



СТИВЕН ГУБСЕР

**МАЛЕНЬКАЯ КНИГА
О БОЛЬШОЙ**

ТЕОРИИ СТРУН

В ПОИСКАХ ПРИНЦИПОВ
УСТРОЙСТВА ВСЕЛЕННОЙ

Annotation

Теорию струн часто называют «теорией всего», потому что ее цель - описать все фундаментальные силы взаимодействия во Вселенной, включив в себя гравитацию, квантовую механику и теорию относительности. Эта революционная концепция представляет новое понимание пространства и времени, она стремится объяснить связь таких феноменов, как черные дыры и кварк-глюонная плазма, дополнительные измерения и квантовые флуктуации. Несмотря на сложность рассматриваемой темы, профессор Принстонского университета Стивен Губсер предлагает емкое, доступное и интересное введение в эту одну из наиболее обсуждаемых сегодня областей физики. С минимумом математики, используя интересные аналогии, автор объясняет суть суперсимметрии, дуальности, искривления пространства-времени так, что это будет понятно любому читателю с багажом знаний средней школы. Пока положения теории струн окончательно не доказаны, однако и те тайны, которые нам уже приоткрылись, позволяют восхититься стройной гармонией мироздания и обсуждать практическое применение будущих открытий в физике высоких энергий.

- [Стивен Габсер](#)
 - [Введение](#)
 - [Глава 1](#)
 -
 - [Длина, масса, время и скорость](#)
 - [E = mc²](#)
 - [Глава 2](#)
 -
 - [Неопределённость](#)
 - [Атом](#)
 - [Фотон](#)
 - [Глава 3](#)
 -
 - [Чёрные дыры](#)
 - [Общая теория относительности](#)
 - [Чёрные дыры не совсем чёрные](#)
 - [Глава 4](#)

- - [Гравитация против квантовой механики](#)
 - [Струны в пространстве-времени](#)
 - [Пространство-время из струн](#)
 - [Глава 5](#)
 -
 - [Вторая суперструнная революция](#)
 - [D-браны и симметрии](#)
 - [Браны и чёрные дыры](#)
 - [Браны в М-теории и границы мира](#)
 - [Глава 6](#)
 -
 - [Размерностью больше, размерностью меньше... Да кто их считал!](#)
 - [Гравитация и калибровочная теория](#)
 - [Глава 7](#)
 -
 - [Странная математика суперсимметрии](#)
 - [Теория всего? Возможно](#)
 - [Частицы, частицы, частицы...](#)
 - [Глава 8](#)
 -
 - [Самое горячее место на Земле](#)
 - [Чёрные дыры в пятимерном пространстве](#)
 - [Эпилог](#)
 - [notes](#)
 - [1](#)
-

Стивен Габсер

Маленькая книга о большой теории струн

В поисках принципов устройства

Вселенной

Введение

Теория струн — это магия. Она претендует на статус Теории Всего, но при этом не может быть проверена экспериментально. И в этом её изотеричность. Она оперирует дополнительными измерениями, квантовыми флуктуациями и чёрными дырами, но неужели именно таков наш мир? Почему он не может быть устроен проще?

Теория струн — это магия. Практикующие её чародеи (и я — один из них) признают, что и сами не понимают эту теорию. Но выполненные с её помощью расчёты дают неожиданно красивые и согласованные результаты. А это означает, что нам придётся продолжить её изучение. Неужели реальный мир не может быть настолько красивым и упорядоченным? Неужели открывшаяся нам истина не соответствует реальности?

Теория струн — это магия. Она поглотила многих талантливых аспирантов, оторвав их от других увлекательных и, несомненно, более полезных тем, имеющих реальное практическое применение, например от сверхпроводимости. Как любая мистика, она притягивает внимание СМИ. Теория струн стала объектом проклятий и анафем приверженцев классической парадигмы из-за невозможности экспериментальной проверки её предсказаний.

И в чём же, собственно, заключается магия? Если говорить коротко, то идея теории струн в том, что фундаментальными кирпичиками материи являются не элементарные частицы, а струны.

Струны похожи на маленькие резиновые ниточки, очень тонкие и невероятно упругие. Электрон, например, представляет собой струну, вращающуюся и вибрирующую в столь малом масштабе, что обнаружить эту вибрацию сложно даже при помощи самых современных ускорителей элементарных частиц. В одних вариантах теории струн электрон описывается как крошечное замкнутое колечко, в других — как отрезок струны, имеющей два свободных конца.

Давайте же совершим небольшой экскурс в историю возникновения теории струн.

Часто теорию струн описывают как теорию, изобретённую «задом наперёд». «Задом наперёд» означает, что сначала у учёных были отдельные фрагменты теории, которые давали блестящие результаты, но никто не мог сказать, стоит ли за этими фрагментами что-либо более глубокое и фундаментальное.

Вначале была... формула. Красивое уравнение, выведенное в 1968 году; оно описывало столкновения пионов в виде взаимодействия струн. Но в то время ещё никто толком не понимал, что такое струны и что с ними делать. Такой вот математический курьёз: есть уравнение, которое имеет осмысленные решения, но при этом никто не понимает его смысла. Понимание пришло позднее, когда обнаружилось, что теория струн включает гравитацию в том виде, в каком она описывается Общей теорией относительности.

В 1970-х и в начале 1980-х годов теория струн балансировала на грани забвения. Она не выглядела пригодной для своего главного предназначения: описания ядерных взаимодействий. При попытке подружить теорию струн с квантовой механикой обнаружился ряд несоответствий, называемых *аномалиями*. Например, при описании частиц, похожих на нейтрино, но обладающих электрическим зарядом, теория предсказывала, что определённые типы гравитационных полей способны спонтанно рождать электрические заряды. А это очень плохо, потому что квантовая механика требует, чтобы во Вселенной сохранялся строгий баланс между общим числом положительных и отрицательных зарядов. Прорыв произошёл в 1984 году, когда был открыт так называемый *принцип устранения аномалий*. После этого теория струн стала всерьёз рассматриваться как кандидат на полное описание Вселенной.

Этот сугубо технический прорыв ознаменовал начало первой суперструнной революции — периода бурной деятельности и потрясающих открытий, которые, однако, не позволили достичь первоначальной цели: создания Общей Теории Всего. Когда это всё начиналось, я был ребёнком и жил неподалёку от Центра теоретической физики в Аспене — очага этой деятельности. Вокруг меня множество людей постоянно бормотали что-то про теорию суперструн и про возможность её проверки на сверхпроводниковом суперколлайдере, и я был просто суперочарован всеми этими супервещами.

Итак: суперструны — это струны, обладающие особыми суперсимметричными свойствами. А что такое суперсимметрия? Я постараюсь объяснить это позже, а сейчас позвольте мне сделать пару частных замечаний. Во-первых, суперсимметрия имеет отношение к частицам с различными спинами. Спин частицы — это момент импульса, определяющий её вращение. Частица ведёт себя подобно вертящемуся теннисному мячу после удара «топспин». Только, в отличие от теннисного мяча, частица не может перестать «вращаться». Во-вторых, честно признаться, из всех вариантов струнных теорий мы лучше всего понимаем

суперсимметричную. Несуперсимметричные теории требуют двадцати шести измерений, в то время как суперсимметричные обходятся всего десятью. Конечно, кое-кто заявит, что и десять измерений — «это уже слишком», поскольку в повседневной жизни мы привыкли к трём пространственным измерениям и одному временному. Так вот, часть усилий по втискиванию теории струн в реальный мир направлена именно на то, чтобы избавиться от лишних измерений или найти им полезное применение.

Оставшуюся часть 1980-х струнные теоретики провели в неистовой гонке, на финише которой маячил призрак Общей Теории Всего. Но они ещё и представления не имели о том, что готовит им теория струн. А дело шло к тому, что струны — это ещё не вся теория. Помимо струн теория требовала существования бран: объектов, имеющих протяжённость в нескольких измерениях. Простейшая брана — это мембрана. Подобно коже барабана, мембрана имеет протяжённость в двух независимых измерениях. И, подобно коже барабана, она может вибрировать. Существуют также 3-браны, заполняющие наше привычное трёхмерное пространство и вибрирующие в дополнительных измерениях. Но могут существовать и 4-браны, и 5-браны, и так далее, вплоть до 9-бран. Всё это начинает выглядеть слишком неудобоваримым, но имеются серьёзные основания полагать, что мы не сможем понять смысл теории струн без включения в неё всех этих бран. Одним из таких оснований является *дуальность* теории струн. Дуальность — это отношение (математики скажут: реляция) между двумя на первый взгляд различными объектами или двумя различными точками зрения. Простейшим примером дуальности является описание шахматной доски. Кто-то скажет, что шахматная доска белая с чёрными клетками, а кто-то — что она чёрная с белыми клетками. Обе точки зрения адекватно описывают вид шахматной доски. Они различны, но соотносятся друг с другом через операцию замены белого на чёрное.

В середине 1990-х мы стали свидетелями второй суперструнной революции, основанной на складывающемся понимании дуальностей и роли бран. И снова усилия были направлены на попытки втиснуть это новое понимание в рамки теории, которая могла бы претендовать на звание Общей Теории Всего, где слово «всего» включает все аспекты фундаментальной физики, которые мы могли бы понять и проверить экспериментом. Гравитация является частью фундаментальной физики. Так же как и электромагнитные и ядерные взаимодействия. Так же как и строение и поведение частиц: электронов, фотонов, протонов и нейтронов, из которых состоят атомы. Пока что построения теории струн позволяют

воспроизводить лишь общие наброски того, что мы знаем, и существуют определённые трудности, не позволяющие говорить о ней как о полностью жизнеспособной теории. Но парадокс в том, что чем больше мы узнаём о теории струн, тем больше мы убеждаемся в том, что мы ничего не знаем. Судя по всему, назрела необходимость в третьей суперструнной революции. Но пока она не предвидится. Напротив, струнные теоретики пытаются уже на существующем уровне развития и понимания теории делать частные предположения о следствиях, которые могут быть проверены в экспериментах: как нынешних, так и грядущих. Наиболее значительные усилия направлены на попытки описать с помощью теории струн высокоэнергетические столкновения протонов и тяжёлых ионов. Мы надеемся, что это описание, возможно, поможет понять идею суперсимметрии, или роль дополнительных измерений, или смысл горизонта чёрной дыры, а может быть, и всё вышеперечисленное разом.

Теперь, когда мы добрались в нашем историческом путешествии до сегодняшних дней, позвольте сделать отступление и рассказать о двух типах столкновений, упомянутых ранее.

Благодаря циклопической экспериментальной установке, построенной недалеко от Женевы, известной под именем Большого адронного коллайдера (БАК), *столкновения протонов* ещё долго будут оставаться в главном фокусе физики высоких энергий. БАК ускоряет летящие по кругу пучки протонов и сталкивает их лоб в лоб со скоростью, близкой к скорости света. Этот тип столкновений хаотичный и неуправляемый. Экспериментаторы пытаются зафиксировать редкие события, приводящие к рождению очень массивных нестабильных частиц. Одной из таких частиц является знаменитый бозон Хиггса, отвечающий, в частности, за наличие массы у электрона. Суперсимметрия предсказывает существование и многих других частиц, которые (если будут обнаружены) послужат наиболее убедительным свидетельством в пользу того, что теория струн — это правильный путь. Существует также весьма отдалённая перспектива, что протон-протонные столкновения породят микроскопические чёрные дыры, последствия распада которых можно непосредственно наблюдать.

При *столкновениях тяжёлых ионов* используются «ободранные» до самого ядра от всех электронов атомы золота и свинца, разгоняемые в том же ускорителе, что и протоны. Столкновения тяжёлых ионов порождают ещё больший хаос, чем столкновения протонов. При этом считается, что протоны и нейтроны, составляющие ядра, «расплавляются» в составляющие их глюоны и кварки. Образовавшаяся субстанция из кварков и глюонов расширяется, охлаждается и вновь «конденсируется» в частицы,

которые фиксируются детекторами. Эта субстанция называется *кварк-глюонной плазмой*. Теория струн усматривает связь кварк-глюонной плазмы с чёрными дырами. Только дуальность чёрной дыры и кварк-глюонной плазмы проявляется не в привычном четырёхмерном пространстве-времени, а в искривлённом пятимерном пространстве. Следует подчеркнуть, что связь теории струн с реальным миром чисто спекулятивная. Суперсимметрия может просто отсутствовать в нём, и кварк-глюонная плазма, создаваемая БАК, может вести себя совсем не так, как пятимерная чёрная дыра. Струнные теоретики вместе с теоретиками других мастей делают свои ставки и, затаив дыхание, следят за крутящимися в коллайдере частицами, способными как оправдать, так и разрушить их надежды.

Эта книга построена на некоторых базовых идеях современной теории струн и последующем обсуждении её возможного применения к физике высоких энергий. Теория струн покоится на двух основаниях: квантовой механике и теории относительности. От этих двух оснований, как от двух сросшихся стволов дерева, отходят многочисленные ветви, образующие настолько обширную крону, что трудно уделить должное внимание даже её небольшой части. Темы, обсуждаемые в этой книге, представляют собой лишь срез теории струн, что в какой-то степени позволяет избежать углубления в математические дебри. Выбор темы также отражает мои предпочтения и предубеждения и, вероятно, даже границы моего понимания предмета.

Другой особенностью книги является то, что она посвящена физике, а не физикам. Я постараюсь рассказать вам о том, что я сам знаю лучше всего, — о теории струн, но не стану рассказывать о людях, участвовавших в её создании (сразу скажу, что это был не я). Чтобы проиллюстрировать всю сложность рассказа о физиках, имеющих отношение к той или иной идее, зададимся простым вопросом: кто создал теорию относительности? Альберт Эйнштейн, не правда ли? Да. Но если мы остановимся на одном этом имени, мы потеряем целый пласт истории физики. Хендрик Лоренц и Анри Пуанкаре проделали огромную работу, предвосхитившую результаты Эйнштейна. Герман Минковский придумал математическую систему координат, которая легла в основу специальной теории относительности. Давид Гильберт независимо создал математическую основу для общей теории относительности. Безусловно, заслуживают упоминания и такие важные фигуры, как Джеймс Клерк Максвелл, Джордж Фицджеральд, Джозеф Лармор, так же как и более поздние первопроходцы — Джон Уилер и Субраманьян Чандрасекар. Развитие квантовой механики шло более

сложным и извилистым путём, поэтому здесь нет столь яркой фигуры, как Эйнштейн, возвышающейся одиноким столпом над остальными, — скорее многочисленная интернациональная армия, в рядах которой были Макс Планк, Альберт Эйнштейн, Эрнест Резерфорд, Нильс Бор, Луи де Бройль, Вернер Гейзенберг, Эрвин Шрёдингер, Поль Дирак, Вольфганг Паули, Паскуаль Йордан и Джон фон Нейман, вносившие каждый свой существенный вклад в общее дело, причём часто сражаясь друг против друга. А если бы я посягнул на расстановку приоритетов и оценку личного вклада каждого из участников в создание теории струн, то такая попытка отодвинула бы на второй план главную идею, ради которой задумывалась эта книга, — рассказать о новой теории.

Цель первых трёх глав книги — ввести читателя в курс тех идей, которые являются основополагающими для понимания теории струн, но не являются её составной частью. Три из них — сохранение энергии, квантование и релятивизм — более важны, чем сама теория струн, поскольку имеют непосредственное отношение к описанию реального мира. Глава 4, посвящённая введению в теорию струн, станет первым шагом в неведомое. Хотя я и попытаюсь в 4-й, 5-й и 6-й главах, насколько сумею, представить теорию струн, D-браны и дуальность теории струн как разумные и хорошо аргументированные теоретические построения, факт остаётся фактом: они не имеют экспериментальных доказательств правомерности их применения для описания реального мира. Главы 7 и 8 посвящены современным попыткам пристроить теорию струн для описания результатов экспериментов по столкновению высокоэнергетических частиц. Суперсимметрия, дуальности и чёрные дыры в пятимерном пространстве призваны объяснить, что происходит и что может произойти с частицами в ускорителях.

В разных местах этой книги я упоминаю значения различных физических величин, такие как энергия, выделяющаяся при ядерном синтезе, или релятивистское замедление времени у олимпийского спринтера. Одной из причин, по которым я это делаю, является то, что физика — точная наука и в ней численная мера всех вещей имеет первостепенное значение. Однако физиков часто интересует лишь приблизительное значение или порядок физической величины. Например, я пишу, что величина замедления времени для спринтера составляет порядка $1/10^{15}$, хотя, если быть точным, то на скорости 10 метров в секунду замедление времени составляет $1/1,8 \times 10^{15}$. Читатели, которым нужны более точные значения и более подробные математические выкладки,

смогут найти их на веб-страничке <http://press.princeton.edu/titles/9133.html>.

Куда же ведёт нас теория струн? Она, как кандидат в президенты на трибуне, обещает. Обещает объединить гравитацию и квантовую механику. Обещает дать нам единую теорию, объединяющую все силы взаимодействия. Обещает новое понимание пространства, времени и дополнительных измерений, в том числе ещё не открытых. Обещает объяснить связь столь непохожих феноменов, как чёрные дыры и кварк-глюонная плазма. Воистину теория струн — это весьма «многообещающая» теория!

Смогут ли струнные теоретики когда-либо выполнить все эти обещания? На самом деле многое из обещанного уже выполнено. Теория струн предлагает элегантную цепочку рассуждений, приводящую нас от квантовой механики к общей теории относительности. В общих чертах я расскажу об этих рассуждениях в четвёртой главе. Теория струн даёт нам черновой набросок описания всех взаимодействий в природе. Этот набросок я обрисую в главе 7 и расскажу о трудностях, возникающих при попытке уточнения предлагаемого описания. И как я расскажу в главе 8, расчёты, выполненные с помощью теории струн, уже сегодня могут быть проверены в ускорителях на столкновениях тяжёлых ионов.

Я не претендую в этой книге на роль арбитра в многочисленных спорах о теории струн, но тем не менее выскажу всё, что думаю касательно разногласий относительно различных точек зрения. Когда на основании теории струн получается какой-либо примечательный результат, её сторонник может воскликнуть: «Это фантастика! Представляете, как было бы здорово, если бы мы смогли что-то сделать этим способом». В то же время критик проворчит: «Это патетика! Вот если бы вы действительно смогли что-то сделать этим способом, тогда я был бы впечатлён». В конце концов и критики, и сторонники, по крайней мере наиболее серьёзные представители обоих лагерей, не так уж и далеки друг от друга по существу вопроса. Каждый согласится, что в фундаментальной физике есть ряд глубоких тайн. Почти каждый согласится, что струнные теоретики предприняли серьёзную попытку проникнуть в эти тайны. И несомненно, большая часть обещаний теории струн пока ещё ожидает своего выполнения.

Глава 1

Энергия

Цель этой главы — познакомить вас с самым знаменитым уравнением в физике: $E = mc^2$. Это уравнение лежит в основе атомной энергии и атомной бомбы. Оно утверждает, что если вы превратите полкило вещества в энергию, её хватит на освещение миллиона домов в течение года. Уравнение $E = mc^2$ лежит и в основании теории струн. Как мы узнаем из главы 4, энергия колебаний струны вносит вклад в её массу.

Странность уравнения $E = mc^2$ в том, что оно устанавливает связь между вещами, которые кажутся нам очень далёкими друг от друга. E — это энергия, например киловатт-часы, за которые вы ежемесячно перечисляете коммунальные платежи, m — это масса, например полкило ветчины, а c — скорость света, составляющая 299 792 458 метров в секунду или приблизительно триста тысяч километров в секунду. Итак, первая наша задача — разобраться с тем, что физики называют *размерными величинами*, такими как длина, масса, время и скорость. Вернёмся к уравнению $E = mc^2$ и поговорим о метрических единицах, о способах записи больших чисел и немного о ядерной физике. Хотя изучение ядерной физики не является обязательным для понимания теории струн, ядерная физика служит хорошей иллюстрацией универсальности уравнения $E = mc^2$. В восьмой главе я вернусь к этой теме и расскажу о попытках использования теории струн для лучшего понимания некоторых аспектов современной ядерной физики.

Длина, масса, время и скорость

Простейшей из всех размерных величин является *длина*. Это то, что вы измеряете линейкой. Единицей измерения длины в международной системе СИ является метр.

Время представляется физиками как дополнительное измерение. Мы воспринимаем реальный мир четырёхмерным: три измерения пространственные и одно — временное. Временное измерение принципиально отличается от пространственных. Вы можете перемещаться в любом направлении в пространстве, но вы не можете двигаться назад во времени. Строго говоря, вы вообще не можете перемещаться во времени. Секунды тикают независимо от того, чем вы занимаетесь. По крайней мере, так следует из нашего повседневного опыта. Но на самом деле не всё так просто. Если вы будете очень быстро бегать по кругу, в то время как ваш коллега неподвижно стоит в его центре, ваше время будет течь немного медленнее, чем время товарища. Если вы возьмёте одинаковые секундомеры и запустите их одновременно, то после пробежки ваш секундомер немного отстанет от секундомера неподвижно стоявшего коллеги. Этот эффект называется *замедлением времени*, однако он неизмеримо мал, если только ваша скорость не сравнима со скоростью света.

Масса определяет количество вещества. Часто массу отождествляют с весом, но это неправильно. Весом мы обладаем, находясь на поверхности Земли, но, оказавшись в *невесомости*, мы потеряем вес, в то время как наша масса никуда не исчезнет. Большая часть массы окружающих нас предметов сосредоточена в протонах и нейтронах и ещё небольшая добавка — в электронах. Таким образом, когда мы говорим о массе обычных предметов, мы фактически говорим о числе нуклонов, из которых эти объекты состоят. *Нуклонами* называются частицы, составляющие атомное ядро: протоны и нейтроны. Моя масса составляет примерно 75 килограммов. Это означает, что я состою приблизительно из 50 000 000 000 000 000 000 000 нуклонов. Оперировать с такими большими числами не очень удобно: того и гляди запутаешься в нулях. Поэтому люди придумали так называемую научную, или *экспоненциальную*, форму представления чисел, подобных тому, что я только что записал. В экспоненциальной форме это число будет выглядеть как 5×10^{28} . Степень 28 означает, что за пятёркой следуют 28 нулей. Давайте немного

попрактикуемся. Один миллион будет записан как 1×10^6 или просто 10^6 . Государственный долг США, составляющий \$18 000 000 000 000, можно записать в виде: $1,8 \times 10^{13}$ долларов. А если бы я мог получить хотя бы по одному центу за каждый нуклон своего тела...

Теперь вернёмся к размерностям физических величин. *Скорость* является переводным коэффициентом между временем и расстоянием. Предположим, вы пробежали 10 метров за одну секунду. Для человека это быстро. Очень быстро. За 10 секунд вы могли бы пробежать 100 метров. Это, конечно, не олимпийский рекорд, но очень близко к нему. Допустим, вы способны сохранять такую скорость на протяжении всей дистанции. За какое время вам удалось бы пробежать километр? Давайте подсчитаем. Один километр — это десять раз по 100 метров. Каждый стометровый участок вы пробегаете за 10 секунд, значит, на то, чтобы преодолеть километр, вам понадобится 100 секунд. Сухопутную милю вы пробежали бы за 161 секунду или за 2 минуты 41 секунду. Никто не способен на такое, потому что ни один человек не сможет бежать со скоростью 10 метров в секунду столь продолжительное время.

Но допустим, вам это удастся. Способны ли вы заметить эффект замедления времени, о котором я уже упоминал? Только не на такой короткой дистанции. Время будет идти для вас чуточку медленнее, и вы потратите на преодоление мили чуть меньше, чем 2:41, но всего лишь на $1/10^{15}$ -ю (одну 1 000 000 000 000 000-ю или «одну тысяча миллион миллионную»). Чтобы сделать этот эффект более заметным, вы должны двигаться очень-очень быстро. Для частиц, бегающих в современных ускорителях, время течёт в 1000 раз медленнее, чем для покоящихся. Точное значение коэффициента замедления времени зависит от возможностей каждого конкретного ускорителя.

Скорость света является неудобным переводным коэффициентом для использования в повседневной жизни, потому что она очень велика. Световой луч способен обогнуть Землю по экватору всего за 0,1 секунды. Поэтому американцы могут разговаривать по телефону с индийскими коллегами, не замечая существенной временной задержки. Более полезным свет становится, когда нам приходится оперировать по-настоящему большими расстояниями. Расстояние от Земли до Луны свет проходит примерно за 1,3 секунды, а расстояние от Солнца до Земли — примерно за 500 секунд.

Ещё большим расстоянием является световой год: как нетрудно догадаться, это расстояние, которое проходит световой луч за один год.

Диаметр нашей Галактики составляет примерно 100 000 световых лет, а размер известной нам части Вселенной равен почти 14 миллиардам световых лет, что составляет примерно $1,3 \times 10^{26}$ метров.

$$E = mc^2$$

Уравнение $E = mc^2$ определяет соотношение между массой и энергией. Оно работает так же, как и соотношение между временем и расстоянием, которое мы только что обсуждали. Но что есть энергия? Это непростой вопрос, поскольку существует множество форм энергии. Энергия движения, энергия тепла, энергия электричества, энергия света... Все эти вещи могут быть преобразованы одна в другую. Например, электрическая лампочка преобразует электричество в свет и тепло, а электрический генератор преобразует механическое движение в электричество. Фундаментальный физический принцип гласит, что полная энергия всегда сохраняется, даже если она при этом переходит из одной формы в другую. Чтобы лучше понять этот принцип, давайте посчитаем, что при этом происходит.

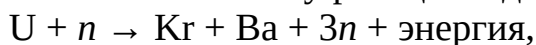
Хорошей отправной точкой для нашего расчёта будет энергия механического движения, называемая *кинетической*. Выражение для кинетической энергии: $K = \frac{1}{2}mv^2$, где K — это кинетическая энергия, m — масса, а v — скорость. Снова представьте себя олимпийским спринтером. Приложив нечеловеческие физические усилия, вы разогнались до скорости 10 метров в секунду. Но это намного меньше скорости света, следовательно, ваша кинетическая энергия намного меньше E из уравнения $E = mc^2$. Что это означает?

Понять это вам поможет знание, что формула $E = mc^2$ описывает энергию покоя. *Энергия покоя* — это энергия, которой обладает тело, когда оно не движется. Начиная разбег, вы преобразуете малую часть вашей энергии покоя в кинетическую энергию. Очень-очень малую часть, составляющую всего одну 10^{15} -ю энергии покоя. То, что на такую же величину — на одну 10^{15} -ю — замедляется время во время вашего бега, — отнюдь не случайное совпадение. Теория относительности содержит точные соотношения между величиной замедления времени и кинетической энергией. В частности, она утверждает, что если тело движется настолько быстро, что его энергия удваивается, то время для него течёт с вдвое меньшей скоростью, чем для покоящегося тела.

Мысль о том, что, имея в своём распоряжении всю энергию покоя, вы ценой невероятных усилий приобретаете кинетическую энергию, составляющую всего лишь $1/10^{15}$ от исходной энергии, несколько

обескураживает. Нельзя ли преобразовать в движение существенно большую часть энергии покоя? Лучшее из известных нам решений — это использование ядерной энергии.

Наше понимание ядерной энергии основывается непосредственно на уравнении $E = mc^2$. Сейчас объясню. Атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. Ядро атома водорода состоит из одного протона, а ядро атома гелия — из двух протонов и двух нейтронов, сильно связанных между собой. Сильная связь означает, что требуется очень много энергии, для того чтобы расщепить ядро гелия. Некоторые ядра расщепить гораздо проще, например ядро урана-235, состоящее из 92 протонов и 143 нейтронов. Достаточно ударить по ядру урана-235 одним нейтроном, и оно развалится на ядро бария, ядро криптона, три нейтрона и выделит при этом энергию. Мы можем записать эту реакцию ядерного распада в виде:



где U обозначает уран-235, Kr — криптон, Ba — барий, а n — нейтрон. Обратите внимание, что я везде уточняю, что мы имеем дело именно с ураном-235, потому что существует другой изотоп урана — уран-238, очень похожий на уран-235, но расщепить его ядро гораздо труднее.

$E = mc^2$ позволяет нам вычислить общее количество освобождаемой в этой реакции энергии, посчитав массы всех участников реакции. Мы получим, что суммарная масса исходных компонентов (ядро урана-235 и нейтрона) превышает суммарную массу продуктов реакции (ядро криптона, ядро бария и трёх нейтронов) приблизительно на одну пятую массы протона. Подставив эту небольшую разницу в массу в уравнение $E = mc^2$, мы вычислим количество освобождённой в реакции энергии. Разница в массе на первый взгляд невелика: одна пятая массы протона составляет порядка 0,1% (одну тысячную) массы ядра урана-235. Таким образом, при расщеплении ядра урана высвобождается одна тысячная его энергии покоя. И хотя эта доля и не кажется существенной, она в триллион раз больше, чем та относительная часть энергии покоя, которая была преобразована в кинетическую энергию олимпийским спринтером.

Я ещё не рассказал, откуда берётся энергия, высвобождаемая при ядерном распаде. Общее количество нуклонов не изменяется: их 236 как до реакции, так и после. И всё же суммарная масса вступающих в реакцию частиц больше, чем суммарная масса продуктов реакции. Это очень важное исключение из правила, согласно которому масса — это, в сущности, количество нуклонов. Дело в том, что нуклоны в ядрах бария и криптона связаны гораздо сильнее, чем в ядре урана-235. Более сильная связь

означает меньшую массу. Слабо связанное ядро урана-235 имеет небольшой избыток массы, ожидающий освобождения в виде энергии. По сути, энергия при ядерном распаде освобождается за счёт перегруппировки протонов и нейтронов в более плотную упаковку.

Один из проектов в современной ядерной физике ставит перед собой цель узнать, что произойдёт, если заставить тяжёлые ядра типа ядер урана участвовать в гораздо более бурно протекающих реакциях, чем обычные реакции распада, описанные выше. По причинам, в которые я не стану вдаваться, экспериментаторы больше предпочитают работать с ядрами золота, чем с ядрами урана. Когда два ядра золота сталкиваются на скоростях, близких к скорости света, они полностью разрушаются. В главе 8 я подробно расскажу о плотном и горячем состоянии вещества, которое образуется в ходе этой реакции.

Таким образом, уравнение $E = mc^2$ говорит нам о том, что энергия покоя чего угодно зависит только от его массы, поскольку скорость света является константой. Извлечь часть этой энергии из урана-235 проще, чем из большинства других веществ. Но с фундаментальной точки зрения энергия покоя присуща всем формам материи — она есть и у камней, и у воздуха, и у воды, и у деревьев, и у людей.

Прежде чем мы перейдём к квантовой механике, позвольте мне сделать небольшое отступление и рассмотреть уравнение $E = mc^2$ в более широком контексте. Это уравнение фигурирует в специальной теории относительности, изучающей влияние движения на измерения времени и пространственных координат. Специальная теория относительности в свою очередь является подмножеством Общей теории относительности, описывающей гравитацию и искривлённое пространство-время. Теория струн является частью Общей теории относительности и квантовой механики и также включает уравнение $E = mc^2$. Струны, браны и чёрные дыры — все повинуются этому уравнению. Например, в пятой главе я покажу, как тепловая энергия браны вносит вклад в её массу. Было бы неправильно утверждать, что уравнение $E = mc^2$ следует из теории струн, но оно неразрывно связано с другими аспектами её математического каркаса.

Глава 2

Квантовая механика

Получив степень бакалавра по физике, я провёл год в Кембридже, изучая физику и математику. Кембридж — это место с зелёными лужайками, свинцовым небом и многовековыми традициями высокой научной школы. Я учился в колледже Св. Иоанна, история которого насчитывает пять веков. Помню, там был прекрасный рояль, стоявший на одном из верхних этажей первого корпуса — старейшего здания Кембриджа. В числе вещей, которые я на нём исполнял, был «Экспромт-фантазия» Шопена. Главная часть этого произведения содержит два ритмических рисунка — полиритмию 4:3. Партии обеих рук исполняются в одном темпе, но на каждые четыре ноты для правой руки приходятся три ноты для левой, что придаёт всей композиции эфирное, текучее звучание.

Это прекрасная часть, и она заставляет меня размышлять о квантовой механике. Чтобы объяснить почему, мне придётся сначала рассказать немного об этой замечательной теории, но я не собираюсь излагать квантовую механику целиком, а только скажу о тех концепциях, которые вызывают у меня реминисценции с музыкой, такой как «Экспромт-фантазия» Шопена.

В квантовой механике возможны любые движения, но некоторые — предпочтительнее остальных. Эти предпочтительные движения называются *квантовыми состояниями*. Они обладают определёнными частотами. Частота — это количество раз в секунду, которые что-то поворачивается или повторяется. В «Экспромт-фантазии» партия правой руки имеет более высокую частоту, чем партия левой руки, и эти частоты относятся как четыре к трём. То, что «вращается» в квантовой механике, имеет более абстрактную природу. Технически — это фаза волновой функции. Вы можете думать о волновой функции как о секундной стрелке часов, которая делает полный оборот за одну минуту. Фаза волновой функции делает то же, что и секундная стрелка, — вращается, только с гораздо более высокой частотой. Скорость этого вращения характеризует энергию системы, о чём я позже расскажу более подробно. Простые квантовые системы, такие как атом водорода, обладают частотами, находящимися в достаточно простых отношениях друг к другу. Например, фаза одного квантового состояния может сделать девять оборотов, в то

время как фаза другого — четыре. Это очень похоже на полиритмию 4:3 шопеновской «Экспромт-фантазии». Но частоты в квантовой механике гораздо более высокие. Например, характерная частота атома водорода имеет порядок 10^{15} оборотов в секунду. Это намного быстрее, чем исполнение «Экспромт-фантазии», где правая рука играет не более 12 нот в секунду.

Ритмическое обаяние «Экспромт-фантазии» вряд ли можно назвать её главным очарованием — по крайней мере, не в моём исполнении. Её мелодия парит над печальными басами, а ноты сливаются вместе в хроматическом размытии. При этом гармония медленно смещается, оттеняя отрывочное порхание главной темы. Сутильная полиритмия 4:3 обеспечивает лишь фон для самого запоминающегося произведения Шопена. Так же и квантовая механика, имея в своей основе дискретный набор осциллирующих квантовых состояний, на макроуровне размывается в красочный и сложный мир, доступный нашему непосредственному восприятию. Эти квантовые частоты имеют совершенно реальное отражение в нашем мире. Например, жёлто-оранжевый свет уличного фонаря имеет определённую частоту, связанную с колебаниями электронов в атомах натрия. Именно эта частота и определяет оранжевый цвет фонаря.

В оставшейся части главы я сфокусируюсь на трёх аспектах квантовой механики: на принципе неопределённости, на атоме водорода и на фотонах. По ходу дела мы столкнёмся с энергией в её новом квантово-механическом амплуа, тесно связанном с частотой. Аналогия с музыкой очень удачна для объяснения роли частоты в квантовой механике, но, как мы увидим в следующем разделе, эта теория содержит и другие ключевые идеи, для объяснения которых не так легко найти аналогии в повседневной жизни.

Неопределённость

Принцип неопределённости является одним из краеугольных камней квантовой механики. Он утверждает, что положение частицы и её импульс никогда не могут быть измерены одновременно. Предыдущее утверждение не вполне корректно, поэтому позвольте мне объяснить более развёрнуто. При любом измерении координаты мы имеем некоторую неопределённость результата, обозначаемую как Δx (произносится «дельта икс»). Допустим, измеряя отрез ткани мягким портновским метром, вы способны определить его длину с точностью не более 0,5 см. Тогда неопределённость вашего измерения составит: $\Delta x \approx 0,5$ см. Это означает, что «дельта икс» составляет приблизительно полсантиметра. Портной может позвонить своему коллеге и сказать: «Гена, отрез ткани, который ты мне прислал, имеет длину два метра с точностью до полусантиметра». (Разумеется, я имею в виду европейского портного, потому что американские портные оперировали бы футами и дюймами.) Другими словами, портной считает, что длина отреза ткани составляет $x = 2$ м, а неопределённость этой длины: $\Delta x \approx 0,5$ см.

С импульсом мы все хорошо знакомы, но лучше понять, что это за зверь, можно, посмотрев глазами физика на столкновение двух тел. Если два бильярдных шара столкнулись лоб в лоб и полностью остановились, значит, до столкновения они имели одинаковые импульсы. Если после столкновения один шар всё ещё движется в первоначальном направлении, но медленнее, значит, он имел больший импульс, чем второй. Импульс и масса связаны простой формулой: $p = mv$. Но давайте пока не будем углубляться в детали. Суть в том, что импульс является чем-то, что вы можете измерить, и это измерение имеет некоторую неопределённость, которую мы обозначим как Δp .

Принцип неопределённости утверждает, что $\Delta p \times \Delta x \geq h/4\pi$, где h — некоторая константа, называемая постоянной Планка, а $\pi = 3,14159...$ — хорошо известное нам соотношение между длиной окружности и её диаметром. Я предпочитаю произносить: «дельта пэ дельта икс больше или равно аш на четыре пи», но если вы предпочитаете «научно-литературный» физико-математический язык, то вам следует говорить: «произведение неопределённостей импульса и координаты частицы не меньше отношения постоянной Планка к четырём пи». Теперь, надеюсь, понятно, почему я сказал, что утверждение, приведённое в начале этого раздела, не вполне корректно: вы можете одновременно измерить координату и импульс

частицы, но неопределённость этих двух измерений никогда не может быть меньше, чем допускает уравнение $\Delta p \times \Delta x \geq h/4\pi$.

Чтобы лучше понять, как работает принцип неопределённости, представьте себе, что мы поймали частицу в ловушку, имеющую размер Δx . Положение частицы известно нам теперь с неопределённостью Δx (при условии, что частица находится внутри ловушки). Принцип неопределённости утверждает, что мы не можем узнать величину импульса этой частицы с точностью большей, чем позволяет упомянутое выше соотношение. Количественно неопределённость импульса должна быть такой, чтобы удовлетворить неравенству $\Delta p \times \Delta x \geq h/4\pi$. Как мы увидим в следующем разделе, прекрасный пример реализации принципа неопределённости представляет собой атом. Более наглядный пример привести трудно, поскольку типичная неопределённость координаты гораздо меньше, чем размер любого предмета, который можно взять в руки. Это происходит из-за того, что величина постоянной Планка крайне мала. Мы вернёмся к ней ещё раз, когда будем говорить о фотонах, и тогда я сообщу вам её численное значение.

Несмотря на то что обычно при обсуждении принципа неопределённости мы говорим об измерениях координат и импульса, его суть гораздо глубже. Он представляет собой внутреннее ограничение, накладываемое на понятия координаты и импульса. В конечном итоге импульсы и координаты — это не числа. Это более сложные объекты, называемые операторами; и я не стану пытаться их здесь описывать, а только скажу, что операторы являются широко используемыми математическими конструкциями, только более сложными, чем числа. Принцип неопределённости вытекает из различия между числами и операторами. Величина Δx — это не просто неопределённость измерения координаты, это фундаментальная неустранимая неопределённость положения частицы. Иными словами, принцип неопределённости отражает не недостаток информации, а фундаментальную «нечёткость» субатомного мира.

