

539.12.01

СУПЕРСТРУНЫ: ВСЕОБЪЕМЛЮЩАЯ ТЕОРИЯ? *)

С. Энтони

Физики давно искали теорию, которая бы полностью описывала нашу Вселенную. Такая теория, возможно, должна основываться на описании частиц не как точек, а как протяженных объектов — суперструн.

В последние несколько лет физики начали всерьез говорить о возможности построения теории всего на свете, способной, в принципе, описать все физические явления. Некоторые зашли так далеко, что пытались даже установить срок, когда это может произойти (см., например, статью Стивена Хокинга: *New Scientist*, 16 August 1984, p. 10). Перед подобной теорией стоят огромные задачи. Она должна объяснять существование всех фундаментальных частиц и взаимодействий. Она должна также обладать предсказательной силой, т. е. позволять вычислять то, что должно произойти при заданных условиях. Например, она должна предсказывать величину гравитационной постоянной, число кварков, которые должны родиться в последних экспериментах на ускорителях и т. п.

Для получения подобных предсказаний физики используют аппарат квантовой механики. Она дает набор правил, позволяющих находить следствия данной теории. Когда мы делаем вычисление, основанное на квантовой механике, результат должен быть согласован с исходными правилами. Это естественное условие приводит к очень сильным ограничениям на теорию. В действительности, эти ограничения могут быть настолько жесткими, что ни одна единая теория, которая описывает частицы как простые точки, не сможет им удовлетворить. Может оказаться необходимым допустить и исследовать возможность, что частицы имеют сложную структуру: они есть протяженные объекты.

Простой, «домашний», пример такого протяженного объекта — это струна. Может показаться удивительным, что теории, основанные на описании частиц как струн, могут быть разработаны. И действительно, физики

*) Anthony S. Superstrings: a Theory of Everything?//*New Scientist*. 29 August 1985. P. 34—36. — Перевод А. А. Цейтлина.

С. Энтони в настоящее время — научный консультант. Ранее он работал в области теории элементарных частиц в Кембриджском университете.

© New Scientist 1985

© Перевод на русский язык,

издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1986

Майкл Грин из колледжа королевы Марии в Лондоне и Джон Шварц из Калифорнийского технологического института несколько лет работали над такими теориями, не привлекая особенно большого внимания. Однако в последние месяцы было получено несколько замечательных результатов, что вынудило физиков, столь уважаемых, как Принстонский профессор Эдвард Виттен, отбросить осторожность и объявить теорию «потрясающей».

Вы можете задать законный вопрос: почему же, если частицы действительно есть струны, это не было обнаружено ранее. Если струны довольно короткие, очень трудно отличить их от точек. Одна из центральных идей, лежащих в основе теории струн, заключается в следующем. Подобно тому, как колебания струны скрипки есть набор гармоник, возбуждения «частицы-струны» есть набор точечных состояний. Каждая высшая гармоника «частицы-струны» будет наблюдаться как новая частица с массой больше масс предыдущих частиц. Все частицы, которые мы знаем и, может быть, откроем в будущем, — это низшие гармоники струн. Маловероятно, чтобы нам удалось непосредственно наблюдать высшие состояния, так как энергия, необходимая для их рождения, столь велика, что подобные процессы могли бы происходить лишь на ранних стадиях эволюции Вселенной.

При обычных условиях существенно лишь состояние струны с наименьшей энергией. Это состояние является точечным, так что адекватно использование обычных теорий с точечными частицами. Однако учет остальных возбуждений струны является крайне существенным при определении предсказаний теории с помощью квантовой механики. Эти дополнительные состояния обеспечивают непротиворечивость теории.

Интерес к этому радикально отличному от прежнего взгляду на элементарные частицы был обусловлен трудностями, с которыми теоретики столкнулись при попытке объединения четырех фундаментальных взаимодействий. Три из взаимодействий — электромагнитное, сильное и слабое — могут быть объединены весьма естественным образом. При этом, однако, гравитация остается в стороне. Теория гравитации Альберта Эйнштейна (общая теория относительности) не годится для фундаментального объединения ввиду того, что ее не удастся совместить с краеугольным камнем физики XX века — квантовой механикой. Подобно тому, как сам Эйнштейн не смог принять квантовую механику, его величайшее творение оказывается противоречивым с точки зрения основанной на вероятностях квантовой теории.

Квантовая механика не есть полностью динамическая теория: она ничего не говорит о природе частиц, образующих Вселенную, и о силах, которые действуют между ними. Это скорее набор правил, с помощью которых можно найти, что произойдет, согласно данной динамической теории, при определенных условиях. После того, как физик выберет динамическую теорию, он применяет правила квантовой механики для нахождения ее предсказаний.

