

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

**СУПЕРГРАВИТАЦИЯ И УНИФИКАЦИЯ ЗАКОНОВ ФИЗИКИ\*)****Д. Фридман, П. ван Ньювенхёйзен**

*В этой новой теории гравитационная сила возникает из симметрии, связывающей между собой частицы с совершенно различными свойствами. Конечным результатом, возможно, станет единая теория всех основных сил в природе.*

В полный список основных фундаментальных составляющих материального мира надо было бы включить десятки и даже сотни частиц, которые взаимодействуют посредством сил четырех видов: сильных, электромагнитных, слабых и гравитационных. Однако нет явной причины, по которой природа должна быть столь сложна, и, вероятно, наиболее честолюбивое стремление современной физики — раскрыть в многообразии частиц и сил более простой исходный порядок. В частности, можно было бы достичь более удовлетворительного понимания природы, если бы удалось как-то объединить все четыре силы. Совсем хорошо было бы показать, что все они имеют общее происхождение, тогда их можно было бы рассматривать как различные проявления единой первоначальной силы.

За прошедшие пятьдесят лет наука добилась замечательных успехов в открытии элементарных частиц материи и в исследовании их взаимодействий. Разумеется, многие проблемы остались нерешенными. Среди наиболее фундаментальных проблем две связаны с гравитацией. Во-первых, непонятно, как гравитация связана с другими фундаментальными силами. Во-вторых, отсутствует рабочая теория гравитации, совместимая с принципами квантовой механики. Возникшая в последнее время новая теория гравитации, названная супергравитацией, привела к новым взглядам на обе эти проблемы. Возможно, сделан шаг к их решению.

□

Из фундаментальных сил в природе гравитация (тяготение) была осознана первой, и для нее первой была найдена математически ясная теория, а именно, теория Ньютона, опубликованная им в 1687 г. в его «Принципах».

---

\*) Freedman D. Z., van Nieuwenhuizen P. Supergravity and the Unification of the Laws of Physics. — Scientific American, February 1978, v. 238, No. 2, pp. 126—143. — Перевод М. С. Маринова.

Д-р Д. Фридман работает в Лаборатории им. Ч. Лауритсена в Калифорнийском технологическом институте, Пасадена, Калифорния; П. ван Ньювенхёйзен — сотрудник Института теоретической физики при Университете штата Нью-Йорк, Стони-Брук, США.

Ньютон открыл простой закон, по которому тяготение действует единообразно между всеми парами частиц с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Он смог рассчитать затем движение снарядов вблизи Земли, в согласии с наблюдениями Галилея, и орбиты планет, которые были в согласии со сформулированными Кеплером эмпирическими законами. Постижение физического закона, который правильно описывал как земные, так и небесные движения, явилось примером поразительного синтеза человеческих знаний.

Столь же замечательное сведение разных явлений к одному принципу произошло в теории электромагнетизма. От натурфилософов XVIII века была скрыта связь между статическим электричеством, возникающим при соприкосновении гребня с волосами, магнитной силой, действующей на стрелку компаса, и светом, исходящим от Солнца или пламени свечи. Однако в XIX веке Джеймс Клерк Максвелл показал, что все эти явления связаны с системой дифференциальных уравнений, которые известны ныне как уравнения Максвелла для электромагнитного поля.

К концу XIX века преобладало мнение, что все сложнейшие проявления гравитации и электромагнетизма можно описать законами Ньютона и Максвелла. Казалось, что оставалось лишь детально разрабатывать следствия из этих уравнений. Эта благодушная позиция была вдребезги разбита рядом опытных результатов, полученных в последнее десятилетие XIX века и в начале XX века. Одно важное противоречие между теорией и экспериментом возникло после открытия, что скорость света, в отличие от скорости других волн, не зависит от движения наблюдателя. Другая трудность была связана с интерпретацией дискретных линий в атомных спектрах. Уже задолго до того времени было известно, что атомы испускают свет лишь с некоторыми характерными частотами, но это наблюдение невозможно было совместить с открытием, что атомы состоят из электронов, вращающихся вокруг крошечных плотных ядер. Теория Максвелла предсказывала непрерывный спектр света, излучаемого электронами, спускающимися по спирали к ядру.

Эти противоречия были сняты развитием двух теорий, ставших краеугольными камнями современной физики, — специальной теории относительности и квантовой механики. Чтобы прийти к этому решению, пришлось отказаться от понятий об абсолютном времени и о детерминизме в движении частиц — понятий, столь глубоко укоренившихся, что было трудно осознать, что они были, в сущности, неявными предположениями. Специальная теория относительности объединила пространство и время, а квантовая механика показала, что частицы и волны — эквивалентны. И тогда удалось понять, почему скорость света одинакова для всех наблюдателей и почему спектральные линии атомов отвечают определенным дискретным частотам.

В теории тяготения Ньютона пространство и время не имеют той тесной связи, которая выявлена теорией относительности. Поэтому специальная теория относительности привела к пересмотру теории тяготения. Новая теория была предложена Эйнштейном в 1916 г. и была названа общей теорией относительности. Она также стала одной из основ современной физики.

□

В начале XX века были открыты две новые фундаментальные силы. Речь идет о слабом взаимодействии, вызывающем бета-распад, и о сильном взаимодействии, связывающем протоны и нейтроны в атомных ядрах. Эти силы не были открыты ранее, так как они действуют лишь на малых

субатомных расстояниях, в то время как тяготение и электромагнетизм — дальнедействующие силы и проявляются макроскопически.

Все четыре силы имеют поразительно разные свойства. Различие в области действия уже было упомянуто, еще больше они различаются по величине. Сильное взаимодействие — самое мощное из четырех (на малых расстояниях). Если принять силу между двумя протонами за единицу, то электрическая сила между этими частицами имеет величину порядка  $10^{-2}$ , а слабое взаимодействие — порядка  $10^{-5}$ . Исключительно мала сила тяготения — всего лишь  $10^{-39}$ . Можно представить себе, как мала эта величина: если бы электроны были привязаны к ядру не электричеством, а гравитацией, то атом водорода был бы больше всей Вселенной.

Таблица I

Взаимодействия четырех типов определяются частицами, которые их переносят. Массы этих частиц определяют радиус действия сил; на больших расстояниях действуют лишь силы, которые переносятся безмассовыми частицами. Характер сил между одинаковыми частицами определяется спином переносящих взаимодействие частиц: для четных спинов — притяжение, для нечетных спинов — отталкивание. Хотя гравитация исключительно слаба, это единственная сила, которая дает притяжение между всеми частицами на больших расстояниях. Поэтому гравитация определяет крупномасштабную структуру Вселенной

Взаимодействие	Сила	Радиус действия	Частицы	Частицы, переносящие взаимодействие			Силы между одинаковыми частицами
				Название	Массы	Спин	
Сильное	1	Малый	Кварки	Глюоны	?	1	Отталкивание
Электромагнитное	$10^{-2}$	Большой	Все электрически заряженные	Фотоны	0	1	Отталкивание
Слабое	$10^{-5}$	Малый	Лептоны и кварки	Векторные бозоны ( $W^+$ , $W^-$ , $Z^0$ )	$50-100 \text{ Гэв}/c^2$	1	Отталкивание
Гравитационное	$10^{-39}$	Большой	Все частицы	Гравитоны	0	2	Притяжение

Несмотря на такое различие свойств четырех основных сил природы, естественно искать более глубокую теорию, в которой все они имели бы общее происхождение. Эйнштейн посвятил большую часть второй половины своей жизни поискам единой полевой теории гравитации и электромагнетизма. Присоединялись к нему и другие физики, но результаты их работы были неубедительны, так как их подход не включал в себя идеи квантовой теории.

Около десяти лет назад слабые и электромагнитные силы были объединены в работе Стивена Вейнберга из Гарвардского университета, а позднее — в работе Абдуса Салама из Международного Центра теоретической физики в Триесте и Джона Уорда из Новой Зеландии. Как полагают, тот же метод применим и к ядерным силам. Однако этот синтез не коснулся силы, которая известна дольше других, — силы тяготения.

Новый подход к единой теории намечен идеей супергравитации. Супергравитация является обобщением общей теории относительности и предсказывает те же классические явления, что и теория Эйнштейна. Мы имеем в виду, например, прецессию планетных орбит, отклонение луча света звезды при прохождении вблизи Солнца, красное смещение звездных спектральных линий и запаздывание радиолокационных сигналов, проходящих

в поле тяготения Солнца. Однако на квантовом, микроскопическом уровне супергравитация отличается от общей теории относительности. При вычислении вероятностей некоторых квантовых эффектов тяготения общая теория относительности дает бессмысленный, бесконечно большой результат. В супергравитации же все проведенные до сих пор вычисления давали конечные ответы.

При построении новой физической теории полезно руководствоваться принципами симметрии, которые позволяют описывать одним законом

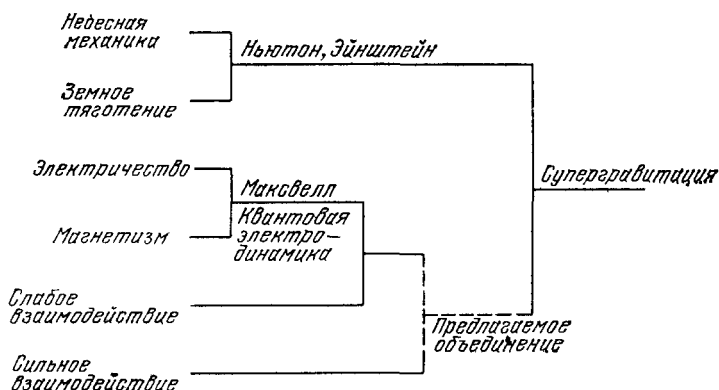


Рис. 1. В истории физических теорий прослеживается тенденция к унификации.

Первый шаг сделал Ньютон, показав, что движение снарядов над земной поверхностью и орбиты планет управляются одним и тем же простым законом. Дж. К. Максвелл создал теорию, описавшую единым образом электрические и магнитные явления. В XX веке теория Ньютона была заменена общей теорией относительности Эйнштейна, а теория Максвелла была преобразована в квантовую теорию поля, названную квантовой электродинамикой. В последние годы электромагнетизм был объединен со слабым взаимодействием. Сильное взаимодействие также описывается квантовой теорией поля, и в конце концов, может быть, удастся представить силы всех трех типов как проявление единого принципа. Супергравитация — теория, развитая в последние несколько лет и описывающая гравитацию как квантовую теорию поля. Она еще не проверена, но на этом пути, может быть, удастся объединить все силы в природе.

объекты или понятия, которые кажутся несвязанными. Ниже будет объяснено, что симметрия физической теории может существовать как в глобальной, так и в локальной форме. Выяснилось, что теории с локальной симметрией, называемые также калибровочными теориями, являются гораздо более мощными. Общая теория относительности и теория электромагнетизма Максвелла основаны на локальных симметриях. Новейшие единые теории слабых и электромагнитных взаимодействий также являются калибровочными. Это наводит на мысль, что любая теория, объединяющая все четыре силы, также должна обладать локальной симметрией.

Супергравитация основана на новой симметрии, которая столь замечательна даже на глобальном уровне, что она получила название суперсимметрии. Суперсимметрия связала два больших класса, на которые делятся все элементарные частицы: фермионы, к которым, например, относятся электрон, протон и нейтрон, и бозоны, подобные фотону. Свойства фермионов и бозонов совершенно различны, и наличие фундаментальной связи между ними было некоторой неожиданностью. В супергравитации суперсимметрия продолжается с глобального уровня на локальный. Примечательно, что это продолжение само собой приводит к теориям, включающим гравитационную силу, и указывает на возможность построения единой теории.