Атом

Атомы состоят из электронов, вращающихся вокруг атомных ядер. Атомные ядра, как я уже рассказывал, состоят из протонов и нейтронов. Простейшим случаем, с рассмотрения которого мы и начнём, является атом водорода, состоящий из одного электрона, вращающегося вокруг ядра, состоящего из одного протона. Размер атома водорода имеет порядок 10^{-10} метра. Единицу измерения 10^{-10} метра называют также *ангстремом*. Говоря, что один ангстрем равен 10^{-10} метра, мы имеем в виду, что в одном метре 10^{10} , или десять миллиардов, ангстрем. Размер атомного ядра примерно в сто тысяч раз меньше. Смысл утверждения, что размер атома имеет порядок одного ангстрема, состоит в том, что электрон крайне редко удаляется от ядра на расстояние больше одного ангстрема. Неопределённость положения электрона — Δx — также порядка одного ангстрема, поэтому невозможно сказать, с какой стороны от ядра в конкретный момент времени находится электрон. Принцип неопределённости требует, чтобы неопределённость импульса электрона — Δp — удовлетворяла неравенству $\Delta p \times \Delta x \geq h/4\pi$. Это приводит к тому, что электрон в атоме водорода должен обладать некоторой средней скоростью, порядка одной сотой скорости света, но направление этой скорости в каждый конкретный момент времени принципиально неопределённо. Неопределённость импульса электрона является, в сущности неопределённостью самого импульса, поскольку не определено его направление. Общая картина выглядит так, что электрон пойман в ловушку кулоновским притяжением ядра, но квантовая механика запрещает ему находиться в этой ловушке в состоянии покоя. Вместо этого он непрерывно «блуждает» в пределах ловушки, и характер его блуждания описывается математическим аппаратом квантовой механики. Область блуждания электрона и определяет размер атома. Если бы электрону разрешили спокойно сидеть на одном месте, он бы сразу упал на ядро под действием кулоновской силы притяжения. В результате все материальные предметы сжались бы до ядерной плотности, что было бы весьма некомфортно. Таким образом, квантовый запрет на неподвижность электронов внутри атомов является большим благом для нас.

Несмотря на то что электрон в атоме водорода обладает неопределённой координатой и неопределённым импульсом, его энергия вполне определённа. На самом деле электрон может обладать несколькими

возможными дискретными значениями энергии. О такой ситуации физики говорят, что энергия электрона в атоме «квантована». Это значит, что электрон имеет выбор из некоторого определённого набора вариантов. Чтобы лучше разобраться в этом странном положении дел, вернёмся к уже знакомой нам кинетической энергии. Мы помним, что кинетическая энергия определяется формулой $K = \frac{1}{2}mv^2$. Для начала применим эту формулу к автомобилю. Меняя силу нажатия на педаль газа, вы можете придать автомобилю любую скорость в пределах его технических возможностей. Однако если бы энергия автомобиля квантовалась, то при условии, что масса автомобиля неизменна, вы могли бы заставить его двигаться только с какой-либо фиксированной скоростью из дискретного набора, например только со скоростью 10, 15 или 25 километров в час, но не 11, 12 или 12,5 километра в час.

Квантование энергии электрона в атоме водорода возвращает меня к аналогии с музыкой. Я уже говорил о подобной аналогии на примере полиритмии 4:3 в «Экспромт-фантазии». Устойчивый музыкальный ритм характеризуется определённой частотой. Каждый квантовый энергетический уровень атома водорода также соответствует определённой частоте. Электрон может «выбрать» один из этих уровней, подобно тому как музыкант может выбрать какой-то определённый ритм и выставить его на метрономе. Но электрон может также частично находиться на одном энергетическом уровне, а частично на другом. Это явление носит название «суперпозиция». Ритм «Экспромт-фантазии» как раз является суперпозицией двух различных ритмов, исполняемых правой и левой рукой.

Итак, как я сказал, электрон в атоме обладает квантово-механически неопределёнными координатой и импульсом, но может иметь определённую энергию из дискретного набора. Не кажется ли вам странным, что энергия имеет фиксированное определённое значение, в то время как координаты и импульсы неопределённые? Чтобы понять, как такое может быть, давайте отвлечёмся на ещё одну музыкальную аналогию. Представьте себе фортепианную струну. После удара молоточка струна начинает вибрировать с определённой частотой, или тоном. Например, струна, отвечающая за ноту «ля» первой октавы, вибрирует с частотой 440 раз в секунду. Физики измеряют частоту в герцах (сокращённое обозначение — Гц); один герц соответствует одному колебанию в секунду. Таким образом, нота «ля» первой октавы звучит с частотой 440 Гц. Это гораздо быстрее, чем ритм «Экспромт-фантазии», где, как вы помните, правая рука извлекает из рояля примерно 12 нот в секунду, то есть с

частотой 12 Гц. Но это гораздо меньше частоты колебаний электрона в атоме водорода. На самом деле поведение струны гораздо сложнее простого колебания. Помимо основной частоты струна выдаёт множество обертонов на более высоких частотах, и именно эти обертоны придают звучанию рояля характерную окраску.

Может показаться, что эта аналогия весьма далека от квантово-механического движения электрона в атоме водорода, но на самом деле оба процесса очень похожи. Минимальная возможная энергия электрона в атоме водорода сродни основной гармонике фортепианной струны: 440 Гц для ноты «ля» первой октавы. Немного упрощая, можно сказать, что частота колебаний электрона в его основном состоянии равна примерно 3×10^{15} Гц. Остальные энергии, доступные электрону, аналогичны обертонам фортепианной струны.

Волны на фортепианной струне и квантово-механическое движение электрона в атоме водорода являются примером так называемых стоячих волн. Стоячие волны — это колебания, которые никуда не движутся. Фортепианная струна закреплена на раме своими концами, и её колебания пленены в пределах длины струны. Квантово-механическое движение электрона также заключено в очень маленькой области — чуть меньше одного ангстрема в поперечнике. Главная идея, лежащая в основе математического аппарата квантовой механики, состоит в том, чтобы представить движение электрона в виде волны. Поскольку волна имеет вполне определённую частоту, подобную основной гармонике фортепианной струны, она имеет и вполне определённую энергию. Но положение электрона в пространстве, например его расстояние от ядра, не может быть описано конкретным числом, поскольку волна присутствует одновременно повсюду внутри атома, точно так же как колебания фортепианной струны происходят одновременно по всей её длине. Всё, что мы можем сказать об электроны, — это лишь то, что он почти всегда находится где-то в пределах одного ангстрема от ядра.

Узнав, что электроны описываются в виде волн, вы вправе спросить: «В виде волн чего?». Это сложный вопрос. Одни считают, что этот вопрос не имеет смысла, другие — что существует некое «электронное поле», пронизывающее всё пространство-время, а электроны представляют собой возбуждения этого поля. Электронное поле аналогично фортепианной струне, а электроны — возникающим на ней колебаниям.

Волны не всегда заперты в маленькой области пространства типа внутренности атома. Например, морские волны путешествуют многие километры, прежде чем разбиться о прибрежные скалы. Примером

путешествующих квантово-механических волн являются, в частности, фотоны. Но перед тем как мы углубимся в изучение фотонов, я должен остановиться на одной формальности, имеющей отношение к вещам, которые мы будем обсуждать в последующих главах. Говоря о частоте основного состояния электрона в атоме водорода, я упомянул о том, что это упрощённое описание. Чтобы пояснить, что именно упрощено, я напишу ещё одну формулу: $E = h\nu$, где E — это энергия, ν — частота, а h — та самая постоянная Планка, которая уже появлялась ранее в формулировке принципа неопределённости. $E = h\nu$ — замечательная формула, она объясняет нам, что, в сущности, представляет собой частота: это просто энергия в новом облике. Но вот беда: существуют различные виды энергии. Электрон обладает энергией покоя. Он также обладает кинетической энергией. И вдобавок он обладает энергией связи, необходимой для того, чтобы освободить электрон из атома. Какую из этих энергий следует использовать в формуле $E = h\nu$? Когда я говорил, что частота основного состояния электрона равна 3×10^{15} колебаний в секунду, я имел в виду кинетическую энергию плюс энергию связи, исключая энергию покоя. Но это весьма произвольное допущение. Я мог бы включить в общую энергию и энергию покоя, если бы почувствовал, что это необходимо. Это означает, что частота в квантовой механике имеет некоторую недоопределённость, а это выглядит нехорошо.



Классическое представление об атоме водорода: электрон обращается по орбите вокруг протона



Квантово-механическое представление электрона в виде стоячей волны. Волна не имеет определённого положения на орбите, но обладает определённой энергией и частотой

Вот как можно разрешить указанную трудность. Давайте зададимся вопросом: «Что происходит, когда электрон переходит с одного энергетического уровня на другой?». Если электрон перескакивает на более низкий энергетический уровень, он освобождается от избытка энергии путём испускания фотона. Энергия фотона равна разности энергий двух уровней: того, с которого электрон перескакивает, и того, на которой он перескакивает. Теперь неважно, учитываем мы энергию покоя электрона или нет, потому что нас интересует только разность между двумя энергетическими уровнями, в то время как энергия покоя электрона не изменяется и не входит в окончательный результат. Правильным использованием формулы $E = h\nu$ будет приравнять E к энергии фотона. Тогда ν будет означать частоту фотона, имеющую вполне определённое значение, уже без всяких неоднозначностей. Остаётся ответить на последний вопрос: «Что же означает частота фотона?». Этим мы сейчас и займёмся.

Фотон

На протяжении веков в физике бушевали споры о том, что такое свет: частицы или волны. Квантовая механика дала на это однозначный ответ: и то и другое.

Чтобы лучше понять волновые свойства света, представьте себе электрон, который решил позагорать под лазерным лучом. Лазер является высокостабильным, когерентным и мощным источником света. Ключевой момент в том, что когда электрон попадает в лазерный луч, электромагнитное поле начинает толкать его туда-сюда с некоторой частотой. Эта частота входит в уравнение $E = h\nu$. Видимый свет имеет частоту чуть меньше 10^{15} колебаний в секунду. Аналогия выглядит причудливой, но, возможно, лучше пояснит ситуацию более жизненный пример. Радиоволны — это то же самое, что и свет, только они имеют существенно более низкую частоту. Радиоволна FM-диапазона имеет частоту около 10^8 колебаний в секунду, или 10^8 герц. Одна из наших местных радиостанций, «Нью-Джерси 101,5», вещает на частоте 101,5 мегагерца. Один мегагерц — это миллион герц, или 10^6 герц. Таким образом, 100 мегагерц — это 10^8 герц. Следовательно, 101,5 мегагерц — это чуть больше 10^8 колебаний в секунду. FM-радиоприёмник сконструирован таким образом, что электроны внутри него могут колебаться с той же самой частотой. Когда вы настраиваете радиоприёмник, вы изменяете предпочтительную для электронов частоту колебаний внутри приёмника. И подобно нашему загорающему в лазерном луче электрону, электроны внутри приёмника «впитывают» омывающие приёмник радиоволны.

Можно привести ещё одну аналогию: представьте себе буй в океане. Как правило, буй крепится цепью к якорю на дне, чтобы его не унесло океанскими волнами и течениями. Реагируя на проходящие волны, буй колеблется вверх-вниз, оставаясь при этом на поверхности воды. Точно так же реагирует на электромагнитное излучение электрон, загорающий в лазерном луче. Но в действительности поведение электрона в лазерном луче несколько отличается от поведения буя на волнах: электрону в конечном итоге будет передаваться импульс в направлении луча, если только он каким-то образом не закреплён подобно бую.

До этого момента мои объяснения были сосредоточены на волновых

свойствах света. А в каких случаях свет ведёт себя подобно частицам? Существует известное явление, называемое фотоэлектрическим эффектом, убедительно свидетельствующее в пользу того, что свет действительно состоит из отдельных фотонов, каждый из которых имеет энергию $E = h\nu$. Вот как это работает. Когда вы освещаете поверхность металла, вы выбиваете из неё электроны. С хорошим экспериментальным оборудованием можно фиксировать выбитые из поверхности электроны и даже измерять их энергию. Результаты таких измерений хорошо согласуются со следующей моделью. Свет состоит из множества фотонов, которые бомбардируют поверхность металла. Каждый раз, когда фотон сталкивается с электроном, он передаёт электрону свою энергию. Время от времени, если энергия фотона достаточна, электрон, с которым он столкнулся, покидает поверхность. Согласно уравнению $E = h\nu$, большая энергия соответствует большей частоте. Известно, что синий цвет имеет примерно на 35% более высокую частоту, чем красный. Это означает, что синий фотон обладает на 35% большей энергией, чем красный. Допустим, мы взяли для изучения фотоэлектрического эффекта кусок натрия. И тут выясняется, что красные фотоны не обладают достаточной энергией для того, чтобы выбивать электроны с поверхности: ничего не происходит, даже если мы сделаем красный свет очень ярким. А вот синие фотоны, напротив, имеют необходимый избыток энергии, позволяющий освобождать электроны из металлического плена, даже если интенсивность синего света будет очень низкой. Выходит, что для получения фотоэффекта нам не важна интенсивность падающего света, которая определяется лишь количеством падающих на поверхность фотонов, а важна именно частота, определяющая энергию каждого фотона.

Минимальная частота света, позволяющая фотонам выбивать электроны с поверхности натрия, составляет $5,5 \times 10^{14}$ колебаний в секунду, что соответствует зелёному свету. Соответствующая этой частоте энергия, вычисляемая по формуле $E = h\nu$, равна 2,3 электрон-вольта. Электрон-вольт — это энергия, которую приобретает электрон, перемещаясь от отрицательного контакта одновольтовой батарейки к положительному. Следовательно, численное значение постоянной Планка составляет 2,3 электрон-вольта, делённые на $5,5 \times 10^{14}$ колебаний в секунду, или $4,1 \times 10^{-15}$ электрон-вольт-секунд.

В целом свет ведёт себя подобно волнам при одних обстоятельствах и подобно частицам — при других. Такое поведение называется *корпускулярно-волновым дуализмом*. Согласно квантовой механике,

корпускулярно-волновым дуализмом обладает не только свет, а вообще всё на свете.

Вернёмся на минуту к атому водорода. В предыдущем разделе я говорил, что его квантованные уровни энергии можно рассматривать как набор стоячих волн. Это пример волнового поведения электрона. Но если вы помните, я оставил без ответа вопрос о том, какой смысл имеют частоты этих волн. Я написал формулу $E = h\nu$, но затем сразу перескочил на обсуждение вопроса об учёте энергии покоя электрона в величине E . С фотоном никаких вопросов не возникает: частота света — это то, что мы непосредственно наблюдаем в эксперименте. Это частота, на которую мы, например, настраиваем радиоприёмник. Таким образом, когда электрон перескакивает с одного уровня на другой, испуская фотон, мы можем, измерив частоту испущенного фотона, однозначно судить о разности энергий двух этих уровней.

Я надеюсь, что моё объяснение позволило вам достаточно хорошо прочувствовать, что представляют собой фотоны. Полностью понять их природу весьма трудно. Самые большие трудности возникают в концепции калибровочной симметрии, о которой пойдёт речь в пятой главе. В оставшейся части этой главы я покажу, как идея фотонов позволяет объединить положения квантовой механики и специальной теории относительности.

Теория относительности базируется на предположении, что свет в вакууме движется всегда с одной и той же скоростью (299 792 458 метров в секунду) и что ничто не может двигаться быстрее. Каждый, кто впервые сталкивается с этим постулатом, непременно задаётся вопросом: «А если мы разгонимся до скорости света, а затем выстрелим из пистолета в направлении нашего движения, разве пуля не будет лететь быстрее света? Не так ли?». Не так быстро. Проблема связана с замедлением времени. Помните, я говорил, что в современных ускорителях элементарных частиц время для самих частиц замедляется в тысячу раз? Это происходит из-за того, что они движутся со скоростью, близкой к скорости света. Если же вы будете двигаться точно со скоростью света, то ваше время остановится полностью. Вы никогда не сумеете выстрелить из пистолета, потому что у вас попросту не будет времени нажать на спусковой крючок.

Может показаться, что последний аргумент всё же оставляет немного места для манёвра. Допустим, вы могли бы достигнуть скорости на 10 метров в секунду меньше скорости света. Время будет течь для вас медленно, как патока, но в конечном итоге вы сумели бы спустить курок и выстрелить. А поскольку пуля вылетает из ствола со скоростью гораздо

большей, чем 10 метров в секунду, её скорость могла бы превысить скорость света. Так? Увы, так просто это не работает. Чем быстрее вы движетесь, тем труднее вам будет разогнать что-либо относительно вас, и вовсе не потому, что вам в лицо будет дуть какой-то встречный ветер: ведь описанный эксперимент можно провести и в космосе. Это происходит из-за того, что время, расстояние и скорость тесно переплетены в специальной теории относительности. Специальная теория относительности будто бы специально построена таким образом, чтобы сорвать любые попытки обогнать свет. Принимая во внимание многочисленные успехи теории относительности в описании мира, большинство физиков склонны принимать ситуацию как есть: вы просто не можете двигаться быстрее, чем свет.

А что у нас с утверждением, будто свет всегда движется в вакууме с одной и той же скоростью? Это можно проверить экспериментально, и это похоже на правду. При этом скорость света в вакууме не зависит от частоты используемого света. Это означает, что имеет место радикальное различие между фотонами и другими частицами, такими как электроны или протоны. Электроны и протоны могут быть быстрыми или медленными. Если они быстры, то обладают большой энергией. Если они медленны, их энергия мала. Но полная энергия электрона никогда не может быть меньше его энергии покоя — $E = mc^2$. То же самое относится и к протону. Однако энергия фотона определяется выражением $E = h\nu$, и частота ν может быть как большой, так и малой, но скорость фотона при этом не меняется. В частности, не существует нижнего предела энергии фотона. Это должно означать, что энергия покоя фотона равна нулю. Если мы воспользуемся формулой $E = mc^2$, то придём к выводу, что и масса фотона тоже должна быть равна нулю. И это принципиальная разница между фотоном и большинством других частиц: фотон не имеет массы.

Хотя это и не имеет отношения к теории струн, но, возможно, вам будет приятно узнать, что свет имеет фиксированную скорость только в вакууме. Проходя через вещество, свет замедляется. Я не имею в виду фотоны, которые падают на поверхность натрия и «застревают» там, выбивая электроны. Я имею в виду совсем другую ситуацию, а именно прохождение света через прозрачные среды, такие как вода или стекло. При прохождении через воду свет замедляется примерно в 1,33 раза. Когда свет проходит сквозь стекло, это может замедлить его ещё сильнее, но не более чем в 2 раза. Алмаз замедляет свет в 2,4 раза. Именно этот фактор наряду с высокой прозрачностью алмаза придаёт ему такой неповторимый

сверкающий облик.

Глава 3

Гравитация и чёрные дыры

Это произошло несколько лет назад в прекрасный летний день, когда мы с отцом отправились к популярной среди скалолазов стене Гротто Уолл неподалёку от Аспена в штате Колорадо. Нашей целью был Твин Кракс — классический маршрут средней сложности. Пройдя его без инцидентов, я загорелся идеей преодолеть при помощи ИТО (искусственных точек опоры) более сложный маршрут — Криогеникс. При ИТО-скалолазании вы закрепляете на скале искусственные точки опоры, которые держат ваш вес, вместо того чтобы висеть на руках, пытаясь нащарить ногой естественную неровность. Затем вы привязываете себя к репшнуру, который продёргивается через все вбитые в скалу железки, так что если вдруг камень, на котором вы повисли, не выдержит вашего веса, получившаяся страховочная конструкция удержит ваше падающее тело.

Криогеникс был прекрасным местом, чтобы попрактиковаться в ИТО-скалолазании, на мой взгляд, прежде всего потому, что большая часть маршрута проходит под отрицательным углом. Если вы сорвётесь, то не обдерёте свои бока о неровную стену, а свободно упадёте вниз и повиснете на верёвке. Ну или будете падать, пока не достигнете земли, но этот вариант выглядел не слишком привлекательным. Другим достоинством Криогеникса была трещина в пару пальцев шириной, проходящая через большую часть маршрута, так что я мог забить в неё столько креплений, сколько хотел.

Мой папа был согласен, поэтому я очертя голову ринулся на скалу и уже на маршруте понял, что в моём плане были некоторые недостатки. Порода внутри трещины оказалась непрочной, и потребовалось вбить много креплений, чтобы обеспечить надёжную страховку. И хотя это был небольшой участок, он «съел» почти весь мой запас железа, так что когда я уже почти достиг вершины, у меня совсем не осталось этих замечательных приспособлений. На последний отрезок, наиболее трудный для свободного лазания, мне не хватило крючьев. Но я был почти у цели! Я поместил закладку в расширение трещины, встал на неё, и она выдержала. Тогда я поместил в ту же трещину гекс, поднялся на него, и в этот момент гекс выскочил, и я рухнул вниз. То, что произошло в следующее мгновение, выпало из моей памяти, но события достаточно легко восстановить.

Закладка вылетела вслед за гексом, и я ощутил себя в свободном падении. Вылетела следующая закладка. То, что произошло далее, называется «зипперингом», поскольку выглядит как расстёгивание застёжки-молнии. Если вылетает слишком много закладок, вы оказываетесь на земле. Причём каждая следующая закладка должна выдерживать всё большую и большую нагрузку, поскольку по мере падения вы набираете скорость, а значит, увеличиваете импульс. И тут я ощутил резкий рывок: это был так называемый эксцентриковый френд — наиболее сложное приспособление из всего скалолазного арсенала. Он не был идеально закреплён, но он выдержал! Моего отца, страховавшего меня внизу, оторвало от земли — настолько сильным оказался рывок верёвки.

Что же произошло? Я потратил некоторое время, изучая френд, прервавший моё падение. Он чуть-чуть выскочил из трещины и повернулся, но в целом держал надёжно. Я проверил и укрепил пару закладок ниже френда и осторожно спустился вниз. Несколько минут я в задумчивости бродил по земле, размышляя, насколько же она твёрдая, после чего смотал верёвку, вытащил из скалы оборудование, до которого смог дотянуться, и больше в этот день не предпринимал попыток восхождения.

Чему же научил меня Криогеникс? Во-первых, никогда не продолжать восхождение, если закончилось снаряжение. Во-вторых, падение не проблема, проблема — приземление. Я вернулся домой без единой царапины, потому что не ударился о землю, хотя и заработал двухминутное кровотечение из носа, — рывок, остановивший меня, был достаточно жёстким, хотя и не шёл ни в какое сравнение с возможным ударом о землю.

И наконец, самый важный урок гравитации, который можно извлечь из опыта свободного падения: вы не ощущаете гравитацию в процессе падения: в падении вы невесомы. Сходные ощущения можно испытать в лифте, когда он начинает движение вниз. Я хотел бы выразить чувство глубокой признательности гравитации за то, что она позволила мне испытать опыт свободного падения. Тогда, на Криогениксе, мне не хватило времени, чтобы оценить этот опыт, а может быть, я слишком переживал за свой рассудок, побывав в дюйме от смерти.

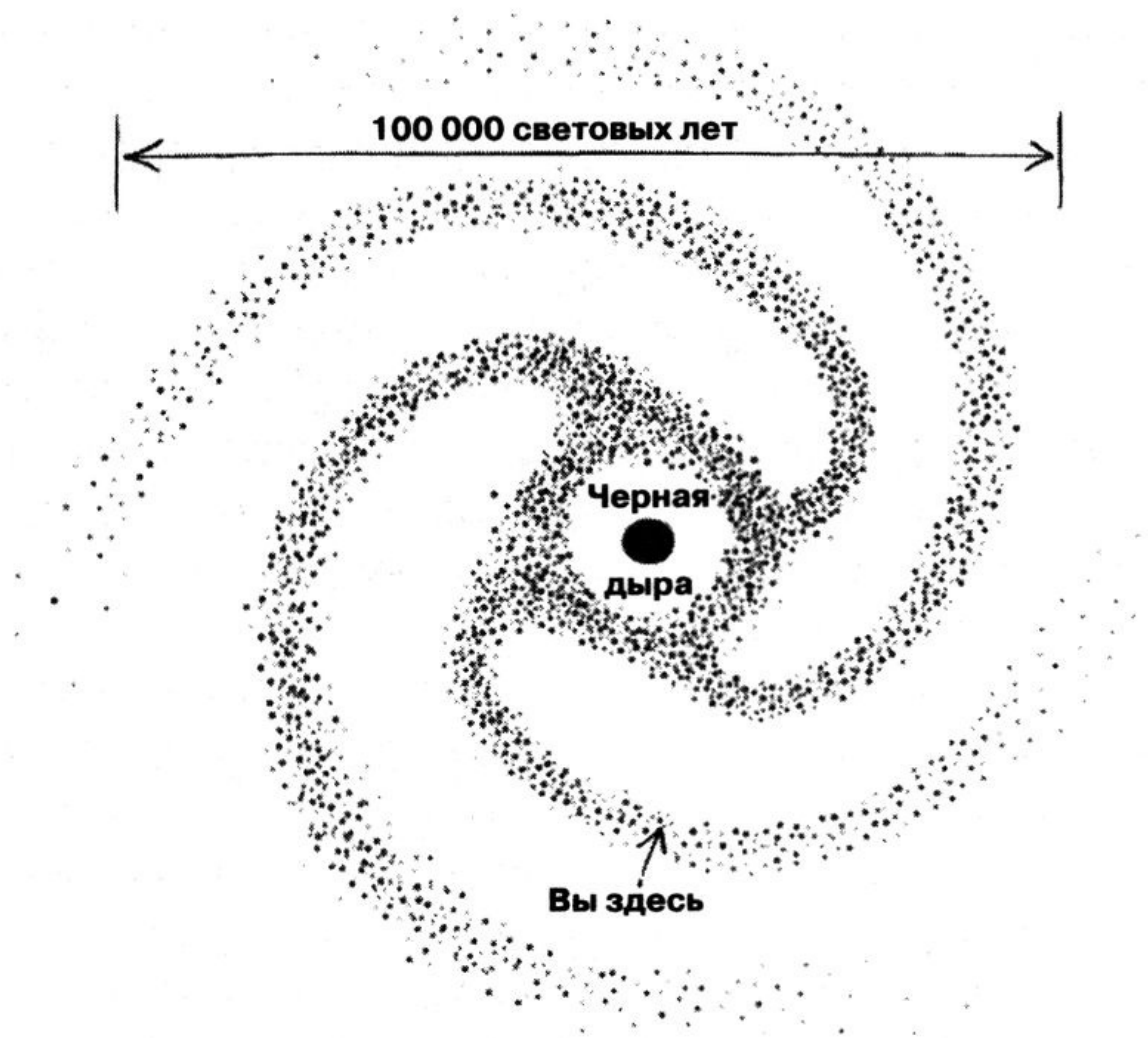
Чёрные дыры

Каково это: упасть в чёрную дыру? Будет ли это похоже на страшный жёсткий удар? Или это будет бесконечное свободное падение? Что ж, давайте отправимся в короткое турне по свойствам чёрных дыр, в котором поищем ответы на эти вопросы.

Прежде всего, чёрные дыры — это объекты, из которых не может выбраться даже свет. Прилагательное «чёрная» в отношении чёрной дыры означает именно полнейшую тьму, отсутствие всякого излучения. Поверхность чёрной дыры называется горизонтом, поскольку никто, находящийся снаружи горизонта, не может видеть ничего, что происходит внутри, ибо для того, чтобы что-то увидеть, нужен свет, а свет не может покинуть чёрную дыру. Принято думать, что чёрные дыры присутствуют в центрах большинства галактик. Они также считаются заключительным этапом эволюции массивных звёзд.

Самое странное в чёрных дырах то, что на самом деле они — просто пустое пространство, за исключением сингулярности в центре. Это может показаться нонсенсом: ну как, скажите, один из самых массивных объектов в галактике может быть пустым? Ответ прост: вся масса внутри чёрной дыры коллапсирует в сингулярность. На самом деле мы не понимаем, — что происходит в самой сингулярности. Всё, что мы понимаем, это то, что сингулярность искажает пространство-время таким образом, что возникает окружающий её горизонт. И всё, что попадает под горизонт, в конце концов сжимается в точку в центральной сингулярности.

Представьте себе, что скалолазу «повезло» свалиться в чёрную дыру. Пересечение горизонта не причинит ему никакого вреда, поскольку там ничего нет, кроме пустого пространства. Скалолаз, вероятно, даже не заметит, как он пересечёт горизонт. Беда в том, что нет и ничего, что могло бы остановить его падение, — вокруг него вплоть до самой центральной сингулярности только пустое пространство. Единственная надежда скалолаза — его верёвка. Но даже если верёвка закреплена на самом прочном и надёжном крюке в истории человечества, она не спасёт нашего скалолаза.



Вероятно, в центре нашей Галактики находится чёрная дыра. Считается, что масса этой чёрной дыры составляет около четырёх миллионов масс Солнца. С точки зрения земного наблюдателя, центр Галактики находится в направлении созвездия Стрельца на расстоянии около 26 000 световых лет от нас. Реальные размеры чёрной дыры гораздо меньше, чем изображённая на рисунке область вокруг неё, свободная от звёзд

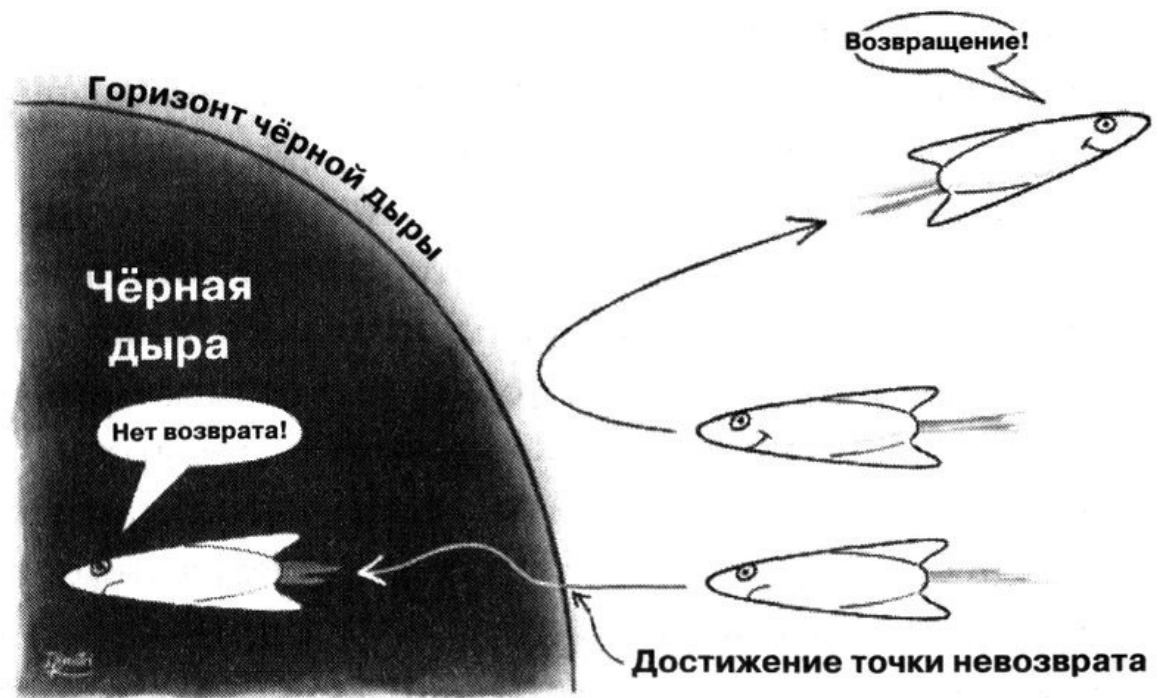
Если крюк и выдержит, верёвка наверняка либо порвётся, либо будет растягиваться до тех пор, пока скалолаз не треснется о сингулярность. Если это случится, возникнет, наверное, самая катастрофическая коллизия, какую только можно вообразить, но мы об этом никогда не узнаем, потому что никто, кроме самого скалолаза, не сможет этого наблюдать. Ведь ни один луч света не может покинуть внутренности чёрной дыры.

Главное, что следует уяснить, — гравитационные силы, действующие

внутри чёрной дыры, абсолютно непреодолимы. После пересечения горизонта у нашего незадачливого скалолаза не больше шансов остановить своё падение, чем остановить время. И тем не менее ему не будет больно до тех пор, пока он не достигнет сингулярности, потому что весь путь он проделает в пустом пространстве. Скалолаз будет ощущать невесомость, так же как я ощущал её, падая с Криогеникса. Это важнейшее фундаментальное положение общей теории относительности: падающий в гравитационном поле наблюдатель ощущает в точности то же, что и наблюдатель, находящийся в пустом пространстве.

Вот ещё одна аналогия, которая поможет понять ситуацию. Представьте себе горное озеро, из которого вытекает стремительный поток, заканчивающийся водопадом. Рыбы, живущие в озере, знают, что не следует подплывать слишком близко к водопаду, потому что если их унесёт потоком, то им уже никогда не вернуться обратно в озеро. Неразумная рыба, позволившая потоку утащить себя из озера, не почувствует никакой разницы по сравнению с плаванием в озере (по крайней мере, не сразу), но у неё не будет иного выбора, кроме как падать вниз вместе с окружающей её водой. Озеро здесь выступает в качестве пространства снаружи горизонта, а водопад — в качестве внутреннего пространства чёрной дыры. Сингулярность же встретит рыбу в образе камня на дне водопада, достигнув которого рыба найдёт свой мгновенный и кровавый конец. Можно предположить и другой исход: водопад плавно переходит в горизонтальный поток, который вливается в другое озеро, где рыба продолжит сытую и счастливую жизнь. Точно так же и в центре чёрной дыры вместо сингулярности может оказаться туннель, ведущий в другую вселенную. Всё это кажется весьма надуманным, но учитывая, что мы ничего не знаем о природе сингулярности в центре чёрной дыры, полностью исключать такую возможность нельзя.

Астрофизики сделают важную поправку к моему утверждению о том, что скалолаз ничего не чувствует, падая в чёрную дыру. Эта поправка связана с приливными силами. Приливные силы называются так из-за того, что вызывают приливы и отливы. Луна притягивает к себе предметы, находящиеся на обращённой к ней стороне Земли, сильнее, чем на обратной.



Горизонт чёрной дыры — это точка невозврата. Звездолёт может подлететь сколь угодно близко к горизонту, развернуться и улететь обратно, но если звездолёт пересечёт горизонт, он уже никогда не сумеет вырваться наружу

Море поднимается на той стороне Земли, которая обращена к Луне. Но море также поднимается и на противоположной стороне, что может показаться нелогичным.

Проще всего объяснить это так: центр Земли притягивается Луной слабее, чем обращённая к Луне часть поверхности, а противоположная от Луны часть поверхности Земли притягивается слабее, чем центр. В результате Земля как бы растягивается лунным притяжением в направлении, соединяющем Землю и Луну.

Когда небесное тело, например звезда, приближается к чёрной дыре, она испытывает аналогичное воздействие: части звезды, находящиеся ближе к чёрной дыре, притягиваются ею сильнее, и звезду начинает растягивать в разные стороны. Приблизившаяся к горизонту чёрной дыры звезда в конечном итоге будет разорвана на куски. Разрывающие звезду силы складываются из приливных сил и сил, возникающих из-за вращения звезды вокруг чёрной дыры. Для простоты будем игнорировать вращение, а рассмотрим только падение звезды в чёрную дыру. Чтобы ещё больше упростить задачу, заменим звезду двумя свободно падающими

наблюдателями, первоначально находящимися друг от друга на расстоянии, равном диаметру звезды. Траектории движения этих наблюдателей похожи на траектории движения ближайшей и наиболее удалённой от чёрной дыры частей поверхности звезды. Я буду называть наблюдателя, который находится ближе к чёрной дыре, ближним, а наблюдателя, который находится дальше, — дальним. Чёрная дыра притягивает ближнего наблюдателя сильнее, чем дальнего, потому что он находится на меньшем расстоянии от неё. Таким образом, ближний наблюдатель будет падать быстрее дальнего, в результате чего наблюдатели будут удаляться друг от друга по мере падения. С их точки зрения это будет выглядеть как действие некой силы, стремящейся растащить их. Очевидно, что приливные силы лишь отражают тот факт, что в каждый момент времени ближний наблюдатель притягивается чёрной дырой сильнее, чем дальний.

Приведу ещё одну аналогию. Представьте себе колонну автомобилей, медленно движущихся друг за другом. Когда первый автомобиль достигает места, где он может ускориться, он отрывается от следующих за ним. Второй автомобиль достигает того же места и ускоряется, но расстояние между ним и автомобилем, следующим впереди, продолжает увеличиваться. Примерно так же увеличивается расстояние между ближним и дальним наблюдателями, когда они начинают падать на чёрную дыру. Деформация звезды при падении в чёрную дыру — по существу то же самое явление, за исключением того, что для полностью реалистичного описания следовало бы дополнительно учитывать вращательное движение звезды вокруг чёрной дыры, а также замедление времени вблизи горизонта чёрной дыры.

Современные астрономы-наблюдатели ставят целью зафиксировать такие явления, как падения звезды в чёрную дыру или столкновения двух чёрных дыр. Ключевой идеей является попытка зарегистрировать всплеск гравитационного излучения, сопровождающий слияние двух массивных объектов. Гравитационное излучение — это не то, что вы можете наблюдать невооружённым глазом, поскольку глазами мы видим только свет. Гравитационное излучение — это нечто иное и более сложное. Гравитационная волна — это распространяющееся возмущение пространства-времени. Так же как и световая волна, гравитационная волна переносит энергию. Как и световая волна, гравитационная имеет определённую частоту. Свет состоит из фотонов — частиц, или квантов, света, а гравитационное излучение, как мы предполагаем, переносится квантами, называемыми гравитонами. Они подчиняются тому же соотношению между частотой и энергией, $E = h\nu$, что и фотоны. Как и

фотоны, они движутся со скоростью света и не имеют массы.

Поскольку гравитоны взаимодействуют с веществом гораздо слабее, чем фотоны, нет никакой надежды зарегистрировать их при помощи чего-либо, подобного фотоэлектрическому эффекту. Вместо этого для регистрации гравитационных волн используется уже описанный выше приливный эффект. Когда два объекта, разделённые некоторым расстоянием, оказываются на пути гравитационной волны, расстояние между ними начинает флуктуировать с частотой, равной частоте гравитационного излучения. Это происходит, потому что колеблется само пространство-время. Схема эксперимента по обнаружению гравитационных волн сводится к очень точному измерению расстояния между двумя объектами, а затем длительному ожиданию, когда оно начнёт флуктуировать. Обнаружение гравитационных волн откроет нам новое направление в исследовании Вселенной. Оно также послужит ещё одним подтверждением справедливости общей теории относительности, предсказывающей, в отличие от теории Ньютона, существование гравитационных волн.

Общая теория относительности

На самом деле я уже рассказал достаточно много об общей теории относительности. Это теория пространства-времени, описывающая чёрные дыры и гравитационные волны. В общей теории относительности пространство-время не статическая сцена, на которой разыгрываются события, а постоянно изменяющееся искривлённое геометрическое многообразие. Гравитационные волны похожи на круги, расходящиеся от брошенного в озеро камня, а чёрные дыры сродни стремительным потокам, вытекающим из этого озера. Обе аналогии несовершенны, потому что не содержат совершенно нового явления, присущего общей теории относительности, — гравитационного замедления времени.

Вспомним о замедлении времени в специальной теории относительности. Там пространство-время оставалось «жёстким». При переходе из системы отсчёта одного тела в систему отсчёта другого менялся только взаимный наклон осей координат. Чем быстрее одно тело двигалось относительно другого, тем сильнее наклонялась его ось времени, тем сильнее его собственное время замедлялось. Когда тело достигало скорости света, его время останавливалось.

В общей теории относительности появляется ещё один механизм замедления времени: время замедляется при помещении тела в гравитационное поле. Чем глубже вы опускаетесь в гравитационный колодец чёрной дыры, тем сильнее замедляется время, полностью останавливаясь при достижении горизонта.

