

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

**КАЛИБРОВОЧНЫЕ ТЕОРИИ СИЛ
МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ*)***Г.'т Хоофт*

Теориями такого вида теперь описываются все основные силы природы. Свойства этих сил выводятся из симметрий или закономерностей, проявляющихся в законах физики.

Для понимания строения окружающего нас мира необходимо создать теорию взаимодействия элементарных частиц материи друг с другом, т. е. теорию основных сил природы. Четыре вида таких сил уже давно установлены и до недавнего времени различные теории использовались для описания каждой из них. Две из этих сил, гравитационная и электромагнитная, имеют неограниченный радиус действия и, в значительной степени благодаря этому, они известны каждому. Они могут ощущаться непосредственно, как субстанция, которая давит или толкает. Другие силы, названные просто слабыми и сильными силами, не могут ощущаться непосредственно, так как их влияние ограничено малым радиусом, не больше чем радиус атомного ядра. Сильные взаимодействия связывают друг с другом протоны и нейтроны в ядрах, или, в другом контексте, они связывают друг с другом частицы, названные кварками, которые, как считается, являются составными частями протонов и нейтронов. Слабые силы главным образом ответственны за распады элементарных частиц.

Физики издавна стремились создать единую основополагающую теорию, которая объединила бы все известные силы. Каждому ясно, что такая теория могла бы открыть сущность связей между этими силами, объясняя в то же время их очевидное различие. Такая унификация пока еще не достигнута, но в последнее время имеется некоторый прогресс. Теперь слабые силы и электромагнитные могут быть поняты в рамках единой теории. Хотя эти силы остаются различными, в теории они становятся математически связанными. Однако то, что сейчас все четыре силы описываются посредством теорий, которые идентичны по своей структуре, в конечном итоге может оказаться более важным. Таким образом, хотя физики все еще не могут найти единственного ключа ко всем известным замкам, до крайней мере сейчас известно, что все необходимые ключи могут быть сделаны из одной болванки. Теории в этом единственном привилегированном классе официально названы как неабелевы теории с локальной симметрией. Разъяснение того, что означает этот непривлекательный ярлык, является основной задачей этой статьи. К настоящему моменту ясно только, что эти теории связывают свойства сил с симметриями природы.

*) 'T H o o f t G. Gauge Theories of the Forces between Elementary Particles. — Scientific American, June 1980, v. 242, pp. 90, 91, 95—100, 103, 104, 106, 108, 109, 111—114, 116. — Перевод В. Н. Зайкина, О. К. Калашникова.

Герард 'т Хоофт — профессор физики Утрехтского университета, Нидерланды.

© Scientific American, Inc., 1980.

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1981.