Супергравитация не проверена опытом. Это пока умозрительная теория, но достигнутые в ней успехи обнадеживают. Вобрав в себя ряд важ-

нейших понятий современной физики, супергравитация уже разрешила больше проблем, чем любая из предшествовавших квантовых теорий тяготения.

□

Современное понимание основных законов природы возникло из трех принципов: специальной относительности, общей относительности и квантовой механики. Каждый из них вызван к жизни решением какого-либо противоречия в физике и каждый привел к предсказанию новых явлений, проверенных затем на опыте. Едва ли в настоящее время можно сомневаться в справедливости этих принципов.

Эйнштейн выдвинул специальную теорию относительности, чтобы согласовать теорию движения в механике Ньютона с обнаруженным на опыте фактом, что скорость света одинакова для всех наблюдателей. Если бы волны света вели себя так же, как волны на поверхности воды, движущийся по отношению к волнам наблюдатель измерил бы скорость волны, отличную от измеренной покоящимся наблюдателем. Уравнения Максвелла предсказывают, что скорость света не зависит от движения наблюдателя. Так как это предсказание казалось противоречащим здравому смыслу, ранее считалось, что уравнения Максвелла справедливы лишь для покоящихся наблюдателей.

В 1888 г. опыт А. Майкельсона и Е. Морли показал, что это мнение неверно. Гениальность Эйнштейна — в том, что он осознал, что красота уравнений Максвелла важнее обычных представлений о движении, оформленных в теории Ньютона. Эйнштейн показал, что уравнения Максвелла становятся справедливыми для всех наблюдателей, если как пространственные размеры, так и временные интервалы, измеряемые двумя наблюдателями, зависят от их относительной скорости. Он показал также, что законы механики Ньютона можно преобразовать таким образом, чтобы они вобрали в себя новые представления о пространстве и времени. Одним из важных предсказаний было то, что скорость света — максимальная скорость, возможная для частицы или сигнала. Другое широко известное предсказание — связь между энергией и массой частицы,  $E = mc^2$ , — формула, определяющая энергию, которая высвобождается в ядерных реакциях.

Общая теория относительности была предложена Эйнштейном в 1916 г., после девяти лет упорных попыток решить проблему построения теории тяготения, согласующейся с присущей специальной теории относительности симметрией между пространством и временем, с одной стороны, и тем известным со времен Галилея опытным фактом, что все тела, независимо от массы, одинаково движутся в поле тяготения, — с другой стороны. Богатство содержания, глубина проникновения в суть вещей ставят общую теорию относительности в один ряд с наиболее поразительными достижениями человеческого разума. Грубо говоря, Эйнштейн впервые пришел к выводу, что если траектории падающих тел не зависят от их массы, то гравитация должна быть связана с внутренней структурой пространства и времени. Он вывел затем уравнения, выражающие эту мысль в математической форме, опираясь на методы неевклидовой геометрии, сформулированные в предшествовавшем столетии Карлом Фридрихом Гауссом и Бернгардом Риманом. Созданная теория, в частности, предсказала, что свет звезды, проходя у края Солнца, отклонится на вдвое больший угол, чем следует из теории Ньютона. Эйнштейн предложил измерить этот эффект во время полного солнечного затмения.

Результаты экспедиции, возглавленной А. Эддингтоном, были обнародованы во время первой годовщины перемирия, завершившего первую

мировую войну. Это был драматический и великий момент в истории науки. Глубокая теоретическая мысль Эйнштейна была утверждена в последней инстанции — в лаборатории Природы.

Через годы после создания общей теории относительности Эйнштейн писал \*): «В свете уже достигнутых результатов счастливо найденное кажется почти само собой разумеющимся, и любой толковый студент усваивает теорию без большого труда. Позади остались долгие годы поисков во тьме, полных предчувствий, напряженное ожидание, чередование надежд и изнеможения и, наконец, прорыв к ясности. Но поймет это лишь тот, кто пережил все сам.» Эти слова в равной мере относятся к другим открывающим новые пути достижениям физики.

Квантовая механика, развитая в 1926 г. Вернером Гейзенбергом, Эрвином Шрёдингером и другими дала убедительное объяснение дискретных линий в атомных спектрах. Квантовая механика описывает электроны в атомах не как точечные частицы, а как суперпозицию волн, которую можно интерпретировать как распределение вероятности вокруг ядра. Энергия каждого распределения имеет определенное значение, и скачки электрона из одного такого квантового состояния в другое сопровождаются излучением на дискретных частотах. Строгий детерминизм классической механики уступил место вероятностной интерпретации измерений на микроскопическом уровне в квантовой механике. Например, электрон в атоме может быть обнаружен в любой точке вокруг ядра; вероятность этого определяется амплитудой распределения волны в этой точке.

□

Строя современную теоретическую физику на основе специальной теории относительности и квантовой механики, надо было соединить обе теории. Первое важное достижение принадлежит П. А. М. Дираку, который в 1928 г. сформулировал релятивистское волновое уравнение для электрона. Из этой работы возникло удивительное предсказание. Уравнение имело смысл лишь при условии, что существует новая частица с той же массой, что электрон, но с противоположным электрическим зарядом. Эта античастица для электрона, названная позитроном, была открыта в 1932 г. По современным взглядам, каждой частице в природе соответствует античастица.

Полное объединение специальной относительности и квантовой механики было осуществлено с развитием квантовой теории поля, которое началось работами Дирака, Гейзенберга и Вольфганга Паули в конце 20-х годов. Квантовая теория поля — общий подход, в принципе применимый к каждой из четырех сил. Однако практически при вычислении некоторых квантовых эффектов в вероятностях возникают бесконечности, приводящие к трудностям. Впервые эти трудности были преодолены в квантовой электродинамике — квантовой теории поля, описывающей взаимодействие электронов, позитронов и фотонов. Успех пришел в конце 40-х годов, через два десятилетия после формулировки теории, когда Ричард Ф. Фейнман, Джулиан С. Швингер и Синитиро Томонага нашли стройные методы вычислений, согласующиеся с внутренней симметрией теории. Оказалось, что бесконечности можно последовательно удалить с помощью метода, называемого перенормировкой. Полученные конечные предсказания можно было сравнить с опытом. Предсказания квантовой электродинамики были подтверждены с необычайной точностью. Например, теория указывает, что электрон ведет себя как маленький магнит. Измеренная величина магнитного дипольного момента, равная

\*) Этими словами завершается одна из популярных лекций Эйнштейна, прочитанная в 1933 г. Перевод цитируется по изданию<sup>1</sup>, с. 406. (Прим. перев.)

$1,0011596524 \pm 2 \cdot 10^{-10}$ , согласуется с теоретическим предсказанием в пределах нескольких единиц на 10 миллиардов.

Процедура перенормировки применима лишь для особого класса полевых теорий, когда бесконечности могут быть скомпенсированы изменением основных параметров теории, таких, как масса и заряд электрона. Наблюдаемая масса электрона складывается из «голой массы» и «собственной энергии», возникающей от взаимодействия электрона с его собственным электромагнитным полем. Каждое из слагаемых в отдельности ненаблюдаемо. Вычисление дает для собственной энергии бесконечность. О голой массе ничего не известно, поэтому можно полагать ее отрицательной и бесконечно большой, так что в сумме бесконечности взаимно уничтожаются и возникает наблюдаемая конечная масса электрона.

□

Перенормировка работает в квантовой электродинамике и в принятых теперь полевых теориях сильных взаимодействий. Долго казалось, что для слабых взаимодействий нет убедительной перенормируемой теории. Это положение изменилось в начале 70-х годов благодаря теоретическому открытию Герарда т'Хоофта и Мартина Вельтмана из Утрехтского университета, которое было развито далее ими и покойным Бенджаменом Ли из Национальной лаборатории им. Ферми и Ж. Зинн-Жюстеном из Ядерного исследовательского центра в Сакле (близ Парижа). Они показали, что единые полевые теории слабых и электромагнитных взаимодействий могут быть перенормированы. Квантовые теории сил тяготения еще страдали от бесконечностей, и именно от этой трудности, может быть, избавит физику супергравитация.

В квантовой теории поля частицы являются волнами или квантами некоторых полей. Важное предсказание квантовой теории поля состоит в том, что частицы имеют собственный момент вращения — спин. Спин может принимать значения, равные постоянной Планка, умноженной на целое или полуцелое число. Короткоживущий  $\pi$ -мезон имеет спин 0, электрон, протон и нейтрон имеют спин  $1/2$ , а фотон — спин 1.

Общее предсказание квантовой теории поля, нашедшее безоговорочное подтверждение в природе, — связь между спином и статистикой частицы, т. е. поведением системы, состоящей из двух или большего числа одинаковых частиц. Частицы с полуделыми спинами ( $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$  и т. д.) — фермионы: они удовлетворяют сформулированному Паули принципу запрета. Этот принцип устанавливает, что два одинаковых фермиона не могут находиться в одной точке пространства или вообще в одном и том же квантовом состоянии. Именно это свойство электрона определяет сложную структуру электронных оболочек атомов и, следовательно, различие химических свойств элементов. Если бы не принцип запрета, все электроны в атоме сели бы на нижний энергетический уровень. В плотной материи тот же принцип приводит к эффективному отталкиванию одинаковых фермионов. Это отталкивание объясняет стабильность «белых карликов» и нейтронных звезд, которые иначе коллапсировали бы в «черные дыры» под действием гравитационного притяжения.

Совершенно иная статистика у бозонов, частиц с целым спином. Для них характерна повышенная вероятность того, что две или несколько частиц окажутся в одной точке пространства или в одном квантовом состоянии. Подобные сгущения многих одинаковых бозонов могут приводить к макроскопически наблюдаемым явлениям. Например, свет лазера — это суперпозиция многих фотонов одной и той же энергией и летящих в одном направлении. При явном различии свойств бозонов и фермионов тем более примечательно открытие симметрии, способной связать их друг с другом.

□

В квантовой теории поля все силы между частицами описываются обменом некоторыми «виртуальными» частицами. Взаимное отталкивание двух электронов происходит, когда один электрон испускает фотон, поглощаемый затем другим электроном. Промежуточный фотон называется виртуальным, так как он не наблюдается при этом непосредственно: он существует слишком короткое время. Согласно квантовой теории дальнедействующие силы возникают при обмене безмассовыми частицами, а короткодействующие — при обмене частицами с массой. Так, ядерная сила между двумя протонами осуществляется обменом  $\pi$ -мезонами, которые в 300 раз тяжелее электрона. На более глубоком уровне протон, нейтрон и  $\pi$ -мезон, по-видимому, состоят из кварков. С этой точки зрения, силы возникают

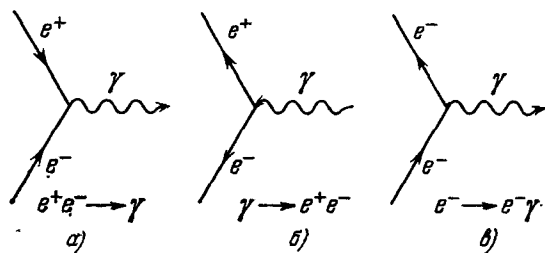


Рис. 2. Квантовые теории поля объясняют действие сил на частицы как результат испускания и поглощения других частиц.