Квантовая механика имеет дело с вероятностями: она говорит, насколько вероятно данное событие, но не гарантирует, что оно обязательно произойдет. Наивный физик, не знающий о развитии физики за последние 60 лет, может попытаться применить правила квантовой механики к эйнштейновской теории гравитации. Однако его быстро постигнет разочарование, так как вероятность любого процесса, которую он вычислит, окажется бесконечной — весьма огорчительный результат ввиду того, что вероятности должны лежать в пределах от 0 до 1.

В некоторых случаях существует метод обращения с бесконечными вероятностями. При условии, что имеется лишь конечное число расходимостей, теория может быть сделана внутренне непротиворечивой и на ее основе могут быть получены осмысленные предсказания, которые иногда оказываются в замечательном согласии с экспериментом. Процедура, с помощью которой устраняются расходимости, носит название «перенормировка». Ее обоснование лежит, скорее, в том, что она приводит к разумным результатам, а не основана на каких-либо физических принципах.

Итак, наивный физик пытается «перенормировать» гравитацию. Эта попытка, однако, оказывается неудачной, но не из-за недостатка усилий. По мере того, как наш физик вычисляет, старательно устраняя расходимости, все новые и более сильные расходимости возникают на каждой новой стадии. Как только одна голова «гравитационной гидры» отрезана, другие, более страшные, вырастают на ее месте. Какие бы усилия ни приложил физик, квантовая версия общей теории относительности не будет иметь смысла.

Представляется, что физик должен сделать выбор: то ли отказаться от общей теории относительности, которая была проверена довольно поверхностно, то ли от квантовой механики, которая прошла самые серьезные экспериментальные проверки, какие только можно придумать. Казалось бы, выбор очевиден. Тем не менее наш физик не хотел бы отказаться от общей теории относительности как ввиду ее элегантности, так и потому, что не существует никакой реальной альтернативной теории гравитации. Поэтому физик решает пойти на компромисс. Теория Эйнштейна должна описывать гравитационное взаимодействие на больших расстояниях; на очень малых масштабах, где важна квантовая механика, должна проявляться новая физика, обеспечивающая согласованность всей теории в целом.

Именно такой подход использовался теоретиками в последние годы в их работе над так называемыми теориями супергравитации, которые возникли в результате синтеза принципов общей теории относительности и суперсимметрии (New Scientist, 15 March 1984, p. 28). Суперсимметрия — это симметрия между фермионами и бозонами, в частности, между частицами материи — кварками и лептонами и частицами — переносчиками взаимодействий, такими, как фотон в случае электромагнетизма. В суперсимметричных теориях для всех известных элементарных частиц имеются «суперпартнеры». Это удвоение числа частиц приводит к замечательному следствию. Бесконечные вероятности, которые возникали в наивном подходе к квантованию гравитации, теперь могут, в принципе, сокращаться, благодаря компенсации вкладов частиц и их суперпартнеров. Хотя каждый тип частиц дает бесконечный вклад в вероятности, расходимости имеют противоположные знаки и могут компенсироваться, так что в результате могут получиться вероятности, лежащие в интервале от 0 до 1.

К сожалению, вычисления, по-видимому, не подтверждают эту надежду. Теория супергравитации наталкивается на риф квантовой механики. Хотя полной ясности до сих пор нет, видимо, и в супергравитации не удастся избавиться от бесконечных вероятностей, которые возникали при квантовании общей теории относительности. Сокращения вкладов в расходимости частицы и ее суперпартнера может быть недостаточно для спасения теории в целом. Но это лишь первая из проблем супергравитации.

Вторая проблема связана с известным экспериментальным фактом. Уже почти 30 лет физики знают, что слабые взаимодействия не сохраняют зеркальную симметрию. Образ, отраженный в теоретическом «зеркале», отличается от реально происходящего явления. Любая теория, как бы огромны ни были ее цели, сколько бы ненаблюдаемых частиц и скрытых измерений она ни предполагала бы существующими, обязательно должна учитывать этот факт. К сожалению, теория супергравитации не предсказывает нарушение зеркальной симметрии.

В других теориях, правильно учитывающих нарушение зеркальной симметрии, это свойство, в свою очередь, приводит к серьезным проблемам при применении правил квантовой механики. В этом случае теория часто предсказывает невозможное: появление частиц с отрицательной вероятностью, т. е. в ней имеются «аномалии». Бесконечные вероятности — это уже достаточно плохо, но от них, по крайней мере, иногда удастся избавиться. Как же быть с отрицательными вероятностями? Для того чтобы их исключить, необходимы совершенно неестественные подгонки параметров теории.

Именно в то время, когда теории точечных частиц столкнулись с серьезными трудностями, если не потерпели крах вообще, появились теории струн и отдели в сторону все проблемы супергравитации. Теории струн существовали уже достаточно длительное время, но именно соединение их с принципом суперсимметрии, т. е. построение теории «суперструн» привело Грина и Шварца к успеху. Замечательное свойство теории суперструн, которое вдохновило Грина и Шварца, это — естественное, в действительности даже необходимое, объединение гравитации с другими типами взаимодействий, которое имеет в ней место.