Но постойте! Недавно я утверждал, что в горизонте событий нет ничего особенного, кроме того, что, упав за него, вы никогда уже не сумеете выбраться обратно. Но как вы сможете пересечь горизонт, если время на горизонте остановится? Решение этого парадокса заключается в том, что время в общей теории относительности относительно и зависит от точки зрения. Ощущение времени падающим сквозь горизонт скалолазом отличается от ощущения времени наблюдателем, который висит над самым горизонтом, но не пересекает его, и отличается от ощущения времени удалённым наблюдателем. С точки зрения удалённого наблюдателя, скалолаз будет падать на горизонт бесконечно долго. Он будет видеть, как скалолаз всё ближе и ближе подлетает к горизонту, и при этом движется всё медленнее и медленнее, и в конце концов практически застывает на горизонте чёрной дыры. С точки зрения самого скалолаза, он достаточно

быстро пересечёт горизонт и достигнет затаившейся в центре чёрной дыры сингулярности. Мы говорим, что время скалолаза замедляется, потому что его секунда растягивается в неизмеримо бóльший промежуток времени для удалённого наблюдателя. Точно так же замедляется время наблюдателя, который парит в непосредственной близости от горизонта чёрной дыры. Чем ближе он к горизонту, тем сильнее замедляется его время.

Несмотря на то что всё это выглядит весьма абстрактно и фантастично, у гравитационного замедления времени есть совершенно реальная работа в нашем повседневном мире. Время течёт медленнее у поверхности Земли, нежели в открытом космосе. Это замедление невелико, не более одной миллиардной, но оно имеет важное значение для корректной работы системы глобального позиционирования — GPS. Причина в том, что для точного определения координат сигналы, поступающие со спутников, должны быть синхронизованы с очень высокой точностью, а часы, расположенные на спутниках, находятся во власти двух релятивистских эффектов: замедления времени, связанного со скоростью их движения, и ускорения времени, связанного с тем, что гравитационное поле Земли ослабевает с удалением от неё. Учёт этих двух эффектов позволяет обеспечить надлежащую точность работы системы GPS.

Ранее я упоминал о связи между замедлением времени и кинетической энергией. Давайте поговорим об этом подробнее. Кинетическая энергия — это энергия движения. Время замедляется тогда, когда вы движетесь. Если вы движетесь настолько быстро, что ваша полная энергия равна удвоенной энергии покоя, то время замедляется в два раза. Если ваша полная энергия равна учетверённой энергии покоя, то время течёт в четыре раза медленнее.

Что-то очень похожее происходит и с гравитационным замедлением времени (астрофизики ещё используют термин «красное смещение»), только оно связано не с кинетической, а с гравитационной энергией. Гравитационная энергия — это энергия, которую вы приобретаете в процессе падения. Если фрагмент космического мусора падает на Землю, то энергия, которую он приобретает в процессе падения, составляет чуть больше одной миллиардной его массы покоя. И совершенно не случайно, что именно на такую же величину замедляется время наблюдателя, перемещённого из дальнего космоса на поверхность Земли. Время течёт по-разному в разных гравитационных полях. Следует оговориться, что эти рассуждения верны для не слишком сильных гравитационных полей. Все предметы как будто чувствуют замедление времени и стремятся падать из мест, где время течёт быстрее, в места, где время течёт медленнее. Сила тяжести, которую вы ощущаете и которую мы называем гравитацией, —

это фактически разница в темпе течения времени в более «высоких» и более «низких» местах.

Чёрные дыры не совсем чёрные

Интерес струнных теоретиков к чёрным дырам возник в основном из-за квантово-механических свойств последних. Квантовая механика перевернула определяющие свойства чёрных дыр с ног на голову. Так, горизонт чёрной дыры перестал быть чёрным. Чёрные дыры светятся, как тлеющие угли, однако их свечение очень слабое и очень холодное, по крайней мере когда речь идёт о чёрных дырах, с которыми имеют дело астрофизики. Свечение чёрных дыр означает, что они обладают температурой. Эта температура связана с величиной гравитации у поверхности чёрной дыры. Чем больше чёрная дыра, тем ниже температура, по крайней мере пока мы говорим об астрофизических чёрных дырах.

Раз уж у нас появилась температура, давайте поговорим о ней. Правильнее всего рассказывать о температуре в терминах тепловой энергии, или теплоты. Теплота кружки горячего чая обуславливается микроскопическими движениями молекул воды. Охлаждая воду, вы отнимаете у неё тепловую энергию: каждая молекула воды начинает двигаться всё менее и менее энергично. В конце концов вода замерзает и превращается в лёд. Это происходит при нуле градусов Цельсия. Но молекулы воды в массе льда по-прежнему движутся — они колеблются вокруг положений равновесия в узлах кристаллической решётки льда. По мере дальнейшего охлаждения льда молекулы будут вибрировать всё слабее и слабее, пока при температуре $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ не застынут полностью... Ну... почти полностью — полностью остановиться им не даст квантово-механический принцип неопределённости. Невозможно охладить что-либо ниже $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, поскольку при этой температуре у тела уже не остаётся тепловой энергии, которую можно было бы у него отнять. Наинизшая из всех возможных температур носит название *абсолютного нуля*.

Важно помнить, что квантовая механика запрещает молекулам воды полностью остановиться даже при температуре абсолютного нуля. Остановимся на этом моменте немного подробнее. Напишем соотношение неопределённостей: $\Delta p \times \Delta x \geq h/4\pi$. В кристалле льда мы довольно точно можем сказать, где какая молекула располагается. Это означает, что Δx очень мало, по крайней мере меньше, чем расстояние между соседними молекулами. А если Δx очень мало, то Δp не может быть слишком малым. То есть, согласно квантовой механике, отдельные молекулы воды

продолжают «дрожать», даже будучи замороженными в кубике льда при абсолютном нуле. Они обладают некоторой энергией, которая может быть ассоциирована с колебаниями. Это явление носит название *нулевые колебания*. Мы уже имели дело с чем-то похожим, когда говорили об атоме водорода. Если вы помните, я сравнил минимальную энергию электрона в атоме водорода с основной гармоникой фортепианной струны. Разница в том, что колебания струны со временем затухают, а электрон по-прежнему движется. В положении и импульсе электрона присутствует неопределённость. Иногда, описывая это явление, говорят, что электрон испытывает *квантовые флуктуации*. Энергия его основного состояния может рассматриваться как энергия нулевых колебаний.

Таким образом, существует два типа колебаний, которым подвержены молекулы воды в кубике льда: тепловые колебания и квантовые флуктуации. Вы можете избавиться от тепловых колебаний, охладив лёд до абсолютного нуля. Но вы не можете избавиться от квантовых флуктуаций.

Идея абсолютного нуля температуры оказалась настолько полезной, что физики даже сместили начало температурной шкалы в эту точку. Новая температурная шкала получила название шкалы Кельвина. Один градус кельвина, или, как часто говорят, просто один кельвин, соответствует одному градусу выше абсолютного нуля, или $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. 273,15 кельвинов соответствуют $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — температуре таяния льда. Характерная энергия тепловых колебаний связана с температурой, выраженной в кельвинах, очень простым соотношением: $E = k_B T$, где k_B — так называемая постоянная Больцмана. Например, при температуре таяния льда тепловая энергия молекул воды, согласно этой формуле, составляет порядка одной сороковой электрон-вольта. Это примерно в сто раз меньше, чем энергия, необходимая для того, чтобы выбить электрон из атома натрия, а эта энергия, как вы помните из главы 2, составляет около 2,3 электрон-вольта.

Чтобы вы лучше почувствовали новую температурную шкалу, я приведу в качестве примера несколько интересных температурных точек на ней. Воздух переходит в жидкое состояние при 77 кельвинах, или $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Комнатная температура (скажем, $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$) соответствует 295 кельвинам.

Физикам удалось охладить вещество до температур порядка одной тысячной кельвина. Поверхность Солнца имеет температуру немного ниже 6000 кельвинов, а в центре Солнца температура достигает 16 миллионов кельвинов.

Но как всё это применить к чёрным дырам? Чёрные дыры не состоят из молекул, колебания которых можно было бы рассматривать как

тепловые или квантовые. Чёрные дыры состоят из пустого пространства, горизонта и сингулярности. Получается, что пустое пространство — довольно сложная вещь. В нём происходят квантовые флуктуации, которые можно описать как спонтанное рождение и уничтожение пар частиц. Если рождение такой пары произойдёт у самого горизонта событий, то может случиться так, что одна из частиц провалится под горизонт, а вторая улетит прочь, унося с собой часть энергии чёрной дыры. Процессы такого типа позволяют приписать поверхности чёрной дыры ненулевую температуру. Иначе говоря, горизонт преобразует некоторые из вездесущих квантовых флуктуаций пространства-времени в тепловую энергию. Тепловое излучение чёрной дыры очень слабое, и оно соответствует очень низкой температуре. Допустим, что чёрная дыра образуется в результате гравитационного коллапса тяжёлой звезды, масса которой в несколько раз превышает массу Солнца. Температура такой чёрной дыры составит всего лишь двадцать миллиардных долей кельвина, или 2×10^{-8} кельвина. Чёрная дыра, находящаяся в центре Галактики, гораздо тяжелее: в миллионы, а может быть, и в миллиард раз тяжелее Солнца. Температура чёрной дыры с массой в пять миллионов солнечных составит одну стотриллионную кельвина, или 10^{-14} кельвина.

Но что действительно очаровывает струнных теоретиков, так это не столько низкая температура горизонтов чёрных дыр, сколько возможность описания определённых объектов в теории струн, известных как D-браны, в виде очень маленьких чёрных дыр. Эти микроскопические чёрные дыры могут иметь широкий диапазон температур: от абсолютного нуля до сколь угодно больших значений. Теория струн интерпретирует температуру микроскопических чёрных дыр как тепловые колебания на D-бране. Я подробнее расскажу о D-бранах в следующей главе, а в главе 5 объясню, какое отношение имеют D-браны к микроскопическим чёрным дырам. Эта реляция лежит в основе последних исследований, призванных описать, что именно происходит при столкновениях тяжёлых ионов, с точки зрения теории струн. Речь о них пойдёт в главе 8.

Глава 4

Теория струн

Учась в Принстоне на втором курсе, я записался на лекции по римской истории. Курс был посвящён в основном Римской республике. В ходе изучения я обратил внимание, как римляне сочетали мирные и военные достижения. Они эволюционировали от неписаной конституции и зачатков представительной демократии к развитому гражданскому обществу, подчинив себе сначала ближайших соседей, потом весь Апеннинский полуостров и, наконец, установив своё господство на всём Средиземноморье и за его пределами. Не менее увлекательны и гражданские войны Поздней республики, закончившиеся установлением тирании и образованием империи.

И в современном английском языке, и в американском праве звучит эхо Древнего Рима. К чему далеко ходить — возьмите двадцатипятицентовую монету. Если монета отчеканена до 1999 года, то на её реверсе вы увидите орла, сидящего на пучке прутьев. Такой пучок называется «фасция» и является древнеримским символом власти. Римляне внесли огромный вклад в литературу, искусство, архитектуру, военную тактику и стратегию. А принятие римлянами христианства позволило последнему дожить до наших дней.

Меня восхищает римская история, но я не упомянул бы о ней, если бы она не вызвала у меня ассоциаций с темой моей книги — с теорией струн. Мы замечаем вокруг себя следы древнеримской культуры, но нас разделяют века. Энергетическая шкала физических явлений, описываемых теорией струн, конечно, если последняя верна, простирается настолько далеко, что это «далеко» лежит за пределами возможностей наших измерительных приборов. Если бы мы были способны охватить весь струнно-теоретический спектр энергий, то непосредственно наблюдали бы все те экзотические вещи, о которых я собираюсь рассказать: дополнительные измерения, D-браны, дуальности и многое другое. Всё это лежит в основе нашего наблюдаемого мира (повторюсь: если теория струн верна), подобно тому как древнеримская цивилизация лежит в основе нашего современного общественного устройства. Только теорию струн отделяют от повседневного опыта не века истории, а порядки значений энергии. Чтобы достичь тех энергий, при которых можно непосредственно наблюдать

проявления дополнительных измерений, предсказываемых теорией струн, ускорители элементарных частиц должны быть в сто триллионов раз мощнее, чем используемые сегодня.

Эта энергетическая пропасть ставит физиков в неловкое положение, вынуждая признать, что проверить теорию струн крайне трудно. В главах 7 и 8 я расскажу о попытках таких проверок, а в этой и двух следующих сосредоточусь на описании теории струн в терминах самой теории струн, без каких бы то ни было апелляций к реальному миру, за исключением разве что отдельных аналогий, которые потребуются для более наглядного объяснения. Представьте, что я пересказываю краткий курс римской истории: повествование изобилует множеством неожиданных развилок и поворотов, и зачастую вам трудно удержать его нить. Но мы изучаем древних римлян не столько для того, чтобы понять их, сколько для того, чтобы понять самих себя. Вот точно так же и теория струн содержит массу неожиданных развилок и поворотов, и я не ожидаю, что мои объяснения окажутся простыми и понятными, но надеюсь, что глубокое понимание теории струн поможет лучше понять наш реальный мир.

В данной главе мы сделаем три важных шага к этому пониманию. Первый шаг позволит увидеть, как теория струн разрешает фундаментальное противоречие между теорией гравитации и квантовой механикой. Второй шаг объяснит, каким образом струны колеблются и движутся в пространстве-времени. Третий — даст представление о том, как само пространство-время возникает в наиболее широко используемом математическом описании струн.

Гравитация против квантовой механики

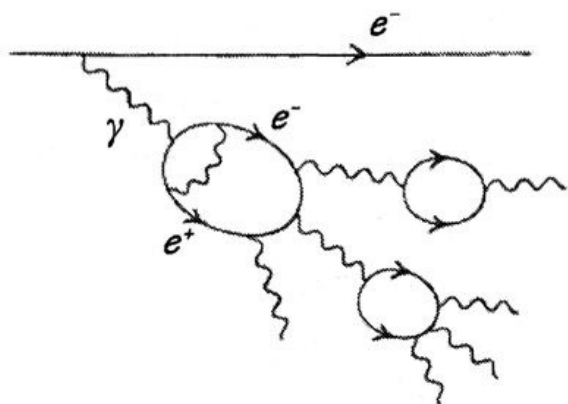
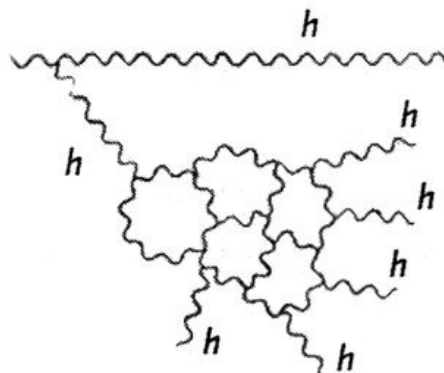
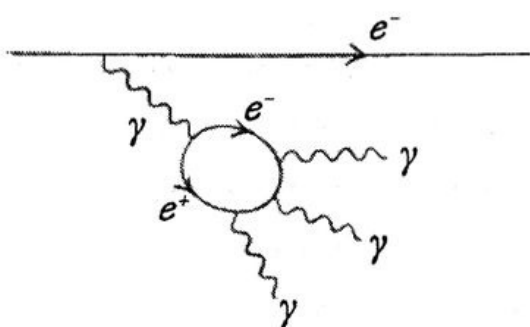
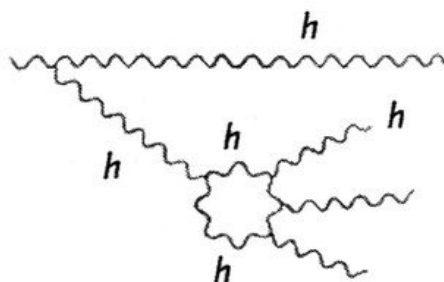
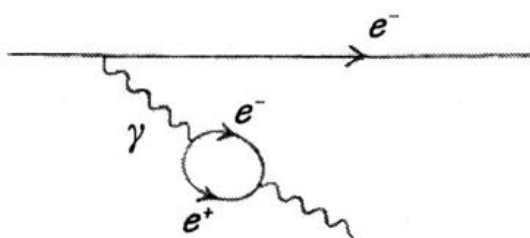
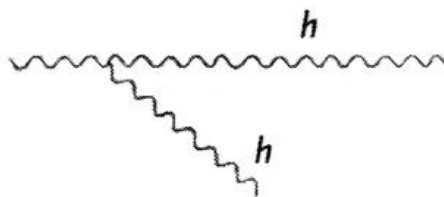
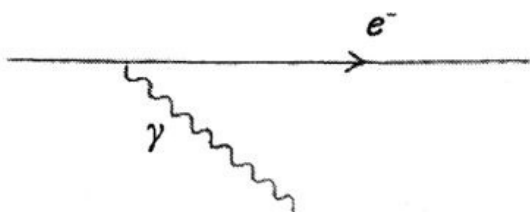
Квантовая механика и Общая теория относительности — две триумфальные физические теории, возникшие в начале XX века, — как оказалось, не согласованы друг с другом. Трудность возникает при применении метода, получившего название *перенормировка*. Я расскажу о перенормировке на примере фотонов и гравитонов, о которых мы уже говорили в предыдущих главах. Суть несогласованности состоит в том, что фотоны приводят нас к перенормируемой теории (что означает: «хорошая теория»), тогда как гравитоны приводят к неперенормируемой теории, и это фактически означает, что у нас нет общей теории, описывающей фотоны и гравитоны.

Фотоны взаимодействуют с электрическими зарядами, но при этом сами по себе электрически нейтральны. Например, имеющий электрический заряд электрон в атоме водорода, перескакивая с одного энергетического уровня на другой, излучает фотон. Именно это я имею в виду, когда говорю, что фотоны взаимодействуют с зарядами. Утверждение, что сам фотон не имеет электрического заряда, равносильно утверждению, что свет не проводит электричество. Если бы это было не так, то вы каждый раз получали бы удар током, схватившись за какой-нибудь предмет, который достаточно долго пролежал на солнечном свете. Фотоны не взаимодействуют друг с другом; они взаимодействуют только с электрическими зарядами.

Гравитоны реагируют не на заряды, а на массу, энергию и импульс. А поскольку они переносят энергию, то взаимодействуют и друг с другом. Может показаться, что это не представляет особой проблемы, однако именно из-за этого мы и сталкиваемся с трудностями. Квантовая механика учит нас, что гравитоны ведут себя и как волны, и как частицы. Частицы гипотетически являются точечными объектами. А точечный гравитон будет притягивать вас тем сильнее, чем ближе к нему вы окажетесь. Его гравитационное поле может быть описано как испускание других гравитонов. Мы будем называть пробный гравитон материнским, а испускаемые им гравитоны — дочерними. Гравитационное поле вблизи материнского гравитона является очень сильным. А значит, его дочерние гравитоны обладают огромными энергиями и импульсами. Это непосредственно следует из принципа неопределённости: дочерние гравитоны наблюдаются на очень небольшом расстоянии Δx от

материнского гравитона, и поэтому, согласно соотношению неопределённостей, $\Delta p \times \Delta x \geq h/4\pi$, неопределённость их импульса, Δp , очень велика. Беда в том, что гравитоны также чувствительны и к импульсу. Дочерние гравитоны сами будут испускать гравитоны. Весь процесс ветвится и невероятно быстро расходится: вы не можете учесть все последствия взаимодействия всех гравитонов.

На самом деле нечто подобное происходит и возле электрона. Если вы попытаетесь измерить электрическое поле очень близко к электрону, то спровоцируете его испустить фотон с очень большим импульсом. Это кажется безобидным, потому что, как мы знаем, фотоны не испускают другие фотоны. Беда в том, что фотон может родить электрон-позитронную пару, которая затем испустит ещё больше фотонов, которые породят новые электроны и позитроны... Полный бардак! Самое удивительное, что в случае с электронами и фотонами вы тем не менее можете полностью описать всё множество частиц, каскадно рождаемых друг от друга. Иногда говорят об одежде, или «шубе», из потомства, в которую укутан электрон. Физики употребляют для описания электронного потомства термин «виртуальные частицы». Перенормировка — это математический метод, позволяющий отследить всю эту кашу.



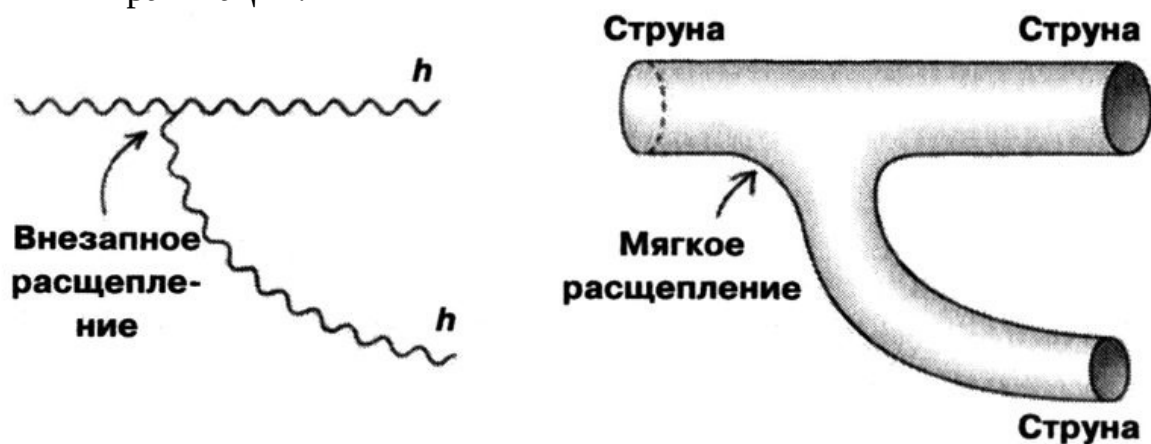
?

Слева: электрон (e^-) испускает виртуальные частицы: фотоны (γ), позитроны (e^+) и другие электроны. Каскад частиц нарастает сравнительно медленно для того, чтобы мы сумели отследить процесс математически, используя перенормировку. Справа: гравитон (h) испускает такое множество виртуальных гравитонов, что никакая перенормировка не в

состоянии описать весь процесс

Идея перенормировки состоит в том, что «голый» электрон предполагается имеющим бесконечный заряд и бесконечную массу, но как только мы «одеи» электрон, его заряд и масса приобретают конечные значения.

Проблема с гравитонами состоит в том, что мы не в состоянии перенормировать облако окружающих его виртуальных гравитонов. Общая теория относительности — теория гравитации — является неперенормируемой. Это может показаться просто запутанной технической проблемой: остаётся слабый шанс, что мы просто смотрим на проблему с неправильной стороны. Также существует ещё более слабый шанс, что теория, называемая *Максимальной теорией супергравитации*, окажется перенормируемой. Однако я и большинство струнных теоретиков уверены, что существуют фундаментальные трудности в объединении квантовой механики и гравитации.



Гравитон расщепляется внезапно. Расщепление струны происходит в некоторой конечной области пространства-времени, обеспечивая «мягкость» процесса

Теперь возьмём теорию струн. Исходное предположение, лежащее в её основе, заключается в том, что частицы не являются точечными. Вместо этого частицы представляются в виде колебательных мод струны. Согласно общепринятой идее теории струн, струны — это бесконечно тонкие, но имеющие конечную длину (порядка 10^{-34} метра) объекты, взаимодействующие друг с другом на манер гравитонов. «Стоп-стоп! — запротестуете вы. — Но разве в этом случае общие проблемы с облаком виртуальных частиц — в данном случае виртуальных струн — не приведут нас к такой же невозможности отследить весь процесс взаимодействия, как

и в случае с гравитонами?» Нет. Тот факт, что струны не являются точечными объектами, убивает описанную проблему в зародыше. Источником трудности в случае с гравитонами является предположение, что они, в соответствии с термином «точечная частица», имеют бесконечно малые размеры. Замена гравитонов колеблющимися струнами сглаживает «острые углы» их взаимодействия друг с другом. «На пальцах» это можно пояснить так: когда гравитон порождает другой виртуальный гравитон, вы можете точно указать место и время, где это произошло. Но когда разветвляется струна, это выглядит как ответвление водопроводной трубы.

В месте ветвления нет точки, в которой происходит излом, Y-образная фигура, иллюстрирующая этот процесс, выглядит гладким непрерывным отрезком трубы, только необычной формы. Всё это приводит к тому, что деление струны оказывается более «нежным» процессом, нежели деление частицы. Физики говорят, что струны взаимодействуют по своей природе «мягко», в то время как частицы взаимодействуют по своей природе «жёстко». Именно эта мягкость и обеспечивает лучшее поведение теории струн, чем общей теории относительности, в отношении применимости квантово-механического описания.

Струны в пространстве-времени

Вспомним вкратце, что мы говорили о колебаниях фортепианной струны. Если туго натянуть струну между двумя колками и ударить по ней молоточком, она завибрирует с определённой частотой. Частота — это число колебаний в секунду. Помимо основной частоты, фортепианная струна вибрирует также на обертонах — колебаниях более высоких частот, придающих звуку рояля характерную окраску. Я приводил эту аналогию при описании поведения электрона в атоме водорода: он тоже имеет основную колебательную моду, соответствующую основному состоянию с минимальной энергией, и дополнительные моды, соответствующие более высоким энергетическим уровням.

Описанная аналогия, возможно, не полностью вас удовлетворит: «Ну и какое отношение имеет электрон в атоме водорода к стоячей волне на фортепианной струне?» — спросите вы. Большинству ближе аналогия с бесконечно малым планетоидом, кружащим по орбите вокруг крошечного солнца — атомного ядра, не так ли? Хороша ли такая аналогия? И да, и нет. Квантовая механика утверждает, что представление об электроны как о частице и представление об электроны как о волне настолько глубоко переплетены, что квантово-механическое движение электрона-частицы вокруг протона действительно может быть описано как стоячая волна.

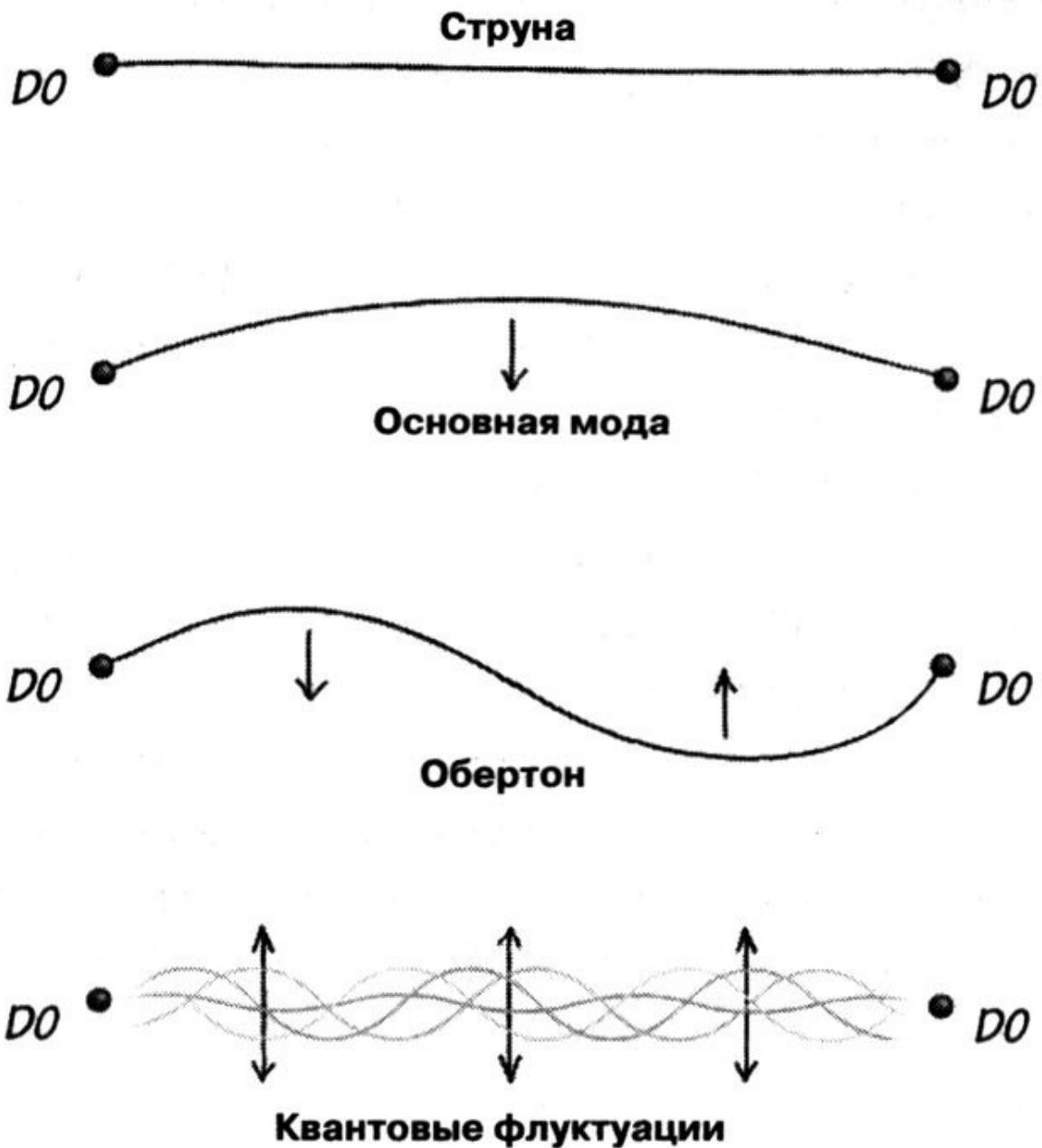
Сравнение фортепианной струны со струнами, которые фигурируют в теории струн, на самом деле — очень правильный метод. Чтобы избежать путаницы с разными видами струн, я буду называть те струны, которыми занимается теория струн, «релятивистскими струнами». Этот термин имеет очень глубокий дидактический смысл, потому что теория струн включает в себя теорию относительности, как специальную, так и общую. Сейчас я хочу поговорить об одной конструкции теории струн, которая настолько похожа на фортепианную струну, насколько вообще может струна быть похожа на струну. Релятивистские струны могут оканчиваться на объектах, которые называют *D-бранами*. Если опустить эффекты, связанные со взаимодействием струн, то D-браны можно рассматривать как бесконечно тяжёлые. Подробно о D-бранах будет рассказано в следующей главе, а сейчас я сделаю лишь небольшое отступление, так сказать, в качестве «костыля». Простейшая D-брана называется D0-браной (произносится «дэ-ноль брана»). Это точечная частица. Я уже слышу возмущение отдельных читателей по поводу возвращения к точечным частицам: «Разве не заявлял

недавно автор, что теория струн ставит своей целью избавиться от точечных частиц?». Ну да, так и было до середины 1990-х годов, а потом точечные частицы опять вернулись в теорию струн, и не одни, а привели за собой целый зоопарк неведомых зверушек. Но я забегаю вперёд. Всё, что я хочу, — это привести струнно-теоретический аналог рояльных колков, удерживающих струну в натянутом состоянии, — и D0-браны настолько уместны в этой роли, что я не в силах удержаться от рассказа о них. Короче, натянем релятивистскую струну между двумя D0-бранами, как фортепианную струну между двумя колками. Сами D0-браны ни к чему не прикреплены, но они остаются неподвижными, поскольку имеют бесконечную массу. Забавно, не правда ли? Так, ладно. О D0-бранах — в следующей главе, а сейчас — только о натянутой струне.

Самый нижний энергетический уровень натянутой струны соответствует отсутствию колебаний. Ну... почти отсутствию, ведь небольшие квантовые колебания присутствуют всегда, и этот факт имеет важное значение. Правильнее всего представлять себе нижний энергетический уровень как обладающий небольшой колебательной энергией в рамках дозволенного квантовой механикой. Возбуждённые уровни релятивистской струны соответствуют её колебаниям либо на основной частоте, либо на обертонах основной частоты, причём она может вибрировать и на нескольких частотах одновременно, так же как и фортепианная струна. Но, так же как и электрон в атоме водорода, релятивистская струна не может вибрировать на произвольной частоте. Электрон может выбирать энергетические уровни из дискретного набора. У релятивистских струн всё точно так же. Разные колебательные уровни обладают разными энергиями, а поскольку масса и энергия связаны соотношением $E = mc^2$, то разным колебательным состояниям соответствуют и разные массы.

Было бы замечательно, если бы я мог сказать, что частота колебаний струны связана с её энергией простым соотношением типа $E = h\nu$, как это было в случае фотонов. К сожалению, всё не так просто. Полная масса струны складывается из нескольких составляющих. Первая из них — это масса покоя струны, которая соответствует энергии натяжения струны между двумя D0-бранами. Вторая — масса, соответствующая колебательной энергии, которая в свою очередь складывается из энергий колебаний всех обертонов. Напомню, что энергия и масса связаны соотношением $E = mc^2$. И наконец, третья составляющая — это масса, соответствующая энергии неустранимых квантовых флуктуаций, носящих

название *нулевых колебаний*. Термин «нулевые колебания» заставляет нас помнить о принципиальной неустранимости квантовых флуктуаций. Так вот: вклад энергии нулевых колебаний в массу струны... отрицателен! Согласен, это странно. Очень странно. Чтобы показать, насколько это странно, я приведу такой пример. Если мы ограничимся одной колебательной модой струны, то увидим, что энергия нулевых колебаний этой моды положительна. Каждый из более высоких обертонов в отдельности даёт ещё больший положительный вклад в энергию струны. Но если мы соответствующим образом просуммируем вклады всех обертонов, то получим отрицательное число. Если вы считаете, что это недостаточно плохо, то вот вам ещё более скверная новость: я утаил часть правды, сказав, что вклад энергии нулевых колебаний отрицателен. Все эти эффекты — масса покоя, энергия колебаний и энергия нулевых колебаний — входят в выражение общей массы квадратами своих величин. И если в этой сумме преобладает энергия нулевых колебаний, то квадрат полной массы оказывается отрицательным, а это значит, что сама масса оказывается мнимой, как корень из минус единицы.



Колебания струны, натянутой между двумя D0-бранами

Прежде чем вы с возмущением отвергнете подобную чушь, позвольте мне добавить, что в теории струн устранению описанной проблемы посвящено целое направление исследований. В двух словах проблема состоит в том, что квадрат массы релятивистской струны в её низшем энергетическом состоянии отрицателен. Струны в таком состоянии называются *тахionsами*. Да-да, это те же самые тахионы, которые в каждой серии противостоят героям «Звёздного пути». Это, безусловно, плохая новость. В описанной мной модели можно было бы избавиться от

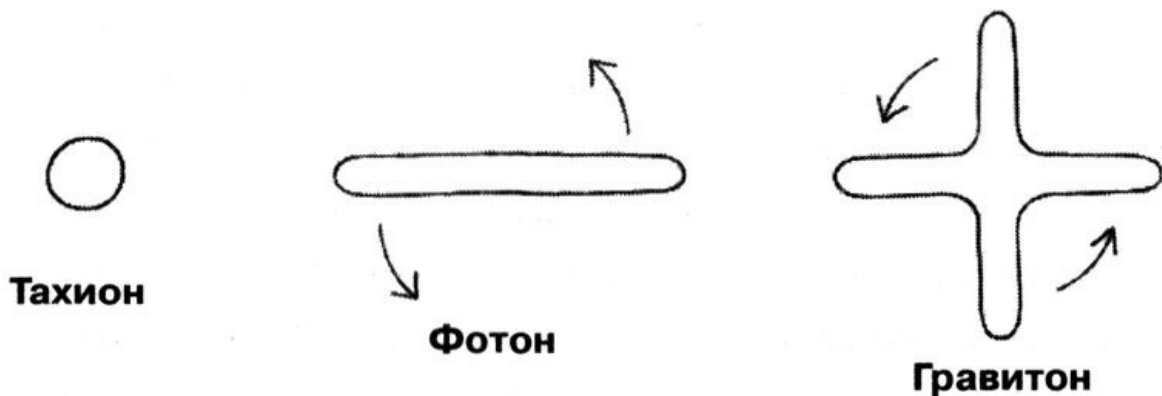
отрицательного квадрата массы, раставив D0-браны, к которым прикреплены концы струны, достаточно далеко, чтобы энергия натяжения струны стала больше энергии нулевых колебаний. Но когда поблизости нет никаких D0-бран, по-прежнему остаётся сама струна. Лишённая возможности прикрепиться к чему-либо, она может замкнуться сама на себя. Теперь она не натянута между чем-то и чем-то и может колебаться, а может и нет. Единственное, чего она не может перестать делать, — это флуктуировать на квантовом уровне. И, как и прежде, квантовые колебания превращают такую струну в тахион, что очень и очень плохо для теории. По современным представлениям, тахионы нестабильны, они сродни карандашу, балансирующему на острие. Можно попытаться уравновесить такой карандаш, но любое лёгкое дуновение опрокинет его. Теория струн, содержащая тахионы, напоминает теорию, описывающую миллионы стоящих на острие карандашей, заполняющих пространство.

Впрочем, я слишком сгустил краски. Существует спасительное решение и для тахионов. Предположим, что основному состоянию тахионной струны соответствует мнимая масса и её квадрат: $m^2 < 0$. Колебательная энергия тоже даёт определённый вклад в квадрат массы. Используя правильную колоду и нужным способом сдав карты, можно добиться того, что полная масса струны будет в точности равна нулю. Это обнадеживает, потому что, как мы знаем, в реальном мире существуют безмассовые частицы, например фотоны или гравитоны. Следовательно, если струны действительно описывают реальный мир, то они должны быть безмассовыми или, более строго, по крайней мере некоторые квантовые состояния струн должны быть безмассовыми.

Обратите внимание, что нужно взять *правильную* колоду карт. Этой метафорой я хотел сказать, что нам понадобится 26-мерное пространство-время. Возможно, вы уже догадались, что к этому безобразию всё и придёт, поэтому я не стану извиняться. Имеется несколько аргументов в пользу 26 измерений, но большинство из них сугубо математические, и я боюсь, что основной массе читателей они не покажутся убедительными. Аргумент, который я приведу, более физический. Мы хотели бы получить безмассовые квантовые состояния струн. Мы знаем, что квантовые нулевые колебания «толкают» m^2 в отрицательную сторону. Мы также знаем, что колебательные моды «толкают» m^2 в противоположном направлении. Минимальное возможное значение энергии колебаний не зависит от размерности пространства, в то время как величина квантовых нулевых колебаний — зависит. Посмотрим на это вот с какой стороны: когда что-то

колеблется — фортепианная струна или что-либо ещё, — оно делает это в каком-то определённом направлении. Фортепианная струна колеблется в том направлении, в котором по ней ударил молоточек; например, струна рояля колеблется вверх-вниз, но не вправо-влево. Колебание выбирает какое-то одно направление и игнорирует остальные. В противоположность этому квантово-механические нулевые колебания происходят во всех возможных направлениях, и добавление каждого нового измерения добавляет квантовой флуктуации ещё одно направление, в котором могут происходить колебания. Больше возможных направлений колебаний, или, как их называют, степеней свободы, означает большее количество флуктуаций, что приводит к большему отрицательному вкладу в m^2 . Остаётся лишь подсчитать, как правильно подобрать вклады в общую массу колебательных мод и нулевых колебаний. Получается, что одну колебательную моду с минимальным значением энергии компенсирует одно 26-мерное квантовое нулевое колебание. Смотрите на это с оптимизмом, ведь количество необходимых измерений могло оказаться нецелым! Что бы мы делали, например, с двадцатью шестью с половиной измерениями?

