

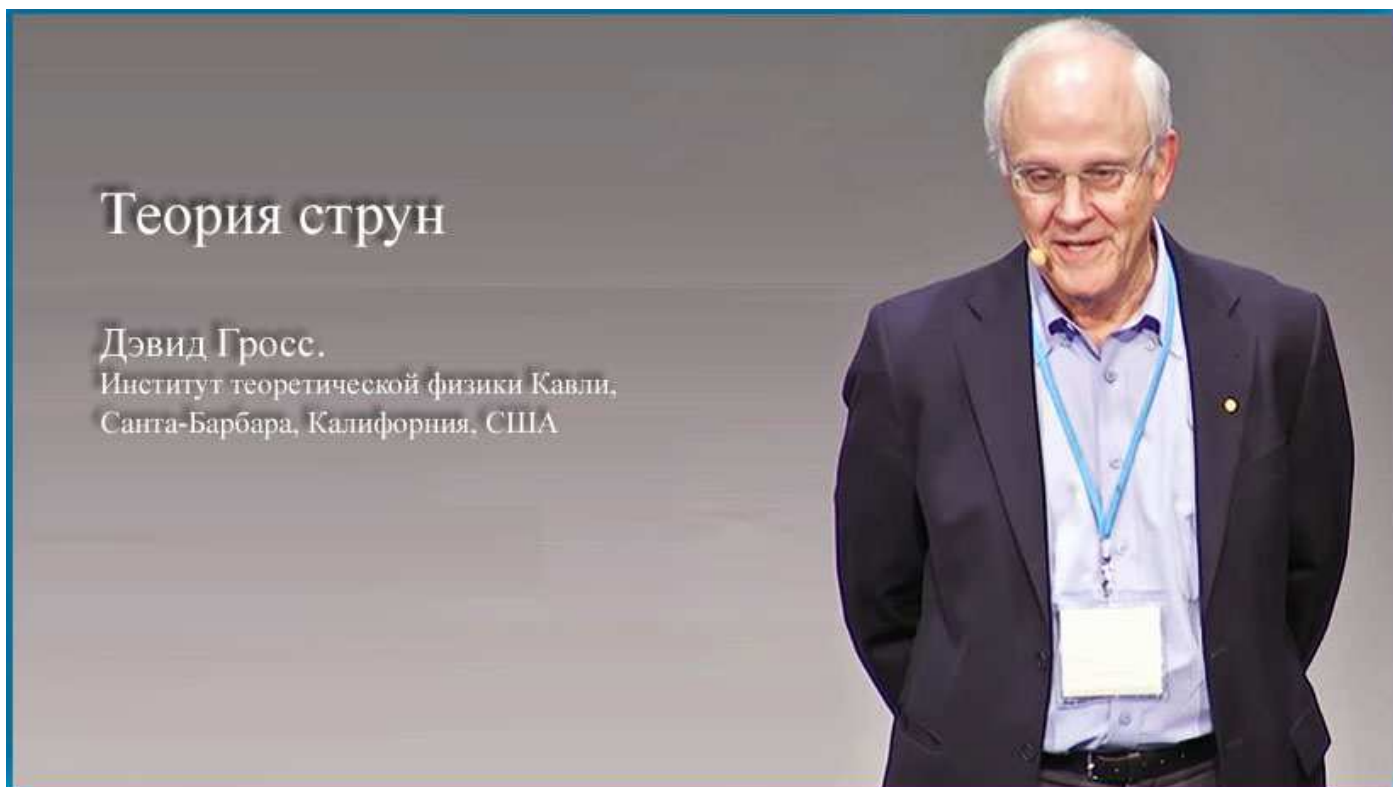
# Теория струн<sup>1)</sup>

*Дэвид Гросс.*

*Институт теоретической физики Кавли, Санта-Барбара, Калифорния, США*

---

<sup>1)</sup> <https://scisne.net/a-887>



- Почему возникла теория струн?
- Вопросы
- Выход за рамки Стандартной модели
- Суперсимметрия
- Можно ли экстраполировать до длины Планка?
- От частиц к струнам
- Взаимодействия струн
- Теория струн и гравитация
- Единая теория
- Дуальности в теории струн
- Пространство-время обречено!
- Надежды, связываемые с теорией струн
- Скоро ли сбудутся обещания теории струн?

Сегодня мы поговорим о теории струн. Прежде всего, я представлю мотивацию столь дерзкой попытки связать воедино все силы природы. Затем мы обсудим базовую структуру теории струн, преподнесенные ею сюрпризы, достигнутые с ее помощью успехи и пока еще не сбывшиеся обещания. И наконец, я обсужу с вами грядущие перемены в фундаментальной физике, предполагаемые теорией струн.

### **Почему возникла теория струн?**

К исходу XX столетия мы имели завершенную и весьма успешную теорию физики элементарных частиц, описывающую три из четырех фундаментальных сил, действующих в природе, — электромагнитные, слабые ядерные и сильные ядерные взаимодействия. В основе нашего понимания физики элементарных частиц лежит квантовая теория поля, то есть квантово-механическая теория локальных полей.

Как явствует из Стандартной модели физики элементарных частиц, а именно из теории электрослабых взаимодействий и квантовой хромодинамики (КХД), квантовая теория поля, насколько мы можем судить, теоретически описывает все наблюдаемые в природе

силы. Стандартная модель крайне успешна и очень хорошо проверена. Сотни экспериментов, проведенных, в основном, на ускорителях элементарных частиц, позволили проникнуть в структуру материи на расстояния до  $10^{-18}$  см (миллиардные доли миллиардных долей сантиметра). И во всех этих экспериментах теория — Стандартная модель — работает очень хорошо. Точность экспериментальной проверки Стандартной модели необычайно высока. В случае квантовой электродинамики (КЭД) мы иногда можем проверить теоретические предсказания с точностью до единицы на  $10^{10}$  — поразительное достижение и с точки зрения эксперимента, и с точки зрения теории. В случае объединенной теории электрослабых взаимодействий точность экспериментальных проверок теории иногда приближается к единице на 100 000. И даже в случае сильных взаимодействий мы сегодня имеем точность экспериментальной проверки предсказаний КХД с погрешностью менее одного процента, приближающуюся в некоторых экспериментах к одной тысячной. Таким образом, Стандартная модель на основе квантовой теории поля необычайно успешна. Более того, не предвидится никаких оснований полагать, что эта общая концептуальная модель (квантовая теория поля) не работает вплоть до масштабов, соизмеримых с длиной Планка (где начинают проявляться квантовые эффекты гравитации), которая составляет порядка  $10^{-33}$  см.

Завершение теоретической разработки Стандартной модели — одно из величайших естественнонаучных достижений XX века. Мы развили всеобъемлющую теорию всех негравитационных сил, действующих в природе, работающую в интервале расстояний начиная с длины Планка и заканчивая размерами Вселенной, то есть различающихся на 60 порядков! Казалось бы, всё идет замечательно...

## Вопросы

Однако исследования на переднем крае фундаментальной физики с успехом Стандартной модели не заканчиваются. Мы не можем довольствоваться лишь Стандартной моделью, поскольку она оставляет открытыми значительную часть вопросов, многие из которых хотя и вытекают из самой Стандартной модели, не могут, по нашему мнению, быть разрешены в рамках квантовой теории поля. Например, все силы, управляющие физикой элементарных частиц, контролируются калибровочными полями, описываемыми теориями неабелевых полей Янга—Миллса. А чем теория Янга—Миллса заслужила столь особое положение? В рамках квантовой теории поля можно представить себе и множество других видов силовых взаимодействий. Почему они не проявляются? Затем, в Стандартной модели мы не можем просто взять и рассчитать напряженность полей и заряды всех сил. Например, постоянная тонкой структуры, определяющая интенсивность электрического силового поля, вычисляется исключительно путем измерений. Мы понятия не имеем, почему она равна приблизительно  $1/137$ .