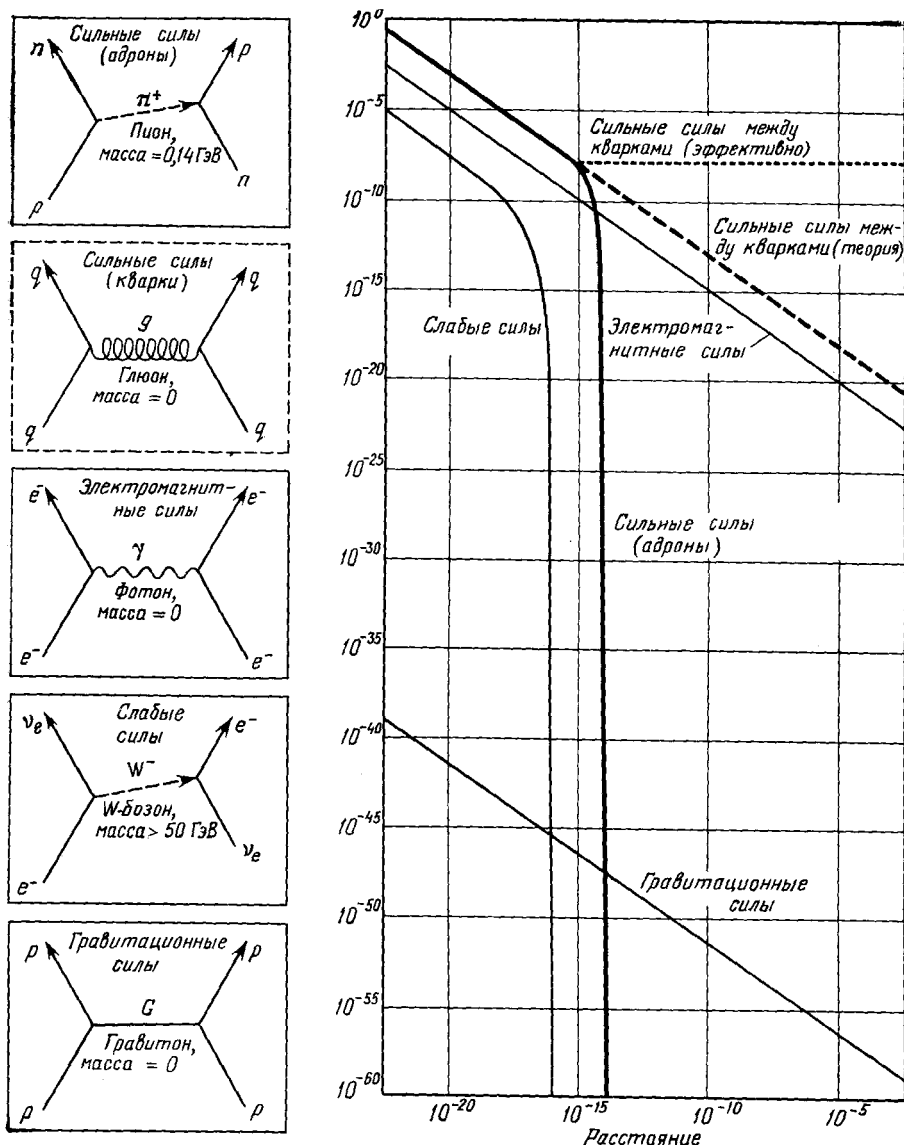


Рис. 1. Четыре основные силы отвечают всем известным взаимодействиям между частицами материи.

Эти силы существенно отличаются по величине и эффективному радиусу действия, но все они описываются теориями, имеющими одну математическую природу — локальными калибровочными теориями. Говорят, что электромагнетизм и гравитация имеют бесконечный радиус действия, хотя их влияние и падает как квадрат расстояния между взаимодействующими частицами. Слабые силы ограничены очень маленькими расстояниями — порядка 10^{-18} см. Сильные взаимодействия представляют более сложную картину. Если наблюдать сильное взаимодействие между адронами, такими, например, как протон и нейтрон (самая толстая сплошная линия), то оказывается, что они имеют конечный радиус действия порядка 10^{-15} см. Сильные взаимодействия связывают также между собой частицы, названные кварками, из которых состоят адроны. Рассматривая сильные взаимодействия в таком контексте, можно было бы ожидать закона обратного квадрата расстояния (штриховая линия). Действительное поведение явно более странное: сила остается постоянной независимо от расстояния (пунктирная линия). В квантовополевых теориях (см. левую часть рисунка) взаимодействие между частицами осуществляется через обмен третьей частицей, называемой виртуальной. Радиус действия сил определяется массой виртуальной частицы. Обмен безмассовыми виртуальными частицами, такими, как фотон и гравитон, приводит к силам, имеющим бесконечный радиус действия.



Симметрии и очевидные симметрии в законах природы играли роль в создании физических теорий еще во времена Галилея и Ньютона. Наиболее известными симметриями являются пространственные или геометрические симметрии. Например, в снежных хлопьях присутствие симметричных штампов может быть обнаружено с одного взгляда. Симметрия может быть определена как инвариантность штампа, которая проявляется, когда к нему применено некоторое преобразование. В случае снежных хлопьев это преобразование является вращением на 60° или на $1/6$ круга. Если отметить первоначальное положение снежинки, а затем вращать ее на 60° (или на любой кратный 60° угол), никаких изменений не будет замечено. Снежинки инвариантны по отношению к вращению на 60° . Следуя тому же принципу, находим, что квадрат инвариантен по отношению к вращению на 90° , а круг, как говорят, имеет непрерывную симметрию, так как вращение на любой угол оставляет его без изменения.