В этой теории струны взаимодействуют друг с другом и сами с собой, когда их концы касаются и «склеиваются». Например, рассеяние двух струн описывается как процесс объединения двух струн в одну и ее последующего разрыва на две струны. Ввиду того, что свободные концы одной струны могут коснуться и слиться, теория струн с открытыми концами должна содержать внутри себя теории замкнутых струн. Это простое, почти тривиальное, наблюдение имеет интересные следствия. Оказывается, что так называемые «калибровочные» взаимодействия — такие, как сильные, слабые или электромагнитные — переносятся открытыми струнами, тогда как замкнутые струны переносят гравитационное взаимодействие. Подобно тому как существование замкнутых струн есть следствие существования открытых струн, существование гравитации вытекает из факта существования калибровочных взаимодействий. Этот результат — отличительная особенность теории открытых струн. Другие теории также могут описывать гравитацию и калибровочные взаимодействия, но объединение этих взаимодействий в них остается дополнительным предположением.

А как обстоят дела со второй проблемой, с которой столкнулась супергравитация, — проблемой нарушения зеркальной симметрии? Эта проблема тесно связана с числом измерений пространства-времени, в котором теория существует. Подобные теории могут часто формулироваться в пространствах большего, чем обычное, числа измерений. В теориях супергравитации в действительности нет убедительной теоретической причины предпочесть одну размерность пространства любой другой, меньшей либо равной 11. Лишь наблюдения в реальном мире определяют число пространственно-временных измерений. В случае суперструн подобная теоретическая свобода уже отсутствует, так как непротиворечивую теорию удастся построить лишь в 10 измерениях. Это важно, ибо лишь при четном числе измерений имеется возможность построения теорий, которые нарушают зеркальную симметрию. Если бы магическая размерность оказалась равной 9 или 11, то суперструны, возможно, представляли бы лишь академический интерес.

Может показаться, что 10 измерений — это слишком много для описания нашего четырехмерного мира (имеющего три пространственных и одно временное направления). Тем не менее такие многомерные теории активно изучались в последнее время. Теоретики, в принципе, знают, как «лишние» измерения могут стать «малыми», чтобы быть наблюдаемыми (New Scientist, 9 February 1984, p. 31).

Открытие, которое вызвало взрыв интереса к суперструнам, состояло в следующем. Грин и Шварц обнаружили, что, нарушая зеркальную симметрию нужным образом, теории суперструн в то же время избегают скрытой ловушки аномалий. Совсем не тривиально, что эти теории могут оказаться свободными от аномалий. И действительно, аномалии отсутствуют лишь в двух тесно связанных вариантах теорий суперструн. Отсутствие противоречий с квантовой механикой диктует весьма специальный спектр состояний струны. Суперструны не только избегают аномалий — они также имеют шанс быть свободными от трудностей с бесконечными вероятностями. Последнее свойство, по-видимому, тесно связано с удачным сокращением аномалий. Однако в настоящее время теория еще недостаточно разработана, чтобы установить справедливость этой связи.

Грин и Шварц пошли дальше и смогли продемонстрировать, почему теория суперструн работает там, где теория супергравитации в десяти измерениях наталкивается на трудности. При низких энергиях струны выглядят как точки и потому описываются «эффективной» теорией точечных частиц. Замечательно, что это низкоэнергетическое приближение десятимерной теории суперструн «почти» совпадает с супергравитацией. Имеется, однако, отличие — дополнительное взаимодействие, которое выглядит совершенно неестественным в рамках теории супергравитации (это — причина, по которой оно не исследовалось ранее), и именно этот добавок обеспечивает существование непротиворечивой теории.

Несмотря на все успехи теории суперструн, остается вопрос, описывает ли она нашу Вселенную или же есть лишь любопытное теоретическое построение. Все, что можно сказать в настоящее время, это — что теория суперструн имеет большие перспективы.

Одно из интересных предсказаний теории состоит в том, что может существовать материя, подобная той, которую мы знаем, с аналогичными частицами и взаимодействиями, но которая практически необнаружима обычными средствами. Хотя частицы этой материи могут излучать и поглощать «свой» свет, частицы нашей материи не могут его зарегистрировать. Две формы материи могут сосуществовать во Вселенной, почти не замечая друг друга. Почти, но не полностью: из всех известных сил лишь гравитация будет удерживать их вместе (*New Scientist*, 8 August 1984, p. 24).

Это явление почти скрытой материи было предложено в качестве объяснения проблемы «недостающей» массы, заключающейся в том, что видимой материи в галактиках недостаточно для объяснения их гравитационного взаимодействия. Весьма интригующим выглядит предположение, что мы сможем «увидеть» эффекты суперструн лишь через влияние невидимой материи.