Затем, что касается структуры фундаментальных составляющих (конституентов) материи — кварков и лептонов. Мы открыли для себя три (а почему именно три?) семейства кварков и лептонов с весьма странными массами и смешиваниями. У нас нет никакого объяснения такой структуре масс и смешиваний или, если уж на то пошло, не знаем мы и самой причины существования материи.

Также, поскольку в конечном итоге нам придется включать во всю эту историю и квантовую теорию гравитации (почему этого не избежать — мы еще увидим), мы полагаем неизбежными и новые вопросы. Некоторые из них носят скорее практический характер: например, как квантовать гравитационное поле? Некоторые же вопросы принято относить к категории философских, например: почему пространство трехмерно (и действительно ли оно трехмерно)?

Получить ответы на все эти вопросы важно не просто ради удовлетворения нашего любопытства, но и потому, что без этих ответов мы не поймем истока и первоначала

Вселенной. Мы не видим способов получения ответов на эти вопросы ни в рамках Стандартной модели, ни в рамках простых расширений Стандартной модели. Это наводит на мысль, что на сверхмалых расстояниях или при сверхвысоких энергиях начинают действовать принципиально новые физические законы. Возвращаясь ко временам всё более горячей и плотной Вселенной и всё более высокой энергии частиц, мы неизбежно упираемся в точку, начиная с которой физика, как мы полагаем, станет иной.

### **Выход за рамки Стандартной модели**

На протяжении последних тридцати лет, сразу по завершении Стандартной модели, мы пытались получить ответы на указанные вопросы, однако без особого успеха. Похоже, в рамках Стандартной модели (а в действительности, и квантовой теории поля, как таковой) ответа на эти вопросы нам не получить. Чтобы попытаться пойти дальше Стандартной модели и ответить на эти вопросы, нужны новые эксперименты на сверхмалых расстояниях и при сверхвысоких энергиях. Однако это и трудно, и дорого. В настоящее время нам недоступны эксперименты при энергиях выше 1 ТэВ (миллион миллионов электрон-вольт). Но ничто не мешает теоретикам экстраполировать Стандартную модель на всё более высокие энергии и посмотреть, что из этого получится. Вскоре по завершении Стандартной модели теоретики экстраполировали силовые взаимодействия до очень высоких энергий.

Всё разнообразие сил основано на неабелевой калибровочной теории Янга—Миллса. Однако при низких энергиях силы эти проявляются совершенно по-разному. Сильные взаимодействия крайне интенсивны, в то время как слабые и электромагнитные взаимодействия проявляются в значительно меньшей степени. Однако в квантовой теории поля все силы зависят от расстояния. Это следствие квантовых свойств вакуума, который представим в виде динамической среды, заполненной виртуальными квантами. Такой вакуум может экранировать заряды, что и происходит в случае электромагнитного взаимодействия, в результате чего электрическое поле экранируется и ослабевает по мере увеличения расстояния (в результате большего экранирования) и, напротив, усиливается на коротком расстоянии и при высокой энергии. Сильное взаимодействие ведет себя противоположным образом (открытие этого свойства — асимптотической свободы — как раз и привело нас к формулировке верной теории сильного взаимодействия); оно ослабевает при высоких энергиях и на коротких расстояниях. Так что, если экстраполировать интенсивность сильного взаимодействия, оно ослабевает и при достаточно высоких энергиях может сравняться с интенсивностью сил слабого и электромагнитного взаимодействий. Почти 30 лет назад было обнаружено, что при экстраполяции всех трех сил они нивелируются в области предельных сверхвысоких энергий. Это стало первым ключом к существованию еще одного физического порога — при сверхвысоких энергиях далеко за пределами современных возможностей наблюдения, — за которым все силы по шкале энергий сливаются в рамках теории объединения.

Но это отнюдь не значит, что нас не ждут новые физические открытия при энергиях значительно ниже шкалы объединения. На самом деле, в последние годы мы сделали множество физических открытий. Мы выяснили, что нейтрино имеют массу и что различные виды нейтрино смешиваются. Мы открыли новые моды нарушения комбинированной четности и нарушения обращения времени при слабых взаимодействиях между элементарными частицами низких энергий. Но все эти природные явления, хотя и открыты впервые, объяснимы в обычных рамках Стандартной модели. Нарушение комбинированной четности — вещь естественная, поскольку мы имеем три семейства кварков и лептонов, а наличие массы у нейтрино может быть учтено путем простого и, опять же, естественного расширения Стандартной модели. Конечно, рассчитать массы нейтрино или структуру нарушения комбинированной

четности теоретически мы не в состоянии, однако та же самая проблема касается и расчета масс кварков и лептонов.

## Суперсимметрия

Уже в 2007 году в ЦЕРНе (Женева) будет запущен новый ускоритель — Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider, LHC). Мы рассчитываем открыть на LHC принципиально новые физические явления. Совершенно определенно ожидается открытие частицы Хиггса — проявления динамики спонтанного нарушения электрослабой калибровочной симметрии. Но самой захватывающей перспективой LHC является открытие суперсимметрии.

Суперсимметрия — удивительная теоретическая концепция. Это естественное и, вероятно, уникальное расширение природных симметрий специальной и общей теорий относительности. Существенную роль играет она и в теории струн. На самом деле, концепция суперсимметрии впервые как раз и была предложена в рамках теории струн, а затем обобщена до квантовой теории поля. Суперсимметрию проще всего описать, представив себе, что пространство-время имеет дополнительные измерения. Характеризуя событие, мы говорим, что оно происходит в пространственной точке  $x$  в момент времени  $t$ . Полевые и волновые функции имеют своими аргументами пространственно-временные координаты  $x$  и  $t$ . Теперь представим пространство с введенными нами дополнительными измерениями, но только квантовыми. По этим вновь введенным координатам положение измеряется уже не обычными, а грассмановыми числами. Эти числа антикоммутируют, то есть умножая некую величину на два таких числа в прямой последовательности, мы получаем противоположный по знаку результат, чем при умножении на два этих же числа в обратной последовательности.

Такие числа можно изобрести. Математики изобретают самые разные числа. Этими числами можно поиграть — и представить себе пространство, в котором, помимо привычных пространственно-временных координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и  $t$ , имеются антикоммутирующие координаты  $\theta_1$  и  $\theta_2$  (такие, что  $\theta_1\theta_2 = -\theta_2\theta_1$ ). Имеется весьма изящное обобщение традиционного пространства-времени, включающее подобные антикоммутирующие квантовые измерения. В таком пространстве — так называемом «суперпространстве» — имеются преобразования симметрии, позволяющие отобразить  $x$  в  $y$  поворотом или  $x$  в  $t$  отображением, а также преобразования, поворотом переводящие квантовые координаты  $\theta$  в пространственные координаты  $x$ . Имеется красивое обобщение классических пространственно-временных симметрий, вращательной инвариантности и релятивистской инвариантности Лоренца до суперпреобразований, действующих в суперпространстве. Так что квантовое обобщение пространства-времени и пространственно-временных симметрий строится математически.