Хотя понятие симметрии имело свои истоки в геометрии, оно оказалось достаточно общим, способным охватить инвариантность по отношению к преобразованиям иных видов. Примером негеометрической симметрии является зарядовая симметрия электромагнетизма. Предположим, что несколько электрически заряженных частиц находятся в некоторой определенной конфигурации и все силы, действующие между парами частиц, могут быть измерены. Тогда, если знаки всех зарядов изменяются на обратные, силы остаются неизменными.

Другая симметрия негеометрического типа касается изотопического спина — характерного свойства протонов и нейтронов и других связанных частиц, названных адронами (это — частицы, участвующие в сильных взаимодействиях). Основа симметрий лежит в наблюдении того факта, что протон и нейтрон являются весьма схожими частицами. Они отличаются по массе всего лишь на десятую долю процента и за исключением их электрического заряда являются идентичными частицами во всех других отношениях. Поэтому кажется очевидным, что от взаимной замены всех протонов нейтронами сильные взаимодействия вряд ли изменятся. Если бы электромагнитные силы (которые зависят от электрического заряда) каким-нибудь образом могли бы быть устранены, изоспиновая симметрия, видимо, была бы точной; в действительности она только приближенная.

Хотя протон и нейтрон, по-видимому, являются различными частицами и трудно представить состояние материи, отвечающее некоему промежуточному (между протоном и нейтроном) состоянию, тем не менее оказывается, что изоспиновая симметрия является непрерывной симметрией, подобной скорее симметрии сферы, чем симметрии снежинки. Попробуем дать упрощенное объяснение, почему это так. Представим, что внутри каждой частицы существует пара скрещенных стрел; одна — представляющая протонные компоненты частицы, другая — нейтронные. Если протонная стрелка указывает вверх (причем выбор именно этого направления здесь не существен), то частица есть протон; если нейтронная стрела указывает вверх, то частица есть нейтрон. Промежуточные положения соответствуют квантово-механической суперпозиции этих двух состояний и поэтому частица выглядит иногда подобно протону, а иногда подобно нейтрону. Преобразования симметрии, связанные с изотопическим спином, вращают внутренние стрелки всех протонов и всех нейтронов повсюду во Вселенной в равной мере и одновременно. Если угол вращения точно равен 90° , каждый протон становится нейтроном и каждый нейтрон — протоном. Симметрия изотопического спина, в известной степени, является точной и не существует состояний, которые не обнаруживаются такого рода преобразованиями.

Все симметрии, которые я до сих пор обсуждал, могут быть классифицированы как глобальные симметрии; в этом контексте слово «глобальные» означает — «происходящие повсюду и одновременно». Это ограничение в описании изоспиновой симметрии соответствует сути дела — внутреннее

