

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 трехмерные 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 трехмерные 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 чем 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 ее отношении к D-бранам. После этого остановимся на связи D-бран с черными 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

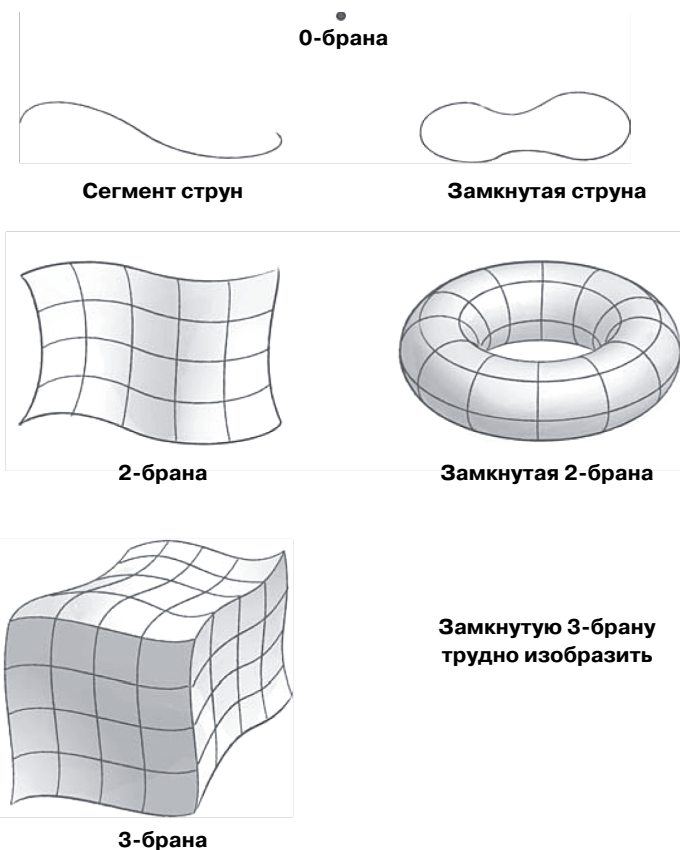
Все, что я до сих пор рассказывал вам о теории струн, примерно соответствует тому, как представляли ее себе ученые в 1989 году. Они понимали опасность тахионов, радовались чудесным свойствам суперструн и связи между струнами и пространством-временем. Была одна вещь, которую более-менее понимали теоретики и о которой я вскользь упомянул в предыдущей главе, а именно — *компактификация*, — процесс свертывания шести пространственных измерений, приводящий к тому, что на финальной стадии остаются лишь три пространственных и одно временное измерение. Выглядело все 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, дает правильный список элементарных частиц, причем гораздо более обширный, чем я только что привел. 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 еще 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 пришел 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 серьезному 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 все менее и менее контролируемые 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 остается гравитон и еще 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 — нуль-мерная 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 определенная связь между супергравитацией и теорией струн, и эта связь была очевидна задолго до второй суперструнной революции. Оставалась



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

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.

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 черные дыры с нулевой температурой. Одиннадцатимерная супергравитация органично вписалась в круг новых идей и заняла в нем 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

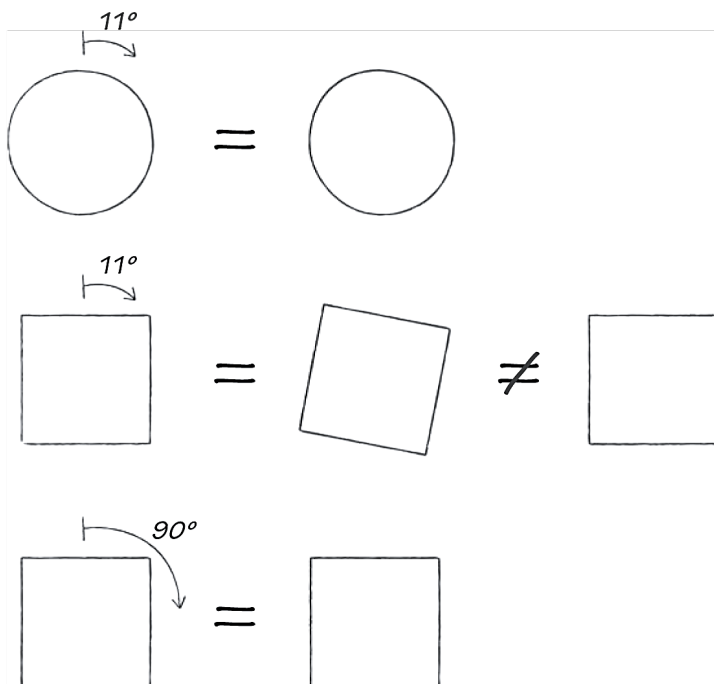
D-браны являются частным случаем бран. Их определяющее свойство — расположение на концах струн. Потребовалось много времени, чтобы понять, как эта простая идея может быть использована в описании движения и взаимодействия D-бран. D-браны имеют определенную массу, которая может быть вычислена на основании 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 распространенность до начала второй суперструнной революции предположения о слабом взаимодействии струн была еще 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, протяженные 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 протяженность 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: струнны-

ми 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 совпадет 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 перекрестку. Точно так же любой понимает, что поворот налево — это действие, противоположное повороту направо. Если вы пойдете на север по 8-й авеню, повернете направо на 26-ю стрит, а затем



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

повернете налево на 6-ю авеню, то направление вашего движения после этого будет таким же, как и в начале пути: на север.

Соглашусь, что не все будет как раньше. Раньше вы шли по 8-й авеню, а теперь идете 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 дает 0 .

Есть еще одна особенность правых и левых поворотов, соответствующих вращению на 90° . Три последовательных

правых поворота эквивалентны одному левому повороту, а после четырех 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. Приведенный пример иллюстрирует отличие арифметики поворотов от обычной арифметики. Всё, что следует знать о группе, — это как правильно складывать ее элементы. Ну, не совсем всё. Помимо операции сложения нам понадобится еще операция взятия *обратного* элемента. Обратным элементом правого поворота является левый поворот. Обратный элемент отменяет все действия элемента группы, к которому он является обратным.

Существует определенное сходство между тем, о чем я только что рассказал, и тем, о чем 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 объез-