Суперсимметричными теориями называются теории квантовых полей в суперпространстве, где поля являются функцией не только пространственно-временных, но и суперпространственных координат. Волновая функция здесь также включает в число аргументов, наряду с пространственно-временными, суперпространственные координаты. Подобные теории имеют весьма характерные отличия от традиционных. Согласно суперсимметричным теориям, у каждой частицы имеется «суперпартнер» — соответствующая ей «суперчастица». Суперпартнер получается в результате поворота суперпространства, переводящего коммутирующую координату, например  $x$ , в антикоммутирующую, например  $\theta$ . Такое преобразование трансформирует бозонную коммутирующую координату в фермионную антикоммутирующую координату. Соответственно, каждой наблюдаемой нами частице должна соответствовать суперчастица с обратным статистическим распределением и спином, отличающимся на  $1/2$ . Кварку соответствует суперпартнер, названный

«скварком»; электрону — партнер с нулевым спином под названием «селектрон»; фотону (кванту света) — фермионный партнер со спином  $1/2$  под названием «фотино»; гравитону (переносчику гравитационного взаимодействия со спином 2) — партнер со спином  $1\ 1/2$  под названием «гравитино». Вообще, у каждой наблюдаемой нами частицы должен иметься супрепартнер. До сих пор частиц-суперпартнеров нами не наблюдалось. Кто-то даже пошутил, что в природе мы наблюдаем ровно половину предсказываемых теориями суперсимметрии частиц — а именно, не выходящие за рамки обычной симметрии. Однако удивляться тут особенно нечему. Суперсимметрия, возможно, идеально точно отражает симметрию законов природы, однако она была спонтанно нарушена уже в первоначальном основном состоянии Вселенной. Многие существующие в природе симметрии спонтанно нарушаются. И, если принять масштабы нарушения суперсимметрии достаточно большими, это объясняет, почему мы до сих пор не наблюдали ни одной из частиц-партнеров. Если же нам удастся обнаружить эти частицы на ускорителе LHC, то этим мы, фактически, откроем новые квантовые измерения пространства-времени. Вот почему всех нас так волнуют перспективы нового ускорителя в ЦЕРНе.

У суперсимметрии много красивых свойств. Она объединяет по принципу симметрии фермионы — кварки и лептоны (то есть составляющие первоэлементы материи) и бозоны — мезоны, фотон, W- и Z-бозоны, глюоны в КХД и гравитон (то есть кванты силовых взаимодействий). Однако суперсимметрия представляется также и крайне полезным инструментом с точки зрения исследования феноменологии элементарных частиц. Она способна объяснить их иерархию, дать ответ на вопрос, почему шкала объединения столь велика по сравнению со шкалой слабого взаимодействия. Без суперсимметрии это соотношение шкал  $10^{14} - 10^{18}$  приходится корректировать вручную. Но, что важнее всего, у нас имеется и непосредственный ключ к суперсимметрии, и он также подсказывает, что ее нарушение начинается в районе 1 ТэВ по шкале энергий. В последние 20 лет мы проводили всё более точные измерения сил, действующих в рамках Стандартной модели, и всё более точные расчеты их изменения в зависимости от энергии взаимодействий. И, выходит, что без суперсимметрии калибровочные связи не состыковываются; впрочем, трем прямым не обязательно пересекаться в одной точке. Однако если просто взять Стандартную модель и привнести в нее минимальную суперсимметрию, а затем предположить, что суперсимметрия нарушается при энергиях порядка 1 ТэВ, то все три калибровочные связи идеально сойдутся в одной общей точке. А это — очень сильный ключевой аргумент в пользу существования суперсимметрии в природе и возможности открыть ее на LHC.

Более точные экстраполяции такого рода помогают нам составить представление о том, где и при какой энергии смыкаются силы. Она оказывается еще выше — порядка  $10^{18}$  ГэВ, то есть в  $10^{14}$  раз выше энергии, которую будет развивать LHC. Это ставит физику элементарных частиц перед серьезной проблемой. Как исследовать энергии такого масштаба и открывать новые физические явления? Способны ли теоретики в принципе экстраполировать модель на так много порядков?

### **Можно ли экстраполировать до длины Планка?**

Можно ли представить себе открытие новой физики, отвечающей за объединение всех сил, если ее естественная шкала энергий столь далека от возможностей прямого экспериментального исследования? Одна из причин, позволяющих рассчитывать на такую возможность, — наличие у нас очень прочного фундамента. Мы располагаем очень хорошей теоретической базой — Стандартной моделью, которая прекрасно работает и с большой точностью проверена экспериментально. Изменить эту теорию непросто. Непросто построить и новую, альтернативную теорию, которая позволила бы объединить все силы при высоких энергиях и одновременно не противоречила бы всем экспериментальным данным, накопленным при низких энергиях. Так что мы имеем

хорошую стартовую позицию, жестко ограничивающую нас в попытках модифицировать Стандартную модель.

Другая причина, по которой мы можем рассчитывать на успешное объединение всех силовых взаимодействий, — это прямой намек на включение гравитации в новую физическую теорию объединения. Энергия объединения в  $10^{18}$  ГэВ очень близка к энергии превращения гравитации в сильное взаимодействие. При низких энергиях гравитация относится к разряду очень слабых взаимодействий. В атоме силы гравитационного притяжения между электроном и протоном в  $10^{40}$  раз слабее силы электрического притяжения между ними. Следовательно, мы можем пренебрегать гравитацией и в обычной атомной физике, и в физике элементарных частиц низких энергий. Но ведь сила гравитационного притяжения связана с массой, которая, в свою очередь, эквивалентна энергии. Поэтому сила гравитационного притяжения растет пропорционально квадрату энергии и быстро выравнивается и объединяется со всеми другими силами (которые зависят от энергии логарифмически) по достижении планковских масштабов энергии порядка  $10^{19}$  ГэВ. Это очень важный ключ, поскольку он указывает, что следующий прорыв в физике, великое объединение всех сил природы, должен распространяться и на гравитацию. А также на то, что происходит это объединение на уровне энергий, при которых гравитация становится сильным взаимодействием и начинают проявляться квантовые эффекты. Поскольку очень трудно построить теорию, включающую все силы, в том числе гравитацию, и одновременно соответствующую нашим знаниям о явлениях, наблюдаемых при низких энергиях, у теоретиков, возможно, есть шанс разобраться, что там происходит, и без прямых экспериментальных измерений в планковских масштабах.

«Планковский масштаб» назван так в честь Макса Планка, который ввел это понятие более века тому назад. В физике мы измеряем все наблюдаемые величины тремя единицами — длины, времени и массы. Все другие количественные физические характеристики могут быть выражены через эти единицы. Но фундаментальными константами размерности в природе являются отнюдь не метры, килограммы и секунды. Эти единицы изобретены человеком. Мы же подозреваем, что Природа использует единицы измерения, в основе которых лежат фундаментальные размерные константы: скорость света  $c$ , квант действия  $h$  и гравитационная постоянная Ньютона  $G$ . Последнюю из этих фундаментальных констант — так называемую «постоянную Планка»  $h$  — Планк ввел для описания излучения. Он понял, что  $h$  вместе с  $c$  и  $G$  можно использовать в качестве трех базовых единиц, нужных нам для описания всех физических явлений. Ученый был крайне рад, что ему удалось завершить триаду фундаментальных размерных констант, и он же дал определения длины Планка, энергии Планка и времени Планка в этих фундаментальных единицах. Характерно, что все эти три единицы отстоят от нас крайне далеко: длина Планка настолько мала, энергия Планка настолько велика, а время Планка настолько мимолетно, что они выходят за пределы нашего восприятия. Однако любой физик согласится, что это — фундаментальные размерные параметры Природы, и нам действительно следует выражать все физические величины в этих единицах.