Если вы ещё не вполне освоились с разными типами колебаний, не переживайте. Они очень похожи. Единственное различие между колебательными модами и квантовыми нулевыми колебаниями состоит в том, что колебательные моды могут присутствовать, а могут и не присутствовать, в то время как нулевые колебания присутствуют всегда. Нулевые колебания — это те минимальные движения, наличия которых требует принцип неопределённости. Помимо основной моды, в колебаниях струны присутствуют и обертоны, придающие струне новые квантово-механические свойства. Я предпочитаю представлять себе различные моды в виде простых механических моделей, например круговых колебаний, колебаний в форме листа клевера или крутильных колебаний. Каждая форма соответствует отдельной частице. Другими словами, одна и та же струна может выступать в роли различных частиц в зависимости от формы происходящих на ней колебаний. Но говорить о форме колебаний всё же не совсем корректно, потому что эти колебания не механические, а квантово-механические. Правильнее говорить, что каждой частице соответствует своя квантовая мода. Геометрическая форма — это лишь удобный способ визуализации квантово-механических свойств.



Карикатуры на квантовые состояния струны, заставляющие её вести себя как тахион, фотон или гравитон

Итак, мы имеем: хорошую новость, плохую новость и очень плохую новость. Струны, обладая разными колебательными модами, способны вести себя как фотоны или как гравитоны. Это хорошая новость. Они могут делать это только в 26-мерном пространстве. Это плохая новость. Кроме того, существуют колебательные моды, приводящие к мнимым массам и превращающие струны в тахионы, которые приносят в теорию нестабильность. Ужаснее этой новости быть не может.

Переход к *суперструнам* позволяет излечить теорию от тахионов, а заодно снизить количество необходимых измерений с 26 до 10. К тому же суперструны допускают новый тип колебательных мод, заставляющий их вести себя как электроны. Это уже по-настоящему круто. А если бы ещё удалось придумать такие супер-пупер-струны, которые бы позволили сократить число измерений до четырёх, можно было бы открывать собственный бизнес по их продаже. В этой шутке присутствует лишь доля шутки. В действительности существует вариант супер-пупер-струнной теории, называемый «теория струн с расширенной локальной суперсимметрией», сокращающий число измерений до четырёх. К сожалению, эти измерения могут существовать только парами, то есть получаются либо четыре пространственных измерения и ни одного временного, либо два пространственных измерения и два временных. Словом, ничего хорошего. Нам-то нужно три пространственных и одно временное измерение. Из десяти измерений суперструнной теории — девять пространственных и одно временное. Нужно каким-то образом избавиться от шести лишних пространственных измерений, чтобы соотнести теорию с реальным миром.

Я много чего хотел бы рассказать о суперструнах, но этот рассказ

ожидает своей очереди в следующих главах. Сейчас же я предпочту остановиться на вопросе лечения теории от тахионов. Суперструны флуктуируют не просто в пространстве-времени, а значительно более сложным и абстрактным образом. Эти особые виды флуктуаций позволяют решить проблему тахионов, но не так, как вы, возможно, подумали. Тахионы по-прежнему остаются в теории как одно из решений для колебательных мод, обладающих мнимой массой, но фишка в том, что если вы будете рассматривать моды, отвечающие за поведение суперструны как фотона, гравитона, электрона или какой-то другой реальной частицы, то, как бы вы ни сталкивали эти частицы, каким бы образом они между собой ни взаимодействовали, они никогда не порождают тахионы. Тахионы как бы возможны, но они никогда не возникают. И это означает, что теория по-прежнему балансирует на лезвии ножа, но существует особый тип симметрии, помогающий сохранять это хрупкое равновесие. Такой тип симметрии называется *суперсимметрией*. Физики надеются найти экспериментальные доказательства существования суперсимметрии в ближайшие годы. Если они их найдут, многие из нас поверят в суперструны. Но об этом — в седьмой главе.

Пространство-время из струн

Я потратил много времени на рассказ о колебаниях и флуктуациях струн в пространстве-времени. Но давайте вернёмся на шаг назад и спросим себя: «А что такое пространство? И что такое время?».

Существует точка зрения, согласно которой пространство является производной сущностью и имеет смысл только в отношении присутствующих в нём объектов. С этой точки зрения пространство описывается в терминах расстояний между объектами. Аналогично, время также не имеет смысла само по себе, а существует только как описание последовательности событий. Рассмотрим пару частиц *A* и *B*. Принято считать, что каждая из них движется по некоторой траектории в пространстве-времени и, если траектории частиц пересекаются, частицы сталкиваются. На первый взгляд в такой парадигме нет ничего плохого, но посмотрим с другой точки зрения. Что, если пространство и время не имеют никакого смысла в отсутствие частиц? Что это могло бы значить? Описывая траекторию частицы *A*, мы могли бы задать набор её пространственных координат как функцию времени и то же самое — для частицы *B*. Сделав это, мы можем свести роль пространства исключительно к механизму задания зависимости координат частиц от времени. Также мы будем знать, что частицы столкнулись, если пространственные и временные координаты частиц совпали.

Если это звучит для вас слишком абстрактно, представьте себе на месте частиц гоночные автомобили, снабжённые GPS-навигаторами и часами. Что мы можем узнать, изучая записанные GPS-навигаторами треки? Предположим, оба автомобиля движутся по одной и той же трассе, и первое, на что мы обращаем внимание, — автомобили периодически возвращаются в одну и ту же точку, пройдя одну и ту же дистанцию — длину гоночной трассы. Самые проникательные из нас воскликнут: «Ага! Трасса замкнута в кольцо». Допустим далее, мы обнаруживаем, что автомобили часто меняют свою скорость. Поломав голову, мы выскажем предположение, что автодром представляет собой не идеальный круг, а имеет повороты, на которых автомобили тормозят, и прямые участки, где автомобили разгоняются. А ещё мы бы могли заметить, что все автомобили, записи с которых у нас имеются, движутся по трассе в одном и том же направлении. Это привело бы нас к гипотезе о том, что существует некое правило, согласно которому все объекты, находящиеся на трассе,

должны двигаться по ней в одном направлении. Наконец, мы бы обратили внимание на то, что автомобили часто сближаются друг с другом, но очень редко сталкиваются, и это навело бы нас на мысль, что столкновения автомобилей не являются главной целью автогонки.

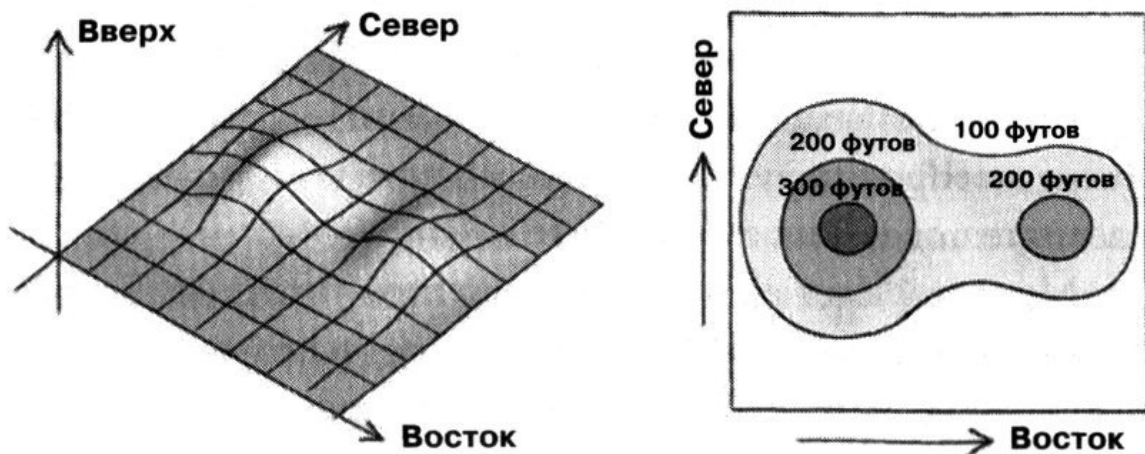
Получается, что, только изучая GPS-треки гоночных автомобилей и применяя дедуктивный метод, вы можете кое-что узнать о геометрии автодрома и правилах гонок. Может показаться, что мы делаем это через... понятно что, вместо того чтобы просто посмотреть гонку вживую. Однако на самом деле наблюдение живой гонки — очень сложный процесс. Вы стоите у края гоночного полотна, и это означает, что вы не присутствуете одновременно во всех точках трассы. Вы смотрите на автомобили, и это означает, что вы видите не сами автомобили, а фиксируете отражённые от них фотоны, что заставляет принимать во внимание множество других физических явлений. Гораздо проще анализировать треки GPS, содержащие всю необходимую информацию о местоположении автомобилей в каждый момент времени. С GPS-треками вам не приходится вникать в такие тонкости, как положение зрителей на трибунах или отражение и преломление снующих туда-сюда фотонов. Вам не нужно спрашивать, да вы на самом деле и не можете задать осмысленный вопрос, существует ли мир за пределами автодрома. Вы даже не нуждаетесь в предположении о существовании самого автодрома. Вместо этого вы можете логически вывести его существование и предположить некоторые из его свойств, изучая записи движения автомобилей.

Многое в теории струн происходит похожим образом. На основании характера движения и взаимодействия струн делаются предположения о свойствах пространства-времени. Такой подход называется *теорией струн на мировом листе*. Мировой лист — это способ представления движения струн. GPS-трек движения автомобиля представляет собой *мировую линию* в пространстве-времени. Со струнами всё оказывается сложнее по двум причинам. Во-первых, струны — не точки. Они имеют протяжённость, поэтому, чтобы задать положение струны, вы должны задать положение всех её точек. Во-вторых, струны существуют в 26-мерном или, в лучшем случае, в 10-мерном пространстве, и эти пространственные координаты могут быть искривлены или свёрнуты довольно сложным образом. В отличие от зрителя автогонки, физик не может встать в сторонке и взглянуть оттуда на геометрию пространства-времени. Осмысленные вопросы имеют отношение только к характеру движения и взаимодействия струн. Само же пространство-время в теории струн на мировом листе имеет смысл лишь в аспекте поведения струн, но не само по себе.

Мировой лист струны является поверхностью. Если мы проведём по этой поверхности разрез, то получим кривую, которая и представляет собой струну. Разрезая лист разными способами, мы получим набор кривых; этот набор является аналогом набора точек, из которых состоит GPS-трек автомобиля. Каждая точка GPS-трека представляет положение автомобиля в определённый момент времени; аналогично каждая кривая, вырезанная из мирового листа, представляет струну в определённый момент времени.

Чтобы описать движение струны в пространстве-времени, необходимо для каждого момента указать положение в пространстве каждой точки на мировом листе. Представьте себе, что мы приклеили на мировой лист множество ярлычков. Вырезая из мирового листа кривую, вы получаете цепочку ярлычков, на каждом из которых записаны координаты и время. Мировой лист в целом представляет собой поверхность, которую замечает струна при своём движении в пространстве-времени.

Чтобы лучше понять, что я имею в виду под маркировкой мирового листа ярлычками, представьте себе топографическую карту. На ней проведены горизонталы, или линии равных высот. Каждая из этих линий помечена ярлычком, обозначающим высоту. Если линии идут слишком часто, то метки ставятся только у некоторых из них, например у каждой пятой. Топографическая карта является плоским листом, но она отображает трёхмерный рельеф местности.



Слева: два холма, разделённые седловиной. Справа: топографическая карта холмов с горизонталями, обозначающими линии равных высот

Хорошей аналогией является представление мирового листа струны как топографической карты, горизонталы которой описывают различные положения струны в пространстве-времени. Но можно встать на другую точку зрения и сказать, что мировой лист струны — это всё, что у нас есть,

а пространство-время — не более чем набор ярлычков. На обычных топографических картах отметки горизонталей — это высоты над уровнем моря, и весь набор ярлычков — это просто набор возможных высот точек земной поверхности: от -400 до $+8800$ метров, исключая океаническое дно. На мировом листе теории струн каждый ярлычок — это положение в 26-мерном пространстве (или в 10-мерном в случае суперструнной теории). Некоторые из этих 26 измерений могут быть свёрнуты в кольцо и замкнуты сами на себя, как кольцевая гоночная трасса. Основная идея нашей концепции состоит в том, что пространство-время «возникает» из способа, которым вы маркируете мировой лист, как если бы высота зависела от того, что вы нарисуете на топографической карте.

Подведём промежуточные итоги, а затем перейдём к одной из главных изюминок теории струн на мировом листе. Обычно мы представляем струны вибрирующими в пространстве-времени. Но пространство и время не обязаны быть абсолютными понятиями. Даже лучше, если это не так, потому что тогда некий внешний динамический принцип мог бы управлять формой пространства-времени. Именно так и случилось в теории струн. В теории струн на мировом листе пространство-время является просто набором ярлычков, позволяющих описать движение струны. Квантовая механика требует, чтобы эти ярлыки немного колебались. А теперь: барабанная дробь! В конечном итоге выходит так, что вы можете отслеживать эти квантовые флуктуации, только если пространство-время подчиняется уравнениям общей теории относительности. Общая теория относительности — напомню — это современная теория гравитации. Итак, квантовая механика плюс теория струн на мировом листе включают в себя гравитацию. Круто!

Объяснения «отслеживания» квантовых флуктуаций пространственно-временных ярлычков на мировом листе уведут нас глубоко в технические дебри, но я могу попытаться объяснить это «на пальцах», используя аналогию с гоночной трассой. Помните, я предположил, что мы могли бы догадаться, что автодром состоит из поворотов и прямых участков, заметив, что автомобили тормозят в одних местах трассы и разгоняются в других? Автодром также не имеет острых углов, потому что, чтобы повернуть в таком месте, автомобиль должен почти остановиться, что противоречило бы духу автогонок. В общей теории относительности тоже почти нет острых углов в пространстве-времени, потому что уравнения ОТО их запрещают. Я говорю «почти», потому что на самом деле острые углы, или, как их называют теоретики, *сингулярности*, разрешены, но только за горизонтом чёрных дыр. Интуитивно можно понять отсутствие острых

углов в пространстве-времени по аналогии с отсутствием их на автодроме. Струны не могут проходить через сингулярности, так же как гоночные автомобили не могут проходить острые углы трассы без остановки, хотя есть и исключения. Исследование разрешённых типов сингулярности представляет собой отдельный и крайне увлекательный раздел теории струн. Обычно эти сингулярности не могут быть поняты в рамках общей теории относительности, так что теория струн разрешает существование гораздо более богатых классов геометрии пространства-времени, чем теория относительности.

Дополнительные геометрии возникают в теории струн в некоторых случаях, связанных с бранами, о которых пойдёт речь в следующей главе.

Глава 5

Браны

В 1989 году я учился в старших классах и отправился в физический лагерь, где нам в числе прочего читали лекции по теории струн. Примерно в середине курса один из моих товарищей задал лектору довольно острый вопрос. Он спросил: «А почему мы ограничиваемся струнами? Почему не рассматриваем листы, или мембраны, или какие-нибудь трёхмерные квантовые штуки?». Ответ лектора сводился к тому, что струны уже и так достаточно сложны, функциональны и перспективны и что они, как представляется, лучше подходят для наших задач, чем мембраны и трёхмерные тела.

Всего через шесть лет, в 1995 году, все струнно-теоретическое сообщество было уже буквально наэлектризовано идеями D-бран. D-браны — это именно то, о чём спрашивал проницательный старшеклассник в 1989 году. Это особые объекты теории струн, которые могут иметь любую размерность. Данная глава посвящена в основном D-бранам и некоторым из их удивительных свойств. Я начну с небольшого экскурса в историю второй суперструнной революции, прокатившейся в середине 1990-х годов гигантской волной по физическому миру и обогатившей его массой новых интересных идей. Затем мы поговорим о том, что такое D-браны, и немного порассуждаем о концепции симметрии и о её отношении к D-бранам. После этого остановимся на связи D-бран с чёрными дырами и закончим рассказом об М-теории, оперирующей 11-мерным пространством. М-теория является более общей теорией, чем теория струн, а различные варианты теории струн являются предельными случаями М-теории.

Вторая суперструнная революция

Всё, что я до сих пор рассказывал вам о теории струн, примерно соответствует тому, как представляли её себе учёные в 1989 году. Они понимали опасность тахионов, радовались чудесным свойствам суперструн и связи между струнами и пространством-временем. Была одна вещь, которую более-менее понимали теоретики и о которой я вскользь упомянул в предыдущей главе, а именно — *компактификация*, — процесс свёртывания шести пространственных измерений, приводящий к тому, что на финальной стадии остаются лишь три пространственных и одно временное измерение. Выглядело всё весьма обнадеживающе, потому что у нас в руках были все основные ингредиенты фундаментальной физики. У нас была гравитация, у нас были фотоны, у нас были электроны и прочие частицы. Взаимодействия между струнами приводили именно к тому, что требовалось. Разумная компактификация, казалось, даёт правильный список элементарных частиц, причём гораздо более обширный, чем я только что привёл. Но теоретикам никак не удавалось найти такую компактификацию, которая позволила бы «закрыть сделку» и привела к абсолютно точному описанию реального мира.

Оглядываясь на то время, можно заметить ещё одну проблему. Как хороши, как свежи были струны... Голова шла кругом от успехов с мировыми листами, и это головокружение мешало физикам увидеть новые горизонты, открываемые второй суперструнной революцией. Мне трудно проследить историю этого периода, поскольку я пришёл в науку уже после начала второй суперструнной революции, но очевидно, что революционная ситуация начала складываться, когда пришло понимание, что одними струнами история не ограничится. Прежде чем перейти к серьёзному разговору о бранах, наверное, имеет смысл кратко рассказать о предпосылках второй суперструнной революции и о том, что, собственно, она собой представляла.

Первая предпосылка состояла в том, что взаимодействия между струнами становились всё менее и менее контролируемыми по мере того, как увеличивалось количество событий слияния и расщепления струн; и тогда было выдвинуто предположение о существовании неких новых объектов, добавление которых в теорию должно было помочь теории струн справиться с ситуацией, когда взаимодействие струн при их разделении и слиянии становится сильным. Вторая предпосылка выросла из теории

супергравитации. *Супергравитация* — это предельный низкоэнергетический случай теории суперструн. Под предельным низкоэнергетическим случаем я понимаю приближение, при котором мы пренебрегаем всеми колебательными модами суперструны, кроме самых нижних. В этом пределе из всего набора частиц остаётся гравитон и ещё несколько частиц, взаимодействия между которыми очень слабы. В теории супергравитации были обнаружены некоторые замечательные симметрии, не проявляющиеся в формализме мировых листов. Это вроде бы указывало на то, что теория струн на мировом листе неполна. И наконец, самая главная предпосылка — это идея бран. Брана — это по сути та же струна, только, в отличие от струны, брана может иметь любую размерность. Струна — это одномерная брана, или 1-брана. Точечная частица — нульмерная брана — 0-брана. Мембрана, представляющая собой двумерную поверхность, является двумерной браной, или 2-браной. Существуют также 3-браны, 4-браны, два вида 5-бран, 6-браны, 7-браны, 8-браны и 9-браны. Такое разнообразие бран наводило на мысль, что теория не может быть сформулирована в терминах одних только струн. Окончательную революционную ситуацию сформировала одиннадцатимерная супергравитация — теория, построенная на основе всего лишь двух идей: суперсимметрии и общей теории относительности. Существует определённая связь между супергравитацией и теорией струн, и эта связь была очевидна задолго до второй суперструнной революции. Оставалась не вполне понятной связь супергравитации с теорией струн на мировом листе, а хуже всего было то, что она не включала в себя квантовую механику, что вызывало изрядный скепсис у теоретиков, привыкших к тому, что гравитация и квантовая механика должны быть тесно переплетены. Короче, одиннадцатимерная супергравитация была загадкой для струнных теоретиков: она была близка к решению их задач, но, с их точки зрения, не имела смысла.

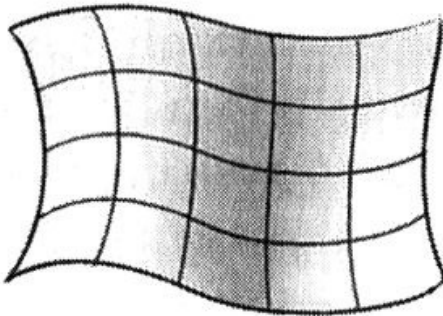
•
0-брана



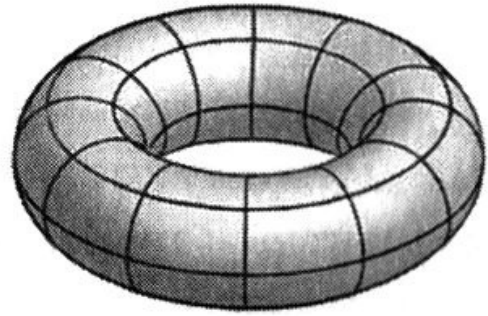
Сегмент струн



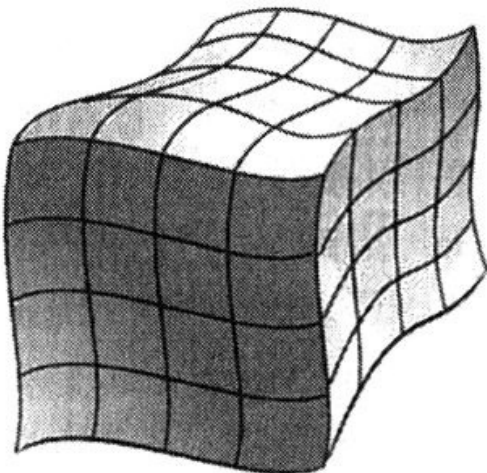
Замкнутая струна



2-брана



Замкнутая 2-брана



3-брана

**Замкнутую 3-брану
трудно изобразить**

0-брана, струна, 2-брана и 3-брана. Струна может замкнуться, образовав кольцо. 2-брана, замыкаясь, образует поверхность, не имеющую края. 3-брана тоже может замкнуться сама на себя, но это очень трудно изобразить

В течение следующих пяти лет, к середине 1990-х, когда все

описанные предпосылки сложились в одну мозаику, ситуация стала просто драматической. Струны по-прежнему занимали главенствующее положение, но выяснилось, что браны различных размерностей не менее важны. По крайней мере, в отдельных случаях браны играли столь же важную роль, что и струны. А в других случаях браны могли быть описаны как чёрные дыры с нулевой температурой. Одиннадцатимерная супергравитация органично вписалась в круг новых идей и заняла в нём центральное положение, получив новое имя: *М-теория*. Точнее, одиннадцатимерная супергравитация является частным случаем — низкоэнергетическим пределом — более общей М-теории. К сожалению, вторая суперструнная революция не дала исчерпывающего описания М-теории. Ясно только одно: мы получили новый инструментарий, позволяющий по-новому работать со струнами. Отдельным сюрпризом оказалось то, что привлечение бран существенно упрощает описание сильного взаимодействия струн.

Очевидно, что это лишь краткий обзор идей второй суперструнной революции. Оставшаяся часть этой главы и большая часть главы 6 будут посвящены более подробному разбору некоторых из этих идей. И начать этот разбор лучше всего с D-бран.

D-браны и симметрии

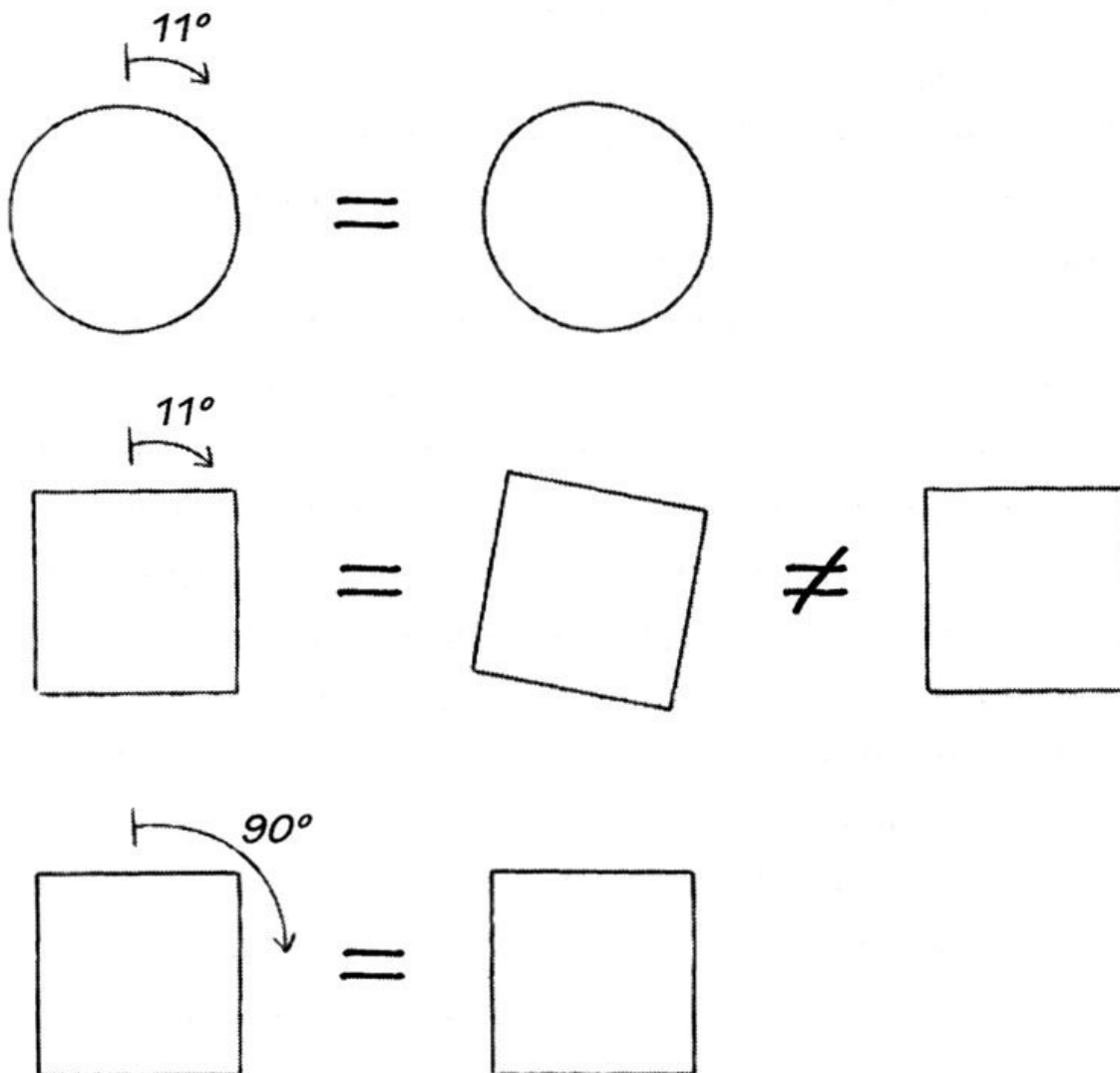
D-браны являются частным случаем бран. Их определяющее свойство — расположение на концах струн. Потребовалось много времени, чтобы понять, как эта простая идея может быть использована в описании движения и взаимодействия D-бран. D-браны имеют определённую массу, которая может быть вычислена на основании всего лишь одного предположения — о том, что D-брана может располагаться на конце струны. Чем слабее взаимодействуют друг с другом струны, тем больше становятся массы D-бран. Стандартная рабочая предпосылка в теории струн на мировом листе состоит в том, что взаимодействия струн очень слабы. В этом случае D-браны становятся настолько массивными, что заставить их двигаться крайне трудно, и это вводит в заблуждение при рассмотрении D-бран в роли динамических объектов. Я подозреваю, что распространённость до начала второй суперструнной революции предположения о слабом взаимодействии струн была ещё одной причиной, по которой потребовалось столько времени, чтобы реабилитировать D-браны в их праве быть динамическими объектами.

В предыдущей главе я упоминал о D0-бранах, представляющих собой точечные частицы. D1-браны похожи на струны, протяжённые в одном измерении. Они могут замыкаться на себя, образуя петли, и способны, подобно струнам, перемещаться в любом направлении. Как и струны, D1-браны способны вибрировать и подвержены квантовым флуктуациям. D p -браны имеют протяжённость в p пространственных измерениях, они существуют как в 26-мерной теории струн, так и в 10-мерной теории суперструн. Как я объяснял в главе 4, 26-мерная теория струн страдает ужасным недугом: струнными тахионами, вносящими в теорию нестабильность. Аналогичная нестабильность присуща в 26-мерной теории струн и D-бранам, а вот 10-мерная теория суперструн подобной нестабильностью не страдает. В оставшейся части книги я буду говорить преимущественно о теории суперструн.

Многое можно понять о D-бранах, изучая их симметрию. До сих пор я весьма вольно обращался со словом «симметрия», и, по-видимому, настало время объяснить, что конкретно физики понимают под симметрией. Круг является симметричной фигурой. Квадрат тоже. Но круг более симметричен, чем квадрат, — сейчас объясню почему. Если повернуть квадрат на 90° , то он совпадёт сам с собой. Круг же совпадает сам с собой

при повороте его на любой произвольный угол. Выходит, что существует гораздо больше различных способов повернуть круг, которые отображают его самого на себя. Вот это и означает, что круг более симметричен, чем квадрат. Когда что-то выглядит одинаково, если смотреть на него с разных сторон, это и означает, что это что-то обладает симметрией.

Физики, а особенно математики, оперируют более абстрактным определением симметрии. Они используют понятие группы симметрии. Поворот окружности, скажем, на 90° вправо соответствует «элементу» группы. Таким элементом является поворот на 90° по часовой стрелке. Необязательно оперировать окружностью, чтобы ухватить идею поворота на 90° . Предположим, что мы просто идём пешком. Любой человек понимает, что значит «повернуть направо», — обычно под этим подразумевается изменение направления движения на 90° по часовой стрелке. Мы можем говорить о повороте направо безотносительно к конкретному перекрёстку. Точно так же любой понимает, что поворот налево — это действие, противоположное повороту направо. Если вы пойдёте на север по 8-й авеню, повернёте направо на 26-ю стрит, а затем повернёте налево на 6-ю авеню, то направление вашего движения после этого будет таким же, как и в начале пути: на север.



Поворот круга на любой угол переводит его самого в себя. Поворот квадрата на 90° также переводит его самого в себя, а перевод на произвольный угол — нет

Соглашусь, что не всё будет как раньше. Раньше вы шли по 8-й авеню, а теперь идёте по 6-й. Но предположим, что вы отслеживаете только направление движения, тогда действительно поворот налево является действием, обратным повороту направо, и будет отменять его подобно тому как прибавление -1 к 1 даёт 0 .

Есть ещё одна особенность правых и левых поворотов, соответствующих вращению на 90° . Три последовательных правых поворота эквивалентны одному левому повороту, а после четырёх правых поворотов вы возвращаетесь к первоначальному направлению движения. Сложение поворотов радикально отличается от сложения чисел. Обозначим

правый поворот числом 1, а левый — числом -1 . Два правых поворота дадут $1 + 1 = 2$. Два правых и один левый поворот дадут $1 + 1 - 1 = 1$, что соответствует одному правому повороту. Пока всё хорошо, но четыре правых поворота эквивалентны отсутствию поворота, и мы должны записать их как $1 + 1 + 1 + 1 = 0$. Это уже не очень хорошо. Приведённый пример иллюстрирует отличие арифметики поворотов от обычной арифметики. Всё, что следует знать о группе, — это как правильно складывать её элементы. Ну, не совсем всё. Помимо операции сложения нам понадобится ещё операция взятия *обратного* элемента. Обратным элементом правого поворота является левый поворот. Обратный элемент отменяет все действия элемента группы, к которому он является обратным.

Существует определённое сходство между тем, о чём я только что рассказал, и тем, что говорилось в предыдущей главе о порождении струнами пространства-времени. Тогда я начал с представления мирового листа струны в виде абстрактной поверхности и показал, что его можно рассматривать как движение струны в пространстве-времени. Здесь же я представляю группу в виде абстрактного набора элементов, а затем определяю, как эти элементы действуют на конкретный объект: квадрат, круг или движущийся автомобиль.

Я утверждаю, что группа симметрий квадрата (точнее, группа вращательных симметрий квадрата) — это та же самая группа, что и только что описанная группа, элементы которой соответствуют правым и левым поворотам. Правый поворот соответствует вращению на 90° по часовой стрелке. Когда, управляя автомобилем, вы поворачиваете направо, вы объезжаете угол, то есть одновременно продолжаете двигаться поступательно, но, как я уже сказал, мы пытаемся отслеживать только направление движения безотносительно к его скорости, и в нашей абстрактной модели автомобиль выезжает на центр перекрёстка, останавливается, затем волшебным образом поворачивается на 90° и возобновляет движение в новом направлении. Суть в том, что эти повороты на 90° в точности те же, что описывают вращательную симметрию квадрата. А вот круг более симметричен, поскольку он переходит сам в себя при повороте на любой угол.

Существует ли что-либо более симметричное, чем круг? Да: шар. Если мы повернём круг в пространстве вокруг одного из его диаметров, то он не перейдёт сам в себя, а вот шар отобразится на себя при любом повороте вокруг любого из его диаметров, что означает, что группа симметрий шара больше группы симметрий круга.

Вернёмся к нашим D-бранам. Поскольку очень трудно оперировать

двадцатью шестью измерениями, и даже десятью, предположим, что нам каким-то образом удалось избавиться от всех лишних измерений, кроме обычных четырёх. D0-брана имеет сферическую симметрию, как и любая точечная частица, — по крайней мере, на том уровне популяризации, которого я пытаюсь придерживаться. Действительно, если точку повернуть на произвольный угол в любом направлении, она останется точкой, так же как и сфера или шар. D1-брана может принимать различные формы, но простейшая из них — это отрезок прямой, который в трёхмерном пространстве имеет ту же симметрию, что и круг или окружность. Если это непонятно, то представьте себе флагшток, торчащий вертикально вверх посередине тротуара. Я согласен, что флагшток, торчащий посреди тротуара, смотрится не на месте, но поставим его там для популяризации науки. Вы можете повернуть флагшток; если это тяжело, то просто посмотрите на него с разных сторон — он выглядит одинаково, откуда бы вы на него ни посмотрели, и то же самое справедливо для окружности, нарисованной на асфальте. Вы не можете её повернуть, но можете сами встать от неё с любой стороны и убедиться, что она выглядит одинаково, откуда бы вы на неё ни посмотрели.

Симметрия — это расширение понятия «одинаковость». Чтобы не наскучить вам хождением вокруг флагштока, я приведу более интересный пример. Предположим, что у нас есть проигрыватель грампластинок — для читателей младше меня поясню, что это устройство, снабжённое вращающимся диском, на который сверху кладётся грампластинка типа тех, что вы видели у ди-джеев на дискотеках. Если диск проигрывателя ровный, без вмятин и царапин, хорошо сбалансирован, то на взгляд практически невозможно определить, вращается он или нет. И всё потому, что он имеет круговую симметрию. А теперь положим на диск проигрывателя пластинку. Глядя на неё, сразу же можно сказать, вращается она или нет, потому что на центральной наклейке обычно присутствует несимметричная надпись. Но предположим, что наклейки нет, а пластинка не имеет видимых дефектов, останется ли что-нибудь, что указывает на вращение пластинки? Да. Звуковая дорожка на пластинке образует спиральный узор, и если внимательно присмотреться, то можно увидеть, как дорожки как будто бы сбегаются к центру, а если мы опустим на пластинку иглу звукоснимателя, то она, следуя по звуковой дорожке, будет медленно перемещаться к центру пластинки. Закрутив диск проигрывателя в обратную сторону, мы увидели бы, что игла звукоснимателя стала перемещаться от центра пластинки к краю. Этот пример служит иллюстрацией того факта, что совершенно необязательно наблюдать движение какой-либо несимметричной метки,

чтобы установить факт вращения, — вращение можно обнаружить и другими, зачастую совершенно неожиданными методами.

Элементарные частицы, в частности электроны и фотоны, тоже постоянно вращаются. Физики употребляют для характеристики вращения частицы термин *спин*. Направление спина совпадает с направлением оси вращения. Спин электрона может быть направлен в любом направлении, отличном от направления движения самого электрона, подобно тому как теннисный мяч может быть при ударе закручен мастерским ударом в любую сторону. В отсутствие внешних воздействий направление оси вращения (или спина) электрона не меняется. Оно может измениться только под действием внешних электромагнитных сил. Атомные ядра, как и электроны, имеют спины. Это свойство атомных ядер используется в магнитно-резонансной томографии (МРТ). Под действием сильного магнитного поля спины протонов — ядер атомов водорода, которые входят в состав практически любых тканей организма пациента, — выстраиваются в одном направлении. Затем тело пациента облучается радиоволнами, которые изменяют направление спинов части атомов. Возвращаясь в исходное, выстроенное состояние, атомы излучают радиоволны, являющиеся своего рода эхом той волны, которой до этого облучили атомы. При помощи сложных математических алгоритмов МРТ-аппарат, анализируя это эхо, строит трёхмерное изображение внутренних органов пациента.

Фотоны тоже имеют спины, но спины фотонов не могут иметь произвольную ориентацию. Ось «вращения» фотона всегда направлена в направлении его движения. Это ограничение сидит как заноза в сердце современной физики элементарных частиц и приводит нас к новому типу симметрии, называемому *калибровочной симметрией*. Термин «калибровка» отсылает нас к метрологии и к измерительным приборам. Например, для калибровки давления в шинах используется измерительный прибор — манометр, а калибр орудия — это характеристика диаметра ствола. В физике, когда объект может быть описан несколькими различными способами и не видно оснований предпочесть один способ другому, калибровка как раз и является механизмом выбора конкретного варианта описания. Калибровочная симметрия отражает эквивалентность различных способов калибровки. Поскольку калибровка и калибровочная симметрия являются весьма абстрактными понятиями, позвольте мне снова отвлечься на житейскую аналогию, прежде чем продолжить повествование. Помните, я говорил о том, как сложно на глаз определить, вращается или нет идеальный симметричный диск проигрывателя? Удобный способ

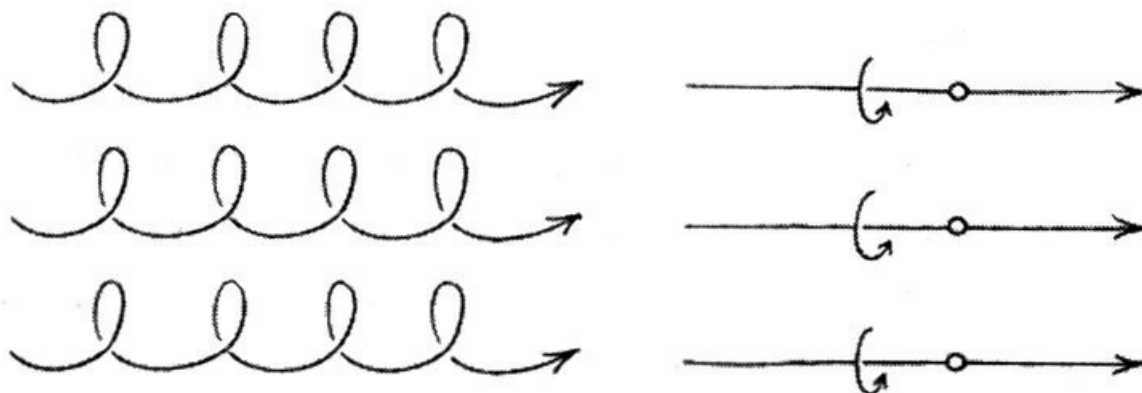
разрешить проблему — поставить маркером точку на краю диска. Не важно, на каком краю вы её поставите — на ближайшем к вам или на дальнем, вместо точки можно провести линию от центра диска к краю, — важно лишь, чтобы ваша метка не обладала круговой симметрией относительно оси вращения диска. После этого сразу станет видно, вращается диск или нет. Выбор места, куда вы поставите метку, — это выбор калибровки, а независимость результата от места, в котором поставлена метка, — это и есть калибровочная симметрия.