Эти явления графически изображаются вершинами. Основная для квантовой электродинамики вершина содержит две линии, изображающие электрон ( $e^-$ ) или позитрон ( $e^+$ ), и линию, изображающую фотон ( $\gamma$ ). Эту вершину можно интерпретировать тремя способами в зависимости от направления движения частиц: а) аннигиляция,  $e^+e^- \rightarrow \gamma$ ; б) распад фотона на пару,  $\gamma \rightarrow e^+e^-$ ; в) распад электрона на электрон и фотон,  $e^- \rightarrow e^- + \gamma$ . Рождение и уничтожение частиц — характерная для квантовой теории поля особенность, отличающая ее от «классических» теорий Максвелла и Эйнштейна.

от того, что кварки обмениваются частицами, называемыми глюонами. Слабое взаимодействие, как полагают, возникает от обмена промежуточными векторными бозонами, очень тяжелыми частицами со спином 1, которые предсказываются едиными теориями слабых и электромагнитных взаимодействий.

Хотя удовлетворительная теория квантовой гравитации еще не установлена, естественно полагать, что сила Ньютона возникает от обмена

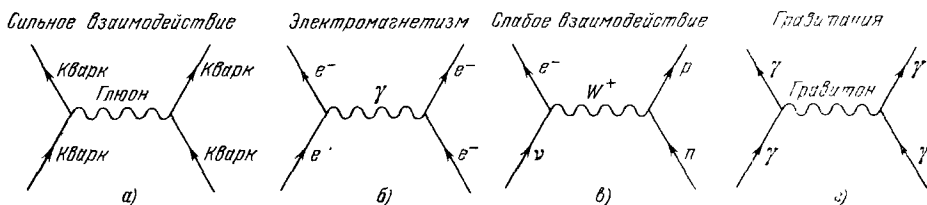


Рис. 3. Взаимодействия между частицами можно изображать диаграммами, в которых вершины соединяются линиями.

Сила между двумя частицами передается обменом третьей частицей, которая называется виртуальной, так как ее нельзя обнаружить. Для каждого из четырех взаимодействий есть своя виртуальная частица (или квант). Для электродинамики это фотон (б). Сильные взаимодействия между кварками (предполагаемыми составляющими протонов и нейтронов) переносятся частицами, которые называются глюонами (а). Виртуальные частицы в слабом взаимодействии  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ , как полагают, во всем похожи на фотон, но имеют большую массу (в). Квант гравитации, — гравитон, имеет нулевую массу (г). Из всех этих виртуальных частиц наблюдался лишь фотон, но кажется правдоподобным, что существуют и другие.

виртуальной частицей. Эта частица называется гравитоном. Она должна быть безмассовой, потому что тяготение действует на далеких расстояниях. Ее спин должен быть целым четным числом, например 0, 2 или 4, потому что при обмене бозонами с нечетным спином между одинаковыми частицами возникает отталкивание. Нулевое значение спина исключается, так как в этом случае световой луч не отклонялся бы в поле Солнца. Следующий



по простоте случай спина 2 удовлетворяет всем экспериментальным требованиям.

Изложенные доводы можно было бы обратить, так что общая теория относительности выводится из предположения, что гравитационная сила возникает от обмена безмассовыми частицами со спином 2 и что эти частицы описываются квантовой теорией поля. Все частицы подтягиваются друг к другу виртуальными гравитонами так, что они следуют по одинаковым искривленным траекториям, управляемым уравнениями Эйнштейна. Этот новый вывод не умаляет открытия Эйнштейна. Он просто освещает это открытие с новой точки зрения, основанной на квантовой теории поля.

Основное различие между классическими и квантовыми полевыми теориями состоит в том, что лишь в квантовом случае происходит рождение и уничтожение частиц. Аннигиляция электрона и позитрона с образованием двух фотонов возможна лишь в квантовой теории поля. Такое явление часто наблюдается в лаборатории, так что эта особенность квантовой теории поля несомненна. Действительно, получаемая из квантовой электродинамики вероятность такого события полностью согласуется с опытом.

Основной элемент квантовой теории поля изображается «вершиной», в которой одна частица разваливается на две или большее число частиц. Вершина в квантовой электродинамике описывает распад фотона на пару электрон-позитрон, аннигиляцию такой пары с образованием фотона или распад электрона на фотон и электрон. В этой вершине сходятся две линии, изображающие электроны или позитроны, и фотонная линия.

Вероятность любого процесса в квантовой теории поля вычисляется с помощью построения диаграмм, в которых вершины связаны всеми возможными способами. Простейшая диаграмма для рассеяния электрона на электроне изображает обмен одним фотоном и учитывает эффект классической электромагнитной силы. Другие диаграммы содержат замкнутые петли, изображающие виртуальные частицы. Диаграммы с петлями дают квантовые поправки. Каждой диаграмме отвечает вполне определенное, хотя и сложное, математическое выражение. В удовлетворительных полевых теориях удастся вычислить эти выражения и удалить бесконечности, которые в них часто встречаются, путем перенормировки. Чтобы найти вероятность процесса, надо затем сложить вклады всех диаграмм и возвести сумму в квадрат. Общее число всех диаграмм — бесконечно, и найти абсолютно точный результат невозможно. В квантовой электродинамике вклад диаграмм с одной петлей составляет менее 1% вклада диаграмм без петель. Диаграммы с двумя петлями еще в 100 раз меньше и т. д. Поэтому достаточно точный результат можно получить, вычислив ограниченное число диаграмм.

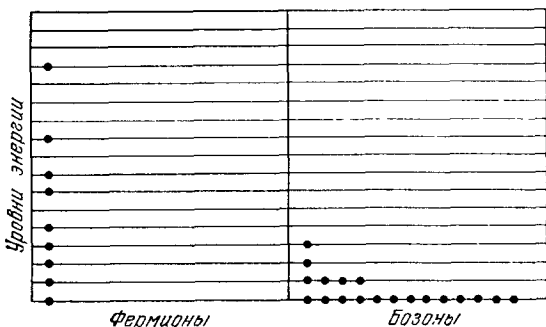


Рис. 4. Спиновый момент влияет не только на движение частиц, но также определяет статистическое поведение систем, состоящих из двух или более одинаковых частиц.

Частицы с полуцелым спином (например, электрон и протон) называются фермионами. Они удовлетворяют принципу запрета, сформулированному Вольфгангом Паули: два фермиона не могут пребывать в одном квантовом состоянии. Частицы с целым спином (например, фотон и гравитон) называются бозонами, они могут быть в одной точке и в квантовом состоянии с данной энергией в неограниченном количестве. Поэтому в системе со спектром энергетических состояний фермионы распределяются по одному на состояние, а бозоны стремятся собраться в состоянии с наименее возможной энергией.

□

В истории материальной культуры немало примеров той привлекательности, которой обладает симметрия для человеческого восприятия. Симметрию можно определить как некоторое движение, при котором какой-либо объект не меняет своей формы. Например, куб можно поворачивать

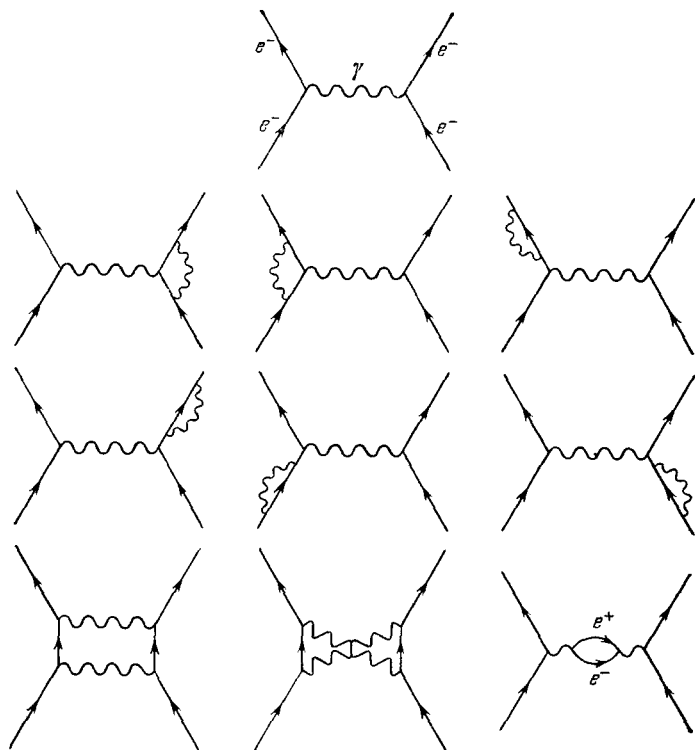


Рис. 5. Квантовые поправки к классическим законам сил изображаются диаграммами с замкнутыми петлями.

В случае взаимодействия между электронами обмен виртуальным фотоном отвечает силе, предсказанной теорией Максвелла. В квантовой электродинамике следует учитывать более сложные взаимодействия. Например, фотон может быть излучен и вновь поглощен тем же электроном, возможен обмен двумя фотонами, или виртуальный фотон может перейти в пару  $e^+e^-$ , которая затем аннигилирует в другой фотон. Классическая проблема квантовой теории поля состоит в том, что такие петлевые диаграммы дают для вероятности процесса бесконечно большой ответ. В квантовой электродинамике метод, называемый перенормировкой, устраняет эти бесконечности. Трудность в построении квантовой теории тяготения связана с тем, что перенормировка в этом случае не приводит к устранению бесконечностей.

на  $90^\circ$ , и он не изменится, а сфера не меняется при любых вращениях относительно центра. Симметриями подобного рода обладают и физические теории, но то, что остается неизменным при движениях, — это не пространственная форма, а математические законы самой теории. В физике общепризнанным является мнение, что законы симметрии играют важнейшую роль в нашем понимании природы.

В качестве примера фундаментальной симметрии рассмотрим двух космонавтов, изучающих электромагнитные явления на двух космических кораблях, свободно летящих в пространстве и имеющих постоянную относительную скорость. Каждый из них устанавливает свою определенным образом ориентированную координатную систему. Наблюдения внешних явлений обоими космонавтами записываются в разной форме. Однако если свести эти наблюдения к физическим законам, то оба убедятся в справедливости уравнений Максвелла.

Этот мысленный эксперимент поясняет принцип, называемый инвариантностью Пуанкарé, по имени французского математика Анри Пуанкарé. Это — симметрия пространства и времени, лежащая в основе специальной теории относительности. Сравнение наблюдений двух космонавтов показало бы, что их координатные системы связаны так, как предписано теорией относительности. Инвариантность Пуанкаре фиксирует экспериментально наблюдаемое положение, что законы природы на другом конце города — те же, что и у вас во дворе. Говоря точно, все законы физики имеют одну и ту же форму в различных координатных системах, отличающихся сдвигами, поворотами осей и имеющих неизменное относительное движение.

Симметрии такого рода, называемые глобальными, принципиально отличаются от локальных симметрий. Глобальная симметрия — понятие более общее, но локальные симметрии предъявляют более жесткие требования к теории и раскрывают более глубокие связи явлений природы. Действительно, переход от глобальной симметрии к локальной объясняет происхождение гравитационных и электромагнитных сил. Есть основание полагать, что все остальные силы также возникают как следствие локальных симметрий.