Тот факт, что планковская масса настолько (на 19 порядков) превышает массу протона, очень важен для понимания структуры Вселенной и природы многих физических явлений. Например, почему звезды, планеты и даже люди такие большие? Почему в их физических телах так много протонов? А причина в том, что, грубо говоря, размер самой крупной звезды, которая может сформироваться без быстрого гравитационного коллапса в черную дыру, пропорционален кубу отношения планковской массы к массе протона, то есть  $\sim 10^{19}$ . Поэтому звезды содержат до  $10^{57}$  протонов, и размер их огромен по сравнению с размерами атомов. То же касается планет и людей. Если бы вышеназванное отношение равнялось десяти, а не  $10^{19}$ , звезда могла бы содержать не более тысячи протонов. Жизнь не зародилась бы, и нас бы тут не было. Эта же иерархия масштабов

обуславливает и слабость гравитации. Гравитационное притяжение между двумя телами с массой, равной массе Планка, выражено сильно, однако сила притяжения между протонами в  $10^{38}$  раз слабее. Как следствие, гравитация, искривляющая, согласно общей теории относительности Эйнштейна, топологическую структуру пространства-времени, в обычных условиях пространство и время практически не искажает. По этой причине на макроскопическом и даже атомном уровне пространство-время имеет гладкую структуру. Если бы вышеназванное отношение равнялось десяти или единице, а не  $10^{19}$ , тогда на обычных или межатомных расстояниях нам приходилось бы считаться с искривлением пространства-времени, обычные атомы могли бы коллапсировать в черные дыры, а квантовые флуктуации метрики пространства-времени были бы заметны на обычных расстояниях в области образования черных дыр. Весь мир был бы иным.

Тот факт, что в масштабах объединения нам приходится считаться с гравитацией, — очень важный ключ, поскольку он вынуждает нас пойти дальше квантово-полевой модели. Гравитация, согласно Эйнштейну, обусловлена динамикой пространства-времени. Энергия и материя искажают и искривляют метрику пространства-времени, придавая ей динамику. Но в квантовой механике любой динамический объект подвержен квантовым флуктуациям, следовательно, и в метрике пространства-времени должны происходить квантовые флуктуации. Семьдесят лет теоретических и экспериментальных исследований привели нас к открытию, что квантовые флуктуации пространства-времени, похоже, не вписываются в рамки квантовой теории поля. Все попытки прямого квантования теории Эйнштейна ни к чему не привели. Стали возникать сомнения относительно взаимной непротиворечивости квантовой механики и общей теории относительности. В качестве альтернативного выдвигается предположение, что теория Эйнштейна представляет собой всего лишь эффективную, но не окончательную и полную теорию гравитации. Да, она описывает гравитацию, но лишь на расстояниях, значительно превышающих длину Планка. Если же заниматься физикой в масштабах шкалы Планка, нужна новая теория, принципиально отличающаяся от квантовой теории поля. Единственной, на мой взгляд, работоспособной кандидатурой на эту роль является теория струн.

## **От частиц к струнам**

Теория струн представляет собой теорию нового типа, олицетворяющую разрыв физики со своей прошлой историей. Традиционно мы добивались прогресса в фундаментальной физике за счет зондирования материи на всё меньших расстояниях и обнаружения там всё более фундаментальных ее составляющих. За века мы узнали, что материя состоит из атомов, а атомы из плотных ядер, окруженных электронами, которые даже сегодня представляются нам неделимыми точечными частицами. Однако само ядро имеет структуру. Заглянув внутрь атомного ядра, мы выяснили, что оно состоит из нуклонов — протонов и нейтронов. В прошлом столетии мы прондировали протон и нейтрон и открыли, что они состоят из кварков — казалось бы, по-настоящему точечных частиц. Стандартная модель как раз и основана на кварках и лептонах в качестве точечных элементарных частиц. Казалось бы, следующая стадия объединения будет связана с выявлением еще более мелких точечных частиц, неких субкварков и сублептонов. Однако на этот счет теория струн однозначно отвечает «нет». Если бы у вас был некий идеальный микроскоп с разрешением на уровне длины Планка, то вместо точечных частиц вы бы увидели в него протяженные струны. Согласно теории струн, базовыми составляющими материи являются не точечные частицы, а протяженные одномерные струны. Это важный разрыв с исторической традицией, складывавшейся в течение двух тысячелетий.

Идея, что все частицы на самом деле представляют собой струны, обладает хорошим потенциалом стать объединяющей, поскольку струна может принимать множество различных конфигураций и представляет собой значительно более сложный объект,



нежели точка. Может статься, что все наблюдаемые нами частицы — суть просто различные гармоники, различные моды колебаний одной и той же струны. Именно такой подход постулируется теорией струн. Струна может вибрировать бесконечным числом образов, и каждая из мод ее вибрации представляется нам на большом удалении точечной частицей.

Итак, теория струн видоизменяет подход к теории строения материи, заменяя фундаментальные частицы в роли первичных составляющих материи различными модами колебаний единственной протяженной струны. Однако во всем остальном теория струн не вносит радикальных изменений в начала физики. И это мудро. Принципиально изменить фундаментальный каркас физической науки очень непросто. Такие изменения — крайне редкое явление в истории физики. Со времен Ньютона до эпохи Эйнштейна и Гейзенберга радикальных изменений в физике было крайне мало. Большинство попыток изменить концепции и модифицировать фундаментальные законы физики противоречат либо экспериментальным данным, либо здравой логике. Любое видоизменение фундаментальных физических законов требует предельной осторожности. Следует видоизменять как можно меньшее число принципов. И теория струн, пока что, изменила концептуальную модель фундаментальной физики лишь в том смысле, что вместо точечных частиц в качестве первоэлементов мы теперь имеем струны.

Вообще говоря, теория струн развивалась на протяжении последних 37 лет путем сохранения всех проверенных физических принципов, кроме одного, согласно которому материя состоит из точечных частиц. Мы придерживаемся традиционных правил релятивистской квантовой механики, только вместо частиц мы теперь квантуем струны. Для выведения законов, описывающих динамику струн, мы просто обобщаем, весьма прямолинейным и естественным образом, законы, которым подчиняется динамика частиц. Скажем, вы хотите обсудить движение частицы. Одним из способов описания движения свободной частицы в пространстве определенной геометрии является формулировка, согласно которой частица движется по некоей траектории в пространстве-времени. Это так называемая «мировая линия» частицы. Затем мы переходим к построению так называемого «действия», в роли которого, в случае свободной частицы, выступает инвариантная длина мировой линии в пространстве-времени. Динамика свободной частицы определяется заявлением, что свободная частица движется вдоль мировой линии с наименьшим суммарным действием на всем ее протяжении. Из этого динамического принципа наименьшего действия следует, что свободные частицы движутся по прямой в неискривленном пространстве-времени и вдоль геодезических линий в искривленном. Строя теорию струн, мы постулируем то же самое. Мы утверждаем, что струна движется в пространстве вдоль мирового листа или по мировой трубе. Для расчета траектории движения струн мы, опять же, минимизируем естественный аналог длины пути — площадь трубы. Итак, мы просто заменяем частицы струнами, линии трубами, а длины площадями, — только и всего. Основные правила (пертурбативной) теории струн очень просты. Математический аппарат несколько усложняется, но концептуально мы изменяем очень немного.