Калибровочная симметрия приводит к двум важным следствиям в квантово-механическом описании фотона. Первое — это безмассовость фотона, в результате чего фотон всегда движется со скоростью света. Второе — это ограничение на направление спина фотона, который всегда ориентирован в направлении движения. Мне трудно объяснить, каким образом эти два следствия вытекают из калибровочной симметрии, без углубления в дебри квантовой теории поля, но я попробую объяснить связь между ними. Рассмотрим сначала электрон, который имеет как массу, так и спин. Если электрон покоится, мы не можем утверждать, что его спин как-то ориентирован относительно направления его движения, хотя бы потому что электрон никуда не движется. С другой стороны, фотон, будучи безмассовым, не может покоиться. Он всегда движется, причём со скоростью света. Специальная теория относительности утверждает, что движущиеся тела сокращаются в направлении движения, причём при движении со скоростью света продольный размер движущегося тела стремится к нулю. Представим себе летящее вращающееся кольцо, ориентированное произвольным образом. По мере приближения к скорости света кольцо будет сплющиваться, стремясь стать перпендикулярным к направлению движения, а значит, ось его вращения будет стремиться к этому направлению. Таким образом, фотон,двигающийся со скоростью света, не может иметь спин, ориентированный иначе чем по направлению движения. Иначе говоря, безмассовость частицы приводит к ограничению на возможное направление её спина.

Следствия калибровочной симметрии делают её совершенно непохожей на те симметрии, которые мы обсуждали ранее. Она выглядит скорее как набор правил. Фотон не может покоиться из-за калибровочной симметрии. Спин фотона не может иметь произвольное направление из-за калибровочной симметрии. Есть ещё одно важное следствие: электрон имеет электрический заряд из-за калибровочной симметрии. Последнее лучше всего проиллюстрировать аналогией между калибровочной и вращательной симметрией. Калибровочная симметрия электрона настолько

похожа на вращательную симметрию, что иногда даже говорят о калибровочном «вращении». Но калибровочное вращение — это не вращение в пространстве, а более абстрактное понятие, имеющее отношение к одному из способов квантово-механического описания электрона. В отличие от вращения диска проигрывателя, «вращение» электрона имеет квантово-механический смысл, оно соответствует определённой калибровочной симметрии. И вот это абстрактное квантово-механическое «вращение» электрона и есть, по сути, его электрический заряд. Заряд электрона отрицателен, а заряд позитрона положителен, — это означает, что они в абстрактном калибровочно-симметричном смысле «вращаются» в разные стороны.

Оказывается, что введение дополнительных измерений позволяет сделать предыдущий разговор более предметным. Допустим, что дополнительное измерение имеет форму кольца, и представим, что частица движется в этом измерении по окружности. Она может двигаться как по часовой стрелке, так и против. Если это кольцо очень-очень мало, мы не сможем обнаружить движение в этом измерении, но тем не менее частица будет вращаться в этом измерении либо в одну, либо в другую сторону. Двигаясь в одном направлении, частица будет иметь положительный заряд, двигаясь в другом — отрицательный. Представляя дополнительные измерения в виде миниатюрных колец, или, как принято говорить, *свёрнутых измерений*, мы не должны удивляться тому, что их калибровочная симметрия настолько похожа на вращательную. Калибровочная симметрия электрического заряда — фактически то же самое, что и симметрия окружности. Частица может двигаться в этом измерении только в двух возможных направлениях — условно говоря, по часовой стрелке и против. Соответственно в природе существуют только два электрических заряда: положительный и отрицательный.



В корпускулярном описании спины фотонов ориентированы в одном

направлении — в направлении движения. В волновом описании электрическое поле имеет форму штопора. Если спины всех фотонов ориентированы так, как я нарисовал, то такой свет называется циркулярно поляризованным

Идея представить электрический заряд в виде движения в свёрнутом измерении была предтечей теории струн. Ей почти сто лет, но за это время никому не удалось что-нибудь реально посчитать на её основе. Часть великого замысла теории струн как раз и состоит в том, чтобы заставить упомянутую идею работать, но у нас есть много дополнительных измерений, чтобы поиграть с ними, и это вселяет некоторую надежду. То есть независимо от того, правилен наш подход или нет, следует признать, что электрический заряд и электромагнитные взаимодействия фундаментально связаны с вращательной симметрией и с движением по окружности.

Может показаться, что мы слишком далеко ушли от D-бран, но это не так. D-браны как раз служат примером тому, о чём мы только что говорили. Как мы видели, D-браны обладают вращательной симметрией. Вспомним хотя бы сравнение D1-браны с флагштоком посреди тротуара, имеющим ту же симметрию, что и окружность. Вращательная симметрия помогает объяснить многие свойства D-бран, но и калибровочная симметрия играет огромную роль. Вот первый намёк на связь D-бран и калибровочной симметрии: если мы возьмём D1-брану, представляющую собой прямую, и «стукнем» по ней в определённом месте, то от места удара в разные стороны побегут два небольших возмущения. Эти возмущения будут двигаться со скоростью света, ведя себя как безмассовые частицы, и ничто не заставит их остановиться. Мы уже знаем, что безмассовые частицы, такие как фотоны, обладают калибровочной симметрией, и калибровочная симметрия заставляет их быть безмассовыми. То же самое происходит и с возмущениями на D1-бране. Я, конечно, сильно всё упрощаю, потому что возмущения на D1-бране, конечно же, совсем не похожи на фотоны. Например, они не имеют спина, но если мы рассмотрим такие же возмущения на D3-бране, то некоторые из них будут иметь спин и с математической точки зрения ничем не будут отличаться от фотонов. Как только этот факт был установлен, физики тут же кинулись строить модели мира, в которых он представляет собой D3-брану. Правда, всё ещё остаются дополнительные измерения, но мы не можем их наблюдать, поскольку мы застряли на бране. Кажется, что достаточно оснастить эту брану фотонами, и идея будет вполне жизнеспособной. Всё, что нам нужно для полного

удовлетворения, это ещё пятнадцать или около того элементарных частиц. К сожалению, D3-брана сама по себе не обеспечивает их существования. В настоящее время в этом направлении ведутся интенсивные исследования, цель которых состоит в том, чтобы выяснить, какие ещё ингредиенты нам нужны для построения мира на D3-бране.

D-браны в теории суперструн также имеют заряд, похожий на электрический. В случае D0-бран такая аналогия оказывается вполне точной: у них есть заряд, который мы могли бы обозначить как +1. Существует ещё один объект — анти-D0-брана, несущий заряд -1. А теперь вспомним наш разговор о почти столетней идее о том, что заряд связан с дополнительным свёрнутым измерением. Она отлично работает для D0-бран. Одним из прорывов второй суперструнной революции стало открытие, что теория суперструн содержит дополнительное скрытое измерение за пределами тех десяти, что к тому времени уже были задействованы. D0-брана, которая, как вы помните, выглядит точкой, может быть описана как частица, движущаяся по окружности в этом одиннадцатом измерении. Если частица движется в одиннадцатом измерении в противоположном направлении, то это анти-D0-брана. Осознание этого достижения заставило рассматривать одиннадцатимерную супергравитацию всерьёз. В каком-то смысле струнные теоретики уже давно изучали её, сами того не осознавая! И получается, что одиннадцатое измерение не должно быть свёрнуто в крохотную окружность. По мере того как мы увеличиваем радиус окружности, возрастает сила взаимодействия между суперструнами. Они делятся и соединяются столь быстро, что попытки уследить кажутся безнадежными. Но по мере усложнения динамики струнной картины новое измерение буквально раскрывается. Одиннадцатимерная супергравитация становится простейшим инструментом описания сильно взаимодействующих суперструн. Мы не знаем точно, как объединить квантовую механику с одиннадцатимерной супергравитацией, но мы убеждены, что должен существовать какой-то способ это сделать, потому что теория струн является полностью квантово-механической теорией и она, безусловно, включает одиннадцатимерную супергравитацию, когда взаимодействия суперструн становятся сильными. Этот круг идей вскоре получил название М-теории.

Струнные теоретики возлагают большие надежды на то, что все наши представления о заряде и калибровочной симметрии могут просто вытекать из скрытой многомерной природы мира. В главе 7 мы подробно обсудим, как это может работать. В главах 6 и 8 я расскажу, как дополнительные измерения могут быть использованы для описания сильных

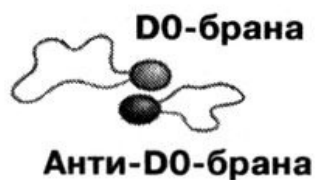
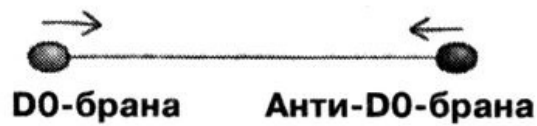
взаимодействий типа взаимодействия между кварками и глюонами внутри протона. Чтобы дать вам общее представление, сообщу, что при некоторых обстоятельствах или в некотором приближении эти взаимодействия могут быть описаны в терминах пятого измерения. Это пятое измерение «раскрывается» подобно одиннадцатому измерению М-теории, когда взаимодействия становятся слишком сильными, чтобы отслеживать их в обычных четырёх измерениях.

Как я уже говорил ранее, D0-браны несут некий заряд, и существует ещё один объект, называемый анти-D0-браной, который несёт противоположный заряд. Что произойдёт, если D0-брана столкнётся с анти-D0-браной? Ответ, очевидно, состоит в том, что они взаимоуничтожатся, исчезнув во вспышке излучения. Сейчас я более подробно расскажу, как взаимодействуют между собой D0-браны и анти-D0-браны.

Для начала давайте вернёмся к обсуждавшимся в четвёртой главе растянутым между D0-бранами струнам. Моей целью было рассказать о трёх составляющих массы струны: это масса покоя, возникающая из энергии натяжения струны между бранами; энергия колебаний, аналогичных колебаниям фортепианной струны; и последняя составляющая — вклад квантовых флуктуаций, которых отрицателен и от которого очень трудно избавиться. Последний компонент доставил массу хлопот, потому что приводил к таким вещам, как тахионы с мнимой массой. Я упомянул тогда, что одним из способов избавления от тахионов является помещение D0-бран достаточно далеко друг от друга, чтобы вклад энергии натяжения стал больше отрицательного вклада квантовых флуктуаций. Но давайте перевернём задачу. Что произойдёт, если мы возьмём две D0-браны, расположенные далеко друг от друга, и начнём их постепенно сближать? Ответ зависит от многих допущений. Чтобы рассуждать строго, мы должны чётко определить, чем отличаются D0-браны от анти-D0-бран. Единственное различие между ними заключается в их заряде. Рассмотрим сначала случай двух D0-бран, приближающихся друг к другу. Они имеют одинаковый заряд. Это означает, что они отталкиваются друг от друга так, как это делают электроны. Но они также имеют массу, поэтому они испытывают гравитационное притяжение друг друга. Оказывается, что сила притяжения полностью компенсирует отталкивание. Получается, что браны почти не замечают друг друга. А следовательно, суперструна, натянутая между двумя D0-бранами, никогда не превратится в тахион. Это скромный пример чудесного решения проблемы тахионов в теории суперструн.

Всё меняется, когда мы располагаем рядом D0-брану и анти-D0-брану.

Они имеют противоположные заряды, следовательно, они притягиваются друг к другу, как электрон и протон. Гравитационное притяжение никуда не исчезает, потому что D0-брана и анти-D0-брана имеют одинаковую массу, а гравитация реагирует на массу. Значит, теперь мы имеем сильное притяжение между D0-браной и анти-D0-браной. Струна, натянутая между ними, «знает» об этой особенности. Это «знание» проявляется в том, что струна становится тахионом, когда D0-брана и анти-D0-брана оказываются слишком близко. Я отметил в предыдущей главе, что в современном представлении о тахионе последний является неустойчивым, и привёл пример карандаша, стоящего на острие. В конце концов он упадёт. D0-брана, находящаяся в непосредственной близости от анти-D0-браны, также нестабильна. Как я уже сказал, они взаимно уничтожаются. Процесс уничтожения аналогичен падению карандаша. Можно посмотреть на этот процесс с другой стороны, представив одиннадцатое измерение в форме окружности. D0-брана, являясь частицей, движется по этой окружности. Анти-D0-брана движется по ней в противоположном направлении. В конце концов они столкнутся. Когда это произойдёт, обе браны исчезнут во вспышке излучения. Детали этого процесса должны дать нам какое-то представление о М-теории, но, к сожалению, никто этого достаточно хорошо не понимает. Беда в том, что процесс аннигиляции происходит очень быстро и очень трудно рассчитать, каким образом большое количество энергии высвобождается в течение короткого времени. Единственное, в чём можно быть уверенным, основываясь на формуле $E = mc^2$, так это в том, что выделяемая энергия складывается из удвоенной энергии покоя D0-браны и кинетической энергии, которую D0-брана и анти-D0-брана, возможно, имели перед уничтожением.



Слева: D0-брана и анти-D0-брана сближаются и аннигилируют в струны. Натянутая между ними струна становится тахионом, когда браны оказываются слишком близко. Тахионы считаются неустойчивыми. Справа: Когда D0-брана далеко от анти-D0-браны, будущий тахион практически стабилен. Когда D0-брана и анти-D0-брана оказываются слишком близко, тахион «скатывается вниз», что эквивалентно взаимоничтожению D0-браны и анти-D0-браны

Браны и чёрные дыры

Я представил D-браны в качестве места в пространстве-времени, где закреплены концы струны, но, оказывается, есть ещё один способ представления D-бран: в качестве чёрных дыр с нулевой температурой. Лучше всего это представление работает для случая большого количества бран, расположенных одна над другой. Начнём с D0-бран. Как я только что объяснил, в теории суперструн две D0-браны не оказывают силового воздействия друг на друга. Их гравитационное притяжение компенсируется электростатическим отталкиванием, и они не аннигилируют друг с другом подобно D0-бранам и анти-D0-бранам. Так что мы можем рассматривать две D0-браны рядом друг с другом или вообще любое количество D0-бран, не беспокоясь о таких неприятностях, как аннигиляция. Но чем больше D0-бран мы собираем в наш клубок, тем сильнее искривляется пространство вокруг них, принимая в пределе форму горизонта чёрной дыры. Для пущего правдоподобия возьмём миллион D0-бран, помещённых рядом друг с другом, и одну D0-брану, движущуюся рядом. Одинокая D0-брана не испытывает на себе ни притяжения, ни отталкивания. Впрочем, это не совсем так. На самом деле одинокая D0-брана не испытывает никакой силы, если она не движется. Если же она движется, то она испытывает небольшую силу, тянущую её, как буксир, к другим бранам. Подобная сила удерживает наш клубок из миллиона бран от рассыпания. Для анти-D0-браны всё обстоит совершенно по-другому. Она испытывает как гравитационное, так и электростатическое притяжение, и, оказавшись достаточно близко от нашего миллионнобранного клубка, уподобляется одной из тех рыб, что подплыли слишком близко к стоку из озера, — её засасывает в него, и никакой физический процесс не может остановить её после того, как она подошла ближе определённой дистанции. Это, так сказать, «на пальцах», и есть понятие горизонта чёрной дыры.

А почему горизонт имеет нулевую температуру? Это объяснить труднее. Всё дело в поведении одинокой D0-браны, которая не испытывает на себе результирующей силы со стороны нашего клубка. Оказывается, что факт отсутствия такой силы глубоко связан с нулевой температурой. Оба этих свойства вытекают из требований суперсимметрии. Я отложу подробное обсуждение суперсимметрии до главы 7, а сейчас добавлю к тому, что мы постепенно узнаем о суперсимметрии, два утверждения. Первое: суперсимметрия относится к гравитонам и фотонам. Гравитоны

ответственны за гравитационное притяжение. Фотоны ответственны за электростатическое притяжение или отталкивание. Частное соотношение, предполагаемое суперсимметрией между гравитонами и фотонами, утверждает, что гравитационные и электростатические силы одинаковы. Второе: суперсимметрия гарантирует стабильность D0-бран. Это означает, что в теории струн не существует объекта легче D0-браны и, соответственно, D0-брана не может ни во что превратиться, если только не встретится с анти-D0-браной. И хотя D0-брана и кажется достаточно тяжёлой, она в корне отличается от тяжёлого ядра урана-235, которое может распадаться на более лёгкие ядра криптона и бария, в то время как бране распадаться не на что.

Клубки из D0-бран также стабильны. Они не могут распадаться на что-нибудь ещё. Единственное, что они могут, — это слегка вибрировать. Это точно такие же колебания, как и тепловые колебания атомов в куске угля. Как вы помните, энергия тепловых колебаний описывается формулой $E = k_B T$. Здесь E представляет собой дополнительную энергию тепловых колебаний. Например, когда вы применяете эту формулу к атому углерода в куске антрацита, то E является дополнительной энергией тепловых колебаний атома, но не его энергией покоя. Общая же энергия куска угля должна включать в себя энергию покоя всех атомов плюс энергию их тепловых колебаний. Атомы также испытывают квантовые флуктуации относительно своих средних положений, и, в принципе, энергия нулевых колебаний тоже входит в общую энергию. Это всё очень напоминает наши предыдущие обсуждения о трёх вкладах в массу струны. Полная масса куска угля может быть получена из его полной энергии при помощи формулы $E = mc^2$.

А теперь перенесём всё сказанное о куске угля на наш клубок из D0-бран. У них есть масса покоя и масса, соответствующая энергии нулевых колебаний. В случае D0-бран вклад энергии нулевых колебаний в полную массу в точности равен нулю. Отслеживание вклада этих квантовых флуктуаций доставляет постоянную головную боль теоретикам. Но D0-браны обязаны обладать хоть какой-то энергией тепловых колебаний. Если так, то клубок из D0-бран должен иметь некоторую температуру и соответствующую ей дополнительную массу. Но дополнительный заряд клубку эта добавка не приносит. Следовательно, если одинокая D0-брана оказывается поблизости от клубка с ненулевой температурой, она будет испытывать дополнительное гравитационное притяжение, но не будет испытывать дополнительного электростатического отталкивания и

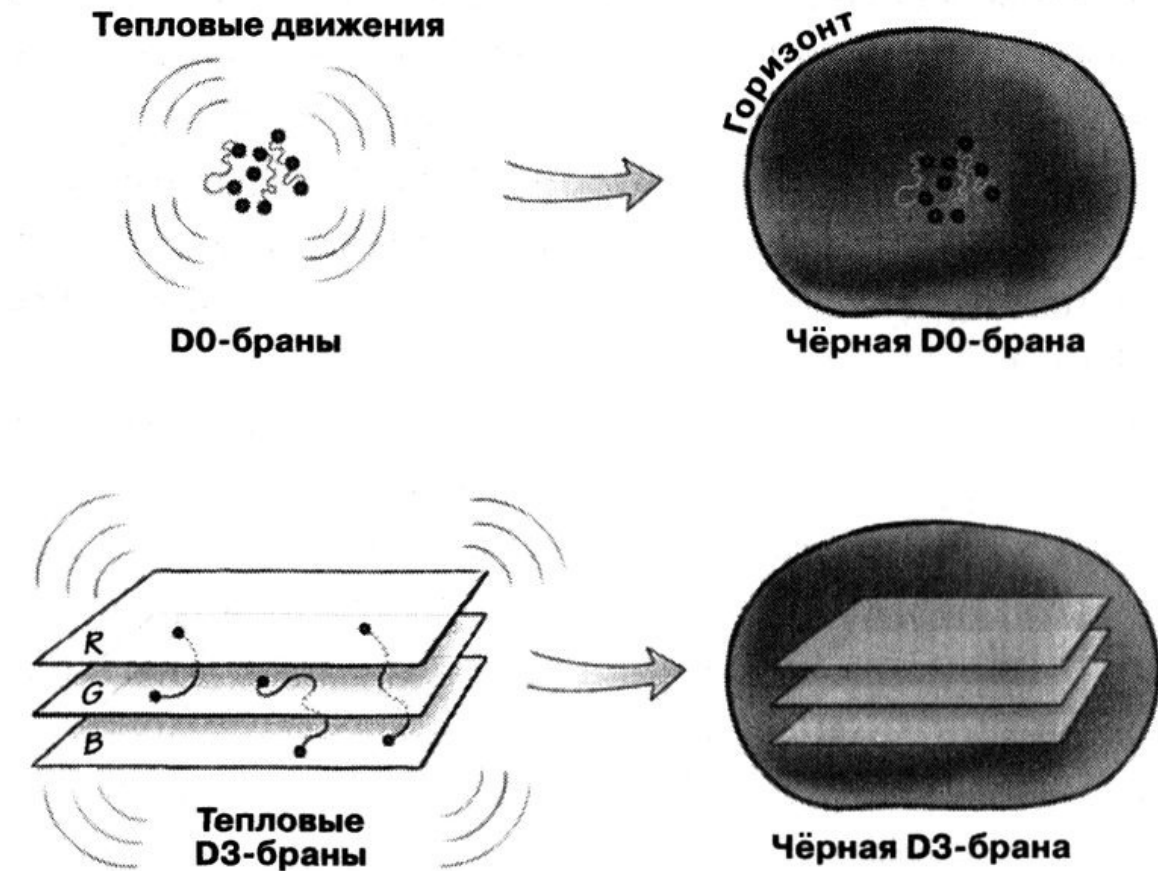
суммарная сила, действующая на неё, не будет равна нулю. Если же мы охладим клубок до абсолютного нуля, то термальная добавка к его массе исчезнет и вместе с ней исчезнет и дополнительная гравитационная сила притяжения. Таким образом, отсутствие дополнительной силы притяжения, действующей на D0-брану, приводит нас к требованию нулевой температуры клубка.

Если все эти разговоры о D0-бранах сбили вас с толку, давайте снова вернёмся к куску угля. Его тепловые колебания дают вклад в его полную энергию, так же как и у клубка D0-бран. Эта полная энергия по-прежнему является энергией покоя куска угля. «Покой» в данном случае означает, что кусок угля лежит неподвижно на столе, а не летит, со свистом рассекая воздух. Полная энергия покоя связана с полной массой формулой $E = mc^2$. Значит, нагретый кусок угля в действительности тяжелее, чем холодный, и точно так же горячий клубок D0-бран тяжелее холодного. Мы можем подсчитать, какую добавку к массе получает кусок угля при нагревании. Очень горячий уголь имеет температуру около 2000 кельвинов. Солнечная фотосфера, как вы помните, в три раза горячее. Формула $E = k_B T$ даёт оценку энергии одного атома — но только оценку. Используя эту довольно грубую оценку, я получил, что нагревание угля до 2000 кельвинов увеличивает его массу покоя примерно на 10^{-11} от первоначальной величины. Это одна стомиллиардная. Тем не менее это существенно больше, чем относительное увеличение массы спринтера на стометровке за счёт его кинетической энергии. Но это во много-много раз меньше, чем доля массы покоя, высвобождающаяся при ядерных реакциях распада. Вот, кстати, почему атомные электростанции считаются перспективнее угольных. Одна тонна урана, загруженная в современный ядерный реактор, способна произвести столько же электроэнергии, сколько сто тысяч тонн угля.

Сомневаюсь, что вы обрадуетесь, узнав, что при описании D0-бран я использовал два упрощения. Во-первых, я утаил от вас, что D0-браны взаимодействуют друг с другом ещё одним способом и переносчиком этого взаимодействия являются безмассовые частицы, отличные от фотонов и гравитонов. Эти частицы называются *дилатонами*, и они обладают нулевым спином. Всё, что ранее было сказано о гравитационном взаимодействии, должно быть расширено с учётом дилатонов. Однако даже с учётом этой небольшой добавки к гравитации все основные выводы остаются прежними. Во-вторых, D0-браны обладают горизонтом, поэтому трудно сказать, вибрируют ли они, подобно атомам. Всё, что мы можем

сказать, и всё, в чём мы можем быть уверены, — это в том, что клубок D0-бран имеет дополнительную энергию и, как следствие, дополнительную массу. Более точное описание чёрных дыр, образованных вибрирующими D0-бранами, представляет в теории струн большую проблему. Лучше всего исследованы случаи D1-бран и D5-бран. Важным случаем являются D3-браны, которые исследованы несколько хуже, а вот с количественным описанием D0-бран всё грустно, несмотря на то что в последнее время в этой области достигнут значительный прогресс.

Главное, что меняется при переходе от изучения чёрных дыр, образованных D0-бранами, к чёрным дырам, образованным D1-бранами или D3-бранами, — это форма горизонта. Горизонт D3-бран очень трудно представить наглядно, потому что D3-брана простирается за пределы привычных трёх пространственных измерений. Более или менее наглядно можно представить себе только одно дополнительное измерение, чтобы получить правильное представление о том, как может выглядеть горизонт в многомерном пространстве. Это чрезвычайно интересное занятие, и в последующих главах я постараюсь всё объяснить, а сейчас попытаемся рассмотреть D1-брану в привычном четырёхмерном пространстве-времени, предположив, как мы уже ранее это делали, что нам каким-то образом удалось избавиться от лишних шести измерений. D1-брана вытянута вдоль прямой, выглядит как флагшток, а её квантовые флуктуации напоминают рябь на этом флагштоке, но если мы расположим рядом друг с другом много D1-бран, то количество различных типов ряби, или *мод колебаний*, существенно возрастет. Удобнее всего представить эти моды в виде струн. Я не оговорился, сейчас объясню. Струна может быть закреплена одним концом на одной D1-бране, а вторым — на другой, при этом концы струн могут скользить по D1-бранам. Струны, имеющие концы, называются *открытыми струнами* в противоположность *закрытым струнам*, замкнутым в кольцо. Наличие у D1-бран тепловых колебаний эквивалентно наличию прикрепленных к ним струн, и, как оказалось, открытые струны описывают все возможные типы малых колебаний D1-бран. Другими словами, струны и есть та самая рябь на D1-бранах.



Слева сверху: клубок из D0-бран обладает тепловой энергией. Справа сверху: форма горизонта вокруг D0-браны, описывающая её тепловые свойства. Слева внизу: три D3-браны одна над другой. Струны между бранами ведут себя подобно глюонам и обеспечивают тепловую энергию. Справа внизу: форма горизонта вокруг D3-бран, описывающая их тепловые свойства

Если взять много D1-бран, то они вместе с прикреплёнными к ним открытыми струнами искривят пространство-время вокруг себя, что приведёт к возникновению горизонта, имеющего круговую симметрию, поскольку D1-браны имеют протяжённость в одном измерении. Этот горизонт можно представлять в виде цилиндра, окружающего пучок D1-бран, и, как вы видите, его форма отличается от сферически симметричного горизонта клубка D0-бран. Некоторые из струнных теоретиков предпочитают при описании группы D1-бран, окружённой горизонтом, использовать термин *чёрная брана*, чтобы отличать данный случай от чёрной дыры, образованной клубком D0-бран и имеющей сферический горизонт. Я предпочитаю не заморачиваться с терминологией и каждый раз

объяснять, что я имею в виду под чёрной браной или чёрной дырой, а всегда конкретно указывать на тип геометрии горизонта, используя термины *чёрная D0-брана*, *чёрная D1-брана* и так далее.

Интересно, что исторически геометрия, описывающая чёрную дыру (или чёрную брану), образованную клубком D-бран, была известна задолго до того, как теоретики поняли, что такое D-браны. Всё, что нужно для описания чёрной браны, — это решить уравнения супергравитации, которая, как вы, возможно, помните, является низкоэнергетическим пределом теории суперструн, когда мы пренебрегаем всеми обертонами колебаний струн, за исключением безмассовых. Супергравитация всё ещё весьма сложная теория, но она куда проще полной теории суперструн. Конструирование чёрных бран было одним из стимулов, которым супергравитация толкала развитие теории струн во время второй суперструнной революции.

Браны в М-теории и границы мира

До сих пор, рассказывая о бранах, я говорил только о D-бранах, потому что из всех прочих бран они наиболее известны, наиболее хорошо изучены и наиболее разнообразны. Но было бы неправильно обойти вниманием другие типы бран только потому, что они выглядят «страньше», чем D-браны. И самые странные из них — это браны М-теории.

Напомню, что М-теория — это одиннадцатимерная квантово-механическая теория, включающая одиннадцатимерную супергравитацию в качестве низкоэнергетического предела. Несмотря на то что на момент написания этих строк М-теория уже разменяла второй десяток лет своей жизни, данное мной только что определение — это фактически и всё, что мы можем сказать об М-теории. Я без стеснения должен признать, что это разочаровывает, хотя в одиннадцатимерной супергравитации есть много интересных вещей. В частности, она содержит два вида чёрных бран: М2-браны и М5-браны, похожие на чёрные браны теории струн и состоящие из группы D-бран, окружённой горизонтом. Особенно похожи на них D3-браны.

М2-браны имеют протяжённость в двух пространственных измерениях, а М5-браны — в пяти. Подобно D-бранам они могут растягиваться вдоль любого из одиннадцати измерений М-теории, изгибаться и замыкаться сами на себя. К сожалению, мы не очень хорошо представляем себе, как они флуктуируют. Мы можем описать движение М2-браны, если она более-менее плоская. Такое движение чем-то напоминает рябь на D1-бране, о которой шла речь ранее. Таким же способом описывается и движение М5-браны. Но в случае множества М-бран, расположенных одна над другой, всё становится настолько сложным, что за прошедшие годы никто не сумел в этом разобраться. Буквально в тот самый момент, когда я пишу эти строки, непробиваемая стена непонимания, похоже, дала трещину: появилось несколько статей с попытками описания динамики двух или более М2-бран, расположенных рядом друг с другом, но мы всё же пока очень, очень далеки от того уровня понимания, который мы имеем для случая струн. Мы можем описать движение струны как классически, так и квантово-механически, независимо от того, вытянута струна в прямую линию или свёрнута в клубок, но на пути такого же описания М2-бран пока ещё слишком много препон, не говоря уже о М5-бранах, где вообще чёрт ногу сломит.

В М-теории обнаружился ещё один, совершенно мистический тип бран. Эта брана представляет собой край пространства-времени — место, где пространство-время заканчивается. Обычно пространство-время в теории струн не может оборваться просто так, так же как и струна не может закончиться иначе как на D-бране. Браны, ограничивающие пространство-время, — это одна из дичайших идей в М-теории, но при этом она почти единодушно принимается теоретиками.

Оказывается, на краю пространства-времени есть фотоны, такие же, как фотоны на D-бранах. Но фотоны с края пространства-времени участвуют в особенно интересной теории под названием *суперсимметричная E8-калибровочная теория*. В середине 1980-х годов, после первой суперструнной революции, было потрачено много усилий на попытки получить на основе этой теории описание электромагнитных и ядерных взаимодействий, и дело повернулось так, что упомянутая теория может быть интерпретирована как М-теория пространства-времени, заканчивающегося на бранах.

Браны, на которых заканчивается пространство-время, являются одним из направлений, в котором М-теория может сделать решительный шаг за пределы одиннадцатимерной супергравитации. Для этого требуется немного квантовой механики и расчёт масс M2- и M5-бран. Когда M2-брана плоская и бесконечно простирается в пространстве, её масса бесконечна. То же самое касается и M5-браны. Из квантовой механики следует, что масса M2-браны, приходящаяся на единицу площади, есть константа. В этом отношении М-теория более информативна, чем теория струн, поскольку масса струны, приходящаяся на единицу длины, насколько мы знаем, произвольна.

Кроме D-бран и M-бран разных мастей, в теории суперструн есть ещё одна брана. На самом деле она была первой браной, с которой стало что-то понятно. Это 5-брана, похожая на M5-брану, только живущая не в одиннадцати, а в десяти измерениях. Иногда её называют *солитонной 5-браной*; я тоже буду использовать это название за неимением более осмысленного. Солитоны являются широко распространённым в физике понятием, и в большинстве своём это тяжёлые и устойчивые объекты. Классическим примером солитона является волна, которая движется вдоль канала, не разрушаясь и не рассеивая свою энергию. Слово «солитон» означает «одинокий». Предполагается, что солитон имеет собственную идентичность. В настоящее время мы считаем, что D-браны также имеют собственную идентичность. Все браны можно в некотором приближении описать в теории струн как солитоны. Но здесь я буду использовать термин

«солитонный» только для описания 5-бран.

Солитонную 5-брану стоит отметить по двум причинам. Во-первых, когда мы перейдём к разговору о дуальностях, будет полезно знать, что причиной существования солитонной 5-браны является дуальность симметрии по отношению к другим бранам. Во-вторых, в нашем понимании солитонная 5-брана является примером того, что пространство-время не имеет смысла само по себе, но существует только в описании движения струны. Я попытался проиллюстрировать эту идею в главе 4, используя аналогию между струнами в пространстве-времени и автомобилями на гоночном треке. Самым важным в этой иллюстрации было то, что факт существования автодрома можно было вывести путём дедукции из записей GPS-навигаторов, установленных на автомобилях. Главная идея солитонной 5-браны чем-то похожа на иллюстрацию с автодромом. Мы начинаем с предположения, что суперструна движется по поверхности сферы. На самом деле по техническим причинам сфера, которую мы используем, имеет на одно измерение больше, чем та, которая приблизительно описывает форму поверхности Земли. Такая гиперсфера называется 3-сферой. Я хочу показать, что она, как и автодром в моей аналогии, замкнута, конечна и имеет определённый размер. Далее, если вы помните, суперструны довольно капризны в отношении геометрии, в которой они готовы жить. Они настаивают на десяти измерениях и на том, чтобы в их мире работали уравнения общей теории относительности. Начав с 3-сферы, необходимо добавить время и ещё шесть пространственных измерений. Общая форма того, что получается в итоге, довольно своеобразна. Вот как это выглядит. Пространство далеко от солитонной 5-браны — плоское и десятимерное. Но при перемещении внутрь браны вы обнаружите глубокую яму в пространстве-времени, имеющую определённый размер, а именно размер 3-сферы, с которой мы начали. Эта яма связана с чёрной дырой, так же как и любая другая брана в теории струн. Но оказывается, вы можете зайти сколь угодно глубоко в яму солитонной 5-браны, не пересекая горизонт. Это означает, что независимо от того, насколько глубоко вы оказались в солитонной 5-бране, вы всегда можете развернуться и вернуться обратно. Глубоко в яме физика становится довольно странной: струны начинают взаимодействовать сильно, и в некоторых случаях дополнительное измерение раскрывается, возвращая нас в одиннадцатимерный мир.

Я надеюсь, что эта глава оставит у вас два ярких впечатления. Во-первых, струны — это далеко не вся теории струн. Во-вторых, вся теория струн чрезвычайно сложна и детализированна. По крайней мере, она

кажется сложной и детализированной. Часто, когда вещи оказываются настолько сложными и детальными, более глубокий уровень понимания упрощает дело. Хорошим примером является химия, где существует около ста различных химических элементов. Знание о том, что все они состоят из протонов, нейтронов и электронов, существенно упрощает понимание химии. Другой пример — обилие элементарных частиц в физике высоких энергий. В ней присутствуют фотоны, гравитоны, электроны, кварки (шесть видов!), глюоны, нейтрино и т. п. Теория струн стремится нарисовать объединяющую картину, где каждая из этих частиц является колебательной модой струны. И вдруг на определённом этапе вас постигает разочарование: вы обнаруживаете, что теория суперструн в свою очередь тоже начинает дробиться на множество разнообразных объектов. С другой стороны, это разнообразие форм образует чрезвычайно плотную ткань, в которой каждый тип бран тесно связан с другим и со струнами, и эта связь будет предметом разговора следующей главы.

Трудно удержаться от волнующего вопроса: есть ли что-то более глубокое и простое, чем браны, — возможно, своего рода «суббраны», из которых состоят все браны? Я не вижу каких-либо намёков на суббраны в математике теории струн. Но с другой стороны, есть основания подозревать, что наше понимание этой математики является неполным. Третья суперструнная революция, если она когда-нибудь произойдёт, будет иметь дело с множеством нерешённых проблем.

Глава 6

Дуальности в теории струн

Дуальность — это отношение, устанавливающее эквивалентность двух на первый взгляд различных вещей. Я уже приводил в пример шахматную доску. Вы можете сказать, что шахматная доска белая с чёрными клетками или чёрная с белыми клетками. Это два дуальных описания одного и того же предмета. Вот другой пример: вальсирование. Возможно, вы видели в старых фильмах пары, танцующие вальс. Мужчина и женщина кружатся лицом друг к другу. Самое главное в исполнении вальса — это движения ног. Когда мужчина делает шаг вперёд левой ногой, женщина делает шаг назад правой; когда мужчина делает шаг вперёд правой ногой, женщина делает шаг назад левой. Когда мужчина поворачивается, женщина тоже поворачивается, оставаясь лицом к лицу с мужчиной. Если отбросить такие движения, как индивидуальное вращение партнёров, например в фигурном вальсе, то женщина всегда повторяет движения мужчины, только с обратным знаком. Есть старая американская шутка, согласно которой Джинджер Роджерс делает всё то же самое, что и Фред Астер, только наоборот и на каблуках.^[1] Так вот, у струн — то же самое: любой объект, описанный неким способом, может быть связан с другим объектом, описанным другим, дуальным, способом.

Когда вы смотрите старый фильм с участием Джинджер и Фреда, то очарование танца создаётся точным зеркальным повторением партнёрами движений друг друга. Так же и в теории струн: когда вы обнаруживаете дуальное описание, вы начинаете гораздо лучше понимать физику явления, чем при взгляде на него только с одной стороны. Ограничиваясь только одним из дуальных описаний, вы рассматриваете явление лишь с одной точки зрения, подобно тому как если бы вы смотрели на исполняемый танец только глазами Фреда или только глазами Джинджер. Впечатление от танца было бы неполным.

Вот реальный пример дуальности в теории струн. Мы говорили о струнах и о D1-бранах. И те и другие имеют протяжённость в одном пространственном измерении. Как и в предыдущей главе, я ограничусь 10-мерной суперструнной теорией, забыв пока про 26-мерную теорию струн, которая страдает нестабильностью тахионов. Самая известная дуальность теории струн, называемая *S-дуальностью*, связывает суперструны с D1-

бранами. Это интересно, но это только один аспект дуальности: как если бы я, рассказывая о вальсе, упомянул только, что женщина делает шаг назад правой ногой, когда мужчина делает шаг вперёд левой. Для полноты картины следует добавить, что S-дуальность присуща любой бране в суперструнной теории.

Но будем усложнять картину постепенно. Существуют несколько разновидностей суперструнной теории, различающихся типом разрешённых в них бран. Тип суперструнной теории, о котором я собираюсь рассказать, называется *IIВ*. Это название не слишком информативное — оно было предложено до того, как теоретики разобрались в различных вариантах теории струн, поэтому я вынужден дать краткие пояснения. Тип *IIВ* включает D1-браны, D3-браны, D5-браны, солитонные 5-браны и несколько других бран, слишком сложных для простой классификации. В то же время тип *IIВ* не включает D0-браны, D2-браны и прочие браны с чётным номером. Этот тип является теорией струн, но не является M-теорией, поэтому в нём отсутствуют M2-браны или M5-браны.