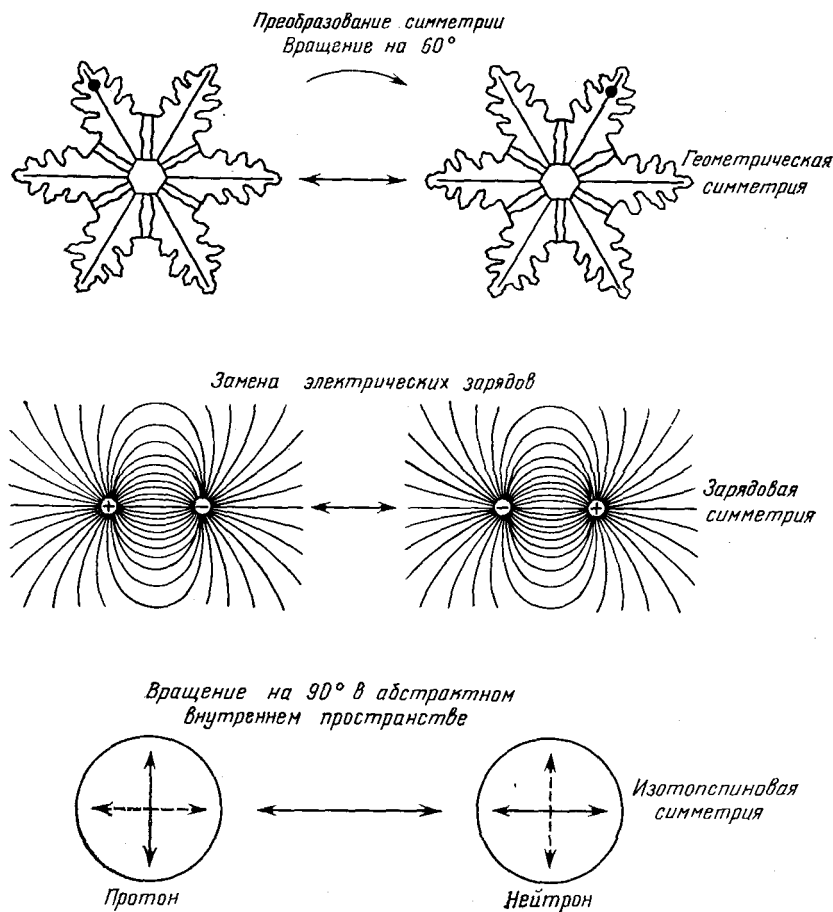


Рис. 2. Симметрии природы определяют свойства сил в калибровочных теориях.

Известная симметрия снежинки характеризуется тем, что снежинка не меняется, если ее повернуть на 60° . Говорят, что снежинка инвариантна по отношению к таким вращениям. В физике вводятся негеометрические типы симметрий. Например, зарядовая симметрия — это инвариантность сил, действующих между заряженными частицами при изменении знаков зарядов всех частиц на противоположные. Изотопическая симметрия основана на наблюдении того факта, что в картине сильного взаимодействия материи мало что изменится, если все протоны заменить на нейтроны и наоборот. Следовательно, протон и нейтрон становятся просто различными состояниями одной частицы — нуклона, и переходы между состояниями можно наглядно представить, приписав ориентацию некоторому указателю во внутреннем пространстве. Симметрии именно такого рода, когда преобразованиями являются внутренние вращения или фазовые сдвиги, относят к калибровочным симметриям.

вращение, которое преобразует протоны в нейтроны и нейтроны в протоны, должно выполняться везде и одновременно. Кроме глобальных симметрий, которые почти всегда присутствуют в физической теории, возможно существование «локальной» симметрии, в рамках которой преобразования могут выполняться независимо в каждой точке пространства и в каждый момент времени. Хотя термин «локальной» симметрии может показаться менее емким понятием, чем «глобальная» симметрия, фактически требование локальной симметрии накладывает значительно более жесткие связи

на конструкцию теории. Глобальная симметрия утверждает, что некоторый закон физики остается инвариантным, когда везде и одновременно выполняется одно и то же преобразование. Для локальной симметрии, которая должна наблюдаться, законы физики должны оставаться справедливыми, даже когда различные преобразования имеют место в каждой точке пространства и времени.

Калибровочные теории могут быть построены как в рамках глобальной, так и локальной симметрии (или в рамках той и другой совместно), но именно теории с локальной симметрией сегодня представляют наибольший интерес. Для того чтобы сделать такую теорию инвариантной по отношению к локальным преобразованиям, должно быть добавлено кое-что, а именно сила. Однако прежде чем показать, как это происходит, необходимо более подробно обсудить, как силы описываются в современных теориях взаимодействий элементарных частиц.



Основные составные части теории частиц включают сегодня не только частицы и силы, но также поля. Поле — это просто величина, определенная в каждой точке некоторой области пространства и времени. Например, эта величина может быть температурой, а область — поверхностью обычной сковородки. Поле в этом случае состоит из значений температуры в каждой точке поверхности.

Температура является скалярной величиной, потому что она может быть представлена точкой на линии или числом. Соответствующие температуре поля называются скалярными полями, для них каждая точка связана с простым числом или величиной. Существуют также другие виды полей, причем для наших целей наиболее важным является векторное поле, в котором с каждой точкой связан вектор или стрелка. Вектор имеет как величину, которая представлена длиной стрелки, так и направление, которое в трехмерном пространстве может быть задано двумя углами; следовательно, чтобы определить вектор, необходимы три числа. Примером векторного поля является поле скоростей жидкости; с каждой точкой всего объема жидкости может быть связана стрелка, указывающая скорость и направление потока.