А как насчет квантовой механики струн? Фейнман научил нас, что для расчета амплитуды вероятности попадания частицы из одной точки пространства-времени в другую нам нужно просто просуммировать вероятности ее нахождения на всех мировых линиях или траекториях, соединяющих два события, а не только на кратчайшей траектории, при этом каждая траектория учитывается с весом, равным экспоненте  $i$ , умноженной на действие (длину мировой линии). Свободную струну мы квантуем в точности так же. Мы проводим суммирование по всем мировым трубам, описывающим перемещение струны из одной конфигурации и момента времени в другие. При этом суммирование по трубам мы производим с весом  $i$  умножить на действие (площадь поверхности мировой трубы). Так мы получаем распределение квантово-механических

амплитуд свободного распространения струны. Затем, как всегда в квантовой механике, мы рассчитываем вероятности, возводя эти амплитуды в квадрат. Так строится квантовая механика свободных струн. Теория струн, на самом деле, не настолько сложна, хотя математическое суммирование по всем мировым листам и будет посложнее суммирования по мировым линиям. Лет через сто, возможно, теорию струн будут преподавать в высшей школе.

## Взаимодействия струн

Однако между частицами и струнами имеется большая разница в том, что касается их взаимодействий. Один из способов описания взаимодействий в квантовой теории поля — диаграммы Фейнмана. Здесь мы, опять же, следуем прежней стратегии и делаем всё то же самое, что и в случае с частицами, просто заменяя их струнами. Когда две частицы А и В перемещаются во времени и в итоге оказываются в одно время в одной и той же точке, имеется вероятность их превращения в частицу С. Например, при встрече электрона с позитроном они могут превратиться в фотон. Именно в этой точке пространства-времени — в вершине диаграммы — и происходит взаимодействие. Вся неопределенность и все свободные параметры квантовой теории поля являются входными данными в вершине и определяют, что там может произойти: какие взаимные превращения частиц возможны и какова амплитуда вероятности таких событий. При встрече электрона с позитроном мы вводим электрический заряд, который определяет вероятность их превращения в фотон. Из этих вершин проистекают все величины, которые мы не можем рассчитать теоретически, такие как постоянная тонкой структуры.

А что происходит со струнами? Наверное, вы подумали, что мы и здесь пойдем проторенным путем. Скажем, две струны А и В могут вступить во взаимодействие в случае их взаимного наложения в пространстве и времени, и тогда возникает вероятность их превращения в третью струну — скажем, С. Вместо точки взаимодействия мы бы в таком случае имели кривую взаимодействия. Казалось бы, естественный способ ввести взаимодействия в теорию струн. К счастью, теории взаимодействия струн были разработаны задолго до теории струн людьми, которые о теории струн понятия не имели. Поэтому они таким путем не пошли. Такая стратегия привела бы к катастрофе. Потребовалось бы пронумеровать все возможные кривые, чтобы определить вероятность вступления двух струн во взаимодействие при их совпадении вдоль кривой с образованием новой струны. Вместо одного параметра точечного взаимодействия — заряда — пришлось бы вводить бесконечное множество неопределенных констант. Однако выясняется, что вместо этого взаимодействие струн гораздо лучше представлять в виде так называемых «брючных диаграмм». Представьте себе две штанины в горизонтальном срезе, перемещающемся вверх с течением времени. Внизу срез брючин описывает две отдельные замкнутые струны, которые ближе к поясу сливаются в единую струну. Так брючная диаграмма представляет слияние двух струн. Но где именно происходит взаимодействие? Нигде. Невозможно указать точку, вершину, в которой происходит взаимодействие. В случае частиц фейнмановские диаграммы состоят из линий, образующих одномерные схемы. Вершина представлена особой точкой на диаграмме. Двигаясь вдоль линии, вы можете однозначно определить местоположение вершины, поскольку это особая точка, откуда можно двигаться в трех направлениях. В остальных точках возможно лишь движение вперед и назад. Вершина в этом случае четко определена на диаграмме. Однако эволюция струны описывается двумерной поверхностью. Любая малая площадка такой поверхности ничем не отличается от другой площадки. Особая точка отсутствует. Фактически, вы не можете ничего знать о факте взаимодействия, не охватив целиком двумерную картину слияния. Взаимодействие струн носит, в некотором смысле, топологический характер. В случае частиц, даже если вы знаете, как именно они движутся свободно, вы ничего не можете сказать о том, как они взаимодействуют, потому что вам нужно знать, что именно происходит в вершине при их встрече. А вот в теории струн раз вы знаете, как движутся свободные струны, то вы

знаете и то, как они взаимодействуют. Не нужно вводить никаких новых физических величин и параметров. Одно это позволяет понять, почему теория струн настолько уникальна и настолько не допускает произвольных толкований. Двадцать лет назад имелось пять различных теорий струн. Сегодня мы понимаем, что все они — одна теория. И мы, фактически, считаем, что возможна лишь одна-единственная теория струн.

## Теория струн и гравитация

Теории струн исполнилось 37 лет, и что достигнуто? Главных достижений три. Самое важное из достижений заключается в том, что эта теория представляется логически непротиворечивым расширением физики. Мы исследуем и развиваем теорию струн уже многие годы, и она, совершенно определенно, выглядит полностью согласованной. Возможно, она не описывает реального физического мира; возможно, она неполна; но она определенно является согласованным логическим расширением физики. Некоторые из нас полагают, однако, что она обернется гораздо большим: что теория струн приведет к настоящей революции в физике, сопоставимой с революционными изменениями, приведшими к возникновению теории относительности квантовой механики в начале XX столетия. Две вышеназванные предыдущие революции в понятиях имели прямое отношение к двум ранее названным мною фундаментальным размерным константам: скорости света  $c$  и планковскому кванту действия  $\hbar$ . Они расширили представления классической физики, однако релятивистские теории сводятся к классической физике при низких скоростях, а квантовая механика — к классической в системах, где действие достаточно велико по сравнению с  $\hbar$ . Многие из нас полагают, что теория струн окажется столь же революционной, если не более, в отношении третьей универсальной размерной константы — постоянной Ньютона  $G$  или длины Планка  $l_p$ . В то же время на расстояниях много больше  $l_p$  теория струн сведется к классической квантовой теории поля, а струны будут выглядеть как частицы.

Два других достижения теории струн — это то, что она, во-первых, дает нам согласованную, конечномерную, хорошо определенную теорию квантовой гравитации, а во-вторых, оказывается очень богатой структурой, включающей, помимо гравитации, и все прочие элементы, необходимые нам для построения Стандартной модели, — калибровочные взаимодействия Янга—Миллса, кварки, лептоны и тому подобное. Вполне возможно, что в рамках теории струн мы даже сможем добиться искомого объединения.