Глобальной называется симметрия относительно преобразования, прилагаемого одинаково во всех точках пространства; в случае локальной

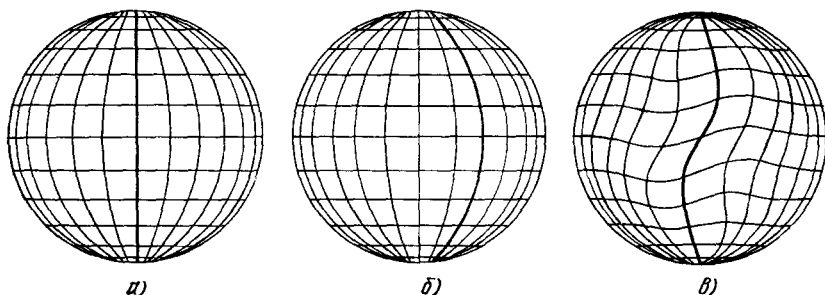


Рис. 6. Законы природы могут обладать симметрией, так же как предметы, подобные кристаллам. а) Исходная сфера, б) глобальное преобразование, в) локальное преобразование.

Как кристалл не меняет своей формы при некоторых специальных поворотах и сдвигах, симметричные законы природы остаются неизменными при некоторых специальных преобразованиях. Симметрии физических законов — двух типов: глобальные и локальные. Различие между ними можно представить себе, рассматривая идеальную сферическую оболочку с нанесенной на ней системой координат (а). Глобальная симметрия проявляется при повороте сферы вокруг некоторой оси (б). Поворот — симметричная операция, потому что форма сферы не меняется; это глобальная симметрия, так как положение всех точек смещается на один и тот же угол. Локальная симметрия требует, чтобы сфера сохранила свою форму даже при условии, что все точки смещаются независимо. Существенно, что такое локальное преобразование приводит к появлению натяжений и соответственно сил взаимодействия между точками (в). Как полагают, каждый из четырех видов сил в природе возникает из сходного требования, чтобы закон физики был инвариантен относительно локального преобразования.

симметрии преобразования в разных точках независимы. Это различие можно пояснить с помощью резинового шарика, точки которого как-то размечены. Шарик можно повергнуть вокруг какой-либо оси, проходящей через его центр. Шарик сохранит при этом свою форму, поэтому поворот — симметричная операция, а так как все точки преобразуются одинаково (поворачиваются на один и тот же угол), мы имеем здесь дело с глобальной симметрией.

У идеально упругого шарика можно было бы также сместить любую точку, независимо растягивая или сжимая резину, но не меняя расстояния до центра. Сферическая форма не нарушится, так что мы вновь имеем дело с преобразованием симметрии. Но это симметрия локальная, так как сме-

щения различных точек независимы. Важная отличительная особенность локальной симметрии состоит в том, что из-за натяжений в резине между смещенными по-разному точками появляются упругие силы. Эти силы не вводятся искусственно; наоборот, они непосредственно связаны с локальной симметрией физической теории.

Упомянутая симметрия Пуанкаре есть симметрия глобальная, так как связь между двумя наборами координат, описывающих данную точку пространства-времени, одинакова для всех точек. Гораздо сильнее условие локальной инвариантности, требующее, чтобы физические законы сохраняли свою форму при независимых преобразованиях координат. Таким образом, допускаются наблюдатели, относительное движение которых не равномерно. На первый взгляд кажется, что при этом законы физики у разных наблюдателей будут различны, так как ускорения приводят к «фиктивным» силам, типа центробежной силы, наблюдаемой вращающимся наблюдателем. Эйнштейн осознал, что фиктивные силы, возникающие в ускоренной системе, тесно связаны с гравитационными силами, присущими всем массам. Он показал, что законы физики останутся инвариантными, если ввести в уравнения гравитационные поля. Так возникла общая теория относительности.

□

Описанный выше пример поясняет важнейшую общую особенность связи между глобальными и локальными симметриями. Если система физических законов инвариантна относительно некоторой глобальной симметрии, более сильное требование инвариантности относительно локальной симметрии можно выполнить только путем введения новых полей, которые приводят к появлению новых сил. Эти поля называются калибровочными полями, они связаны с новыми частицами, и силы можно представлять как результат обмена этими частицами. Так, гравитация — калибровочное поле для локальной инвариантности относительно преобразований Пуанкаре, а сила тяготения возникает из требования, чтобы эта симметрия была локальной.

Существование электромагнитных сил также можно вывести из требования локальности симметрии. В квантовой теории поля заряженные частицы описываются комплексными полями, так что в каждой точке заданы две величины: амплитуда и фаза. Амплитуда измеряет вероятность найти частицу в данной точке, а фаза характеризует волновые свойства частиц. Наблюдаемые величины, такие, как полная энергия системы заряженных частиц, не меняются при сдвиге фазы на некоторую величину, одинаковую во всех точках. Таким образом, поле обладает глобальной симметрией относительно сдвига фазы. Локальная симметрия требует инвариантности наблюдаемых относительно независимого изменения фазы в разных точках. Чтобы устроить локальную симметрию, необходимо ввести калибровочное поле; кванты этого поля — фотоны, вызывающие электромагнитные силы. При наличии лишь глобальной симметрии не было бы ни электромагнитных сил, ни фотонов, ни света.

Локальная электромагнитная симметрия называется внутренней: в отличие от преобразований Пуанкаре, в этом случае пространственно-временные координаты не меняются. Другая внутренняя симметрия, изотопическая, играет фундаментальную роль в ядерной физике: она устанавливает связь между протоном и нейтроном.

Протон и нейтрон имеют одинаковый спин  $1/2$ , и в ядре на них действуют приблизительно одинаковые силы. Изотопическая симметрия позволяет рассматривать эти две частицы как состояния единой частицы — нуклона. Нуклон можно представить себе как частицу, связанную со стрелкой в во-

ображаемом пространстве. Если стрелка указывает вверх, то нуклон — протон, если она указывает вниз, то это нейтрон. Наблюдаемые частицы имеют определенный заряд, это либо протоны, либо нейтроны, поэтому стрелка в этом случае всегда указывает либо вверх, либо вниз. Однако описывающие ядерные силы уравнения инвариантны относительно произвольных вращений стрелки. В ядерной физике изотопическая симметрия считается глобальной. Стрелка должна поворачиваться на один и тот же угол во всех точках пространства, если исходить из инвариантности ядерных сил.

Задача превращения глобальной изотопической симметрии в локальную была решена в 1954 г. Янг Чжень-нином и Робертом Миллсом. Они обнаружили, что переход к локальной симметрии требует введения трех калибровочных полей, связанных с безмассовыми частицами со спином 1. В течение более чем десяти лет теория полей Янга — Миллса рассматривалась как математически красивая диковина, не имеющая физических применений. В природе явно нет трех безмассовых частиц такого рода и передаваемых ими дальнедействующих сил.

Теперь мы знаем, что калибровочные поля в теории Янга — Миллса могут существовать, потому что они не обязательно лишены массы. Масса, и притом очень большая, может возникнуть у них посредством механизма, который называется спонтанным нарушением симметрии. Джерри Голдстоун из Кембриджского университета показал, что симметричная теория может иногда приводить к совершенно асимметричным явлениям. Здесь уместна аналогия с рулеткой: уравнения движения для колеса рулетки и шарика симметричны относительно вращения вокруг оси, но шарик всегда останавливается в асимметричной позиции.

Питер Хиггс из Эдинбургского университета показал затем, что в теориях с калибровочными полями спонтанное нарушение симметрии приводит к появлению масс у некоторых калибровочных полей, в то время как другие остаются безмассовыми. Единые теории слабых и электромагнитных взаимодействий используют локальную изотопическую симметрию и спонтанное нарушение. В этих теориях близкоедействующее слабое взаимодействие переносится промежуточными векторными бозонами. Это — калибровочные поля со спином 1, получившие массу способом Хиггса. Фотон — калибровочная частица, оставшаяся безмассовой. Так простое требование локальной изотопической инвариантности привело к объединению двух из основных сил в природе. Как будет показано ниже, дополнительное требование локальной суперсимметрии может в дальнейшем объединить эти силы с гравитацией.

□

Внутренние симметрии, типа изотопической, связывают частицы с одинаковым спином. Казалось весьма заманчивым найти симметричную схему,

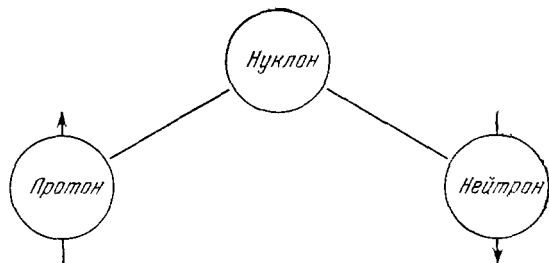


Рис. 7. Изотопическая симметрия устанавливает связь между частицами с одинаковым спином, например протоном и нейтроном.

Обе эти частицы можно рассматривать как состояния единой частицы, называемой нуклоном, которую можно изобразить стрелкой в воображаемом пространстве. Если стрелка указывает вверх, то нуклон — протон, если вниз — то нейтрон. Для реальных частиц стрелка всегда указывает либо вверх, либо вниз, так как нуклон всегда наблюдается в одном из этих двух состояний, но физические законы, описывающие взаимодействия между протонами и нейтронами, не меняются при произвольных вращении стрелки.

которая связала бы частицы с разными спинами. Изобретение суперсимметрии привело именно к такой схеме. Суперсимметрия объединяет частицы со смежными значениями спинов, например 1 и  $1/2$ , включая в одно семейство и бозоны, и фермионы. Не менее замечательно то, что суперсимметрия связала инвариантность относительно преобразований Пуанкаре с внутренними симметриями. Именно благодаря этому и возникла новая теория тяготения — супергравитация.

Суперсимметрия была сформулирована независимо физиками в СССР, Западной Европе и США. Она обсуждалась в 1971 г. сотрудниками ФИАН им. Лебедева в Москве Ю. А. Гольфандом и Е. П. Лихтманом. Однако работа осталась незамеченной, и идея была переоткрыта в 1973 г. Д. В. Волковым и В. П. Акуловым из УФТИ в Харькове. Симметрия между бозонами и фермионами была также обнаружена в 1971 г. Пьером М. Рамоном

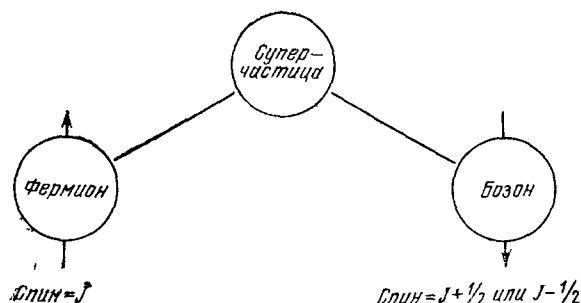


Рис. 8. Суперсимметрия связывает частицы с различными спинами, т. е.  $J$  с  $J + 1/2$  или  $J - 1/2$ .

Поэтому любые фермион и бозон с соседними значениями спинов можно рассматривать как состояния единой «суперчастицы». Долгое время считали, что подобной симметрии между бозонами и фермионами быть не может. В квантовых теориях поля с локальной суперсимметрией естественно возникает сила тяготения. Гравитон со спином 2 связан с фермионом со спином  $3/2$ . Эту частицу называют гравитино. Ни гравитон, ни гравитино не наблюдались на опыте.

из Калифорнийского технологического института (КТИ), а также Андре Неве из Высшей Нормальной школы в Париже и Джоном Шварцем из КТИ. Их работы возникли из дуальных моделей. В 1973 г. Юлиус Весс из Университета Карлсруэ и Бруно Зумино из ЦЕРН обобщили эти работы на квантовую теорию поля и нашли систематический метод построения глобально суперсимметричных теорий.