Вернёмся к S-дуальности. Я упомянул, что эта дуальность связывает струны и D1-браны. Оказывается, что она также связывает D5-браны с солитонными 5-бранами, а вот D3-браны S-дуальность связывает с такими же D3-бранами. Это значит, что если вы возьмёте струну, то дуальным к ней объектом будет D1-брана, но если вы возьмёте D3-брану, то дуальным к ней объектом окажется снова D3-брана. Можно ещё долго говорить об S-дуальности, но уже понятно, как, собрав воедино всё, что я только что рассказал, сконструировать что-то новое. Струны могут оканчиваться на D5-бранах — это следует из самого определения бран как места, где могут оканчиваться струны. Как наличие S-дуальности повлияет на предыдущее высказывание? S-дуальность утверждает, что мы можем заменить D5-брану на солитонную 5-брану, а струну — на D1-брану. Значит, можно сформулировать новое утверждение: D1-браны могут оканчиваться на солитонных 5-бранах. Это новое утверждение можно проверить независимым способом, и оно оказывается верным. Дуальности теории струн позволяют нам конструировать новые правила и теоремы, а также дают мощный инструмент доказательства и проверки существующих гипотез.

В общем случае дуальности теории струн задают дуальные отношения между двумя на первый взгляд различными теориями или теоретическими конструкциями. Сейчас уже известна вся паутина струнных дуальностей, и все они настолько хорошо согласованы, что вы можете начать построения

с какой-нибудь хорошо изученной браны и через несколько дуальностей и *деформаций* получить столь же хорошее описание другой браны, изучение которой другими способами было бы очень сложным.

Я употребил термин «деформация», но не объяснил, что это такое. Но прежде вернёмся к обсуждавшейся в предыдущей главе идее: в теории струн существует много различных типов бран, и было бы здорово в конечном итоге найти объединяющую картину, в которой все браны являются различными проявлениями одной и той же более глубокой структуры. Дуальности не годятся на эту роль. Они обменивают одни типы бран на другие. Иногда они обменивают браны на струны. На сегодняшнем уровне понимания, похоже, что все типы струн и бран находятся на одном и том же уровне структуры мироздания. Если приводить аналогии, то можно сказать, что мы понимаем природу бран гораздо лучше, чем химики понимали природу различных химических элементов после открытия периодической системы, но до появления атомной теории. Однако наше понимание бран сильно уступает пониманию химии, сформировавшемуся после открытия структуры атома.

Дуальности в теории струн были обнаружены в то время, когда я был студентом. Помню, я смотрел на них с некоторым скептицизмом: неужели это то, чему я хочу учиться? Они, конечно, были довольно интересной вещью, но казались довольно далёкими от главной цели: превращения «теории струн» в «теорию всего». Сегодня я понимаю, что этот скептицизм был неизбежным этапом становления нашего понимания теории. Некоторые из многообещающих перспектив экспериментальной проверки теории струн основаны именно на дуальностях.

Наше понимание струнных дуальностей меняется. S-дуальность на самом деле является одним из наиболее загадочных видов дуальности. Правило для соотнесения струн с D1-бранами хорошо изучено и проверено для случая, когда струны или D1-браны растянуты в прямую линию и почти неподвижны. Но разобраться в правилах S-дуальности для струн или D1-бран, свёрнутых произвольным образом и столь же произвольно сталкивающихся друг с другом, довольно тяжело. Трудность эта связана с сильным взаимодействием струн. Я описывал деление струны, используя аналогию с разветвляющейся водопроводной трубой. Поверхность трубы — это мировой лист струны, который представляет собой пространственно-временную поверхность, заметаемую струной в процессе движения. Процесс слияния струн похож на объединение двух труб в одну. Сила взаимодействия струн может служить критерием количественной оценки частоты разделения и объединения струн. Когда взаимодействия

струн слабы, расстояния от одного акта расщепления или взаимодействия с другой струной до другого велики. Когда взаимодействия струн сильны, расщепления и соединения струн происходят так часто, что вы с трудом можете отследить движение струны и определить, успела ли она разделиться на две, прежде чем объединилась с другой струной. Когда струны взаимодействуют сильно, D1-браны взаимодействуют слабо, и наоборот. Таким образом, S-дуальность обеспечивает обмен между слабовзаимодействующим и сильновзаимодействующим поведением объекта.

Если вы устали следить за моими мыслями, давайте вернёмся к танцевальной аналогии. Слабовзаимодействующее поведение в теории струн — понятное, простое и элегантное. Это как танец Фреда Астера. Сильновзаимодействующее поведение хаотично и запутанно. Струны летают повсюду, но их уже трудно называть струнами, потому что они постоянно расщепляются и соединяются. Единственная аналогия, которая приходит мне в голову, — это инопланетный слизняк. S-дуальность — это как если Фред Астер танцует с инопланетным слизняком, — извини, Фред. Но этот инопланетянин такой же хороший танцор, как и Фред, только по-своему, по-инопланетному. Мы просто не способны оценить то, что он делает. Если бы мы были инопланетянами, всё было бы наоборот: мы бы восхищались понятным и элегантным танцем нашего собрата-слизняка, а движения Фреда воспринимали бы как хаотический беспорядок. Этой аналогией я хочу показать, что струнные дуальности зачастую связывают что-то, что мы хорошо понимаем, например теорию слабовзаимодействующих струн, с тем, что мы понимаем плохо, если вообще понимаем, например сильновзаимодействующее поведение.

Помните, когда в предыдущей главе я рассказывал о теории сильновзаимодействующих струн, это кончилось тем, что я раскрыл новое измерение? Я утверждал, что теория струн начинает вести себя так, будто это пространство на самом деле одиннадцатимерное, а не десятимерное. Это утверждение довольно сильно отличается от того, о чём я говорил несколькими абзацами выше. На самом деле я имел в виду другую теорию струн. Та, в которой дополнительное измерение раскрывается, когда взаимодействия струн становятся сильными, называется теорией струн *типа IIA*. Она содержит D0-браны, D2-браны, D4-браны, D6-браны, солитонные 5-браны и некоторые другие объекты, которые сложно классифицировать. Когда «спаривание» струн становится сильным, теория типа IIA лучше всего описывает этот процесс в одиннадцатимерном пространстве. Но в теории *типа IIB* случай сильного взаимодействия

лучше всего описывается путём замены струн на D1-браны без добавления лишних измерений.

Я уже подчёркивал, что есть многое, чего мы не понимаем в струнных дуальностях. Так что имеет смысл закончить этот раздел на тех двух вещах, которые мы понимаем вполне надёжно. Первой из них является низкоэнергетическая теория. В каждом варианте теории струн присутствует гравитация. Описание гравитации в ОТО чрезвычайно строгое и хорошо проверено временем. Оно имеет ограниченное множество обобщений, представленное в теориях супергравитации, о которых я упоминал в предыдущей главе. Теории супергравитации охватывают низкоэнергетическую динамику суперструн, потому что включают в себя только колебательные моды суперструн с наименьшей энергией. Мы настолько хорошо понимаем гравитацию и супергравитацию, что они могут служить эталонами для оценки нашего понимания струнных дуальностей. Вторым таким эталоном являются длинные прямые струны и длинные прямые браны. Эти объекты могут быть описаны в теории супергравитации как чёрные дыры с нулевой температурой. Они также обладают особыми несиловыми свойствами, о которых я упоминал в разговоре о D0-бранах. Технический минимум возможностей струнных дуальностей гарантированно обеспечивает описание того, что происходит в области низких энергий, плюс описание поведения длинных прямых бран и длинных прямых струн.

Размерностью больше, размерностью меньше... Да кто их считал!

В этом разделе я хочу рассказать о наиболее изученной струнной дуальности. Она называется *T-дуальностью*. Названия *S-дуальность* и *T-дуальность* — столь же случайны, как и названия типов теорий *IIA* и *IIB*. У струнных теоретиков постоянные проблемы с придумыванием названий для изобретаемых ими сущностей: проводя исследования на переднем крае знания, мы должны как-то называть новые вещи, с которыми раньше никто не сталкивался. Поэтому учёные часто дают им первые пришедшие в голову по ходу дела названия. Часто эти названия имеют отношение к некоторым очень ранним работам по теме. Названия приживаются и остаются в науке, даже если работа теряет актуальность или вообще забывается. Так мы накопили сборную солянку смешных названий. Я думаю, что и в других областях науки такая же чехарда, ну, может быть, чуть меньшая.

T-дуальность — это дуальность теории струн, связывающая теории типа *IIA* и *IIB*. Эта дуальность хорошо изучена, потому что в процессе развития теории складывалось впечатление, что струны взаимодействуют только слабо. Это означает, что струны проходят большие расстояния (или проходит много времени) между актами деления или слияния.

Очевидно, что установление соответствия между теориями струн типа *IIA* и *IIB* является большой проблемой. Теория *IIA* содержит чётные *D*-браны: *D0*, *D2*, *D4*, *D6*, теория *IIB* — нечётные: *D1*, *D3*, *D5*. Как вы видите отображение *D0*-браны — точечной частицы, на *D1*-брану, которая представляет собой отрезок линии? Это кажется невозможным. Но есть один трюк. Сверните одно из десяти измерений теории типа *IIA* в окружность. Если радиус этой окружности будет гораздо меньше масштаба, который вы можете наблюдать, то ваша теория будет выглядеть как имеющая только девять измерений. Мы могли бы так сворачивать одно измерение за другим, до тех пор, пока их не останется всего четыре, но давайте поговорим об этом позже. Мы пытаемся разобраться в отношении между теориями струн, а не в их возможном отношении к реальному миру. Так что оставим свёрнутым только одно измерение. В нашем новом девятимерном мире вы не сможете обнаружить разницу между теорией типа *IIA* и теорией типа *IIB*. Возьмём, к примеру, *D0*-брану из теории типа *IIA*. Если вы свернёте *D1*-брану в кольцо, то для наблюдателя, не

обладающего достаточно чувствительным для обнаружения свёрнутого измерения прибором, она будет выглядеть как D0-брана. Для такого наблюдателя свёрнутая в кольцо D1-брана не будет иметь вообще никакой пространственной протяжённости, она будет выглядеть как точечная частица, которой соответствует D0-брана. Но погодите! Ведь D1-бране вовсе не обязательно быть свёрнутой в кольцо — теория вовсе не запрещает ей простираться в виде линии в одном из оставшихся девяти измерений, которые наш гипотетический дальнзоркий наблюдатель прекрасно «видит»? Ну да, это возможно. С другой стороны, если D2-брану свернуть вокруг измерения, которое мы решили устранить из десятимерной теории, она примет форму длинного шланга, который будет простираться в виде извилистой линии в оставшихся девяти измерениях. Для нашего девятимерного наблюдателя такая свёрнутая D2-брана будет неотличима от развёрнутой D1-браны, потому что, не видя свёрнутого измерения, наблюдатель не сможет определить, что перед ним: одномерная D1-брана или свёрнутая в трубочку вокруг невидимого ему десятого измерения D2-брана. Продолжая в том же ключе, мы можем заставить свёрнутую D3-брану вести себя как развёрнутая D2-брана, свёрнутую D4-брану — как развёрнутая D3-брана и так далее.

Сказанное выше может оставить у вас впечатление, что Т-дуальность — это только приближение. Струны в теориях типа IIA и IIB выглядят одними и теми же объектами в девятимерном пространстве лишь до тех пор, пока наблюдатель не обнаружит свёрнутое десятое измерение. Но в действительности Т-дуальность точна. Если мы начнём говорить о ней на правильном математическом языке, то она покажется нам такой же очевидной, как дуальность описания шахматной доски. И хотя математический язык пока непонятен большинству читателей, я хотел бы обратить ваше внимание вот на какой момент: струна из теории типа IIA, свёрнутая в кольцо, это то же самое, что струна из теории типа IIB, не свёрнутая, но движущаяся по окружности, и наоборот, струна из теории типа IIA, движущаяся по окружности, — это то же самое, что струна из теории типа IIB, свёрнутая в кольцо.



Т-дуальность между струнными теориями типа IIA и IIB. Обе связаны с девятимерной теорией. 0-брана в девятимерной теории может быть образована из D0-браны теории типа IIA или из свёрнутой в кольцо D1-браны теории типа IIB

Трюк состоит в том, что размер кольца, в которое можно свернуть или по которому можно заставить двигаться струну типа IIA, отличается от размера кольца, по которому можно заставить двигаться или в которое можно свернуть струну типа IIB. Чтобы понять это, обратимся к квантовой механике. Когда электрон движется внутри атома, он имеет определённые квантованные значения энергии, но при этом его положение и импульс неопределённые. Струна, квантово-механически движущаяся по окружности, тоже имеет определённые квантованные значения энергии и неопределённые координаты. Это приводит к тому, что импульс струны квантуется, так же как и энергия, что очень интересно, потому что означает, что принцип неопределённости в своей привычной форме неприменим к движению в свёрнутом измерении. Математика говорит нам, что, согласно принципу неопределённости, если радиус окружности очень мал, то импульс струны, движущейся по ней, должен быть очень большим и, как следствие, очень большой должна быть и её энергия. И наоборот, если радиус велик, то энергия струны может быть малой. Сравним описанную ситуацию со случаем, когда струна свёрнута в кольцо. Масса свёрнутой струны пропорциональна её длине: если увеличить длину в два раза, то в два раза вырастет и масса, поскольку струны из теории струн ведут себя как обычные струны — они обладают постоянной массой на единицу длины. Это приводит к тому, что струна, свёрнутая в кольцо большого

радиуса, должна быть тяжёлой, а струна, свёрнутая в кольцо малого радиуса, — лёгкой. А теперь — самая изюминка. При замене струны типа IIA, движущейся по окружности, на струну типа IIB, свёрнутую в кольцо, мы должны сохранить энергию струны неизменной. Если окружность, по которой движется струна типа IIA, мала, то энергия струны должна быть большой, значит, свёрнутая в кольцо струна типа IIB должна быть длинной. И наоборот, если окружность, по которой движется струна типа IIA, велика, то окружность, в которую свёрнута струна типа IIB, должна быть мала. Если радиус окружности у струны типа IIA устремить к нулю, то радиус окружности у струны типа IIB устремится к бесконечности, и в конце концов мы не сможем узнать в этой фигуре окружность. Другими словами, окружность струны типа IIB раскрывается в почти плоское пространственное измерение. Это напоминает дуальность между теорией струн типа IIA и М-теорией, когда одиннадцатое измерение раскрывается, если взаимодействие между струнами становится сильным.

Я обещал пояснить термин «деформация», который использовал ранее. Изменение размера окружности — один из примеров деформации. Другим примером деформации служит изменение силы взаимодействия струн. В общем случае под деформацией понимается любое изменение, которое может быть произведено *гладко*. Струнная дуальность не является деформацией, но она устанавливает соответствие между двумя теориями, каждая из которых может быть деформирована. Струнную дуальность можно представить как изменение перспективы: существуют две точки зрения на любое физическое явление, и часто одна из них оказывается проще другой. Например, описание струн в теории типа IIB сильно упрощается, когда струны взаимодействуют слабо, а S-дуальность обменивает сильное взаимодействие на слабое. К сожалению, аналогия с Фредом Астером и слизняком здесь не работает. Ведь мы можем плавно изменять силу взаимодействия струн, и, чтобы аналогия была полной, мы должны были бы плавно деформировать Фреда в слизняка и наоборот. Главным озарением второй суперструнной революции стало осознание того факта, что, деформируя теорию различными способами и применяя различные дуальности, можно перейти от одного варианта теории струн к любому другому. Я привёл три примера: T-дуальность, устанавливающую соответствие между струнами теории типа IIA и струнами теории типа IIB; S-дуальность, связывающую суперструны с D1-бранами; и дуальность, устанавливающую эквивалентность теории струн типа IIA и М-теории. Есть ещё три суперструнные теории, но я не уверен, что их обсуждение здесь существенно облегчит понимание предмета.

Я предполагаю, что на первых порах вам трудно следить за всеми этими бранами и дуальностями, но надеюсь, что один момент вы поняли уже достаточно ясно: пространственными измерениями в теории струн можно манипулировать. Их можно добавлять и удалять, сворачивать и разворачивать. До конца не ясно, должна ли в конечном итоге теория струн, описывающая реальный мир, включать дополнительные измерения сами по себе или нет. Если пространство-время — это только приближение для случая, когда размером дополнительных измерений можно пренебречь, то, возможно, правильное описание мира включает в себя четыре большие измерения и несколько абстрактных математических сущностей, выступающих в роли дополнительных измерений. Это теоретическое построение восходит к первой суперструнной революции, но оно не очень популярно в наши дни.

Гравитация и калибровочная теория

Один необычный тип дуальности носит название *струнно-калибровочной дуальности*. Необычность этой дуальности заключается в том, что она устанавливает не соответствие теории струн типа ПВ и другой теории струн, а соответствие теории типа ПВ и калибровочной теории. В пятой главе я рассказывал о калибровочной симметрии. Позвольте напомнить её основные моменты. Калибровочная симметрия гарантирует безмассовость фотона. Ещё она гарантирует, что направление спина фотона совпадает с направлением его движения. И она позволяет нам рассматривать электрический заряд как вращение в некотором абстрактном пространстве. Калибровочная теория — это теория, математическое описание которой включает калибровочную симметрию. Обычно это означает, что такая теория содержит фотоны или объекты, похожие на фотоны. Простейшим примером калибровочной теории является теория электромагнетизма. Более сложные калибровочные теории есть не только у струнных теоретиков, но и у ядерных физиков, и у физиков, изучающих элементарные частицы, и у исследователей конденсированных сред.

Вы, возможно, помните, что калибровочная симметрия фотонов и электронов таинственным образом совпадает с круговой симметрией. Заряженный объект, такой как электрон, обладает эффективным вращением по абстрактной окружности. Не следует воспринимать эту окружность буквально, как, например, одиннадцатое измерение в М-теории. Это всего лишь математическая абстракция, помогающая описать электрический заряд электрона и его взаимодействие с фотонами. Одним из аспектов этой математики является то, что фотоны сами не несут электрический заряд, но могут его «чувствовать».

Естественно задаться вопросом: если с фотонами ассоциирована круговая симметрия, то нет ли калибровочной теории, с которой была бы ассоциирована сферическая симметрия? Есть такая теория! Она содержит три вида фотонов, соответствующих трём возможным осям, вокруг которых можно повернуть сферу (в авиации эти три независимых направления вращения носят названия крен, тангаж и рысканье). В отличие от обычных фотонов, фотоны в этой теории заряжены. Помните, мы говорили об облаке виртуальных частиц, окружающем электроны или гравитоны? Напомню основные положения. Существует чёткое различие между гравитацией, где гравитоны могут непосредственно порождать

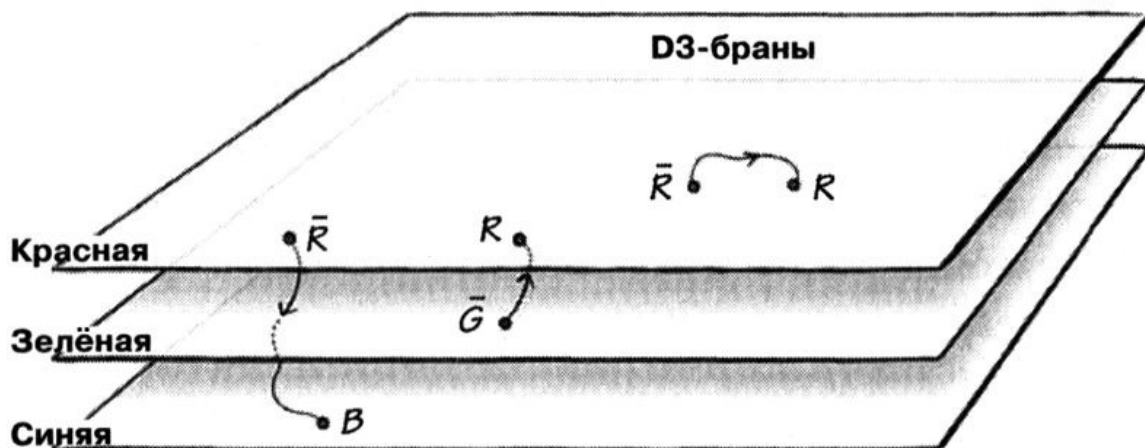
другие гравитоны, и электромагнетизмом, где фотоны могут рождать другие фотоны только через рождение пар заряженных частиц или при рассеянии на заряженных частицах. В последнем случае мы можем просчитать все процессы рождения виртуальных частиц со сколь угодно высокой точностью. Про такую теорию говорят, что она *перенормируема*. Эта теория называется *квантовой электродинамикой*, или сокращённо *КЭД*. Теория гравитации, напротив, *неперенормируема*. Это означает, что у нас нет математического аппарата, способного полностью и до конца описать весь процесс каскадного рождения гравитонов. А что с калибровочной теорией, ассоциированной со сферической симметрией? Оказывается, она больше похожа на КЭД, чем на теорию гравитации, то есть она перенормируема.

Краеугольным камнем для понимания физических процессов, происходящих внутри протона, является калибровочная теория, называемая *квантовой хромодинамикой*, или сокращённо *КХД*. Она основывается на группе симметрии, содержащей восемь различных типов вращения. Как вы уже догадались, эти вращения происходят не в обычных четырёх измерениях. Они происходят в особом абстрактном математическом пространстве, называемом *цветовым пространством*. КХД очень похожа на калибровочную теорию, ассоциированную со сферической симметрией, только она более сложная, из-за того что оперирует восемью типами поворотов в отличие от трёх: крена, тангажа и рысканья, присущих трёхмерной сферической симметрии. Каждый из восьми типов вращения соответствует частице, похожей на фотон. Эти восемь частиц называются *глюонами*. Кроме них существуют частицы, похожие на электроны, называемые *кварками*, но если электрон имеет только отрицательный электрический заряд, то кварки могут обладать тремя разными типами зарядов. Эти заряды называются *цветами*, а цветовое пространство служит математическим инструментом, позволяющим работать с цветовыми зарядами. Заряд кварка может быть красным, зелёным и синим, но это всего-навсего фигура речи: указанные цвета не имеют никакого отношения к цветам, которые различает человеческий глаз. Глюоны также несут цветовые заряды и «чувствуют» друг друга подобно гравитонам. Но, в отличие от неконтролируемого размножения гравитонов, каскадное рождение виртуальных частиц кварками поддаётся математическому описанию. Таким образом, КХД, как и КЭД, тоже является перенормируемой теорией. Её название было выбрано не случайно: она очень сильно напоминает квантовую электродинамику, а слово «хромодинамика» дословно означает «движение цветов», только понятие

«цвет» в квантовой хромодинамике не имеет отношения к обычным цветам, а всего лишь служит удобной визуализацией математической абстракции.

Кварки, глюоны и цвета-которые-не-цвета придают КХД такое же причудливое звучание, как и теории струн, но, в отличие от теории струн, КХД очень хорошо проверена экспериментально и единодушно признаётся корректным описанием физики внутри протона. КХД имеет много необычных особенностей, наиболее важная из которых заключается в том, что мы не можем наблюдать голый кварк: он всегда одет в «шубу» из глюонов и связан с другими кварками. Протоны и нейтроны представляют собой подобные связанные состояния кварков, а вот электроны — нет. Похоже, что электроны вообще не имеют ничего общего с кварками. Или более строго: они присутствуют в теоретической физике на равных правах с кварками. Одна из непроверенных гипотез в современной физике утверждает, что электрический заряд может оказаться четвёртым цветовым зарядом. Эту гипотезу мы обсудим в седьмой главе.

Колебания D3-бран описываются калибровочной теорией, похожей на КХД. Ранее мы уже говорили о колебаниях D1-бран. Вкратце: колебания D1-браны можно представить двумя способами: либо как рябь, бегущую по бране, либо как струну, прикреплённую к бране и скользящую по ней. Второй способ описания лучше, чем первый, обобщается на случай D3-бран. Возьмём три D3-браны и расположим их одна над другой, для удобства присвоив им цветовые обозначения. Одну брану назовём красной, другую — синей, а третью — зелёной. Если струна прикреплена одним концом к красной бране, а другим — к синей, какого она будет цвета? Интуитивно кажется, что пурпурного. Ну нет, подобная цветовая метафора уведёт нас слишком далеко. Правильнее будет сказать, что цвет струны плавно перетекает из красного в синий. Оказывается, именно такими цветами обладают глюоны. Теперь понятно, откуда берутся восемь типов глюонов. Три глюона имеют цвета: красно-красный, красно-синий и красно-зелёный, ещё три начинаются с зелёного цвета, и ещё три — с синего. Итого — девять. Упс! Перебор. К сожалению, для объяснения, почему в действительности глюонов не девять, а восемь, мне пришлось бы задействовать слишком сложный математический аппарат.



Три D3-браны, расположенные одна над другой, обозначены как «красная», «зелёная» и «синяя». Струны, идущие от одной браны к другой, используются для описания колебаний бран

Если не брать во внимание небольшую проблему с лишним глюоном, то примерно понятно, как можно получить глюоны из трёх D3-бран, соединённых струнами. С кварками несколько сложнее. Я опущу этот вопрос, чтобы показать главную изюминку: я взял три D3-браны, соединил их струнами и получил глюоны. Если бы я взял одну D3-брану, я бы получил фотоны. Взяв две D3-браны, я получу уже упоминавшуюся ранее калибровочную теорию, ассоциированную со сферической симметрией. В общем случае, взяв N бран, я получу теорию, содержащую порядка N^2 глюонов.

Теперь вспомним, что если взять много бран и сложить их вместе, то такая конструкция лучше всего описывается чёрной дырой с нулевой температурой. В пятой главе я показал это на примере D0-бран. С D3-бранами получится то же самое. Сложенные одна над другой, они искривят пространство-время вокруг себя, и в их непосредственной окрестности возникнет горизонт чёрной дыры. Из-за большого количества измерений наглядно изобразить форму окружающего D3-браны горизонта очень трудно. Представьте себе нечто, напоминающее цилиндр, двумерная поверхность которого круглая в пяти измерениях и прямая ещё в трёх. Всего восемь измерений. Представили? Кажется, что всё это достаточно далеко от КХД. При наличии у D3-бран дополнительной колебательной энергии горизонт немного увеличивается в размерах и приобретает ненулевую температуру.

Важнейшей деталью струнно-калибровочной дуальности является

возможность применить к колебаниям D3-бран формулу $E = k_B T$ и получить представление о температуре горизонта, окружающего D3-браны. Позвольте мне попытаться объяснить, почему это считается струнным дуализмом. Существует два способа описания D3-бран ненулевой температуры. Один состоит в том, чтобы учесть все открытые струны, скользящие по D3-бранам, другой — в том, чтобы следить за окружающим D3-браны горизонтом. Эти два представления являются взаимодополняющими в следующем смысле. Если у вас есть горизонт, то вы не можете сказать наверняка, что находится внутри него. Другими словами, существование горизонта не позволяет следить за струнами на D3-бранах. По крайней мере вы не можете отслеживать поведение каждой из них по отдельности. Всё, что вы можете, — это отслеживать какие-то коллективные свойства струн, такие как их суммарная энергия. Наличие горизонта означает, что глюоны взаимодействуют сильно. Они часто расщепляются и соединяются. Они то появляются, то исчезают. Они одеваются в сложные каскадные конструкции из других глюонов. Как и в случае сильновзаимодействующих струн, когда струны перестают быть похожи на струны, так и сильновзаимодействующие глюоны перестают быть похожи на глюоны. Появление горизонта — это что-то вроде раскрытия дополнительных измерений в М-теории. Для объяснения динамики сильновзаимодействующих глюонов нужен язык, который требует дополнительных измерений.

Применение струнно-калибровочной дуальности не ограничивается слежением за энергией тепловых глюонов. Главным является именно эквивалентность калибровочной теории глюонов на D3-бранах и геометрии чёрной дыры вокруг D3-бран. Это утверждение может показаться странным, потому что криволинейная геометрия является 10-мерной, тогда как глюоны «знают» только о четырёх измерениях. Ещё более странным выглядит то, что эта дуальность устанавливает соответствие между теорией с гравитацией (теория струн в окрестности D3-бран) и теорией без гравитации (калибровочная теория на D3-бранах). На первый взгляд она кажется более узкой дуальностью, чем другие. Т-дуальность, например, устанавливает полное соответствие между теорией типа IIB и теорией типа IIA. Она содержит правила для отображения любого типа D-бран на любой другой тип. А струнно-калибровочная дуальность выглядит как ограниченная только одним типом бран — D3-бранами. На самом деле другие типы бран входят в струнно-калибровочную дуальность достаточно интересным образом, например, приводя к существованию кварков наряду

с глюонами. Я ещё вернусь к струнно-калибровочной дуальности в главе 8, где расскажу о попытках «пристегнуть» её для описания столкновений тяжёлых ионов.

В заключение я хочу отметить, что, с одной стороны, дуальности теории струн отличаются от симметрий, а с другой — может показаться, что это одно и то же. Два описания, связанные отношением дуальности, могут требовать пространств разной размерности или, как вы только что видели, одно может содержать гравитацию, а другое — нет. Это не похоже на симметрию такого объекта, как квадрат. У квадрата есть четыре одинаковых угла, и можно описать набор преобразований, отображающий квадрат на себя. С другой стороны, существуют некоторые струнные дуальности, в которых две стороны явления выглядят как зеркальные отражения друг друга. Например, теории типа IIA и IIB очень похожи, за исключением различия в типах бран, существование которых они допускают. Струнные дуальности устанавливают соответствие разных теорий струн с низкоэнергетической супергравитацией способом, который тесно связан с обычной симметрией, такой как симметрия квадрата. Вполне возможно, что мы не до конца понимаем струнные дуальности, потому что большая часть того, что мы понимаем, ограничена низкоэнергетическими теориями.

Глава 7

Суперсимметрия и Большой адронный коллайдер

В 2008 году строительство Большого адронного коллайдера, или БАК, было завершено. В это же время я посетил ЦЕРН, где мне предложили экскурсию по главным экспериментальным установкам БАК. До этого я обычно участвовал только в конференциях ЦЕРН, но экскурсия по рабочим установкам произвела на меня неизгладимое впечатление. Экспериментальная установка называлась «компактный мюонный соленоид». Это был совсем небольшой (по меркам ЦЕРН) прибор величиной всего лишь с трёхэтажный дом, и я стал свидетелем окончательной сборки всех его компонентов. Массивные конусообразные штукoviны помещались внутри бочкообразного корпуса детектора — всё это напоминало множество гигантских цифровых фотокамер, объективы которых были обращены к центру детектора, где сталкивались высокоэнергетичные протонные пучки.

По окончании экскурсии мы немного полазали по Французским Альпам: ничего сложного для хорошего альпиниста. Я сумел забраться на вершину Эгюий-дю-Миди и обнаружил, что оттуда вниз ведёт канатная дорога, по которой мы с коллегой спустились в лежащий у подножья горы городок. Хребет, по которому мы поднимались, отличается плотным трафиком, при том что тропа очень узкая и покрыта снегом. По каким-то соображениям все альпинисты предпочитают подниматься по нему в связке, хотя мне всегда казалось, что партнёр по восхождению является не очень надёжным якорем. В случае когда один из партнёров срывается, другому приходится прикладывать массу усилий, чтобы удержаться на ногах и не улететь вслед за товарищем. Я не люблю ходить в связке и предпочитаю при восхождении надеяться только на крепость рук и на вбитый крюк. Тем не менее должен признаться, что это восхождение мы с коллегой совершили в связке, подобно всем остальным: мой партнёр был очень опытным альпинистом, а хребет не выглядел трудным для прохождения.

Сейчас, в ретроспективе, я думаю, что восхождение в связке по узкому хребту может служить удачной метафорой для рассказа о бозоне Хиггса, в надежде на открытие которого (в числе прочего) строился БАК.

Представьте себе, что вы стоите на узком гребне хребта, с трудом сохраняя равновесие. Шаг влево, шаг вправо — и вы летите в пропасть. В таком же положении находятся тахионы в теории струн: они балансируют в крайне неустойчивом равновесии, и малейшее возмущение отправляет их в фатальное падение по склону вниз. Но это ещё не всё. Представьте, что по хребту идут в связке восемь альпинистов и один из них теряет равновесие и падает влево. Второй испытывает на себе рывок верёвки, сбивающий его с ног, и падает вслед за первым — тоже влево. Третий, вознося молитву с просьбой помочь ему удержать вес двух свалившихся товарищей, готовится последовать за ними. Единственно правильное, что можно предпринять в подобных обстоятельствах, — это прыгнуть с гребня вправо и молиться, чтобы верёвка не подвела. Но по ряду причин сделать это трудно.

Вернёмся к тахионам и к бозону Хиггса. Тахионы проявляют нестабильность в любой точке пространства, и это явление коллективное. Тахионы подобны группе альпинистов, идущих в связке. Если один тахион теряет равновесие и начинает соскальзывать в пропасть, он увлекает за собой расположенных поблизости «товарищей».

Бозон Хиггса придуман для описания *тахионного конденсата*. Тахионная конденсация — это термин, описывающий процесс сваливания тахионов с хребта в долину. Представим себе, что упавшие с хребта альпинисты не разбиваются насмерть, а чудесным образом спасаются и мягко приземляются в долине. Там у них «Клуб упавших альпинистов». Они устали после тяжёлого восхождения и не имеют сил вскарабкаться обратно на гору. Вместо этого они всей толпой бродят вдоль склона, периодически кто-нибудь из них пытается залезть на склон, но соскальзывает обратно. Примерно так же ведут себя тахионы, сконденсировавшиеся в какой-то точке пространства-времени: квантовые флуктуации тахионного конденсата и есть бозоны Хиггса.

Отличие поведения бозона Хиггса от поведения членов «Клуба упавших альпинистов» состоит в том, что движение бозона Хиггса происходит не в обычном четырёхмерном мире, а в дополнительных пространственно-временных измерениях.

Несмотря на то что бозон Хиггса долгое время сохранял статус гипотетической частицы, он служит иллюстрацией прекрасно разработанной физической теории, возможно, лучшей из всего, что было придумано за последние десятилетия. Эта теория носит название *Стандартная модель*. Слово «стандартная» в данном случае означает, что эта теория является общепризнанной, а слово «модель» указывает на предварительный, незаконченный характер теории. Стандартная модель не

ограничивается описанием тахионного конденсата. Среди прочего она объясняет роль бозона Хиггса в возникновении масс у субатомных частиц: электронов и кварков.

В 2010 году в экспериментах на ускорителе элементарных частиц, называемом Тэватрон, была обнаружена однопроцентная разница в числе мюонов и антимюонов, образующихся при распаде более тяжёлой частицы, что являлось указанием на существование бозона Хиггса. Ожидалось, что подтвердить или опровергнуть данную гипотезу помогут эксперименты на Большом адронном коллайдере. Надо заметить, что ещё двумя десятилетиями ранее в Техасе планировалось построить для этих целей сверхпроводящий суперколлайдер, но в 1993 году Конгресс вытащил вилку финансирования проекта из розетки госбюджета, сэкономив американским налогоплательщикам десять миллиардов долларов, благодаря чему США уступили своё лидерство в области высокоэнергетической физики старушке Европе, и 4 июля 2012 года ЦЕРН с большой помпой отрапортовал о долгожданном открытии бозона Хиггса.

Странная математика суперсимметрии

Большие надежды, возлагаемые на БАК, связаны с тем, что с его помощью, возможно, будет обнаружена *суперсимметрия*. Это особый тип симметрии, который позволяет «уравновесить» теорию суперструн. Суперсимметрия делает это путём удаления злокачественных тахионов способом, который вкратце был описан в четвёртой главе. Ещё суперсимметрия устанавливает отношения между гравитонами и фотонами и гарантирует стабильность D0-бран, о которых шла речь в пятой главе. Несмотря на то что с точки зрения формальной логики суперсимметрия и теория струн различны, между ними есть много общего. Открытие суперсимметрии будет означать, что теория струн на верном пути. И хотя существуют скептики, утверждающие, что суперсимметрия может существовать сама по себе и теория струн для этого необязательна, мне кажется, что существование суперсимметрии без теории струн было бы слишком невероятным совпадением, чтобы в него поверить.

Итак, что же такое суперсимметрия? Мы постоянно ходили вокруг этого вопроса на протяжении всей книги. Что ж, настало время ответить на него. Суперсимметрия оперирует дополнительными измерениями довольно своеобразным способом. Измерения, которыми мы обычно оперируем, включая и дополнительные, образуют метрическое пространство, то есть пространство, обладающее *мерой*, или попросту расстоянием. Расстояние — это число: 2 сантиметра, 10 километров и т. п. Если сложить два расстояния, то в результате тоже получится расстояние. При перемножении двух расстояний получается площадь. Но дополнительные измерения, которыми оперирует суперсимметрия, не выражаются числами — по крайней мере обычными числами. Они выражаются *антикоммутативными* числами, являющимися краеугольным камнем странной математики суперсимметрии. Антикоммутативные числа играют важную роль в описании электронов, нуклонов, кварков и прочих частиц, называемых *фермионами*. Несмотря на то что я ещё не дал определения терминам «антикоммутативность» и «фермион», я буду пока использовать их, просто чтобы называть вещи своими именами, не углубляясь в дебри очень сложной математики. Дополнительные измерения суперсимметрии носят название *фермионных измерений*.

Фермионные измерения, в отличие от обычных, накладывают ряд ограничений на характер возможных движений. Частица может двигаться в

фермионном измерении вперёд или назад или покоиться, но при движении она может иметь только одну фиксированную «скорость». Правда, скорость — это очень грубая аналогия для описания движения в фермионном измерении. Гораздо лучше для такого описания подходит понятие *спин*. Вы помните, что многие частицы обладают спином, то есть, грубо говоря, вращаются, однако скорость этого вращения может принимать только фиксированные значения. Электрон обладает минимальным отличным от нуля спином. Фотон обладает вдвое большим спином, чем электрон, но, как мы уже знаем, спин фотона всегда ориентирован в направлении его движения. Гравитон обладает вдвое большим спином, чем фотон. И это всё. Не существует фундаментальных частиц, спин которых больше спина гравитона. Если теория суперсимметрии верна, то бозон Хиггса не движется ни в одном из фермионных измерений. Электрон движется в одном, фотон — в двух фермионных измерениях. Что же касается гравитона, то тут всё зависит от того, сколько фермионных измерений имеется в его распоряжении. Может статься, например, что часть спина гравитона приходится на фермионные измерения, а часть — на обычные пространственно-временные.

Фермионные измерения обладают одной исключительной особенностью, которая выражается в так называемом *принципе запрета*. Принцип запрета был сформулирован в 1925 году Вольфгангом Паули, и он гласит, что два фермиона не могут одновременно находиться в одном и том же квантовом состоянии. Электроны являются фермионами, поэтому два электрона в атоме гелия не могут находиться на одной и той же орбите в одном и том же состоянии — они должны по крайней мере иметь при этом противоположно направленные спины. Фермионы — это по определению такие частицы, которые подчиняются принципу запрета.

Частицы, не подчиняющиеся принципу запрета, — а в их число входят фотоны, гравитоны, глюоны и бозон Хиггса, — называются *бозонами*. Поведение бозонов радикально отличается от поведения фермионов. Бозоны не только могут находиться одновременно в одном и том же квантовом состоянии, но более того — предпочитают это делать. Суперсимметрия устанавливает отношение *партнёрства* между бозонами и фермионами. Каждому бозону суперсимметрия ставит в партнёрство фермион, и наоборот. Например, бозон Хиггса в качестве суперсимметричного партнёра имеет фермион, называемый *хиггсино* (иногда его ещё называют «шиггс»). Как бы мы его ни назвали, хиггсино представляет собой не что иное, как бозон Хиггса, движущийся в одном из фермионных измерений.

