

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

## ТЕОРИИ СУПЕРСТРУН В РЕАЛЬНОМ МИРЕ\*)

М. Грин

Теория суперструн суть развитие струнных теорий начала 70-х годов. Это были модели сильно взаимодействующих частиц, таких, как протон, нейтрон и мезоны, которые построены из кварков и антикварков. Например, мезон представлялся как струна с кварком на одном конце и антикварком на другом.

Все эти ранние теории струн оказались противоречивыми, так как они обязательно содержали «тахионы», т. е. частицы, движущиеся со скоростью больше скорости света. Непротиворечивые струнные теории удалось, однако, построить, накладывая условия суперсимметрии — симметрии, которая связывает частицы полуцелого спина (спина  $1/2, 3/2, 5/2, \dots$  в единицах постоянной Планка, деленной на  $2\pi$ ) с частицами целого спина ( $1, 2, 3, \dots$ ). В результате возникли теории суперструн, развитые за последние пять лет.

Частицы с наименьшей массой в теориях суперструн включают гравитон (безмассовую частицу спина 2, связанную с гравитационным взаимодействием) и «калибровочные» частицы спина 1, связанные с сильным, электромагнитным и слабым взаимодействиями (т. е. глюоны, фотон и  $W$ - и  $Z$ -бозоны). Имеется также бесконечное число массивных частиц, которые можно представлять отвечающими высшим гармоникам колеблющейся струны.

Массовый масштаб определяется натяжением струны, которое оказывается равным приблизительно  $10^{39}$  тонн (в довольно неестественных единицах!). Это приводит к тому, что средняя длина струн оказывается порядка  $10^{-35}$  м — так называемой планковской длины, которая одновременно — масштаб, на котором квантовые эффекты становятся столь большими, что они не могут более игнорироваться в теориях, включающих гравитацию. Таким образом, струна является столь короткой, что для большинства приложений теории струн не отличаются от теорий точечных частиц и высшие моды струны столь массивны, что не могут быть обнаружены непосредственно. Однако на планковском масштабе, где квантовые эффекты «наводят беспорядок» в общей теории относительности, струнная природа фундаментальных частиц существенна для обеспечения непротиворечивости квантовой теории.

Летом 1984 г. Джон Шварц из Калифорнийского технологического института и я обнаружили, что имеется лишь ограниченное семейство реалистических теорий суперструн. Это означает, что структура всех взаимодействий, включая гравитационное, почти полностью фиксирована и нет свободы, связанной с подгонкой параметров. Удивительно, что, пытаясь решить пробле-

\*) Green M. Superstring Theories in the Real World//New Scientist. 29 August 1985. P. 35. — Перевод А. А. Цейтлина.

М. Грин в настоящее время — профессор физики в Колледже королевы Марии в Лондоне. Он — один из пионеров теории суперструн.

мы квантовой гравитации, мы пришли к почти однозначным предсказаниям о характере других взаимодействий.

Математический аппарат, используемый для описания симметрий между взаимодействиями и частицами, известен как теория групп. Возможные непротиворечивые теории суперструн основаны на группах симметрии, обозначаемых  $SO(32)$  (группа вращений в 32-мерном внутреннем пространстве) и  $E_8 \times E_8$  ( $E_8$  — это самая большая из групп, называемых «исключительными группами Ли»; *New Scientist*, 30 May 1985, p. 26). Эти группы выглядят огромными в сравнении с теми, которые использовали в прошедшие десять лет при построении так называемых теорий великого объединения, которые не включали гравитационное взаимодействие (*New Scientist*, 14 February 1985, p. 48). Очень интересный новый тип суперструн, названный «гетеротическими суперструнами», допускает выбор обеих перечисленных выше групп и только лишь их. Теория гетеротических струн была разработана Дэвидом Гроссом, Джеффом Харви, Эмилем Мартинеком и Райэном Ромом из Принстона (так называемым «Принстонским струнным квартетом!»).

Одна из новых черт теорий суперструн состоит в том, что они имеют смысл лишь в случае, если существуют шесть дополнительных пространственных измерений помимо известных нам трех, так что в целом имеется 10 пространственно-временных измерений. Очевидно, крайне важным является вопрос, предсказывает ли теория, что шесть дополнительных измерений являются столь малыми, что они не наблюдаемы в обычных экспериментах. Хотя этот вопрос в настоящее время остается открытым, имеется большой прогресс в понимании того, как выглядела бы эффективная четырехмерная теория в случае, если бы «лишние» измерения в теории суперструн действительно «закрутились» так, чтобы выглядеть очень малыми.

Одно из наиболее интересных предположений по поводу того, как четырехмерная физика может быть описана в рамках этой картины, было высказано американскими теоретиками Филипом Канделасом, Гарри Хоровитцем, Энди Строминджером и Эдвардом Виттенем. Они продемонстрировали, как реалистическая теория великого объединения, основанная на группе  $E_6$ , может быть получена как следствие  $E_8 \times E_8$ -теории суперструн при условии, что шесть дополнительных измерений образуют так называемое пространство Калаби — Яо (Калаби и Яо — это фамилии двух известных математиков). Группа  $E_6$  долгое время рассматривалась в качестве возможной группы теории великого объединения, согласующейся с экспериментальными данными.

В отличие от известных ранее теорий, в теории суперструн отсутствует возможность подгонки параметров для согласования с экспериментом. Вся «низкоэнергетическая физика» (здесь имеются в виду энергии, малые по сравнению с энергией, отвечающей натяжению струны, т. е. в том числе максимально достижимые в лаборатории энергии) полностью определяется свойствами искривленного шестимерного пространства. Однако имеется большое число возможных пространств Калаби — Яо, и совсем не просто установить, какое из них (если вообще какое-то) отвечает реальности. Интересно, что некоторые из этих пространств действительно приводят к «стандартной модели», описывающей всю наблюдаемую физику электрослабых и сильных взаимодействий. Имеется много возможных теоретических ограничений, которые еще предстоит исследовать и которые, в принципе, могут ограничить выбор шестимерного пространства, возможно, даже сделать его однозначным.

Имеются ли другие следствия у теорий суперструн, помимо предсказания масс частиц и констант взаимодействий? Виттен и другие исследователи из Принстона отметили, что могут существовать частицы с необычными значениями электрического и магнитного зарядов, которые отвечают струнам, «накрученным» на «дырки» в искривленном шестимерном пространстве. Другим общим предсказанием  $E_8 \times E_8$ -теории является существование «те-

новой материи», которая может быть обнаружена только по очень слабому гравитационному взаимодействию с обычной материей. В настоящее время это наблюдение выглядит скорее как научная фантастика, хотя в дальнейшем оно может иметь астрофизические приложения, объясняя существование по крайней мере части из так называемой «скрытой» массы.

Теории суперструн до сих пор не имеют элегантно математической формулировки. Отсутствует также понимание лежащих в их основе интуитивных геометрических принципов, подобных тем, которые использовал Эйнштейн при построении общей теории относительности. И тем не менее общая теория относительности и калибровочные теории других взаимодействий следуют из теорий суперструн как приближенные теории, справедливые на расстояниях больше  $10^{-35}$  м. Это указывает на то, что должна существовать гораздо более естественная формулировка теорий суперструн, основанная на некотором обобщении эйнштейновского принципа общей относительности. Если такой обобщенный принцип будет найден, это прояснит логические основания теорий суперструн и приведет к лучшему пониманию их предсказаний.