В середине 60-х годов были доказаны некоторые теоремы, которые, казалось, демонстрировали невозможность объединения инвариантности Пуанкаре с внутренними симметриями. Теперь выяснилось, что эти теоремы неверны, причем ошибка не в доказательстве. Одно из предположений, подразумевавшихся при доказательстве, оказалось излишне ограничительным, и его можно было ослабить. Это предположение на первый взгляд правдоподобно и не вызывает сомнений. Оно состоит в том, что используемые для описания симметрии числа должны удовлетворять перестановочному закону при умножении. Как выяснилось теперь, для этого ограничения нет оснований. Существенный элемент суперсимметричного подхода — использование некоммутирующих чисел.

От перестановки сомножителей произведение не меняется — это закон, справедливый для обычных чисел. Так, для любых двух вещественных чисел  $r_1$  и  $r_2$  справедливо  $r_1 \times r_2 = r_2 \times r_1$ . Для антикоммутирующих чисел в этом равенстве нужно изменить знак. Для двух таких чисел  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  справедливо  $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \times \varepsilon_1 = 0$ . Хотя в это уравнение и нельзя подставить числовых значений, описать систему величин, обладающих этим

свойством, тем не менее можно. Это открытие было сделано более ста лет назад Германом Гюнтером Грассманом, преподавателем математики в германском городе Штеттине \*).

Суперсимметрию можно описывать, пользуясь тем же способом, что и для изотопической инвариантности. Гипотетическая суперчастица снабжается дополнительной стрелкой в воображаемом вспомогательном пространстве. Если стрелка смотрит вверх, то частица — фермион, если вниз, то частица — бозон. Спины бозона и фермиона принимают ближайшие значения. Например, бозон со спином 1 может быть привязан к фермиону со спином  $1/2$  или  $3/2$ . Для физических частиц стрелка всегда смотрит либо вверх, либо вниз, так как реальная частица не может быть полуфермионом, полубозоном, однако описывающие силы взаимодействия между частицами уравнения инвариантны относительно произвольных вращений стрелки,

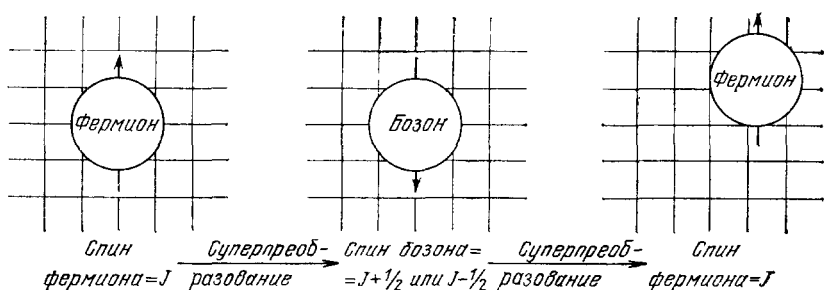


Рис. 9. Суперпреобразование приводит к смещению частицы в пространстве.

На первый взгляд кажется, что суперсимметрия — род внутренней симметрии и влияет лишь на свойства частицы, а не на ее положение. Однако повторное применение суперпреобразования, от фермиона к бозону и вновь к фермиону, переводит частицу в другую точку пространства. В локальной суперсимметрии это смещение может зависеть от точки пространства. Смещение частицы при суперпреобразованиях указывает на связь между суперсимметрией и структурой пространства-времени. Эта связь и объясняет наличие силы тяготения.

как в случае изотопической симметрии. Суперсимметрия — глобальна, если угол вращения во всех точках пространства одинаков, и локальна, если в разных точках вращения различны.

Объясним теперь, как действует преобразование суперсимметрии. Обозначим бозонное и фермионное поля буквами  $b$  и  $f$ . Новые поля  $b'$  и  $f'$  получаются при преобразовании  $f' = f + b\epsilon$ ,  $b' = b + f\epsilon$ . Множитель  $\epsilon$  есть мера поворота стелки для суперчастицы. Поле  $b$  — обычное число, хотя  $f$  и  $\epsilon$  антикоммутируют.

Необходимость использования антикоммутирующих чисел связана с принципом запрета Паули, согласно которому два одинаковых фермиона не могут находиться в одной точке. Амплитуда вероятности найти фермион в данной точке равна величине поля  $f$ , а вероятность найти два фермиона определяется произведением  $f \times f$ . Согласно принципу Паули  $f \times f = 0$ , и антикоммутирующие числа удовлетворяют этому требованию. Вероятность найти два бозона в точке, определяемая  $b \times b$ , не обязана исчезать, так что  $b$  может быть обычным числом. Закон преобразования должен быть в соответствии с принципом Паули. Два бозона могут быть в одной точке, но если они превращаются в фермионы, то вероятность должна обратиться в нуль. Отсюда возникает требование  $(f + b\epsilon) \times (f + b\epsilon) = 0$ , которое выполняется, если  $f \times \epsilon + \epsilon \times f = 0$  и  $\epsilon \times \epsilon = 0$ .

\* Город Щецин в ПНР. (Прим. перев.)

Наиболее поразительное свойство суперсимметрии состоит в том, что повторное применение преобразования, связывающего бозон с фермионом, сдвигает частицу в другую точку пространства-времени. Таким образом из суперпреобразований получаются преобразования Пуанкаре. Так как локальная симметрия относительно преобразований Пуанкаре приводит к общей теории относительности, то можно ожидать также и связи между суперсимметрией и гравитацией.

□

Мы уже указывали, что при переходе от глобальной симметрии к локальной всегда возникают новые калибровочные поля, которые в свою очередь приводят к новым силам. Естественно возникает вопрос, можно ли сделать глобальную суперсимметрию локальной, а если да, то какова будет природа новых калибровочных полей. И действительно, локальная суперсимметрия возможна, если ввести два поля: гравитон со спином 2 и новое поле со спином  $3/2$ .

Построение калибровочной теории суперсимметрии исходит из наблюдения, что повторное применение суперпреобразования приводит к физическому смещению частицы. Чтобы получить локально суперсимметричную теорию, надо ввести калибровочные поля и для сдвига в пространстве-времени, и для суперпреобразования. Сдвиг в пространстве-времени — это преобразование Пуанкаре, а соответствующее калибровочное поле — гравитон со спином 2. Так гравитация естественным образом возникает в этой теории, и по этой причине локальную суперсимметрию обычно называют супергравитацией. Найти калибровочное поле для суперпреобразований не так просто, но так как суперсимметрия объединяет поля со смежными значениями спина, то это должен быть фермион со спином  $3/2$  или  $5/2$ . Из соображений простоты  $3/2$  предпочтительнее: этот выбор подтверждается и более детальным исследованием.

В 1976 г. наиболее простой вариант супергравитации был построен нами в сотрудничестве с Серджо Феррарой из лаборатории Фраскати близ Рима; вскоре после этого Стэнли Дезер из университета им. Брандейса и Бруно Zumino показали, как сформулировать теорию более простым способом. В этом подходе предполагалось, что теория должна включать гравитон со спином 2 и частицу со спином  $3/2$  и должна обладать инвариантностью Пуанкаре и локальной суперсимметрией. После сложных математических выкладок авторы нашли теорию, удовлетворяющую этим требованиям.

Работать с полями, описывающими частицы с высшими спинами, довольно трудно. Теорию полей со спином  $3/2$  опубликовали в 1941 г. Швингер и Вильям Р. Парита из лаборатории им. Лоуренса при Калифорнийском университете в Беркли, но все попытки ввести силы взаимодействия с другими частицами приводили к противоречиям. Например, в некоторых из обсуждавшихся теорий сигналы распространялись бы быстрее света, что нарушило бы принцип причинности. Теперь мы знаем, что эти попытки были неудачны, так как частицы со спином  $3/2$  можно связать с другими частицами только суперсимметричным образом.

Существование фундаментальной частицы со спином  $3/2$  в супергравитации неизбежно. Эта частица — необходимый партнер гравитона, и для нее предложили название «гравитино». Пока не ясно, каких свойств следует ожидать у гравитино. В простейшем варианте супергравитации эта частица имеет массу 0 и связана с другими частицами малой силой микроскопического тяготения. Такие частицы не наблюдались, но их было бы очень трудно обнаружить. Даже гравитоны до сих пор не наблюдались на опыте. Однако в более сложных вариантах гравитино может



обрести массу при спонтанном нарушении симметрии, и между гравитино и другими частицами может возникнуть более сильное взаимодействие. В таких теориях обнаружить гравитино было бы гораздо легче. Открытие таких частиц со спином  $3/2$  было бы сильным экспериментальным доводом в пользу супергравитации.

Отчасти трудность объединения гравитации с другими тремя силами не в том, что теории противоречат друг другу, а просто в том, что у них очень мало общего. В общей теории относительности силы выводятся из геометрических свойств пространства и времени, а в квантовой теории поля они возникают от обмена квантами. Супергравитация описывает общую теорию относительности на языке квантовой теории поля, но можно супергравитацию сформулировать и на геометрическом языке. Подобный геометрический подход возможен на основе понятия о расширенном пространстве-времени, в каждой точке которого определены не только обычные четыре координаты, но и дополнительный набор координат, заданных антикоммутирующими переменными. «Суперпространство» такого типа было введено Акуловым и Волковым, а позднее исследовалось Саламом и Джоном Стрэтди в Международном Центре теоретической физики.

Этот метод позволил построить другие теории супергравитации, которые в действительности предшествовали тому, который здесь обсуждается. Одна из таких теорий была развита Ричардом Л. Арновитом и Праном Натом из Северо-восточного университета. Они пошли тем же путем, что Эйнштейн, но в суперпространстве, а не в обычном пространстве. Подобные теории красивы, но сложны технически. До сих пор не ясно, какие частицы они описывают и имеют ли они физический смысл.

□

Простейший вариант супергравитации описывает мир, состоящий только из гравитонов и гравитино. Такая модель, конечно, не реалистична, так как в единой теории поля должно быть место для всех элементарных частиц. Число таких частиц точно неизвестно. В настоящее время считают, что элементарны кварки, из которых состоят протоны и нейтроны. Элементарны также электрон и три связанные с ним частицы: мюон и нейтрино двух видов \*). Группа элементарных частиц связана с калибровочными полями: фотон, промежуточные векторные бозоны в слабых взаимодействиях и гравитон. Если существует супергравитация, то в список надо включить и гравитино.

Чтобы описать все частицы, в суперсимметрию надо включить поля со спинами меньше  $3/2$ . В принципе, это расширение построить нетрудно, так как суперсимметрия может связать любую пару фермион — бозон с близкими спинами. Нужно лишь ввести в теорию нужное число таких пар. Для описания взаимодействия этих дублетов с основным дублетом

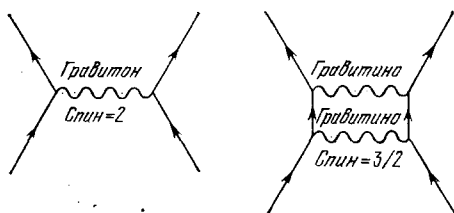


Рис. 10. Супергравитация приводит к появлению квантовых поправок к общей теории относительности.