Фермионные измерения трудно изобразить наглядно, поэтому для удобства их изучения используются не совсем обычные алгебраические правила. Допустим, у нас есть два фермионных измерения. Обозначим то, что можно условно назвать расстояниями в этих измерениях, буквами a и b . При сложении и умножении на обычное число «необычная» алгебра ничем не отличается от обычной:

$$a + a = 2a$$

$$2(a + b) = 2a + 2b$$

$$a + b = b + a$$

А вот при умножении фермионных величин начинаются необычности:

$$a \times b = -b \times a$$

$$a \times a = 0$$

$$b \times b = 0$$

Эти правила можно интерпретировать следующим образом. Число 1 означает движение только в «бозонном» измерении, a означает движение в одном фермионном измерении, а b — в другом. Запись $a \times a$ описывает попытку совершить одно и то же движение дважды в одном фермионном измерении. Выражение $a \times a = 0$ означает, что движения подобного рода в фермионных измерениях запрещены. Несколько труднее объяснить, почему $a \times b = -b \times a$. Обозначим буквой q любое движение или любую комбинацию движений в фермионном измерении, тогда если $q = a$, то выражение $q \times q = 0$ будет означать $a \times a = 0$, а если $q = b$, то выражение $q \times q = 0$ будет означать $b \times b = 0$. Но что будет, если $q = a + b$? Распишем произведение двух сумм, дважды воспользовавшись распределительным законом умножения:

$$(a + b) \times (a + b) = (a + b) \times a + (a + b) \times b = a \times a + b \times a + a \times b + b \times b.$$

Из требования $q \times q = 0$ следует, что:

$$a \times a + b \times a + a \times b + b \times b = 0.$$

Но так как $a \times a = 0$ и $b \times b = 0$, то сумма оставшихся двух слагаемых тоже должна быть равна нулю:

$$b \times a + a \times b = 0,$$

откуда следует, что:

$$a \times b = -b \times a.$$

Ключевая идея состоит в том, что фермионные измерения — это математическая абстракция. Они являются не чем иным, как алгебраическими правилами, используемыми для их описания.

Суперсимметрия является симметрией между бозонными и фермионными измерениями. Что это означает? Симметрия в широком смысле — это неизменность чего-то при определённых преобразованиях

этого чего-то: например, симметрия квадрата означает, что при повороте квадрата на 90° мы получим точно такой же квадрат. Бозонные измерения представляют собой обычные измерения вроде длины и ширины. Шесть дополнительных измерений теории струн тоже являются бозонными измерениями, но они нас сейчас не интересуют. Фермионные же измерения представляют собой всего лишь набор необычных алгебраических правил, описанных ранее.

Будем по аналогии с поворотом квадрата использовать термин «поворот» и для суперсимметричного преобразования. Поворот из бозонного измерения в фермионное означает, что если частица перед поворотом двигалась в бозонном измерении, то после поворота она в нём больше не движется, и наоборот, если до поворота частица не двигалась в бозонном измерении, то после поворота она начинает в нём двигаться. Непонятно? Хорошо, попробую по-другому. Физически это означает, что если мы возьмём бозон, то после поворота в фермионное измерение он станет фермионом. Математически суперсимметричный поворот из бозонного измерения в фермионное означает замену числа 1, обозначающего бозонное измерение, на одну из букв: a или b , которые обозначают фермионные измерения. Сохранение неизменности объекта при суперсимметричном повороте сводится к тому, что получившийся в результате фермион будет иметь ту же массу и тот же заряд, что и исходный бозон. И это приводит нас к одному из наиболее фундаментальных предсказаний суперсимметрии: для каждого бозона должен существовать суперсимметричный партнёр: фермион, обладающий такой же массой и зарядом, и наоборот, для каждого фермиона должен существовать суперсимметричный ему бозон.

Один из фактов, в которых мы уверены, заключается в том, что мир не является идеально суперсимметричным. Если бы в этом мире существовал бозон с такой же массой и зарядом, как у электрона, мы бы, несомненно, знали о нём, потому что существование такого бозона в корне изменило бы структуру атома. Возможно, существует какой-то механизм, подобный механизму конденсации тахионов, нарушающий суперсимметрию. Если идея существования этой странной новой симметрии заставляет вас чувствовать себя идущим по зыбучим пескам, я в этом не виноват. Как и большая часть теории струн, суперсимметрия является плодом длинной цепочки спекулятивных рассуждений теоретиков и не имеет под собой надёжной экспериментальной опоры.

Если гипотеза суперсимметрии и фермионных измерений подтвердится экспериментально на Большом адронном коллайдере, это

будет триумф чистого разума — реванш за все предыдущие насмешки скептиков. Впрочем, не исключено, что правы окажутся скептики. Откровенно говоря, я не удивлюсь любому исходу.

Теория всего? Возможно

Вот краткий обзор канонических идей относительно того, каким образом теория струн может описывать реальный мир. В наиболее распространённом сегодня варианте теории струн мир описывается как десятимерный. Естественно, я имею в виду теорию суперструн, которая помимо этого содержит ещё несколько фермионных измерений, но их мы пока оставим за скобками. Шесть из этих десяти измерений свёрнуты или, как говорят теоретики, *компактифицированы*. Наиболее предпочтительным способом компактификации является использование суперсимметрии совместно с формализмом мировых листов. Масштаб свёрнутых измерений очень мал, возможно, он всего в несколько раз больше, чем характерный масштаб колебаний струны. Все обертоны столь массивны, что даже при энергиях, достижимых в экспериментах БАК, они не играют существенной роли, таким образом, основная информация, которую мы получаем в ходе экспериментов, касается наинизших колебательных мод струн. В некоторых теоретических сценариях существуют D-браны или другие браны, которые слегка «приправляют» суперструнное блюдо дополнительными измерениями, что приводит к появлению дополнительных квантовых состояний, которые могут быть обнаружены в БАК-экспериментах.

После того как мы компактифицировали шесть дополнительных измерений, самое время задаться вопросом: к какой реально наблюдаемой четырёхмерной физике приводит нас получившаяся картина? В нашем блюде всегда будет присутствовать гравитация и, кроме неё, как правило, ещё одна калибровочная теория, неотличимая от квантовой хромодинамики. Гравитация порождается безмассовыми состояниями струн, которые квантово-механически приправлены дополнительными шестью измерениями. Калибровочная теория порождается либо такими же, слегка приправленными дополнительными измерениями, струнными состояниями, либо дополнительными состояниями, связанными с бранами.

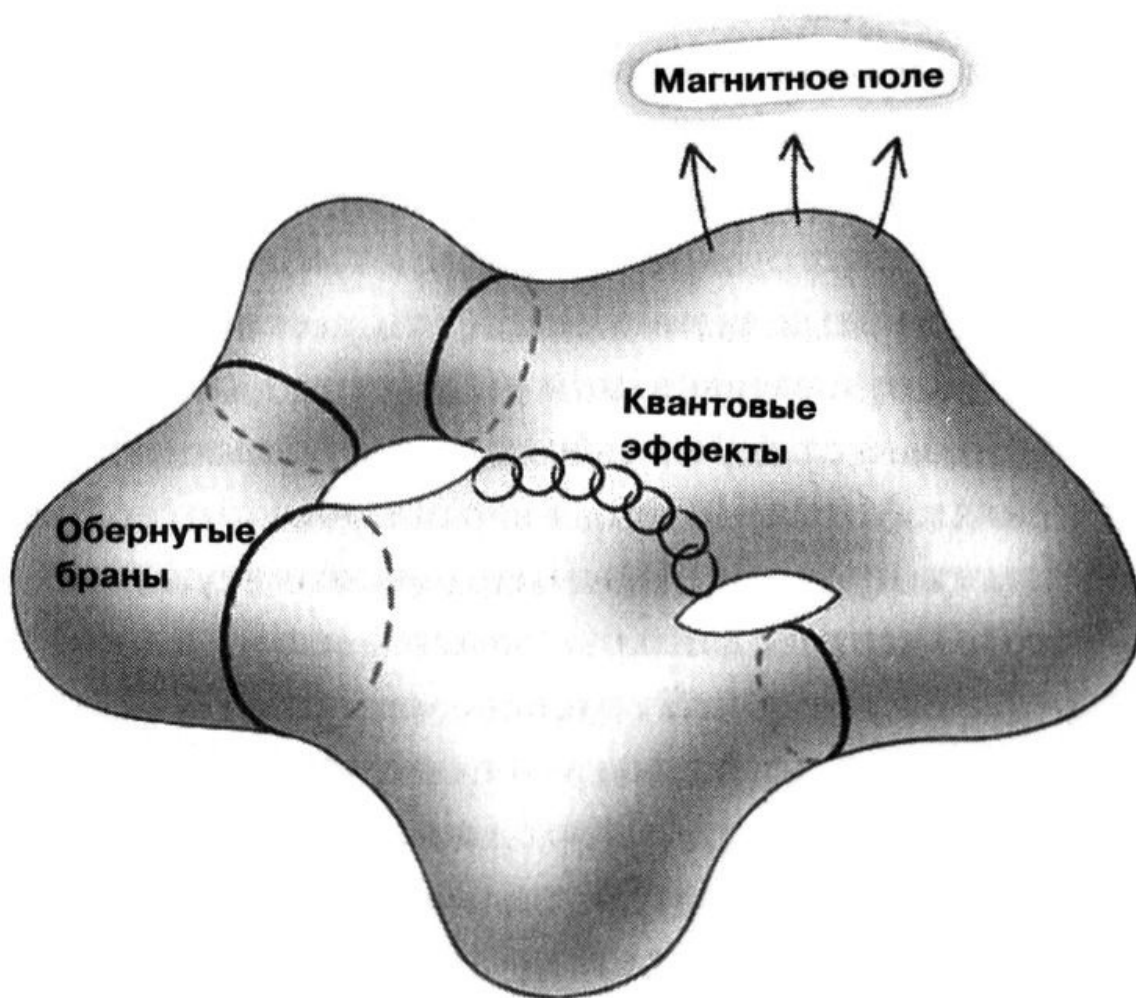
Четырёхмерная гравитация — это великолепно. Это именно то, что описывает общая теория относительности. А вот ответ на вопрос, является ли получившаяся теория «теорией всего», зависит от того, насколько хорошо получившаяся калибровочная теория предсказывает поведение субатомных частиц, которые мы наблюдаем в экспериментах на ускорителях. Чтобы лучше разобраться в калибровочной теории, вспомним,

что в предыдущей главе мы описывали калибровочную симметрию квантовой хромодинамики в терминах трёх цветов: красного, зелёного и синего. Теория, являющаяся наиболее перспективным кандидатом на роль теории всего: кварков, глюонов, электронов, нейтрино и прочих частиц, — содержит как минимум пять цветов. Есть несколько способов «прикрутить» эти пять цветов к конструкции струнной теории. Мы не способны экспериментально зафиксировать именно такое количество цветов, но существует нечто, что может помочь нам отличить два дополнительных цвета от трёх известных. Это что-то может быть похоже, например, на бозон Хиггса, но есть и другие идеи. Чтобы представить, откуда могут взяться именно пять цветов, перечислим известные нам фундаментальные частицы, являющиеся фермионами. Их три: кварки, электроны и нейтрино. Кварки могут иметь три различных цвета, а электрон и нейтрино только по одному. Три плюс один плюс один будет пять. Вот видите: всё очень просто.

После того как поднятая строителями струнных конструкций пыль оседает, оказывается, что получившиеся теории прекрасно согласуются с экспериментами. Как правило, эти теории требуют существования суперсимметрии и содержат не один бозон Хиггса, а два и в довесок к нему ещё целый ряд частиц, масса которых сопоставима с массой бозона Хиггса. Также они предсказывают наличие очень малой массы у нейтрино и включают гравитацию в том виде, как её описывает общая теория относительности. В общем, всё это весьма впечатляет. Ведь и правда: ни одна другая теоретическая основа фундаментальной физики не предоставляет нам всех необходимых для приготовления теории ингредиентов и не обеспечивает их правильного взаимодействия. Если струнные теоретики каким-то образом случайно попали в десятку, то теория струн действительно окажется *теорией всего*, то есть будет описывать все фундаментальные частицы, все взаимодействия между ними и все наблюдаемые типы симметрии. Нам же не останется ничего другого, кроме как решать уравнения этой теории и предсказывать все измеримые в физике элементарных частиц величины: от массы электрона до силы взаимодействия между глюонами.

Тем не менее на пути создания теории всего по-прежнему стоит ряд трудностей. Многое зависит от размера и формы дополнительных измерений. Мы до сих пор не понимаем, почему эти дополнительные измерения не могут быть плоскими. Другими словами, мы не понимаем, что за таинственная сила удерживает наш мир в четырёхмерном состоянии, не давая ему развернуться во всех десяти измерениях. По другой версии,

когда-то, на заре существования Вселенной, все измерения были компактифицированы, а потом по какой-то причине только трём из девяти пространственных измерений удалось развернуться в привычный нам мир. Никто не может объяснить, почему дополнительные измерения имеют именно ту форму, которую имеют. Вдобавок ко всему эти измерения, как правило, *вялые*. Чтобы вы поняли, что я имею в виду, вспомним ещё раз разговор о клубке D0-бран. Он тоже обладает определённой вялостью, каждая D0-брана в нём очень слабо связана с остальными, и практически ничто не мешает ей улететь прочь, а D0-браны снаружи клубка не притягиваются к нему и не отталкиваются от него. Вялость дополнительных измерений означает, что они могут менять свой размер и форму с такой же лёгкостью, как D0-браны могут покидать упомянутый клубок.



Мир теории струн. Обычные четыре измерения (вверху) медленно расходятся с течением времени, обеспечивая расширение Вселенной. Шесть дополнительных измерений (внизу) удерживаются в свёрнутом состоянии обёрнутыми вокруг них бранами, магнитными полями и квантовыми эффектами

На то, чтобы придумать механизм, каким-то образом закрепляющий дополнительные измерения и не дающий им вести себя как попало, было потрачено много времени и усилий струнных теоретиков. Обычно для этого пытаются приспособить браны и магнитные поля. Роль бран представить достаточно просто. Они сродни шпагату, которым перевязывают посылку на почте; трудность состоит в том, что эта посылка мягкая. При попытке связать её она начинает выпирать в разные стороны при затягивании шпагата, и для сохранения формы приходится перевязывать её многократно в разных направлениях. Магнитные поля играют роль плотной упаковочной бумаги, придающей посылке относительную жёсткость.

Итоговая картина мира оказывается весьма сложной. Вероятно, существует множество способов связать дополнительные измерения, предохранив их от развёртывания, но наличие такого большого числа вариантов в некоторых случаях рассматривается как положительная черта модели из-за так называемой *проблемы космологической постоянной*. Вкратце проблема состоит в следующем: при наличии ненулевой космологической постоянной три пространственных измерения стремятся с течением времени «расходиться». Из астрономических наблюдений мы знаем, что большинство галактик разбегаются в разные стороны, и это интерпретируется как расширение пространства. Существование космологической постоянной приводит к тому, что это расширение становится ускоренным. Наблюдения, выполненные в течение последних десяти лет, свидетельствуют о том, что расширение Вселенной действительно ускоряется со временем, что может быть объяснено существованием очень малой космологической постоянной. Если мы хотим описать мир с позиций теории струн, то нужно придумать механизм, который, с одной стороны, удерживал бы шесть скрытых измерений в свёрнутом состоянии и не давал им двигаться, а с другой — обеспечивал бы трём развёрнутым пространственным измерениям слабую возможность расширяться, причём расширяться с ускорением. Я не стану объяснять здесь, почему это так, но похоже, что число способов связать нужным образом дополнительные измерения чрезвычайно велико. Согласно некоторым струнным теоретикам, такое множество вариантов гарантирует, что среди них найдётся хотя бы один, описывающий наш реальный мир с идеальной точностью, включая существование космологической постоянной именно такой величины, как мы наблюдаем. Наша Вселенная с этой точки зрения является единственной среди множества возможных

вселенных, в которой дополнительные измерения связаны именно таким способом. В противном случае разумная жизнь во Вселенной не могла бы существовать. С другой стороны, наше существование является причиной, по которой мы наблюдаем именно такую Вселенную, потому что другие вселенные наблюдать просто некому. Лично я нахожу этот аргумент достаточно убедительным, чтобы признать правильность теории струн.

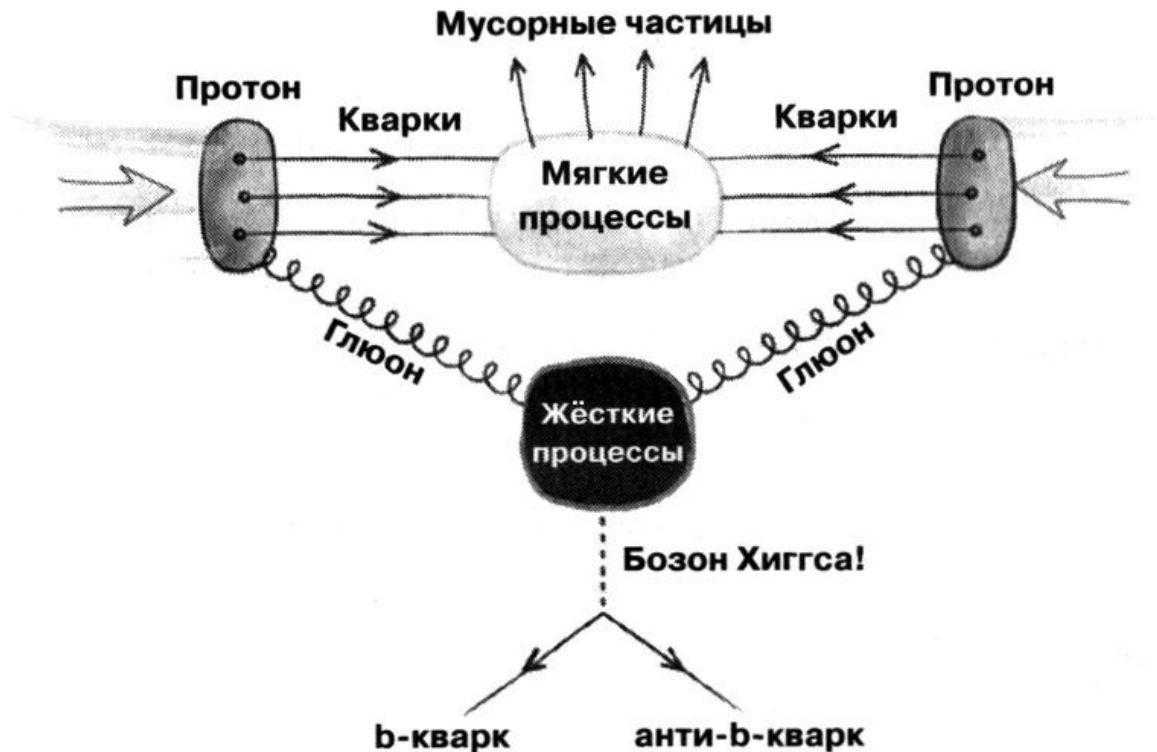
Струнные теоретики прошли суровую закалку, пытаясь на протяжении более чем двадцати лет приготовить теорию всего, и не последнюю роль в этом сыграла проблема свёрнутых измерений. Но чем лучше мы узнаём теорию струн, тем больше проблем она ставит перед нами, и это удручает. Возможно, стоит сравнить трудности, возникающие при попытках описать реальный четырёхмерный мир на основе теории струн, с трудностями, возникшими в другой области теоретической физики — высокотемпературной сверхпроводимости. Открытая в 1986 году, высокотемпературная сверхпроводимость позволяет передавать большие электрические мощности без потерь энергии. Эпитет «высокотемпературная» здесь, конечно, не слишком удачен, поскольку при этих температурах замерзает даже воздух, но они гораздо выше тех температур, при которых эффект сверхпроводимости наблюдался ранее, и это очень важно для его промышленного использования. Теоретически, однако, очень трудно понять, как работает высокотемпературная сверхпроводимость. Существующая теория, известная с 1950-х годов, объясняет обычную сверхпроводимость, и она основана на эффекте образования электронных пар. Сила, удерживающая электроны в парах, основана на... звуке! Электроны как бы «разговаривают» друг с другом на расстояниях, во много раз превышающих размер атома, а затем согласовывают своё движение таким образом, чтобы избежать потерь энергии. Мистика. Но весьма хрупкая, потому что тепловое движение мешает спариванию электронов: при повышении температуры электроны уже не могут «перекричать» шум теплового движения и «услышать» друг друга. Считается, что описание 1950-х годов, в котором электроны координируют свои действия посредством звуковых волн, не годится для высокотемпературных сверхпроводников. Электроны, вероятно, по-прежнему образуют пары в этих материалах, но на гораздо меньшем расстоянии и связываются гораздо более сильным образом. Возможно, определённую роль играет особая мелкозернистая структура среды. Существует ряд теоретических предположений о том, как это может происходить, но мне кажется, что в целом проблема пока не решена.

Решённая или нет, но проблема высокотемпературной

сверхпроводимости даёт несколько хороших уроков теории струн. Главный из них состоит в том, что одних только теоретических выкладок зачастую недостаточно. Высокотемпературная сверхпроводимость была открыта экспериментально, в то время как теоретики до сих пор не в состоянии дать удовлетворительное объяснение этому явлению. Правильная теория реального мира может быть весьма далека от того, что мы способны вообразить. Хрупкость электронных пар, удерживаемых звуковыми волнами, напоминает мне вялость дополнительных измерений, едва удерживаемых в свёрнутом состоянии. Не исключено, что «настоящая» теория струн, описывающая реальный мир, так же сильно отличается от конструкции, в которой дополнительные измерения связаны бранами и скреплены магнитными полями, как современное объяснение сверхпроводимости отличается от теоретических построений 1950-х годов. И процесс её построения может затянуться.

Частицы, частицы, частицы...

В пятой главе я упомянул длинный список известных элементарных частиц: фотоны, гравитоны, электроны, кварки (шесть разновидностей!), глюоны, нейтрино и ещё несколько других. Говоря о полном списке, стоит отметить, что он включает множество различных частиц с совершенно разными свойствами, участвующих в различных взаимодействиях. Факт существования такого списка с мольбой вызывает к новой универсальной теории, которая содержала бы лишь несколько элементарных объектов и объясняла бы физические взаимодействия на более глубоком уровне. Для объяснения закономерностей периодической таблицы химических элементов потребовалось создание теории строения атома. Гелий, аргон, калий и медь столь же различны, сколь и типы химических реакций, в которые они вступают. Но теория строения атома показала, что все химические элементы состоят из электронов, находящихся в определённых квантовых состояниях и колеблющихся около атомных ядер, состоящих из протонов и нейтронов. Длинный список элементарных частиц может быть объяснён теорией струн, но сама теория струн в свою очередь тоже успела обзавестись целым выводком разнообразных объектов: D-бранами, солитонными 5-бранами, М-бранами и т. п., — и никто не знает, как можно и можно ли вообще придумать для описания этих объектов более общую теорию, вскрывающую новый уровень, следующий за уровнем дуальностей теории струн.



Столкновение двух протонов в БАК может родить бозон Хиггса. В изображённом на рисунке процессе бозон Хиггса быстро распадается на b -кварк и анти- b -кварк, которые могут быть зафиксированы детектором. Но образующийся одновременно с этим мусор из прочих частиц мешает понять, что же происходит в действительности

Самая массивная из открытых на сегодняшний день частиц — это t -кварк. Его масса в 182 раза превосходит массу протона, t -кварк был открыт в 1995 году большой коллаборацией экспериментаторов на Теватроне, являвшемся крупнейшим ускорителем в США. Протоны и антипротоны, летящие навстречу друг другу по большому кольцу (диаметром примерно 2 км), сталкиваются лоб в лоб, имея энергию, в 1000 раз превосходящую их энергию покоя. Неудивительно, что они рождают t -кварки, обладая таким запасом энергии. Более того, теоретически они могли бы родить частицу вдесятеро более массивную, чем t -кварк, поскольку суммарная энергия, выделяющаяся при столкновении протона и антипротона в $1000 + 1000 = 2000$ раз превосходит массу протона. К сожалению, почти невозможно добиться того, чтобы вся энергия столкновения переходила в массу одной частицы, и всё потому, что протон и антипротон не являются точечными частицами, а обладают внутренней структурой. Каждый из участников столкновения состоит из трёх кварков и нескольких глюонов. При

столкновении протона и антипротона большинство кварков пролетают друг мимо друга или испытывают лишь скользящее столкновение. Интерес представляют столкновения, при которых один из кварков или один из глюонов, находящийся внутри протона, сталкивается лоб в лоб с одним из кварков или глюонов, находящихся внутри антипротона. Такое жёсткое столкновение, называемое *жёстким процессом*, и приводит к рождению t -кварка. Жёсткие процессы должны также приводить и к рождению бозонов Хиггса. Поскольку в жёстком процессе участвуют только по одному кварку или глюону от каждого протона или антипротона, то на рождение t -кварка тратится только часть общей энергии столкновения протона с антипротоном.

БАК способен сталкивать протоны с энергией, в 15 000 раз превышающей их массу. Энергия, расходуемая на жёсткие процессы, составляет порядка одной десятой от полной энергии протона. С точностью до порядка можно сказать, что БАК способен в большом количестве рождать частицы, масса которых более чем в 1000 раз превосходит массу протона, в то время как масса отдельных рождаемых частиц может превосходить массу протона более чем в 2000 раз. Но чем тяжелее частица, тем реже она встречается среди продуктов реакции.

Какие же новые типы частиц можно ожидать среди продуктов реакций в экспериментах на БАК? На момент написания этой книги самым честным ответом будет: «А чёрт его знает...». Я не хочу утверждать, что строительство БАК окажется пустой тратой денег, если он ничего не обнаружит, хотя это и будет горькой правдой. Я надеюсь, что независимо от того, справедливы ли гипотеза существования суперсимметрии и теория струн, должно обнаружиться что-то интересное в диапазоне энергий, покрываемом БАК, помимо вроде как открытого бозона Хиггса. Мне бы хотелось, чтобы это была суперсимметрия. Убеждённость, что в этом диапазоне энергий что-то есть, основывается на идее перенормировки. Я вкратце качественно изложил эту идею в четвёртой главе и напомним, что перенормировка — это математическая машинерия, позволяющая получить полное описание облака виртуальных частиц, окружающее электрон или какую-нибудь другую частицу. Перенормировка работает, только если в исследуемом диапазоне энергий существует что-нибудь типа бозона Хиггса. А для того, чтобы перенормировка работала гладко, помимо бозона Хиггса должна обнаружиться и суперсимметрия. Но не следует забывать, что указанная математическая машинерия — это не реальный мир. Всё может оказаться совсем не таким, как мы придумали. В экспериментах БАК может обнаружиться нечто, чего мы даже не могли вообразить, и это

будет самым возбуждающим результатом. Впрочем, стоит сказать, что если БАК не обнаружит ничего, то такой результат окажется не менее потрясающим.

Вернёмся к суперсимметрии — наиболее предпочитаемому кандидату на исследование в БАК. Как я уже говорил, самое поразительное предсказание суперсимметрии состоит в том, что у каждой элементарной частицы должен существовать суперсимметричный партнёр, обладающий таким же зарядом, такой же массой и участвующий в тех же взаимодействиях, но отличающийся значением спина. У нас есть электрон, а суперсимметрия предсказывает существование суперэлектрона, называемого *сэлектроном*. У нас есть фотоны — суперсимметрия предсказывает существование суперфотонов — *фотино*. Аналогично суперсимметрия предсказывает существование *скварков*, *глюино*, *снейтрино* и *гравитино*. Даже бозон Хиггса должен иметь суперпартнёра, обычно называемого *хиггсино*. Как я объяснял ранее, суперсимметрия не может быть точной, в частности потому, что не существует сэлектрона, имеющего точно такую же массу, как и электрон. Приблизительная, или *нарушенная*, суперсимметрия всё ещё предсказывает существование сэлектрона, фотино, снейтрино и остальных *счастлиц*, но их массы оказываются во много раз больше масс их обычных партнёров. Есть основания предполагать, что массы искоемых суперчастиц лежат в пределах досягаемости Большого адронного коллайдера. Если это так, то БАК окажется самой плодотворной исследовательской установкой в истории и даст нам в руки не одну-две, а целую дюжину новых фундаментальных частиц.

Симметрия, требующая существования целого набора новых частиц, эквивалентного уже существующему, может показаться скорее шагом назад, чем вперёд. В конце концов, разве задача создания универсальной теории не требует уменьшения количества эксплуатируемых ею сущностей? Примерно такое чувство родила во мне суперсимметрия, когда я впервые с ней познакомился. Но вот вам пример, над которым стоит задуматься. Уравнение Дирака, описывающее электрон, было придумано в 1920-х годах, и оно давало одно неожиданное предсказание: существование антиэлектрона, обычно называемого позитроном. Вскоре физики предсказали существование античастиц для каждой известной частицы, и они открыли их! С моей точки зрения, суперсимметрия не обладает такой же аурой неизбежности: она не нужна для описания уже известных частиц, в то время как уравнение Дирака было необходимо для описания электрона. Хотя, возможно, не стоит ставить в один ряд подтверждённые и

неподтверждённые предсказания.



Распад скварка на несколько детектируемых частиц и на ЛСЧ (легчайшая суперсимметричная частица), которая ускользает незарегистрированной

Существует большая разница между наличием у частицы массы, находящейся в диапазоне, покрываемом БАК, и возможностью зарегистрировать эту частицу, поскольку чрезвычайно сложно разобраться в том обилии разнообразных мусорных частиц, которые рождаются в ходе каждого столкновения, и реконструировать весь ход событий. На самом деле Теватрон исправно выдавал на-гора все эти годы бозоны Хиггса, но трудности реконструкции всех событий рождения и уничтожения частиц позволили ему все эти годы успешно скрываться от исследователей, в то время как масса бозона Хиггса составляет около 130 масс протона — это меньше, чем масса t-кварка! Гораздо проще искать счастиицы при помощи БАК. Например, глюино, если их массы лежат в доступном диапазоне, должны генерироваться на БАК целыми гроздьями, тем более что они предсказываются многими вариантами суперсимметричных теорий, и их должно быть сравнительно легко отфильтровывать из потока экспериментальных данных. В цепочках распада, предсказываемых этими теориями, глюино передают часть своей энергии покоя другим счастиицам, которые в свою очередь передают часть своей энергии покоя дальше по цепочке. В конце цепочки распадов остаётся только одна легчайшая суперчастица. Для обозначения легчайших суперсимметричных частиц используется аббревиатура ЛСЧ. Принято считать, что ЛСЧ не распадается на другие частицы, а покидает детектор необнаруженной. Если всё это правда, то понятно, почему детекторы БАК не регистрируют суперчастицы, а обнаруживают только продукты их распада.

Прежде чем продолжить рассказ о ЛСЧ, я хотел бы отметить одну очень неприятную особенность БАК. Даже если в эксперименте обнаружится что-то похожее на счастлицу, это не позволит нам с уверенностью утверждать, что мы открыли суперсимметрию. Виной всему обилие частиц, рождаемых при протон-протонных столкновениях. Взаимодействия между кварками и глюонами столь сильны, что они маскируют новые явления. В результате определить спин вновь открытой частицы очень трудно. По этой причине физики выступают за постройку нового ускорителя, называемого *Международным линейным коллайдером*, или МЛК. В его задачу будет входить ускорение электронов и позитронов, потому что их столкновения проходят более «чисто», чем столкновения протонов. Предполагается, что МЛК позволит более надёжно отфильтровать предсказания суперсимметрии от предсказаний других альтернативных теорий. Но МЛК пока что находится в стадии проектирования и вступит в строй не ранее 2020 года. Печальная судьба Сверхпроводящего суперколлайдера показывает, как трудно воплощать подобные проекты в жизнь.

Вернёмся к суперсимметрии. Обнаружение ЛСЧ будет важнейшим открытием последних лет, поскольку, возможно, именно они составляют так называемую *тёмную материю*, играющую ключевую роль в формировании галактик. На протяжении десятилетий астрономы и космологи ломали голову над аномально высокой массой галактик. Современная наблюдательная техника позволяет без особого труда пересчитать все звёзды в той или иной галактике и вычислить их суммарную массу. Оказывается, даже если к этой массе добавить массу газа и пыли, которые всегда присутствуют в галактиках, её окажется недостаточно для того, чтобы удерживать звёзды в галактике. Для объяснения этого феномена была придумана тёмная материя, дополняющая недостаток массы. Расчёты показывают, что общая масса тёмной материи в наблюдаемой части Вселенной должна в пять или шесть раз превосходить массу обычной материи, доступной нашим наблюдательным инструментам. Но что эта материя собой представляет? На этот счёт имеется масса гипотез, начиная от потухших звёзд и заканчивая субатомными частицами. У ЛСЧ есть два важных преимущества перед другими кандидатами на роль тёмной материи. Во-первых, в большинстве наиболее реалистичных суперсимметричных теорий ЛСЧ очень массивны (их масса более чем в 100 раз превосходит массу протона), электрически нейтральны и стабильны. Во-вторых, легко понять, как они возникли на ранней стадии эволюции Вселенной и почему их суммарная масса в пять-шесть раз

превышает массу обычного вещества, то есть вещества, состоящего преимущественно из протонов, нейтронов и электронов.

В общем, суперсимметрия представляет собой замечательную теоретическую основу. Она базируется на необычной математике, прекрасно согласуется с общепринятыми теориями элементарных частиц, включая перенормируемые, и она предсказывает множество новых частиц, которые мы надеемся открыть при помощи БАК. Наконец, теория суперсимметрии и теория струн так глубоко взаимосвязаны, что мне трудно поверить, что в мире могла бы существовать суперсимметрия, если бы теория струн в той или иной форме не была верна. Суперсимметрия немного напоминает дуальности теории струн. Она устанавливает отношение между частицами и их суперсимметричными партнёрами, подобно тому как S-дуальность устанавливает отношение между струнами и D-бранами. Как и дуальности теории струн, суперсимметрия заставляет нас хотеть большего. Не существует ли некоторой универсальной картины, лежащей в основе всех частиц и их суперпартнёров? Не является ли суперсимметрия намёком на то, что такая картина должна существовать? Теория струн даёт ясный ответ, в который суперсимметрия встроена с самого начала и в котором все уже известные частицы и частицы, которые ещё предстоит открыть, имеют более или менее единое происхождение, описываемое динамикой струн и дополнительными измерениями.

Глава 8

Тяжёлые ионы и пятое измерение

Интересным фактом взаимоотношений суперсимметрии и ускорительной физики, а конкретно физики, изучаемой на БАК, является то, что все необходимые для построения законченной теории ингредиенты были получены ещё более двадцати лет назад. Разумеется, за два последних десятилетия теория и эксперимент не топтались на месте. Например, был открыт долгое время остававшийся неуловимым t -кварк. Особняком стоит разве что бозон Хиггса, который удалось поймать только в 2012 году. Также за эти годы значительно углубилось теоретическое понимание суперсимметрии, и сейчас мы гораздо лучше представляем, чего именно следует ждать от БАК, чем могли бы представить в 1980-х годах. Но все эти успехи были лишь подготовительными манёврами к генеральному наступлению, начала которого ждут, затаив дыхание, все физики мира. Суперсимметрия показала за эти годы удивительный пример выживания. Не имея никаких экспериментальных подтверждений, она ухитрилась не утратить своей роли главной надежды на построение общей теории всего. И даже альтернативные теории, предлагавшие вместо суперсимметрии различные варианты перенормировок, в ходе своего развития становились всё более «суперсимметричными».

В последнее время был придуман совершенно новый способ связать теорию струн с реальным миром. Со стороны теории струн этот способ основан на струнно-калибровочной дуальности, о которой я рассказывал в шестой главе. Со стороны реального мира он базируется на столкновениях тяжёлых ионов, о которых я расскажу немного позже. В этих столкновениях температура и плотность достигают столь высоких величин, что протоны и нейтроны «плавятся», образуя субстанцию, называемую *кварк-глюонной плазмой*. Существуют разные способы описания этой субстанции, не имеющие ничего общего с теорией струн, но, на мой взгляд, самый правильный способ состоит в том, чтобы сделать инструментом такого описания именно теорию струн.

Это явно менее благородная цель, чем создание теории всего и выявление глубинных пластов физики вселенной. В настоящее время предполагаемая связь теории струн с физикой тяжёлых ионов обладает замечательными особенностями, которых лишена теория всего,

базирующаяся исключительно на теории струн. Во-первых, в головах сторонников чистой теории струн прочно укоренились динамика струн и струнно-калибровочная дуальность, — это более прямой путь от теории струн к теории всего, чем большинство других предлагаемых сценариев, потому что стыковка теории струн и физических явлений, исследуемых на Большом адронном коллайдере, в основном происходит посредством приближения суперсимметрии в низкоэнергетическом пределе теории струн, то есть когда можно пренебречь всеми состояниями струн, кроме самых низкоэнергетических. Во-вторых, расчёты, выполненные при помощи теории струн, уже довольно хорошо согласуются с экспериментальными данными, несмотря на то что пока ещё не утихают споры о соответствии предсказаний теории струн результатам экспериментов по столкновению тяжёлых ионов. Тем не менее эта область исследований обеспечивает наиболее тесное взаимодействие между современной теорией струн и экспериментальной физикой.

Самое горячее место на Земле

Релятивистский коллайдер тяжёлых ионов (RHIC) расположен в Брукхейвенской национальной лаборатории на Лонг-Айленде. Он построен по тому же принципу, что и Теватрон или БАК, но, в отличие от них, способен ускорять субатомные частицы до энергий, лишь в 100 раз превышающих их энергии покоя. Для сравнения: Теватрон способен придавать протонам энергию, превышающую их массу в 1000 раз, БАК — в 7000 раз. Но главное отличие RHIC от Теватрона в том, что RHIC ускоряет не протоны, ядра золота. Ядро золота состоит из почти 200 нуклонов (напомню, что к нуклонам относятся протоны и нейтроны). Золото было выбрано, потому что его ядро очень тяжёлое и вдобавок по ряду технических причин с ним проще работать, чем с другими тяжёлыми металлами. В экспериментах на БАК планируется использовать более тяжёлые, чем ядра золота, ядра свинца. На самом деле нет никакой принципиальной разницы в том, ядра какого элемента использовать в эксперименте, поэтому в дальнейшем я буду говорить о ядрах золота, потому что именно они использовались в экспериментах на RHIC.

Физики постоянно сталкиваются что-нибудь с чем-нибудь в надежде получить что-либо ещё, но в последнее время их предпочтения сместились к столкновениям электронов с позитронами. Причина в том, что электроны имеют очень простую структуру по сравнению с атомными ядрами. Нет никаких свидетельств в пользу того, что электрон имеет внутреннюю структуру. Позитроны в этом отношении идентичны электронам, за исключением того, что они несут не отрицательный, а положительный заряд. Протоны устроены гораздо сложнее — они состоят как минимум из трёх кварков и какого-то количества глюонов. Общее название частиц, составляющих протон, — *партоны* — от английского слова part — часть. Но протоны представляют собой нечто большее, чем просто набор партонов. Сильные взаимодействия между кварками и глюонами порождают облако виртуальных частиц, о котором мы говорили в контексте перенормировки. Позвольте вкратце напомнить, как это происходит. Кварк может испустить глюон, подобно тому как электрон испускает фотон. Глюон в чём-то похож на фотон, но есть принципиальное отличие: глюон может распасться на несколько глюонов. Те в свою очередь могут распасться на кварки или соединиться с другими глюонами. Все эти испускания, распады и соединения образуют целый каскад. Участвующие в

этих процессах частицы называются *виртуальными*, потому что всё происходит внутри протона и мы не наблюдаем отдельные кварки или отдельные глюоны: они всегда являются составными частями других субатомных частиц. Физики называют такую особенность поведения кварков и глюонов *конфайнментом*. Как бы эти частицы ни взаимодействовали, они всегда остаются запертыми внутри протона. При столкновении двух протонов они проходят друг сквозь друга, как два заряда дроби, и единственное, что может произойти, — это жёсткое столкновение двух кварков или глюонов. Один из типов событий, регистрируемых на БАК, так и называется: *жёсткий процесс*. Чаще же кварки и глюоны взаимодействуют более *мягко*, хотя мягкость здесь весьма относительное понятие: при столкновении двух протонов они обычно полностью разрушаются, рождая более полусотни частиц, большая часть которых нестабильна.