При изучении электрически заряженных объектов поле является удобным инструментом для исследования того, как электромагнитное взаимодействие передается из одной точки в другую. Предполагается, что все заряженные частицы порождают электромагнитное поле, а каждая частица затем взаимодействует с суммой всех полей, а не с каждой частицей в отдельности.

В квантовой механике сами частицы могут быть представлены как поле. Электрон, например, может рассматриваться как пакет волн с некоторой конечной протяженностью в пространстве. Часто удобно, наоборот, представлять квантовомеханическое поле так, как если бы оно было частицей. Взаимодействие двух частиц через их взаимопроникающее поле можно затем выразить как обмен между двумя частицами третьей частицей, которая называется квантом поля. Например, когда два электрона (каждый окруженный электромагнитным полем) приближаются друг к другу и отталкиваются, говорят, что они обмениваются фотоном — квантом электромагнитного поля.

Обменный квант имеет только иллюзорное существование. Будучи испущенным, он должен быть поглощен той же частицей или другой за конечное время. Он не может сохраняться сам по себе и не может быть обнаружен в эксперименте. Этот вид квантов поля называется виртуальными частицами. Чем больше их энергия, тем меньше времени они существ-

вуют. Во взаимодействии виртуальная частица заимствует или растрчивает часть энергии, но должна отдавать долг до того, как эта нехватка будет замечена.