В общей теории относительности сила тяготения возникает лишь от обмена гравитонами; в супергравитации возникает добавочный вклад от обмена гравитино со спином  $3/2$ . Так как гравитино — фермионы, обмен осуществляется только их парами. Этим эффектом можно пренебречь всюду, кроме самых малых расстояний. Предсказания общей теории относительности на больших расстояниях сохраняются в супергравитации; новые эффекты предсказываются лишь на микроскопическом уровне.

\*) По-видимому, в этот список надо добавить и недавно открытые тяжелые лептоны. (Прим. перев.)

калибровочных полей супергравитации, включающим частицы со спинами 2 и  $3/2$ , была разработана специальная техника. В последние годы был построен целый ряд таких теорий.

В одной группе теорий вводят произвольное число частиц дублетами, содержащими спины 1 и  $1/2$  или  $1/2$  и 0. Преимущество таких теорий в том, что число частиц можно сделать практически произвольным и таким образом подстроить теорию под наблюдаемые элементарные частицы. Однако за эту свободу приходится расплачиваться. Недостатком таких теорий является то, что из однопетлевых диаграмм нельзя исключить бесконечности. Причина этого в отсутствии полной унификации. Здесь нет преобразований, которые связали бы гравитон и гравитино с частицами низших спинов. Однако эти теории могут сыграть важную роль в описании природы.

Теории другого рода, объединенные названием «обобщенная супергравитация», гораздо более жесткие и полностью унифицированы. Имеется ровно 8 таких теорий, и каждая из них характеризуется определенным числом различных суперпреобразований. Это число обозначается через  $n$ , и оно может принимать значения от 1 до 8. В каждой теории — один

Т а б л и ц а II

Состав семейств частиц в различных вариантах обобщенной супергравитации. Семейство включает не только гравитон и гравитино, но и элементарные частицы с низшими спинами, некоторые из них могли бы соответствовать известным частицам, таким, как фотон и электрон. Всего имеется 8 вариантов, определяемых числом  $n$ , равным числу входящих в теорию гравитино со спином  $3/2$ . Если какая-либо из этих моделей правильно описывает природу, то предсказываемое ею семейство частиц должно включать все существующие элементарные частицы. Таким образом были бы объединены все элементарные состояния материи.

Однако важная проблема осталась нерешенной: даже в наиболее обширной модели, по-видимому, нет места для всех известных частиц со спинами  $1/2$  и 1

Спин $n$	0	$1/2$	1	$3/2$	2
1	—	—	—	1	1
2	—	—	1	2	1
3	—	1	3	3	1
4	2	4	6	4	1
5	10	11	10	5	1
6	30	26	16	6	1
7	70	56	28	7	1
8	70	56	28	8	1

гравитон со спином 2 и  $n$  гравитино со спином  $3/2$ . При этом число частиц с меньшими спинами полностью определено. Если  $n = 1$ , то мы имеем обычную супергравитацию: в теории есть лишь гравитон и гравитино. Если  $n = 2$ , то, кроме гравитона и двух гравитино, есть еще одна частица со спином 1. Вероятно, наиболее реалистична модель с  $n = 8$ . В этом случае в семейство входят: гравитон, 8 гравитино, 28 частиц со спином 1, 56 частиц со спином  $1/2$  и 70 частиц со спином 0.

Примечательным свойством восьми обобщенных моделей является их максимальная симметрия. Суперпреобразование связывает частицу с другими частицами, спины которых отличаются от ее спина на  $1/2$ . Эти суперпреобразования локальны. Таким образом, гравитон можно

перевести в какое-либо гравитино, а гравитино — в частицу со спином 1. Все частицы с одинаковым спином связаны глобальной внутренней симметрией, схожей с изотопической, которая объединяет протон с нейтроном. Например, любое гравитино можно перевести таким преобразованием в любое, другое гравитино. Комбинация суперсимметрии с внутренней симметрией объединяет все частицы в единое семейство. Поэтому, начав с гравитона, можно последовательностью суперпреобразований и операций внутренней симметрии прийти к любой другой частице, входящей в теорию.

Как и прочие симметрии в физике, обобщенную супергравитацию можно интерпретировать с помощью «суперчастицы», которая характеризуется стрелкой в некотором вспомогательном многомерном пространстве. По мере вращения этой стрелки частица становится гравитоном, гравитино, фотоном, кварком и т. д. Кванты всех взаимодействий присутствуют в теории, все они объединены и возникают из единого источника. Такой унификации никогда прежде не было в квантовой теории поля.

Следующий шаг — сделать внутреннюю симметрию, объединяющую частицы с одинаковыми спинами, локальной, а не глобальной. Локальная внутренняя симметрия необходима, чтобы ввести силы, подобные электромагнетизму. И действительно, удалось удовлетворить требованию локальности, как было показано Фридманом и Ашоком Дасом из Городского университета в Нью-Йорке и Е. С. Фрадкиным и М. А. Васильевым из ФИАН им. Лебедева. Полученные теории в принципе объединяют тяготение с сильными, слабыми и электромагнитными силами.

В обобщенной супергравитации сила тяготения характеризуется одним параметром, а все остальные силы определяются другим параметром. Идеалом единой теории является такая, в которой все силы задавались бы единственной универсальной постоянной. Существует еще третий тип моделей супергравитации, и они обладают этим свойством. Простейшая модель была найдена, среди прочих, Микио Каку из Городского университета (Нью-Йорк) и Полем Таунсендом из университета в Стони-Брук (штат Нью-Йорк). Эти модели не основаны на общей теории относительности, а являются суперсимметричным обобщением другого варианта тяготения, открытого в 1923 г. Германом Вейлем. Как и в теории Эйнштейна, тяготение описывается кривизной пространства-времени, но теория обладает дополнительной локальной симметрией, позволяющей произвольно выбирать в каждой точке масштаб, в котором измеряются длины и времена. Соответствующие суперсимметричные обобщения теории Вейля приводят к полному слиянию тяготения с другими силами, однако в настоящее время теории первых двух типов, по-видимому, более пригодны для описания реального мира.

□

Принцип локальной суперсимметрии приводит к красивому объединению основных сил, но одной красоты еще недостаточно. Теория должна пройти проверку, отсеявшую все прежние теории квантовой гравитации: бесконечности, возникающие при вычислении вероятностей, должны быть устранены.

Во всех квантовых теориях поля диаграммы, в которых виртуальные частицы образуют замкнутые петли, описывают чисто квантовые эффекты. Вычисление вероятностей, связанных с такими диаграммами, приводит к суммированию по виртуальным частицам со всеми возможными энергиями. Это суммирование, как правило, приводит к бесконечностям в математических выражениях. В некоторых случаях, например в квантовой электродинамике, эти бесконечности сравнительно безобидны и могут

быть устранены с помощью перенормировки. Однако в квантовой гравитации бесконечности гораздо хуже: перенормировки не помогают. Для их устранения остается лишь одна возможность. В некоторых диаграммах возникает положительная бесконечность, а в других — отрицательная. В вероятность физического процесса входит лишь сумма диаграмм, и, возможно, что в этой сумме бесконечности чудесным образом уничтожают друг друга.

Причину, по которой бесконечности в квантовой гравитации страшнее, чем в электродинамике, можно пояснить простым рассуждением. Электрическая сила, действующая между заряженными частицами, не зависит от их масс или энергий, а только от зарядов, в то время как сила тяготения пропорциональна массам. Так как согласно теории относительности масса и энергия связаны формулой  $E = mc^2$ , то гравитационная сила, действующая на виртуальные частицы, возрастает с ростом их энергии. Поэтому в случае гравитации в сумму по энергиям виртуальных частиц более высокие энергии дают более высокий вклад, так что возникают более серьезные бесконечности. Грубо говоря, возникающие в гравитации бесконечности аналогичны расходящемуся ряду  $1 + 2 + 3 + \dots$ , а в электромагнетизме эти бесконечности вида  $1 + 1 + 1 + \dots$ .

Однопетлевые диаграммы квантовой гравитации были тщательно проанализированы еще до открытия супергравитации. Оказалось, что в диаграммах, содержащих лишь гравитоны, и в самом деле происходит сокращение бесконечностей. Этот результат был получен Брайсом С. Де Виттом из Техасского университета и т'Хоофтом и Вельтманом. Бесконечности исчезают из-за некоторого особого свойства четырехмерного пространства-времени; если бы наш мир имел другую размерность, этого бы не произошло.

Однако это обстоятельство казалось не слишком важным для физики, так как наш мир состоит не только из гравитонов. Все попытки получить конечный результат в теориях, содержащих гравитоны и другие частицы, не привели к успеху: при введении частиц с низшими спинами бесконечности вновь возникали.

Поэтому когда явное вычисление физического процесса, для которого обычная гравитация давала бесконечность, в супергравитации привело к конечной величине, это было встречено с большим интересом. Дальнейшие исследования показали, что в каждом из восьми вариантов обобщенной супергравитации сумма всех диаграмм с одной петлей конечна для любого физического процесса. Это благоприятное для решения проблемы бесконечностей в гравитации обстоятельство — наиболее обнадеживающая черта супергравитации.

Точная компенсация нескольких десятков бесконечных членов кажется слишком необычной, чтобы быть случайной, и имеет простое объяснение. Рассмотрим прежде всего подмножество петлевых диаграмм, в которых все входящие и выходящие частицы — гравитоны, а прочие частицы присутствуют в диаграммах лишь виртуально. Можно показать, что сумма всех этих диаграмм конечна, и это следует из обобщения того же результата, полученного в общей теории относительности.

Конечные результаты в восьми вариантах обобщенной супергравитации можно получить также в диаграммах с входящими и выходящими частицами с низшими спинами. В этих диаграммах бесконечности уничтожаются из-за полной унификации всех частиц. Например, диаграммы с внешними фотонами или электронами можно связать с диаграммами, содержащими лишь гравитоны, применением суперпреобразований. По существу, все диаграммы можно привести к чисто гравитонным, о которых уже известно, что сумма всех диаграмм конечна.

Бесконечности уничтожаются лишь в обобщенной супергравитации, так как лишь в таких теориях любую частицу можно преобразовать в гравитон. В других вариантах супергравитации, включающих произвольное число частиц со спинами 0,  $1/2$  и 1, отсутствует принципиально важная симметрия между частицами со спином 1 и гравитино со спином  $3/2$ . В моделях, основанных на теории тяготения Вейля, бесконечности исключаются из диаграмм с любым числом петель. С другой стороны, неизвестно, всегда ли в этих моделях вероятности положительны, а это — необходимый критерий пригодности для любой физической теории.

Впервые уничтожение расходимостей было проверено явным вычислением для процесса рассеяния фотона на фотоне. В обычной теории тяготения каждая однопетлевая диаграмма дает вклад в амплитуду вероятности, пропорциональный бесконечности. Сумма диаграмм больше нуля. В супергравитации нужно учесть также диаграммы, содержащие гравитино. Каждая из них пропорциональна той же бесконечности, но сумма коэффициентов при всех диаграммах равна нулю.

Позднее проводились явные вычисления для других процессов в супергравитации. Приводились новые теоретические соображения в пользу того, что в обобщенной супергравитации бесконечности сокращаются в сумме всех диаграмм с двумя петлями. Конечные результаты были впервые получены в работе П. ван Ньювенхёйзена, М. Т. Грисару и Дж. А. М. Вермасерена.

□

Супергравитация — значительное теоретическое достижение, потому что этот подход подает надежду на решение важных и давно стоящих перед физикой проблем — объединения фундаментальных сил и устранения бесконечностей из квантовой гравитации. В том, что касается объединения фермионов и бозонов и вывода всех взаимодействий из единого требования локальной симметрии, эта теория показывает вполне удовлетворительный порядок. Однако надо еще выяснить, есть ли такой порядок в природе. Несколько трудностей в интерпретации теории пока не преодолены.