Во-первых, теория струн демонстрирует непротиворечивость квантовой механики и общей теории относительности. Многие успели обеспокоиться по поводу их возможной несовместимости после многолетних безуспешных попыток квантовать уравнения Эйнштейна. Теория струн успешно создает естественную теорию гравитации, которая при больших расстояниях асимптотически сводится к теории Эйнштейна. Следовательно, она дает нам инструменты для исследования многих весьма странных явлений, происходящих при крайне сильной гравитации в глубоко продавленном пространственно-временном континууме, как, например, в окрестностях знаменитых черных дыр. Хокинг показал, что черные дыры, не способные что бы то ни было излучать в классическом понимании, на самом деле не являются абсолютно черными. Используя квантовую механику, он продемонстрировал, что черные дыры испускают-таки тепловое излучение. То есть черная дыра ведет себя как термодинамический объект с энтропией, температурой и излучением абсолютно черного тела. Однако Хокинг также пришел к заключению, что при формировании и последующем тепловом распаде черной дыры информация теряется, и, тем самым, нарушаются законы квантовой механики. Теория струн оказалась крайне полезной с точки зрения опровержения этого парадокса, бросающего вызов квантовой механике. Новые идеи теории струн позволили буквально спасти квантовую механику. Например, согласно Бекенштейну и Хокингу, черная дыра обладает энтропией. Очень странно для решения системы уравнений классической общей теории относительности обладать энтропией. Ведь энтропия — это обычно мера

числа микросостояний макроскопической системы с фиксированными квантовыми числами. Оказывается, в рамках теории струн можно построить множество примеров контролируемых моделей черных дыр. В этих случаях мы можем деформировать теорию путем изменения параметров до случая, когда черные дыры можно будет описать как протяженные объекты, которые в теории струн принято называть D-бранами, и рассчитать число их возможных конфигураций с заданными характеристиками — массой, энергией, моментом импульса и зарядом. Стромингер и Вафа показали, что в полностью контролируемых нами случаях мы, в принципе, можем точно рассчитать число микросостояний в системе. Полученная в результате энтропия (логарифм числа микросостояний) в точности соответствует энтропии, предлагаемой Бекенштейном и Хокингом. Это демонстрирует, что калибровочная теория на D-бранах может в точности описывать число степеней свободы системы черной дыры.

Теория струн позволяет разрешить и парадокс потери информации. Для этого мы используем некоторые дуальности, выявленные недавно в теории струн. Дуальность — это взаимосвязь между двумя формулировками одной и той же теории. Одна из самых завораживающих дуальностей, выявленных в последнее время, — это связь между теорией струн на фоне искривленного анти-де-ситтеровского пространства — с пятью пространственно-временными измерениями и еще пятью пространственными измерениями теории струн, свернутыми в пятимерную сферу, — и обычной (но в высшей степени суперсимметричной) калибровочной теорией в четырех измерениях. Теорию последнего типа мы используем в Стандартной модели и понимаем ее очень хорошо. Это унитарная теория без информационных потерь. Поскольку мы можем смоделировать образование черных дыр в анти-де-ситтеровском пространстве, мы можем затем и спроецировать их эволюцию во времени на хорошо известное нам пространство калибровочной теории и показать тем самым, что, по крайней мере, в этом анти-де-ситтеровском пространстве излучение и испарение черных дыр — процесс унитарный. Фактически же, недавно Стивен Хокинг посетил Институт Кавли (KITP) с лекцией, на которой заявил, что ранее высказанные им опасения не обоснованы. Сейчас он полагает, исходя из указанной дуальности, что испарение черных дыр не нарушает законов квантовой механики.

Мы надеемся, что теория струн поможет разрешить и другие парадоксы квантовой гравитации, такие как парадокс космологической сингулярности, которую мы наблюдаем, экстраполируя историю Вселенной вспять до точки Большого взрыва. Возможно, нам удастся сформулировать принцип, предопределяющий историю Вселенной и объясняющий Большой взрыв. Может быть, теория струн позволит как-то сгладить сингулярность точки Большого взрыва и зафиксировать начальные условия в ней или, как предвидят некоторые, рассуждая о возможных сценариях развития теории струн, показать, что Вселенная вечно пульсирует. На самом деле, и я к этому еще вернусь, по моему мнению, в самом начале Вселенной времени не существовало, то есть, фактически, время — понятие привходящее. Пока что теория струн не преуспела в решении проблемы космологических сингулярностей, хотя проблемы многих статических сингулярностей в классической общей теории относительности с ее помощью решены. Здесь мы до сих пор наталкиваемся всё на те же трудности, что и в случае теории Эйнштейна. В этом плане потребуется еще очень много работы.

## **Единая теория**

Наконец, достижение теории струн и в том, что она закладывает основу для построения единой теории природы. Квантуя струны, мы открыли, что они естественным образом порождают частицы и силы Стандартной модели, если строить решения согласно нашим представлениям о четырехмерном мире. Выходит, однако, что струнные теории не могут не включать дополнительных пространственных измерений. Мы их не наблюдаем, значит их нужно сделать компактными, свернуть и, тем самым, скрыть, сделать

ненаблюдаемыми. 20 лет назад мы нашли решения теории струн, в которых шесть пространственных измерений закольцованы и образуют особые шестимерные замкнутые пространства, так называемые многообразия Калаби—Яу (Calabi—Yau). Эти теории автоматически порождают частицы и силы, согласующиеся со Стандартной моделью. В те годы было много надежд, что нам удастся построить предсказуемое объяснение Стандартной модели с использованием теорий струн того времени. Это не просто, поскольку при высоких энергиях струнные теории суперсимметричны. Чтобы объяснить реальный мир, нужно понять механизм нарушения симметрии. Также нужно понять механизм замыкания на себя или компактификации ненаблюдаемых измерений. Наконец, нужно объяснить энергию вакуума, космологическую константу. В квантовой механике вклад в энергию вакуума вносят все динамические объекты — поскольку обладают в нулевой точке ненулевой кинетической энергией. Очень трудно понять, почему космологическая постоянная, обуславливающая ускоренное расширение Вселенной (а его мы, кажется, измерили) настолько мала, а мала она невероятно. Решение теории струн должно принести, среди прочего, ответ на этот сложный вопрос: почему так мала космологическая константа? В теории струн, в отличие от традиционной квантовой теории поля, космологическую константу можно рассчитать теоретически. В квантовой теории поля космологическая константа представляет собой подгоночный параметр — ее значение можно принять сколь угодно малым и даже нулевым. Но в теории струн выбора у нас нет, и обычно она получается чудовищно большой — в  $10^{120}$  раз больше, чем нужно.

Недавно обнаружили, что пертурбативных решений, или так называемых «вакуумов» теории струн с космологической константой, имеется великое множество. Утверждают, что существует невероятное число,  $\sim 10^{1000}$ , таких метастабильных вакуумов с положительными космологическими константами; совокупность всех возможных миров называют «ландшафтом». Утверждают реальное отсутствие принципа выбора какого-либо одного из этого многообразия вакуумов, которые все нестабильны и потенциально подвержены квантово-механическому распаду. Вместо этого утверждают, что при развитии Вселенной непосредственно после Большого взрыва различные области проходят этап инфляционного расширения независимо друг от друга, и в различных областях Вселенной вакуум формируется по-разному, причем выбор вакуума происходит случайным образом. Единственный принцип, по которому наша Вселенная выделяется среди других, — «антропный принцип». Мы живем во Вселенной, которая способна поддерживать жизнь. Я нахожу такой подход не только безвкусным, но и преждевременным. Прежде всего, хотя у нас и имеется множество способов описания решений теории струн, мы до сих пор не знаем, что такое сама теория струн. К этому вопросу я еще вернусь. Но кроме того, пусть даже возможно существование множества метастабильных вакуумов, у нас же нет единой и согласованной струнной космологии. Все состояния, о которых рассуждают сторонники гипотезы ландшафта, метастабильны. Все до единого зависят от времени, и мы не способны понять ни их будущего, ни динамики их распада, ни, если на то пошло, их прошлого, которое, заметим, сингулярно.