Чтобы лучше представить себе характер этих столкновений, рассмотрим в качестве примера автомобильный краш-тест, в котором машины сталкиваются лоб в лоб. В большинстве случаев машины разбиваются в лепёшку, но находящиеся внутри манекены, являющиеся аналогами партонов, остаются более-менее неповреждёнными. Это пример мягкого процесса при столкновении двух протонов. В редком неблагоприятном случае обломки манекенов вместе с остатками автомобилей разлетаются в разные стороны — это пример жёсткого процесса. Протон-протонные столкновения чаще всего представляют собой гибрид небольшого числа относительно редких жёстких процессов и множества мягких.

Поспешу также заверить вас, что, вопреки журналистским страшилкам, в высокоэнергетических столкновениях частиц нет ничего опасного. Миллиарды космических частиц каждую секунду вторгаются в земную атмосферу, сталкиваясь с протонами и с атомными ядрами азота и кислорода. То, что происходит внутри Теватрона, и то, что происходит внутри БАК, — не более чем управляемые варианты процессов, происходящих в атмосфере Земли с сотворения мира. Из-за того, что огромное количество столкновений в коллайдерах происходит в сравнительно небольшой области, для уменьшения воздействия возникающей при этом радиации все установки спрятаны глубоко под землёй, но следует заметить, что риск облучения персонала здесь гораздо ниже, чем на атомных электростанциях.

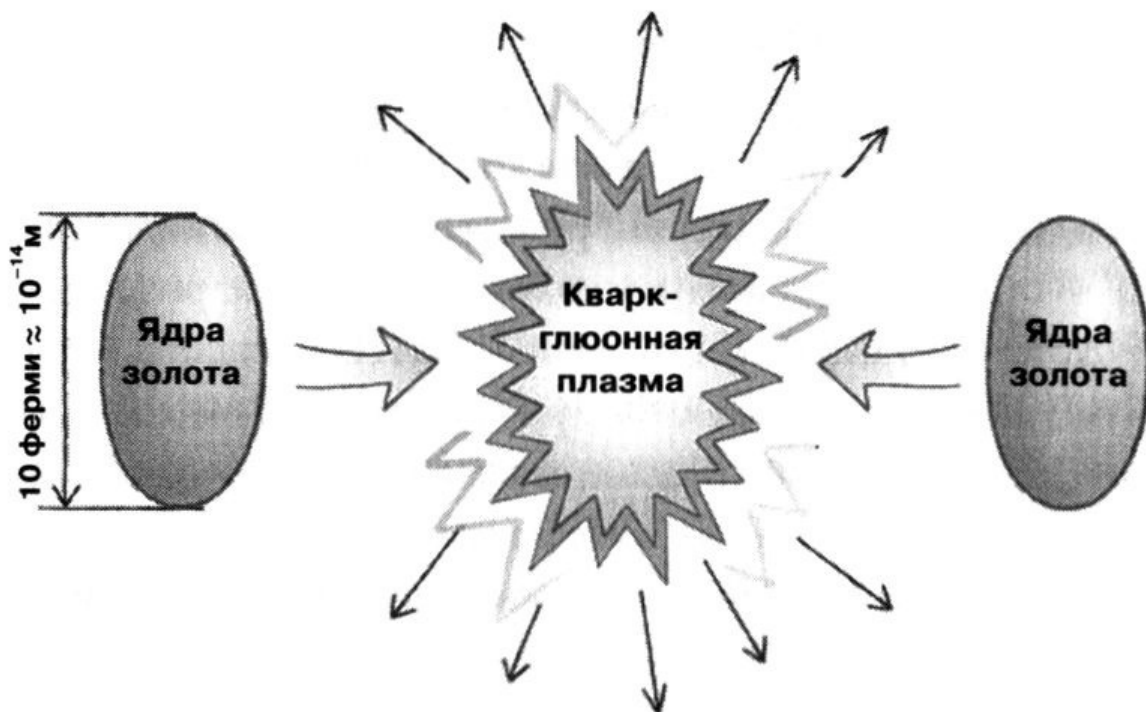
Столкновения ионов золота на первый взгляд очень похожи на столкновения протонов. Каждое ядро представляет собой большой комок

нуклонов, состоящих в свою очередь из партонов. При столкновении некоторые партоны сталкиваются жёстко, в то время как остальные — мягко. Подобно протонам, ядра золота при столкновении также полностью разрушаются, рождая буквально тысячи частиц.

Качественно столкновения ядер золота гораздо более катастрофичны, чем столкновения протонов. Возвращаясь к автомобильной аналогии, можно сказать, что столкновения ядер золота похожи на столкновения автомобилей, начинённых взрывчаткой.

При этом возникает очень горячий ядерный шар, который затем быстро сдувается. Этот шар горячее, чем всё, что мы можем себе представить. При обычном химическом взрыве достигается температура в несколько тысяч кельвинов. Температура в центре Солнца достигает 16 миллионов кельвинов. Похожие температуры достигаются при ядерном взрыве. Но температура, достигаемая в RHIC, превышает температуру в центре Солнца в 200 000 раз! Это горячее всего, что можно себе вообразить. Протоны и нейтроны при таких температурах «плавятся», освобождая находящиеся внутри них кварки и глюоны, формирующие кварк-глюонную плазму, о которой я уже упоминал ранее.

7500 высокоэнергетичных частиц



Супер-сверх-высокоскоростные столкновения ядер золота приводят к образованию кварк-глюонной плазмы, распадающейся на тысячи высокоэнергетичных частиц

В протон-протонных столкновениях физики вынуждены тщательно отсеивать в поисках суперсимметрии все жёсткие процессы, которые прячутся в общей массе мягких процессов, индуцируемых в ходе тех же самых столкновений. Когда два кварка сталкиваются лоб в лоб, они тут же разлетаются в разные стороны и улавливаются детекторами частиц вместе с осколками протона. В случае столкновения тяжёлых ионов всё происходит совершенно по-другому. Образующиеся в жёстких процессах частицы на долгое (по меркам микромира) время застревают в кварк-глюонной плазме. Такое поведение частиц отражает одно из ключевых свойств кварк-глюонной плазмы. В качестве аналогии можно привести поведение пули в воде. Наверное, вы помните, как в фильмах про Джеймса Бонда шпионы стреляют друг в друга под водой, при этом пули прочерчивают в толще воды красиво подсвеченные следы из кавитационных пузырьков? В реальности же пуля останавливается в воде уже через несколько метров. Говоря физическим языком, длина свободного пробега пули в воде составляет несколько метров. Одной из отличительных особенностей кварк-глюонной плазмы является очень малая длина свободного пробега частиц, рождаемых в жёстких процессах, — она не превышает нескольких размеров протона.

Другой отличительной особенностью кварк-глюонной плазмы является её вязкость. При чрезвычайно высокой плотности кварк-глюонной плазмы её вязкость неожиданно низка. Последнее утверждение нуждается в пояснении. С одной стороны, я понимаю под вязкостью то же, что и большинство домохозяек: мёд вязкий, вода — не очень. С другой стороны, в физике тяжёлых ионов существует резкий контраст между потоком свободных частиц, который считается очень вязким, и сильно взаимодействующей кварк-глюонной плазмой, вязкость которой низка. Казалось бы, что может быть менее вязким, чем поток свободных частиц? Если частицы не сталкиваются друг с другом, откуда возьмётся вязкость? Увы, подобные рассуждения в корне неверны. Представим что-то, имеющее действительно низкую вязкость, в виде набора слоёв, которые могут свободно скользить друг относительно друга. Рассмотрим, например, воду, обтекающую камень: слои воды в непосредственной близости от камня движутся медленно, но чем дальше от камня, тем быстрее движется вода. Расположенные рядом слои как бы смазывают друг друга. Что случится, если мы заменим воду водяным паром? Пар состоит из множества отдельных молекул, редко соударяющихся друг с другом, но часто соударяющихся с камнем. В отличие от воды пар не содержит

отдельных слоёв, легко скользящих друг относительно друга, и прокачать ту же массу пара через русло гораздо труднее, чем воду, потому что вода, в отличие от пара, как бы самосмазывается, — получается, что вода менее вязкая, чем пар.

При столкновениях тяжёлых ионов создаются условия, похожие на только что рассмотренный пример с водой, обтекающей камень, за исключением того, что тут нет ни воды, ни камней. Аналогия состоит в том, что сильно взаимодействующая кварк-глюонная плазма своим поведением напоминает низковязкую воду, состоящую из отдельных слоёв, свободно скользящих друг относительно друга, а пучок свободных частиц, редко сталкивающихся друг с другом, — высоковязкий пар. Тот факт, что наилучшее соответствие экспериментальным данным даёт аналогия с низковязкой жидкостью, стал сюрпризом для физиков, а предварительные оценки вязкости, полученные на основе квантовой хромодинамики, оказались неверными: они предсказывали, что кварки и глюоны должны вести себя скорее как пар, нежели как вода.

Ещё одно потрясение ожидало исследователей, когда обнаружилось, что горизонт чёрной дыры имеет вязкость, сопоставимую с той, которая необходима для описания столкновений тяжёлых ионов. Эти теоретические результаты были получены на основе струнно-калибровочной дуальности, о которой я рассказывал в шестой главе. Дальнейшие изыскания показали, что многие аспекты столкновений тяжёлых ионов имеют близкие аналогии с описанием гравитационно-связанных систем. В описаниях таких систем всегда используется дополнительное измерение, но это не одно из тех дополнительных измерений, которые используются в теории струн. Это дополнительное измерение — пятое измерение, которое присутствует в названии главы, — не является свёрнутым, оно ортогонально четырём обычным измерениям, но мы не можем двигаться в нём привычным образом. Оно описывает энергетическую шкалу — характерные значения энергий различных физических процессов. Объединив пятое измерение с четырьмя привычными и любимыми измерениями реального мира, вы получите искривлённое пятимерное пространство-время. Это пространство-время «кодирует» информацию о температуре, потерях энергии и вязкости в своей геометрии. В последнее время много усилий тратится на то, чтобы установить соответствие между пятимерной геометрией и физикой кварк-глюонной плазмы.

Что мы имеем в итоге: мягкие процессы, мешающие физикам разбираться в протон-протонных столкновениях в БАК, становятся ещё более многочисленными в экспериментах по столкновению тяжёлых ионов,

где они ведут к образованию кварк-глюонной плазмы. Кварк-глюонная плазма не может быть удовлетворительно описана в терминах взаимодействий отдельных частиц. Её свойства лучше всего становятся понятны, если описывать их в терминах чёрных дыр в пятимерном пространстве с привлечением струнно-калибровочной дуальности.

Чёрные дыры в пятимерном пространстве

В главе 6 я попытался рассказать о струнно-калибровочной дуальности. Взаимодействие струн, прикрепленных к D3-бранам, описывается калибровочной теорией, напоминающей квантовую хромодинамику. Изменяя свободный параметр этой теории, взаимодействие струн можно сделать более сильным или более слабым. Если мы сделаем взаимодействие струн очень сильным, то тепловые состояния лучше всего будут описываться в терминах горизонта чёрной дыры, окружающего D3-браны. Этот горизонт трудно изобразить наглядно, поскольку он представляет собой восьмимерную гиперповерхность в десятимерном пространстве. Упрощённо я представляю себе эту гиперповерхность в виде трёхмерной поверхности, параллельной трём пространственным измерениям нашего мира и отстоящей от неё в пятом измерении на расстояние, зависящее от температуры. Чем выше температура этой трёхмерной поверхности, тем меньше расстояние, на которое она удалена от нашего мира в пятом измерении. Это несовершенная визуализация. Она не отражает того факта, что пятое измерение не похоже на привычные нам четыре. Наш четырёхмерный мир является как бы тенью пятимерной реальности. Но, в отличие от тени, которую мы видим только в солнечный день, наш четырёхмерный опыт несёт не меньше информации, чем пятимерная реальность, стоящая за ним. Четырёхмерное и пятимерное описания на самом деле эквивалентны. Эта эквивалентность хотя и неочевидная, но точная: любое утверждение, которое можно сформулировать в четырёхмерной физике, имеет аналог в пятимерной, и наоборот.

Другие дуальности теории струн обладают похожими метафорическими качествами. Вспомним, к примеру, дуальность между десятимерной теорией струн и одиннадцатимерной М-теорией, включающую эквивалентность D0-бран и движущихся по окружностям частиц. Особое очарование струнно-калибровочной дуальности в том, что вместо установления отношения между двумя абстрактными теориями в размерностях, лежащих за пределами человеческих представлений, она имеет дело непосредственно со знакомой нам четырёхмерной физикой, используемой для описания кварков и глюонов. Таким образом, эквивалентные объекты на пятимерной стороне дуальности имеют особое значение. Наиболее важным для нашего разговора является отношение

между кварк-глюонной плазмой, создаваемой при столкновениях тяжёлых ионов, и пятимерным горизонтом чёрной дыры. Справедливым это отношение делают в первую очередь высокие температуры, достигаемые в столкновениях тяжёлых ионов, расплавляющие нуклоны в составляющие их глюоны и кварки. Нуклоны сами по себе очень трудно отразить на пятимерное пространство, отдельные кварки и глюоны — тоже, а вот коллективное поведение сильновзаимодействующих кварков и глюонов транслировать в пятое измерение очень просто: рой частиц переходит в горизонт.

Определённо в струнно-калибровочной дуальности присутствует какое-то неуловимое новое качество. Как из общих соображений, так и по чисто техническим причинам, несколько странно иметь в качестве пятого измерения нечто, не являющееся измерением в том смысле, в каком мы знаем и любим наши привычные четыре. Это не направление физических исследований, а скорее концепция, обозначающая некоторые аспекты физики четырёх измерений. В конечном счёте я не уверен, что шесть дополнительных измерений теории струн будут смотреться в роли теории всего более убедительно, чем пятое измерение струнно-калибровочной дуальности.

Дополнительная ирония в том, что температура чёрной дыры должна быть огромной, что резко контрастирует с температурами чёрных дыр, образующихся в ядрах галактик. По грубой прикидке, сделанной в третьей главе, температура галактических чёрных дыр составляет около одной стотриллионной кельвина, в то время как температура пятимерной чёрной дыры, дуальной кварк-глюонной плазме, превышает три триллиона кельвинов, что радикально отличает искривлённое пятимерное пространство от искривлённого четырёхмерного.

Допустим, мы согласимся с дуальностью горячего роя кварков и глюонов и пятимерного горизонта. Что дальше? Существует множество вещей, которые мы сможем сделать, поскольку струнно-калибровочная дуальность — это настоящее вычислительное эльдорадо. Наиболее интересным является вычисление вязкости: как следует из геометрии чёрной дыры, динамическая вязкость очень мала по сравнению с плотностью плазмы, и это хорошо согласуется с общепринятой интерпретацией экспериментальных данных. Другие расчёты касаются поведения высокоэнергетичных частиц, которые, как я описал ранее, не пролетают больших расстояний в облаке плазмы. Это явление имеет очевидное родство с физикой чёрной дыры: ничто не может покинуть чёрную дыру. Однако нельзя по аналогии сказать, что ничто не может

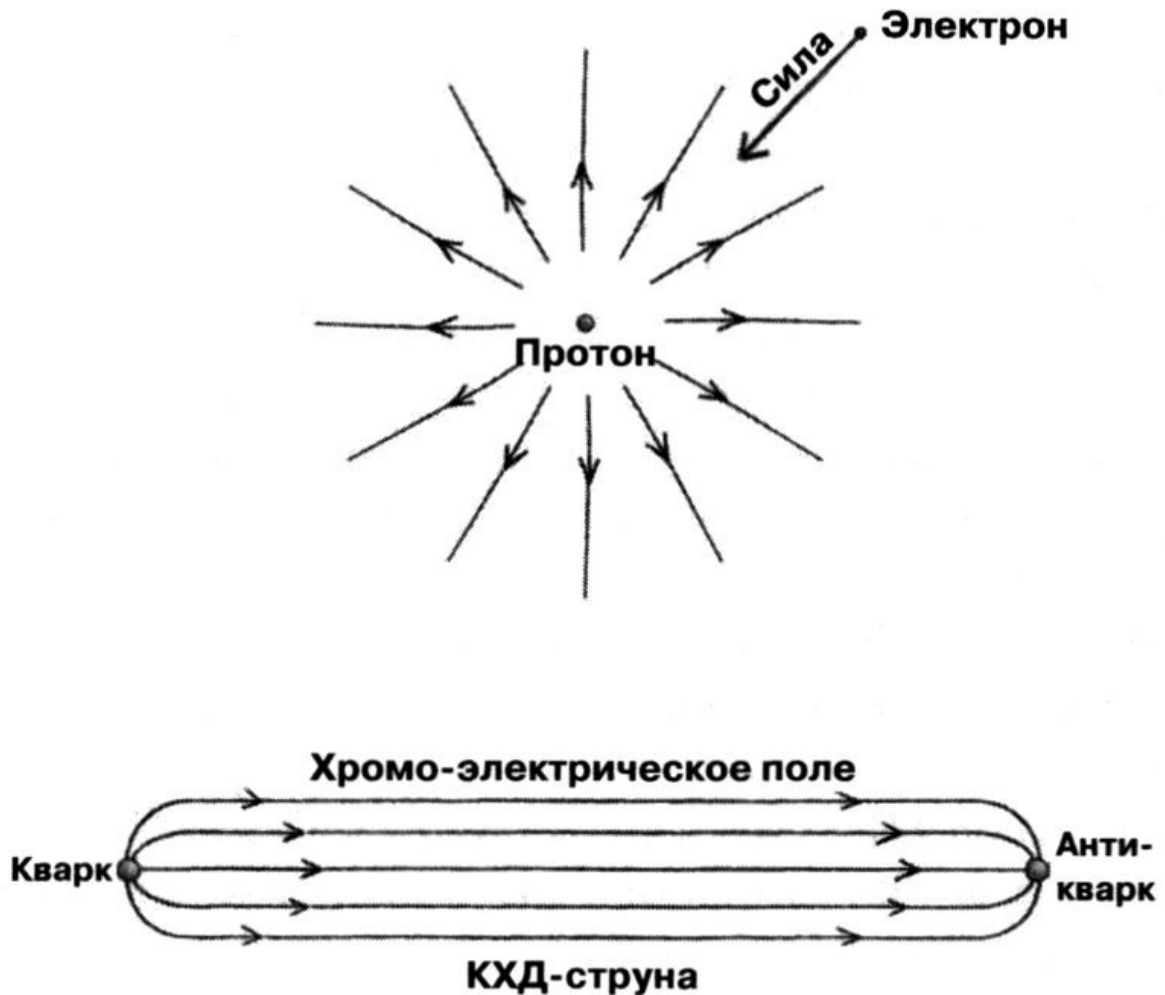
покинуть пределы плазменного облака. Как же должна выглядеть корректная трансляция четырёхмерной физики в пятимерную?

Споры об этом идут в то самое время, когда я пишу эту книгу, поэтому я могу только в общих чертах обрисовать возможные ответы и немного рассказать о сути этих споров.

Одним из возможных вариантов решения является идея «КХД-струн». Это настолько важная и общепринятая концепция, что я должен сделать небольшое отступление и рассказать, откуда она взялась. Во-первых, вспомним, что электрон окружён облаком виртуальных фотонов. Эти фотоны могут быть описаны в терминах электрического поля. На самом деле любой электрически заряженный объект, например протон, создаёт электрическое поле. Электрическое поле, окружающее протон, сообщает другим протонам, как они должны двигаться. Протоны «командуют» друг другом посредством электрического поля. Окружающее протон электрическое поле направлено во все стороны от центра протона. Протоны притягивают электроны, что также может быть описано при помощи электрического поля: будучи заряженными отрицательно, электроны реагируют на электрическое поле противоположным образом, нежели протоны.

Кварки очень похожи на электроны и в то же время очень не похожи. Они испускают виртуальные глюоны, которые могут быть описаны в терминах «хромо-электрического поля», сообщающего кваркам, куда им следует двигаться.

Но виртуальные глюоны сильно взаимодействуют между собой, что принципиально отличает их от фотонов. Из-за этого взаимодействия хромо-электрическое поле вытягивается в тонкую *квантово-хромодинамическую струну* — КХД-струну, — протянутую от одного кварка к другому. Два кварка, связанные КХД-струной, образуют частицу, называемую *мезоном*. Изучая свойства мезонов, мы можем вывести законы поведения КХД-струн, которое оказывается похожим на поведение струн в теории струн. Отдельные исследования старше, чем теория струн и квантовая хромодинамика! Они дали пищу для размышлений о том, что при помощи струн можно описать поведение субатомных частиц.



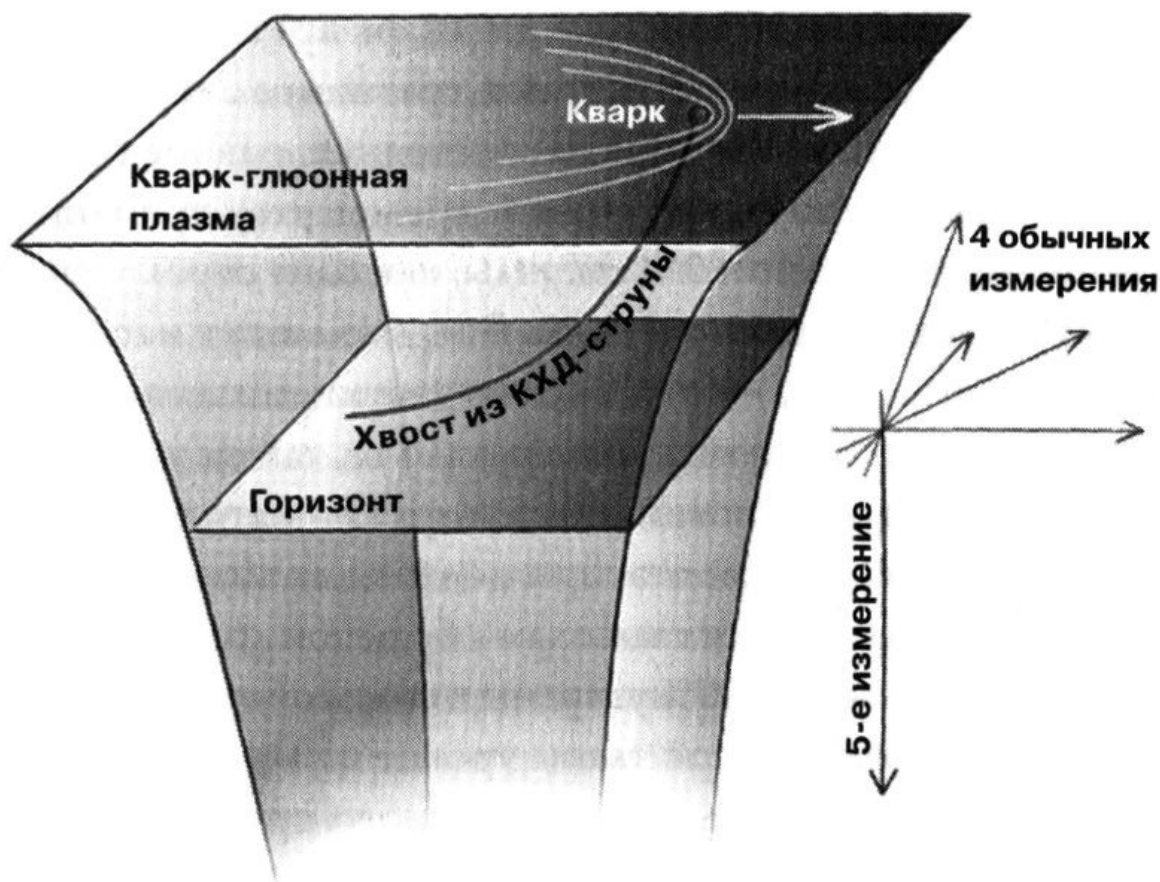
Вверху: электрическое поле протона направлено радиально во все стороны от центра протона. Внизу: хромо-электрическое поле кварка принимает форму КХД-струны и оканчивается на антикварке

Современная инкарнация этих спекуляций является одним из аспектов струнно-калибровочной дуальности и её отношения к КХД. Главное различие между современной теорией струн и КХД состоит в том, что струны рассматриваются как фундаментальные объекты, в то время как КХД-струны являются результатом взаимодействия виртуальных глюонов. Однако основной урок струнной дуальности в том, что нельзя жёстко рассматривать одну теоретическую конструкцию как фундаментальную, а другую как производную: в зависимости от обстоятельств вторая может оказаться более приемлемым языком для описания реальности.

Представьте себе кварк, рождённый в жёстком процессе и пробивающий себе дорогу сквозь кварк-глюонную плазму подобно пуле, движущейся сквозь воду. Идеи, стоящие за КХД-струнами, всё ещё

сохраняют своё значение: кварк окружён виртуальными глюонами, эти глюоны взаимодействуют между собой, проявляя тенденцию к образованию КХД-струны. Но помимо этого кварки и глюоны, составляющие горячий рой, взаимодействуют с движущимся кварком так же, как и виртуальные глюоны, которые он испускает. Этот горячий рой не позволяет КХД-струне полностью сформироваться. В целом кварк выглядит как головастик с хвостом из недосформировавшейся КХД-струны. Физика движения головастика сквозь толщу воды напоминает физику взаимодействия горячего роя с виртуальными глюонами. Насколько я знаю, квантовая хромодинамика не даёт точного количественного описания этой картины, но картина в чём-то схожа с тем, что описывает струнно-калибровочная дуальность. Струна спускается от кварка к горизонту чёрной дыры, и кварк тащит её за собой, в то время как хвост струны оказывается «застывшим» в горизонте. Струна тянет кварк назад, потому что он не может вытащить её из горизонта чёрной дыры. В конце концов кварк либо вырывается вверх и останавливается, либо падает в чёрную дыру. В обоих случаях ему не удаётся улететь далеко.

Картина, которую я нарисовал, должна хорошо описывать тяжёлые кварки, такие как с-кварк, имеющий массу, в полтора раза превышающую массу протона, или b-кварк, который тяжелее протона в четыре раза. Эти кварки не присутствуют в обычной материи, но рождаются при столкновениях тяжёлых ионов. «Обычные кварки», составляющие протоны и нейтроны, рождаются при столкновениях тяжёлых ионов гораздо более обильно, чем тяжёлые кварки. Попытки расширить описание «струнных хвостов» на случай обычных кварков пока что не имеют успеха.



Кварк, движущийся сквозь горячую кварк-глюонную плазму, тащит за собой хвост из КХД-струны, которая в пятимерном пространстве спускается вниз, достигает в конце концов горизонта чёрной дыры и, «цепляясь» на него, тормозит движение кварка

Подведём черту: струнно-калибровочная дуальность даёт нам оценку длины свободного пробега тяжёлого кварка в кварк-глюонной плазме. Для того чтобы решить, насколько хороша эта оценка, нам нужны новые экспериментальные данные.

На пути получения новых экспериментальных данных нас подстерегают две трудности. Первая состоит в том, что экспериментаторы не могут засунуть микроскоп внутрь кварк-глюонной плазмы и увидеть, где именно останавливается летящий сквозь неё тяжёлый кварк, вместо этого они имеют сгусток плазмы, в котором тяжёлый кварк претерпевает многочисленные столкновения за время, сравнимое с тем, которое требуется свету, чтобы пройти расстояние, равное размеру ядра золота. Этот очень короткий промежуток времени составляет примерно 4×10^{-23} секунды, или одну сорокатриллионтриллионную долю секунды. Всё, что

могут наблюдать экспериментаторы, — это тысячи частиц, вылетающих из сгустка плазмы. Меня всегда потрясало то, как им удаётся выудить информацию о поведении с-кварка из всего этого мусора. Я думаю, экспериментаторы должны понимать, почему теоретики относятся к их выводам с большой долей скепсиса. Они могут быть на 99,99% уверены в своём оборудовании, но даже ошибка в 0,01% при таком уровне шума сводит на нет точность вычисления длины свободного пробега с-кварка в кварк-глюонной плазме.

Вторая трудность заключается в том, что вычисления, выполняемые на основе теории струн, всего лишь *похожи* на вычисления, выполняемые на основе квантовой хромодинамики, но не тождественны. Теоретик должен выполнить определённую процедуру трансляции между одной и другой теорией, прежде чем он получит предсказание, которое можно проверить экспериментально. И на этом этапе трансляции имеет место некоторый произвол. Попытки выполнить эту процедуру трансляции честно приводят к разбросу предсказаний тормозного пути с-кварка в два раза, то есть расчёт, в зависимости от произвольных начальных предположений, либо соответствует результату эксперимента, либо отличается от него в два раза. То же относится и к расчёту вязкости.

Так что поводов открывать шампанское пока нет. Тем не менее даже согласие между теорией и экспериментом с погрешностью 50% — это огромный прорыв в высокоэнергетической физике. Пятнадцать лет назад, когда струнные теоретики трудились над дополнительными размерностями, а эксперименты по столкновениям тяжёлых ионов находились в стадии постройки детектора, никто из нас не знал даже, как подступиться к подобным расчётам. А сегодня мы расстраиваемся из-за какого-то двухкратного расхождения теории с экспериментом и думаем, как улучшить точность расчётов. Это большой прогресс.

Ранее я обмолвился о спорах, как правильно преобразовать процесс остановки тяжёлого кварка в процессы с участием струн и чёрных дыр. Это отнюдь не споры о потерянном где-то множителе 2, это споры о физической картине, которую следует использовать для описания тяжёлых кварков. Описанная мной картина содержала струнный хвост, который тащится за кварком и увязает другим концом в горизонте чёрной дыры. Конкурирующая картина содержит U-образные струны, причём нижняя часть «буквы U» чертит по горизонту чёрной дыры. За отсутствием лучшей терминологии я буду называть эти две картины «струнно-хвостовой» и «U-струнной». Преимущество последней в том, что она претендует на описание и обычных кварков, что очень хорошо, поскольку обычные

кварки вылетают из коллайдеров в гораздо больших количествах, чем тяжёлые, и их существенно легче изучать. U-струнная картина приводит к предсказаниям, которые, как и в случае струнно-хвостовой картины, либо соответствуют экспериментальным данным, либо отличаются от них в два раза. Причина заключается в так называемом *факторе произвола*: некоторые свободные параметры могут быть выбраны по-разному для струнно-хвостовой и для U-струнной картин. Причём сторонники каждой из картин выдвигают убедительные аргументы против конкурирующей. Этот спор непросто урегулировать: предмет спора слишком абстрактный, конкурирующие гипотезы отличаются незначительно, а согласие с экспериментальными данными ожидается лишь приблизительное. Тем не менее я бы отметил его как доброе предзнаменование: струнные теоретики вместо обсуждения абстрактных материй наконец-то занялись обсуждением достоинств и недостатков вычислений, которые можно хотя бы приближённо сравнить с экспериментальными данными.

Что дальше? Для исследований столкновений тяжёлых ионов ответ будет: «Чем больше, тем лучше». Чем больше расчётов сделают струнные теоретики, тем больше различных подходов к решению проблемы перевода четырёхмерной картины в пятимерную они смогут предложить. Цель их усилий — в разумном согласовании и последовательном сопоставлении пятимерных конструкций и экспериментально измеримых величин. Может случиться так, что вся программа исследований упрётся в бетонный блок посреди выбранной нами дороги и между теорией струн и реальным миром квантовой хромодинамики обнаружатся непримиримые противоречия. Пока этого, к счастью, не произошло, но существует опасность, что мы не сумеем выполнить ряд необходимых вычислений из-за технических трудностей.

Теория струн движется вперёд неравномерно, испытывая периоды застоя, прерываемые очередными революциями. Эксперименты с ядрами свинца на БАК позволят достичь существенно больших энергий, чем эксперименты с ядрами золота на RHIC. Данные, полученные в этих экспериментах, дадут новый стимул теоретикам. Среди многих достижений, которых мы можем ожидать от столкновений тяжёлых ионов в БАК, будет производство тяжёлых кварков в гораздо больших количествах, чем на RHIC. Кроме того, используемые в БАК детекторы совершеннее установленных на RHIC, поэтому разумно надеяться, что Большой адронный коллайдер существенно прояснит физическую картину потери энергии быстро движущимися кварками.

Ради справедливости стоит заметить, что главный вопрос, касающийся

Большого адронного коллайдера, состоит в том, какие новые частицы он будет открывать, какие новые симметрии? Протон-протонные столкновения являются, безусловно, лучшим полигоном для таких открытий, чем столкновения тяжёлых ионов, потому что энергия, приходящаяся на один протон, в них выше, а фон сопутствующих частиц менее шумный. Прогнозирование открытий БАК является своего рода хобби среди теоретиков. К тому времени, когда вы возьмёте в руки эту книгу, вы, вероятно, будете знать больше, чем я сейчас. Но человек предполагает, а Бог располагает, и может случиться так, что нам не повезёт и новые открытия не посыплются на нас с неба звёздным дождём.

Эксперименты трудны, теории абстрактны, и их сопоставление может обнаружить трудности и противоречия, значительно более острые, чем те, которые я описал в этой главе. Даже если ряд открытий подтвердит правоту какой-либо из теорий, построение согласованной картины мироздания, вероятно, будет долгим и запутанным процессом. И всё же я ожидаю, что благодаря своим достижениям, развитому математическому аппарату и широкому теоретическому охвату — от квантовой механики до теории гравитации — теория струн станет важной частью окончательного ответа.

Эпилог

Существует много аспектов теории струн, над которыми мы могли бы задуматься после завершения нашего ознакомительного тура. Например, существуют ли какие-либо специфические требования, заставляющие пространство-время существовать в десяти измерениях и подчиняться суперсимметрии? Или так ли уж необходимы все эти специфические объекты типа D0-бран или бран, ограничивающих пространство-время? Мы могли бы задуматься о зыбкой, но постепенно упрочняющейся связи теории струн с экспериментальной физикой. Или задаться вопросом: «Является ли теория струн стройной и красивой? Неоправданно раздутой? Облыжно оклеветанной?».

Как ни увлекательны все эти темы, я считаю, что закончить книгу следует коротким рассказом о математике, составляющей ядро теории струн. Помните вопрос из культового фильма: «В чём сила, брат?». Так вот, сила теории струн — в уравнениях. Почти все уравнения теории струн предусматривают использование математического анализа, изложение которого выходит за рамки популярной книги. Поэтому я попытаюсь, насколько это возможно, описать словами несколько наиболее важных уравнений, имеющих отношение к темам, рассмотренным в главах 5–8.

Самым важным уравнением в теории струн является уравнение, описывающее их движение. Оно утверждает, что струны предпочитают двигаться в пространстве-времени таким образом, чтобы площадь заметаемой ими поверхности была минимальной. Это уравнение не учитывает квантовую механику. Существует другое уравнение, точнее группа уравнений, описывающих движение струны квантово-механически. Эти уравнения говорят нам, что любые движения струны возможны, но некоторые из них «возможнее» других, а именно те, которые незначительно отличаются от движения, минимизирующего заметаемую струной площадь в пространстве-времени. И эти последние движения «взаимоукрепляют» друг друга. Это «взаимоукрепление» хорошо иллюстрируется римской фасцией — крепко связанным пучком прутьев. Такой пучок намного прочнее, чем каждый из составляющих его прутьев. Каждое возможное движение струны аналогично отдельному пруту. Большинство возможных движений дезорганизованы, они как бы тянут уравнение в разные стороны, но те возможные движения, которые близки к минимизирующему площадь, в некотором роде «выровнены», и они вместе вносят синхронный вклад в

уравнения, квантово-механически описывающие струну.

Уравнения для D-бран похожи на уравнения для струн. Отличительная особенность этих уравнений заключается в том, что когда много D-бран собираются вместе, опять же наподобие римских фасций, D-браны получают в своё распоряжение больше возможных направлений движения, чем имеется пространственно-временных измерений. Если D-браны находятся далеко друг от друга, то положение одной D-браны относительно другой описывается вектором в десятимерном пространстве-времени. Но если D-браны расположены очень близко, в игру вступает калибровочная теория. Уравнения калибровочной теории говорят нам, что про струны, натянутые между двумя бранами, как изображено на иллюстрации в разделе «Браны и чёрные дыры» главы 5, невозможно с уверенностью сказать, что они идут от «красной» браны к «синей» или от «зелёной» к «красной». Вместо этого имеет место суперпозиция всех возможных вариантов, описываемая единой разноцветной волновой функцией, наподобие того как мелодия и гармония соединяются в «Экспромт-фантазии» Шопена, не теряя своей индивидуальности.

Уравнения, описывающие дуальности теории струн, удивительно разношёрстны. Те из них, которые описывают супергравитацию, неожиданно просты и выражают некоторые отношения симметрии. Уравнения, описывающие струны и браны, являются квантово-механическими, и они тоже довольно просты: большинство этих уравнений утверждают, что электрические заряды бран должны принимать только целочисленные значения при соответствующем выборе единиц измерения. И существует ещё множество уравнений, описывающих дуальности теории струн; эти уравнения обычно вырастают из попыток формализовать те многочисленные интуитивные отношения, о которых мы говорили в этой книге. В качестве примера можно привести вычисление вклада квантовых флуктуаций клубка D0-бран в общую массу этого клубка. Правильный ответ, говорящий, что квантовые флуктуации не вносят никакого вклада в массу клубка, был получен на основе дуальности с M-теорией задолго до того, как это было окончательно доказано путём решения соответствующих уравнений.

Уравнения суперсимметрии начинаются с выражений типа $a \times a = 0$. Это выражение имеет несколько смыслов. Во-первых, оно означает, что в фермионном измерении возможны только два состояния движения: движение или покой. Во-вторых, оно означает, что два фермиона не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии (принцип запрета). Суперсимметрия ведёт нас от простых выражений типа $a \times a = 0$ к

действительно глубоким уравнениям, которые помогли современной математике обрести её нынешнюю форму.

Уравнения, описывающие чёрные дыры и струнно-калибровочную дуальность, существуют в двух основных формах. Первая форма — это *дифференциальные* уравнения. Дифференциальные уравнения описывают непрерывное поведение струны или частицы в пространстве-времени или эволюцию самого пространства-времени шаг за шагом. Вторая форма — это *интегральные* уравнения. С помощью интегрального уравнения вы можете описать, что происходит в целом пласте пространства-времени, включая граничные условия. Эти две формы уравнений тесно связаны. К примеру, дифференциальное уравнение можно метафорически представить как заявление частицы: «Я падаю!». А интегральное уравнение, описывающее горизонт чёрной дыры, сообщает частице: «После пересечения этой границы ты никогда не сможешь вернуться обратно».

Сколь бы ни велика была роль математики в теории струн, было бы ошибкой думать, что вся теория струн — это лишь большой набор разнообразных уравнений. Уравнения подобны мазкам на картине. Без отдельных мазков не будет полной картины, но полная картина — это нечто большее, чем набор отдельных мазков. Не вызывает сомнений, что теория струн — это незавершённое полотно, и два главных вопроса, возникающих при взгляде на него: «Когда на этом полотне будут закрашены последние белые пятна и будет ли законченная картина отражать реальный мир?».

notes

Примечания

Автор имеет в виду знаменитую танцевальную сцену из мюзикла 1936 года «Время свинга». Посмотреть обсуждаемый фрагмент фильма можно, например, здесь: <http://youtu.be/mxPgplMujzQ>. (Примеч. перев.)