Другая проблема возникает в связи с требованием локальности внутренней симметрии в обобщенной супергравитации. При переходе от гло-

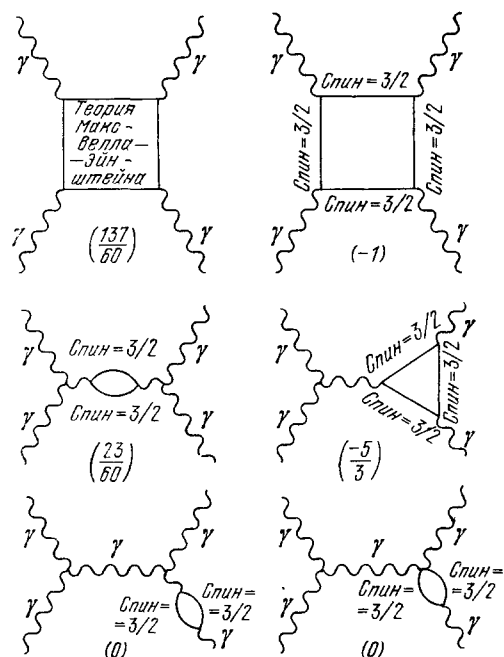


Рис. 11. Конечный ответ для петлевых диаграмм в квантовой теории гравитации получается при учете взаимодействия с гравитино.

На рисунке показаны диаграммы для взаимодействия между фотонами. Первая диаграмма изображает все однопетлевые взаимодействия, в которых участвуют лишь гравитоны и фотоны. Суммарный вклад этих диаграмм равен некоторой бесконечно большой величине, умноженной на  $137/60$ . Можно построить пять однопетлевых диаграмм с гравитино, каждая из них пропорциональна той же бесконечности, коэффициенты указаны в скобках. Физический смысл имеет лишь сумма всех диаграмм, а сложение коэффициентов дает нуль. Таким образом, бесконечности от обмена гравитино уничтожают бесконечности от обмена гравитонами, и возникает конечный результат.

бальной симметрии к локальной в уравнениях возникает неожиданное слагаемое, которое называется космологическим членом. Этот член обсуждался впервые Эйнштейном в ранних применениях общей теории относительности к космологии. Эффективно космологический член приводит к существованию у Вселенной конечного размера. Появление этого члена в указанной связи загадочно: внутренняя симметрия связана с электромагнитными и ядерными силами, и кажется поразительным, что эти силы могут повлиять на размер Вселенной. Но что еще хуже, так это предсказываемая теорией величина космологического члена: она превосходит верхний предел, найденный из астрофизических наблюдений.

Другое противоречие с опытом бросается в глаза еще больше. Все частицы в обобщенной супергравитации лишены массы, но несомненно, что многие наблюдаемые частицы, такие, как электрон, имеют ненулевую массу. Многообещающий подход к этой проблеме — предположить, что некоторые частицы плучают массу вследствие спонтанного нарушения симметрии. Это могло бы объяснить, почему фундаментальные гравитино, предсказываемые обобщенной супергравитацией, не наблюдались. Их масса могла бы быть столь велика, что у существующих ускорителей не хватило бы энергии породить эти частицы. Интересно отметить, что спонтанное нарушение симметрии меняет также космологический член в квантовой теории поля. Исследуется вопрос, можно ли подавить этот член в обобщенной супергравитации.

Если рассматривать супергравитацию как реалистическую теорию, то важно доказать, что бесконечности выпадают из диаграмм с любым числом петель. До сих пор сокращения были продемонстрированы только для диаграмм с одной и двумя петлями. Но не менее существенны и диаграммы с тремя и более петлями. Чтобы показать, что они конечны, по-видимому, нужны качественно новые математические методы. Лучше всего было бы в общем виде доказать, что конечна сумма всех возможных диаграмм.

Исключительность обобщенной супергравитации следует причислить к ее достоинствам, а не к ее недостаткам: каждая из восьми теорий имеет мало свободных параметров и потому дает четкие предсказания. В частности, список всех элементарных частиц оказывается полностью определенным. Однако эти предсказания не вполне соответствуют известным в настоящее время элементарным частицам. Наиболее многообещающей кажется теория с  $n = 8$ . Это наиболее богатый вариант супергравитации, и некоторые семейство частиц в этой теории поразительно похожи на наблюдаемые в природе. Меррей Гелл-Манн из КТИ показал, что после спонтанного нарушения симметрии теория правильно предсказывает некоторые свойства кварков, такие, как их электрический заряд. С другой стороны, эта теория имеет и серьезные недостатки. В ней не хватает места для других известных частиц, таких, как мюон и промежуточные векторные бозоны.

Дальнейшее исследование супергравитации, а может быть, и ее пересмотр, должно в конце концов разрешить эти проблемы. Но может оказаться, что в пересмотре нуждается современный взгляд на то, какие частицы в природе элементарны.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Freedman D. Z., van Nieuwenhuizen P., Ferrara S.—Phys. Rev. Ser. D, 1976, v. 13, p. 3214.  
 Deser S., Zumino B.—Phys. Lett. Ser. B, 1976, v. 62, p. 335.  
 Grisaru M. T., van Nieuwenhuizen, Vermaseren J. A. M.—Phys. Rev. Lett., 1976, v. 37, p. 1662.

539.12.01

## ДОПОЛНЕНИЕ (ЛИТЕРАТУРНЫЕ УКАЗАНИЯ) К СТАТЬЕ Д. ФРИДМАНА И П. ВАН НЬЮЕНХЕЙЗЕНА

Следуя традиции журнала «Scientific American», авторы ограничились минимальной библиографией. Они привели ссылки лишь на три статьи по супергравитации (см. <sup>53, 54, 58</sup>). Ниже предлагаются небольшие комментарии, которые могут быть полезны для более глубокого изучения затронутых в статье вопросов по научной литературе.

1. *Общая теория относительности и единая теория поля.* Работы Эйнштейна, посвященные разработке различных подходов к единой теории поля, опубликованы в переводе у нас <sup>1</sup>. Ни один из подходов не удовлетворил Эйнштейна из-за внутренних трудностей в самой классической теории еще до квантования. Одно из обобщений теории относительности связано с введением дополнительных координат. Развивая эту идею Калуцы, Эйнштейн исследовал теорию с замкнутой пятой координатой; см. в особенности его статью с Бергманом <sup>2</sup>. В супергравитации используются дополнительные антикоммутирующие координаты. Авторы упоминают также конформную теорию тяготения Г. Вейля, которая изложена в его книге <sup>3</sup>. Опыты по проверке общей теории относительности описаны в книге С. Вейнберга <sup>4</sup> (гл. 8); см. также статьи Коноплевой <sup>5</sup> и Руденко <sup>6</sup>. Подробное обсуждение эффекта отклонения света в поле тяготения содержится в статье Комера и Латропа <sup>7</sup>. Вывод общей теории относительности из принципов квантовой теории поля обсуждался рядом авторов. Одна из последних статей на эту тему — работа Йылмаза <sup>8</sup>. В ней можно найти ссылки на более ранние работы. Квантовая теория гравитационного поля изложена в статье Фаддеева и Попова <sup>9</sup>.

2. *Калибровочные поля.* Принцип калибровочной инвариантности занял ведущее место в современной квантовой теории поля и ему посвящена обширная литература. На русском языке издавались сборники переводов важнейших статей о калибровочных полях <sup>10, 11</sup>, см. также статьи Г' Хоофта и Вельзмана <sup>12</sup>, Илиопулоса <sup>13</sup> и монографии Коноплевой и Попова <sup>14</sup>, Славнова и Фаддеева <sup>15</sup>. Перевод классической работы Янга и Миллса <sup>16</sup> можно найти в книге <sup>10</sup>. Перенормируемость калибровочных теорий доказана в работах <sup>17-19</sup>. Статья Голдстоуна о спонтанном нарушении симметрии <sup>20</sup> была опубликована еще в 1961 г. См. также обзоры Бернштейна <sup>21</sup> и Илиопулоса <sup>13</sup>. Механизм спонтанного нарушения симметрии путем введения самодействующих скалярных полей предложен в работе Хиггса <sup>22</sup>. Эта идея развивалась затем в ряде работ, из которых можно отметить статью Киббла <sup>23</sup>. Единая теория слабых и электромагнитных взаимодействий, использующая калибровочную инвариантность, предложена в работах <sup>24-26</sup>, см. также обзор Вейнберга <sup>27</sup> и книгу Тейлора <sup>28</sup>. Описание сильных взаимодействий на основе представления о калибровочно связанных кварках и глюонах носит предложенное Гелл-Манном название «квантовая хромодинамика»; см. обзоры Политцера <sup>29</sup>, Вайнштейна и др. <sup>30</sup>, а также более популярные статьи Намбу <sup>31</sup>, Арбузова и Логунова <sup>32</sup>.

3. *Суперсимметрия.* Суперсимметрия была открыта в 1971 г. В работах Гольфанда и Лихтмана <sup>33, 34</sup> найдена алгебра операторов, включающая в себя генераторы группы Пуанкаре, а также генераторы спинорного типа, замкнутая относительно системы коммутаторов и антикоммутаторов. Первая работа Волкова и Акулова <sup>35</sup>, независимо нашедших нелинейную реализацию суперсимметрии, опубликована в 1972 г. С другой стороны, в 1971 г. Жерве и Сакита <sup>36</sup> обнаружили суперсимметрию в дуальных моделях с фермионными степенями свободы, которые были незадолго до этого предложены в работах Рамона <sup>37</sup> и Невё и Шварца <sup>38</sup>. Название «суперкалибровочные преобразования» ввели Жерве и Сакита. Суперпреобразования, используемые в дуальных моделях, являются расширением группы конформных преобразований двумерного пространства, связанного с динамикой релятивистской струны; см. например, обзор <sup>39</sup>. Аналогичную группу суперконформных преобразований четырехмерного пространства построили Весс и Зумино <sup>40</sup>. Позднее они обнаружили, что эту группу можно сузить, исключив преобразования, меняющие интервал длины в пространстве Минковского. При этом была воспроизведена группа, найденная Гольфандом и Лихтманом. Суперпространство было введено в работе Салама и Стратди <sup>41</sup>. Суперсимметрия и суперпространство подробно обсуждаются в обзорных статьях Огиевского и Мезинческу <sup>42</sup>, Салама и Стратди <sup>43</sup>, Файе и Феррары <sup>44</sup>. Формализм суперпространства и суперполей существенно использует операции с антикоммутирующими числами — элементами алгебры Грассмана. При этом существенно, что на эти «числа» обобщаются такие понятия анализа, как дифференцирование и интегрирование. Этот формализм, независимо от суперсимметрии, полезен для описания фермионных квантованных полей и в этом связи был развит Березиным <sup>45</sup>. Геометрическое обобщение суперсимметрии, основанное на понятии о суперпространстве с метрикой типа Римана, предложено в работах Арновита и Ната <sup>46, 47</sup>; см. также статью <sup>48</sup>.