Возможно, имеется лишь единственная и неповторимая уникальная космологическая теория, объясняющая происхождение нашего мира. Но поскольку я подозреваю, что грядущая революция в теории струн затронет наше понимание природы пространства и времени, может случиться, что критерии определения состояния Вселенной, вакуума, окажутся совсем иными. Я продолжаю верить в триумфальное достижение, рано или поздно, поставленной Эйнштейном цели — создание единой теории без свободных параметров или допущений. Теория струн обладает таким потенциалом, поскольку свободных параметров не содержит, однако мы по-прежнему не знаем принципа, определяющего состояние Вселенной.

## Дуальности в теории струн

Самая большая проблема в теории струн заключается в том, что мы по-прежнему не знаем, что такое сама теория струн. У нас есть множество различных способов построения пертурбативных решений на различных участках этой теории. Мы открыли всевозможные удивительные дуальности, расширяющие наш контроль над теорией, но и дающие нам ясно понять, что мы не имеем ни малейшей идеи относительно полной структуры этой теории.

Теория струн, на первый взгляд, представляет собой весьма умеренную модификацию физики; мы просто заменяем частицы струнами. А затем начались всевозможные удивительные открытия. Например, гравитация всплыла наряду с калибровочными взаимодействиями. И все эти особые типы симметрий и сил не были привнесены в теорию — они просто следовали из нее. Другим сюрпризом стало открытие суперсимметрии, когда люди попытались построить спиновые струны — струны, описывающие, в том числе, фермионы со спином  $1/2$ . Также было открыто, что струны могут жить только в пространстве-времени с числом измерений значительно больше традиционного — 10 или 11. Десять лет назад выяснилось, что струны — не единственное представление в теории струн, и что при взгляде с других точек зрения фундаментальную роль в ней играют принципиально новые протяженные многомерные объекты — так называемые D-браны. Наконец, в теории струн были открыты далеко идущие и очень сильные дуальности.

В свое время мы думали, что имеем пять отдельных струнных теорий — две теории замкнутых струн, две теории гетеротических струн и теорию открытых струн. Теперь мы понимаем, что всё это одно и то же, и умеем преобразовывать наблюдаемые физические величины из одной теории в другую. Например, возьмем какую-нибудь теорию — описывающую, скажем, движение суперструн в десяти измерениях. Мы знаем, как рассчитать разложение этой теории для случая слабой связи. Однако по мере усиления связи разложение разваливается, но у нас есть и другой, более удачный способ теоретического описания. При низких энергиях его можно замечательно описать в рамках одиннадцатимерной модели супергравитации. Более того, теория с 11 измерениями имеет и иное представление, в терминах обычной квантовой механики, — простое (суперсимметричное) квантово-механическое представление в матричной форме, где пространственные измерения вообще устраняются, и остается одно время. И такое представление дуально с представлением в рамках 11-мерной модели супергравитации при низких энергиях. Имеется и много других дуальных теоретических представлений, включая дуальность между теорией струн в анти-де-ситтеровском пространстве и четырехмерной калибровочной теорией, о которой я уже упоминал. Здесь мы имеем дело с дуальностью представлений в обычной четырехмерной калибровочной теории без гравитации и десятимерной теорией струн.

Все эти открытия стали полным сюрпризом. А что дальше? Кто знает?

## Пространство-время обречено!

Я думаю, что состояние теории струн на сегодняшний день похоже на состояние квантовой теории непосредственно после появления модели атома Бора — до формулировки принципов квантовой механики. На том этапе у людей была лишь старая квантовая теория — набор правил для расчета спектральных линий. Старая квантовая теория хорошо работает в отношении атома водорода, а в отношении даже атомов гелия — уже не столь хорошо. И сами правила квантования выглядели на том этапе слишком парадоксально. А затем, после двенадцатилетней неразберихи, произошло концептуальное изменение — была разработана квантовая механика. По-моему, теория струн сейчас как раз и находится в подобной ситуации. У нас есть всевозможные

способы описания теории струн с использованием различных моделей, различного числа измерений, с учетом гравитации и без нее, с различными степенями свободы; а что у нас отсутствует, так это понимание фундаментальных принципов динамики и симметрии, лежащих в основе теории.

И причина здесь кроется, по-моему, в самой концепции пространства-времени. Многие теоретики струн внутренне согласны с Эдвардом Виттенем, сказавшим, **что пространство-время, должно быть, обречено**. Понятие пространства-времени — это нечто такое, от чего, возможно, придется отказаться. Почему мы считаем, что пространство-время обречено? По многим причинам. Во-первых, в теории струн мы свободны варьировать число пространственных измерений путем изменения константы связи, силы взаимодействия. Одна и та же теория при слабом взаимодействии выглядит так, что струны движутся в десяти измерениях, а при сильном взаимодействии — в одиннадцати. Так что в теории струн число измерений пространства-времени — величина отнюдь не фундаментальная.

В теории струн мы также можем непрерывным образом изменять топологию пространства-времени. В обычной общей теории относительности этого сделать нельзя, не породив сингулярностей. Теория струн допускает выбор решения, классическим образом описывающего струну и движущегося в многообразии, где часть пространственных измерений компактно свернуты. Непрерывно изменяя параметры такого решения, мы достигаем точки, в которой струна переходит в пространство иной топологии. У нас есть описания, позволяющие нам исследовать гладкое изменение топологий, что, опять же, наводит на мысль о том, что в теории струн гладкие многообразия фундаментальной роли не играют.

Также, с операционной точки зрения, в теории струн не может идти реальной речи о произвольно малых расстояниях. Просто бессмысленно говорить о гладком многообразии пространства-времени с бесконечно малыми расстояниями. Гейзенберг вывел свой принцип неопределенности, рассматривая проблему измерения линейных размеров объектов при помощи микроскопа. Давайте рассмотрим вопрос об использовании микроскопа для определения малых расстояний в теории струн. Согласно теории струн, световые лучи, используемые в микроскопе, сами по себе состоят из струн. Выясняется, что помимо квантово-механической неопределенности при измерении расстояний — эффекта, заставляющего нас использовать световые лучи (или ускорители частиц) всё более и более высоких энергий для более точного определения местоположения частицы, — тут имеет место и струнная неопределенность. С повышением их энергии  $E$  струны растягиваются. И рано или поздно они становятся больше объектов, которые мы пытаемся зондировать. Квантово-механическая неопределенность при измерении линейных размеров объекта пропорциональна  $1/E$ , а струнная неопределенность растет прямо пропорционально  $E$ . Как следствие, минимальное расстояние, которое мы можем прозондировать, составляет порядка планковской длины. Поэтому нет никакого смысла говорить о линейных размерах короче планковских.

К тому же заключению можно прийти и другим путем — рассмотрев струны, когда одно из измерений компактно закольцовано. Выясняется, что теория струн, компактифицированная на круге радиуса  $R$  (в единицах Планка), может быть эквивалентно описана и в терминах теории струн, компактифицированной на круге радиуса  $1/R$  (в единицах Планка). Занижая  $R$ , мы тем самым увеличиваем  $1/R$ , а более точное описание дает модель с большим радиусом компактификации. И опять же, минимальное значение  $R$  определяется длиной Планка.

**На сегодняшний день многие из нас убеждены, что пространство и время —  $x, y, z, t$ , — не первичные, а, скорее, производные понятия. У нас есть много**

**примеров, указывающих на то, что часть или даже всё пространство — не фундаментально, но является лишь удобной крупномасштабной концепцией.** Мы имеем дуальные представления теории струн на некоем фоне, из которых пространство, включая гравитацию, проистекает — частично или полностью. Учитывая урок теории относительности, мы обязаны считать, что раз пространство является концепцией производной, значит, и концепция пространства-времени должна являться таковой. Однако у нас нет ни малейшей идеи, как формулировать физику, если время не фундаментально. В конце концов, физику мы традиционно понимаем как науку о процессах, протекающих во времени, — сама роль физики сводилась к предсказанию будущего на основе настоящего. В квантовой механике динамика определяется через гамильтониан в качестве генератора унитарной временной эволюции. Если же время — понятие производное и не являющееся независимым, трудно представить, как нам дальше формулировать физику. **По моему мнению, чтобы завершить построение теории струн, нам нужно понять, каким образом, подобно пространству, зарождается время.** Мы не знаем как, и это, на мой взгляд, — крупный камень преткновения на пути к разгадке тайн теории струн.

### **Надежды, связываемые с теорией струн**

Теория струн многое обещает нам в будущем. Она надеется окончательно объединить все силы природы, выработать новые концепции пространства и времени, разрешить важные загадки квантовой гравитации и космологии. Это амбициозные цели, и на их осуществление может уйти много времени. Потребуется, как я уже говорил, революция в нашем представлении о пространстве и времени. Между тем теория струн продолжает углублять наше проникновение и в обычную теорию Янга—Миллса. Теория струн также привела ко многим прозрениям в математике, созданию новых математических структур, методов и идей, о которых математики раньше просто не задумывались. Сегодня математики и струнные теоретики проводят совместные исследования во многих областях математики, например в алгебраической геометрии.

Теория струн также мотивировала новые умозрительные идеи, стимулирующие новые эксперименты. Одна из самых захватывающих связана со сверхбольшими пространственными измерениями. Первоначально мы считали дополнительные пространственные измерения теории струн закольцованными в малые разнообразия с размерами не более планковских. Но в последние годы пришло осознание, что некоторые из этих дополнительных измерений могут, напротив, быть очень масштабными и даже бесконечными, а не воспринимаем мы их лишь по той простой причине, что сами прикованы к трехмерной *бране* — гиперповерхности в мире с большим числом измерений.

Такая возможность весьма естественным образом следует из теории струн. Вполне возможно, что мы привязаны к бране, в то время как есть и другие измерения, возможно даже бесконечные. Единственный для нас способ увидеть или почувствовать другие пространственные измерения — через гравитационные флуктуации «экстрапространства». Примечательно, что подобные умопостроения не противоречат современным экспериментам. Многие не исключают возможности того, что новые эксперименты, скажем на LHC, могут привести к открытию этих макроскопических дополнительных измерений. Существование сверхкрупных дополнительных измерений привело бы к очень интересным эффектам. По некоторым сценариям, шкала Планка и шкала теории струн находятся при значительно более низких энергиях, и тогда можно представить себе, например, образование черной дыры в результате столкновения протонов и наблюдение возбужденных мод струн в обычных частицах.

Теория струн предлагает и другие феноменологические сценарии. Один из самых интересных заключается в том, что Вселенная заполнена космическими струнами



межгалактических или даже вселенских размеров. Обычно струны крайне малы — их длина сопоставима с планковской. Для того, чтобы растянуть их до макроскопических размеров, потребовалась колоссальная энергия. Но согласно инфляционной теории, которая, похоже, вполне адекватно описывает космологию, вся наблюдаемая сегодня Вселенная возникла в результате раздувания крошечной области пространства размерами порядка длины Планка. Таким образом, в начале Вселенной размеры струн и области пространства, раздувшегося затем до видимой Вселенной, были равными. По мере раздувания этой области струны также растягивались. Расширение Вселенной обеспечивало и необходимую энергию для растяжения струн, и теперь они могут иметь протяженность через всю Вселенную. Такие струны будут флуктуировать и колебаться, пересекаться и взаимодействовать между собой. Наблюдать их можно либо благодаря производимому ими эффекту гравитационных линз, отклоняющих световые лучи, идущие от далеких галактик, либо по всплескам гравитационного излучения в результате их продольных колебаний. По некоторым сценариям, гравитационное излучение космических струн можно будет открыть уже на новом детекторе гравитационных волн LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory). Однако и макроскопические новые измерения, и космические струны — гипотезы слишком умозрительные с точки зрения современной теории струн. Мы определенно не можем утверждать, что вероятность их подтверждения сколько-нибудь велика. Однако они дают важный стимул к экспериментам по поиску новых эффектов на LHC и гравитационно-волновых детекторах и указывают на осязаемость близкой перспективы (хотя лично я считаю ее крайне маловероятной) прямого наблюдения струнных эффектов в лабораториях или обсерваториях.

Еще одно применение теории струн находит в моей любимой теории поля — КХД, теории сильного взаимодействия. Здесь теория струн может дать нам определенный аналитический контроль над теорией при больших расстояниях. КХД в каком-то смысле очень тесно увязана с теорией струн. Фактически, теория струн была придумана для описания ядерных сил. Мезоны представимы в виде силовых трубок. Поскольку кварки и антикварки, фактически, заключены внутри цветных силовых трубок, порождающих мезоны, последние ведут себя во многом подобно струнам. В случае мезонов, однако, энергия натяжения струны составляет не планковскую величину, а всего лишь порядка 1 ГэВ. Теперь мы понимаем это дуальное струнное описание КХД и с позиции самой КХД, и с позиции теории струн. У нас есть данные, свидетельствующие о реальной корректности такого представления, о взаимном соответствии КХД и струнной теории. Сила хромодинамического взаимодействия, определяемая в КХД константой связи (реально ее следовало бы представлять как шкалу масс), эквивалентна натяжению струны в струнной теории. Спаривание струн, отвечающее за квантовые поправки к классической струнной теории, эквивалентно поправкам по числу цветов в калибровочной теории. В реальном мире мы имеем всего три цвета. Однако можно принять число цветов равным  $N$ , и хотя в реальном мире  $N = 3$ , расширение КХД на случай  $1/N$  является неплохим приближением. Мы знаем, что при устремлении  $N$  к бесконечности, в случае фиксированной связи, спектр КХД принимает тот же вид, что и у невзаимодействующих мезонов, то есть, как мы полагаем, приходит в соответствие с состояниями, описываемыми классической теорией струн. Если бы мы знали уравнение классической теории струн для этого случая, мы могли бы найти его решение (опять же, классическое) и получили бы спектр, совпадающий со спектром мезонов при бесконечном количестве цветов. Следовательно, остается надеяться на то, что нам удастся сформулировать такую струнную теорию, найти решение и рассчитать спектр КХД аналитически для случая  $N = \infty$ , а затем рассчитать поправки для случаев  $1/N$ . Используя открытые в последние годы дуальности, с обеих сторон — теории струн и КХД — ведутся интенсивные исследования, позволившие открыть много нового. Это добрый знак, дающий надежду на аналитическое расширение модели КХД на большие расстояния или режим сильных взаимодействий.

### **Скоро ли сбудутся обещания теории струн?**

Так скоро ли сбудутся обещания теории струн? Шесть лет назад я смотрел в будущее менее оптимистично и говорил, что успеха теории струн придется ждать до следующего тысячелетия. Сегодня я более оптимистичен: я верю, что он придет уже в этом тысячелетии.