4. Объединение в одно семейство частиц с разными спинами осуществлялось ранее в теории с симметрией  $SU(6)$ ; см., например обзор Пайса<sup>49</sup>. Однако в том случае спины частиц в одном семействе различались на целое число, так что бозонные и фермионные семейства не перемешивались. Вопрос об объединении внутренних симметрий с группой Пуанкаре возник в связи с попытками специального нарушения симметрии  $SU(6)$ . Основным результатом был получен О'Райфerti<sup>50</sup>. Объединение суперсимметрии с внутренними симметриями обсуждалось в работах<sup>51, 52</sup>.

5. *Супергравитация*. Первыми работами по супергравитации являются<sup>53, 54</sup>. В статье упоминались также авторы работ<sup>55-59</sup>. Перенормировки в квантованной гравитации и сокращение расходимостей в однопетлевом приближении проведены в работах Де-Витта<sup>60</sup>, т' Хоофта и Вельтмана<sup>61</sup>. Как показали последние исследования, диаграммы с тремя петлями в супергравитации приводят к новым расходимостям; см., например работы<sup>62, 63</sup>. Среди последних работ по супергравитации и геометрии суперпространства можно отметить статьи<sup>64-65</sup>.

6. Перечисляя создателей квантовой теории, авторы не упомянули Бора и де Бройля. Материалы по истории создания квантовой теории можно найти в специальном выпуске УФН<sup>83</sup>, посвященном пятидесятилетию этого выдающегося периода в истории науки.

7. В качестве примера замечательной точности квантовой электродинамики приведено согласие вычисленного значения магнитного момента электрона с опытом. Один из последних обзоров на эту тему — статья<sup>84</sup>.

8. Противоречия теории взаимодействующего поля частиц со спином  $3/2$  были обнаружены в работе Вело и Цванцигера<sup>85</sup>. Супергравитация устраняет эти противоречия.

М. С. Маринов

## ЛИТЕРАТУРА

1. Эйнштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966.— т. II.
2. Einstein A., Bergmann P.— Ann. d. Math., 1938, Bd. 39, s. 683.— Перевод в<sup>1</sup>, с. 492.
3. Weyl H. Raum. Zeit. Materie.— Berlin: J. Springer-Verlag, 1923.
4. Вейнберг С. Гравитация и космология/Пер. с англ.; под ред. Я. Смородинского.— М.: Мир, 1975.
5. Коноплева Н. П.— УФН, 1977, т. 123, с. 537.
6. Руденко В. Н.— УФН, 1978, т. 126, с. 361.
7. Comer R., Lathrop J.— Am. J. Phys., 1978, v. 46, p. 801.
8. Yilmaz M.— Lett. Nuovo Cimento, 1978, v. 22, p. 647.
9. Фаддеев Л. Д., Попов В. Н.— УФН, 1973, т. 111, с. 427.
10. Элементарные частицы и компенсирующие поля: Сб. переводов/Под ред. Д. Д. Иваненко.— М.: Мир, 1964.
11. Квантовая теория калибровочных полей: Сб. переводов/Под ред. Н. П. Коноплевой.— М.: Мир, 1977.
12. T' Hooft G., Veltman M. Diagrammar.— Geneva: CERN 73-9, 1973.
13. Iliopoulos J.— An Introduction to Gauge Theories.— Geneva: CERN 76-11, 1976.— Перевод: УФН, 1977, т. 123, с. 565.
14. Коноплева Н. П., Попов В. Н. Калибровочные поля.— М.: Атомиздат, 1972.
15. Славнов А. А., Фаддеев Л. Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей.— М.: Наука, 1978.
16. Yang C. N., Mills R. L.— Phys. Rev., 1954, v. 96, p. 191.
17. T' Hooft G.— Nucl. Phys. Ser. B, 1971, v. 33, p. 173, v. 35, p. 167.
18. T' Hooft G., Veltman M.— Ibid., 1973, v. 44, p. 189.
19. Lee B. W., Zinn-Justin J.— Phys. Rev. Ser. D, 1972, v. 5, p. 3121, 3137, 3155.
20. Goldstone J.— Nuovo Cimento, 1961, v. 19, p. 15.
21. Bernstein J.— Rev. Mod. Phys., 1974, v. 46, p. 7.— Перевод в сб.<sup>11</sup>.
22. Higgs P. W.— Phys. Rev. Lett., 1964, v. 12, p. 132.
23. Kibble T. W. B.— Phys. Rev., 1967, v. 155, p. 1554.
24. Weinberg S.— Phys. Rev. Lett., 1967, v. 19, p. 1264.
25. Salam A., Ward J. C.— Phys. Lett., 1964, v. 13, p. 168.
26. Salam A.— In: Proc. of 8th Nobel Symposium/Ed. N. Svartholm.— Söcken: 1968.
27. Weinberg S.— Rev. Mod. Phys., 1974, v. 46, p. 255.— Перевод: УФН, 1976, т. 118, с. 505.
28. Тейлор Дж. Калибровочные теории слабых взаимодействий: Пер. с англ./Под ред. Г. В. Ефимова.— М.: Мир, 1978.
29. Politzer H. D.— Phys. Rept., 1974, v. 14C, p. 129.



30. Вайнштейн А. И., Волошин М. В., Захаров В. И., Новиков В. А., Окунь Л. В., Шифман М. А.— УФН, 1977, т. 123, с. 267.
31. Nambu Y.— Sci. American, May 1976, v. 235, No. 5, p. 48.— Перевод: УФН, 1978, т. 124, с. 147.
32. Арбузов Б. А., Логунов А. А.— УФН, 1977, т. 123, с. 505.
33. Гольфанд Ю. А., Лихтман Е. П.— Письма ЖЭТФ, 1971, т. 13, с. 452.
34. Гольфанд Ю. А., Лихтман Е. П.— В кн. Проблемы теоретической физики (памяти И. Е. Тамма).— М.: Наука, 1972,— С. 37.
35. Волков Д. В., Акулов В. П.— Письма ЖЭТФ, 1972, т. 16, с. 621.
36. Gervais J.— L., Sakita B.— Ibid., 1971, v. 34, p. 632.
37. Ramond P.— Phys. Rev. Ser. D, 1971, v. 3, p. 2415.
38. Neveu A., Schwarz J. H.— Nucl. Phys. Ser. B, 1971, v. 31, p. 86.
39. Маринов М. С.— УФН, 1977, т. 121, с. 377.
40. Wess J., Zumino B.— Nucl. Phys. Ser. B, 1974, v. 70, p. 39.
41. Salam A., Strathdee J.— Ibid., 1974, v. 76, p. 477.
42. Огиевецкий В. И., Мезинческу Л.— УФН, 1975, т. 117, с. 637.
43. Salam A., Strathdee J.— Fortschr. Phys., 1978, Bd. 26, S. 57.
44. Fayet P., Ferrara S.— Phys. Rept., 1977, v. 32C, p. 249.
45. Березин Ф. А. Метод вторичного квантования.— М.: Наука, 1965.
46. Nath P., Arnowitz R.— Phys. Lett. Ser. B, 1975, v. 56, p. 171.
47. Arnowitz R., Nath P., Zumino B.— Ibid., p. 81.
48. Nath P. In: Gauge Theory in Modern Field Theory/Ed. R. Arnowitz, P. Nath, Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1977,— P. 281.
49. Pais A.— Rev. Mod. Phys., 1966, v. 38, p. 215.— Перевод в кн. Теория групп и элементарные частицы./Под ред. Д. Д. Иваненко.— М.: Мир, 1967.
50. O'Raifeartaigh L.— Phys. Rev. Lett., 1965, v. 14, p. 575.
51. Конопельченко Б. Г.— Письма ЖЭТФ, 1974, т. 20, с. 684.
52. Haag R., Lopuszansky J., Sohnius M.— Nucl. Phys., Ser. B, 1975, v. 88, p. 257.
53. Freedman D. Z., van Nieuwenhuizen P., Ferrara S.— Phys. Rev. Ser. D, 1976, v. 13, p. 3214.
54. Deser S., Zumino B.— Phys. Lett. Ser. B, 1976, v. 62, p. 335.
55. Das A., Freedman D. Z.— Nucl. Phys. Ser. B, 1977, v. 120, p. 221.
56. Fradkin E. S., Vasiliev M. A.— Phys. Lett. Ser. B, 1977, v. 72, p. 70.
57. Kaku M., Townsend P., van Nieuwenhuizen P.— Phys. Rev. Ser. D, 1978, v. 17, p. 3179.
58. Grisaru M. T., van Nieuwenhuizen P., Vermaseren J. A. M.— Phys. Rev. Lett., 1976, v. 37, p. 1662.
59. Gell-Mann M.— (unpublished).
60. De Witt B. S.— Phys. Rev., 1967, v. 160, p. 1113, v. 162, p. 1195, 1239.
61. 't Hooft G., Veltman M.— Ann. Institute H. Poincaré, 1974, t. 20, p. 69.
62. Deser S., Kay J. H., Stelle K. S.— Phys. Rev. Lett., 1977, v. 38, p. 527.
63. Deser S., Kay J. H.— Phys. Lett. Ser. B, 1978, v. 76, p. 400.
64. Каллош Р.— Письма ЖЭТФ, 1977, т. 26, с. 575.
65. Огиевецкий В. И., Сокачев Э. С.— ЯФ, 1978, т. 28, с. 1631.
66. Славнов А. А.— УФН, 1978, т. 124, с. 487.
67. Arnowitz R., Nath P.— Phys. Lett. Ser. B, 1978, v. 78, p. 581.
68. Brink L., Gell-Mann M., Ramond P., Schwarz J. H.— Ibid., 1978, v. 74, p. 336, v. 76, p. 417.
69. Cordero P., Teitelboim C.— Ibid., 1978, v. 78, p. 80.
70. Cremmer E., Scherk J., Ferrara S.— Ibid., 1978, v. 74, p. 61.
71. Cremmer E., Julia B., Scherk J.— Ibid., 1978, v. 76, p. 409.
72. Das A., Kaku M., Townsend P. K.— Phys. Rev. Lett., 1978, v. 40, p. 1215.
73. Deser S., Kay J. H., Stelle K. S.— Phys. Rev. Ser. D, 1977, v. 16, p. 2448.
74. Deser S., Teitelboim C.— Phys. Rev. Lett., 1977, v. 39, p. 249.
75. Ferrara S., van Nieuwenhuizen P.— Phys. Lett. Ser. B., 1978, v. 74, p. 333; v. 76, p. 404, v. 78, p. 573.
76. Kaku M., Townsend P. K.— Ibid., 1978, v. 76, p. 54.
77. Kallosh R., Tarasov O. V., Tyutin I. V.— Nucl. Phys. Ser. B, 1978, v. 137, p. 145.
78. Kallosh R.— Nucl. Phys. Ser. B, 1978, v. 141, p. 141.
79. McDowell S. W., Mansouri F.— Phys. Rev. Lett., 1977, v. 38, p. 739, 1379.
80. Stelle K. S., West P. C.— Phys. Lett., 1978, v. 74, p. 330; v. 77, p. 374; Nucl. Phys. Ser. B, 1978, v. 140, p. 285.

81. Sterman G., Townsend P. K., van Nieuwenhuizen P.—  
Phys. Rev. Ser. D, 1978, v. 17, p. 150.
82. Wess J., Zumino B.—Phys. Lett. Ser. B, 1977, v. 66, p. 361; 1978, v. 74,  
p. 51.
83. УФН, 1977, т. 122, вып. 4.
84. Calmet J., Narison S., Perrottet M., de Rafael E.—Rev.  
Mod. Phys., 1977, v. 49, p. 21.
85. Velo G., Zwanziger D.—Phys. Rev., 1969, v. 186, p. 1337.