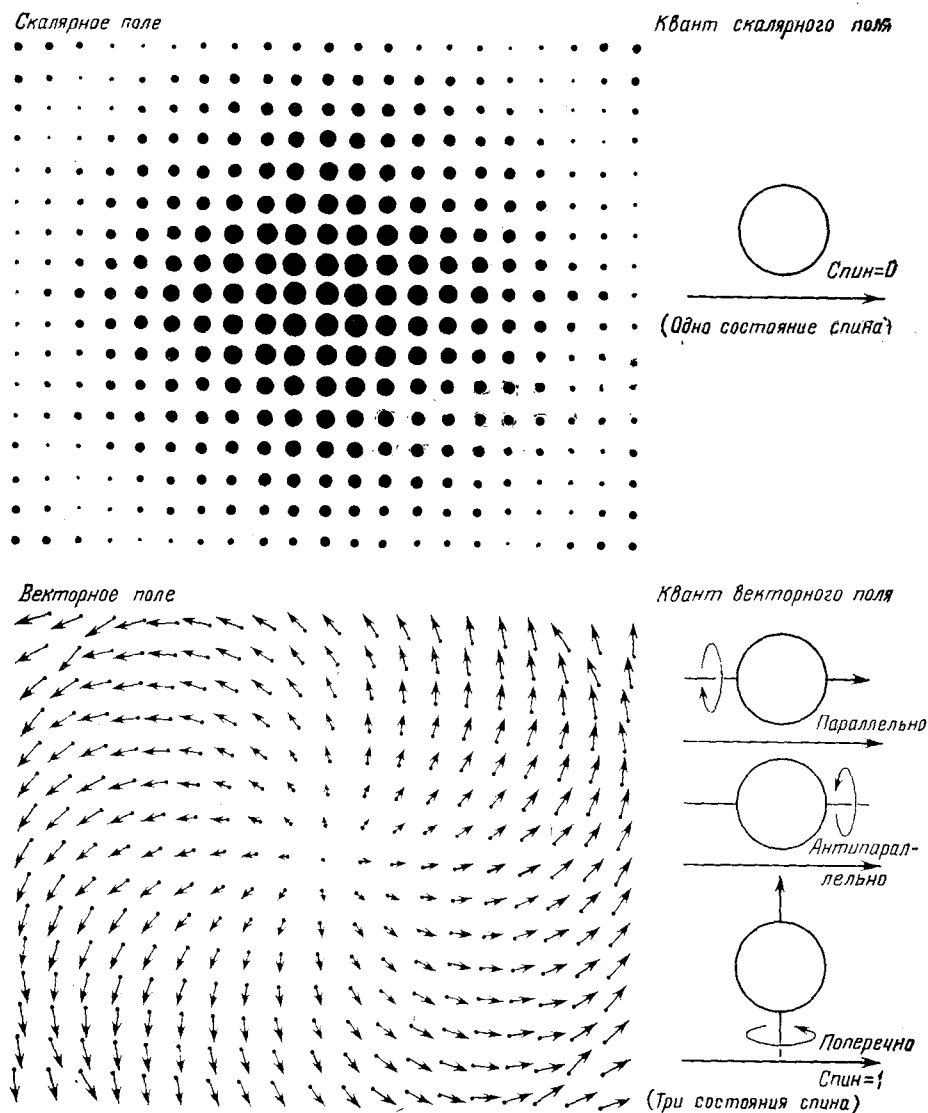


Рис. 3. Понятие поля — величины, определенной в каждой точке некоторой области пространства и времени, очень важно при построении калибровочных теорий.

Скалярное поле задается в каждой точке только своей величиной. На рисунке величина поля пропорциональна площади кружков. Векторное поле характеризуется и величиной, и направлением; оно изображено на рисунке стрелками. Скалярным полем описываются такие величины, как температура или плотность жидкости; векторным полем можно изобразить скорость этой жидкости. В квантово-полевых теориях воздействие поля может быть представлено виртуальной частицей. Число компонент поля определяет число различных ориентаций частицы, что в свою очередь зависит от спинового углового момента. Скалярное поле имеет ровно одну компоненту (его значение может быть задано единственным числом) и представляется частицей нулевого спина с одним спиновым состоянием, или ориентацией. Векторное поле в трехмерном пространстве имеет три компоненты (величину и два угла, указывающие направление), и ему соответствует частица со спином 1, имеющая три спиновых состояния.

Область взаимодействия определяется массой обмениваемого кванта. Если квант поля имеет большую массу, большее количество энергии должно быть заимствовано для того, чтобы поддержать его существование

и долг должен быть выплачен скорее, прежде чем этот дисбаланс энергии будет обнаружен. Ввиду этого расстояние, которое частица может пройти до того, как она будет вновь поглощена, является ограниченным, и, таким образом, соответствующая сила имеет ограниченный радиус действия. В особом случае, где обмениваемый квант является безмассовым, радиус действия сил является бесконечным.

Число компонент поля соответствует числу квантовомеханических состояний кванта поля. Число возможных состояний в свою очередь связано с внутренним спиновым моментом частицы. Спиновый момент может принимать только дискретные величины; если величина спина измерена в фундаментальных единицах, эти величины всегда целые или полуцелые. Более того, квантуется не только величина спина, но также его направление или ориентация (если быть более точным, то спин может быть определен как вектор, параллельный спиновой оси, и проекции или компоненты этого вектора вдоль любого направления в пространстве должны иметь величины, которые являются целыми или полуцелыми). Число возможных ориентаций или спиновых состояний равно удвоенной величине спина плюс единица. Таким образом, частица со спином половина, такая как электрон, имеет два спиновых состояния: спин может быть направлен параллельно направлению движения частицы или противоположно ему. Частица со спином единица имеет три ориентации: параллельную движению, противоположную ему и поперечную, частица со спином нуль не имеет спиновой ориентации: все ее направления эквивалентны или, как говорят, она имеет только одно спиновое состояние.

Скалярное поле, которое имеет только одну компоненту (величину), следует представлять квантом поля, который имеет также только одну компоненту или, другими словами, частицей со спином нуль. Такие частицы поэтому названы скалярными частицами. Подобно этому трехкомпонентное векторное поле имеет квант поля со спином единица, т. е. три спиновых состояния, что соответствует векторной частице. Электромагнитное поле является векторным полем и спин фотона, в соответствии с этой спецификацией, равен единице. Гравитационное поле имеет более сложную структуру, названную тензором, и имеет 10 компонент, но не все из них независимы. В результате спин гравитационного поля равен двум, что соответствует пяти спиновым состояниям.

Однако в случае электромагнетизма и гравитации следует принять во внимание одно усложнение. Так как фотон и гравитон безмассовые, они всегда должны двигаться со скоростью света. Из-за такой скорости они имеют свойство, не присущее частицам с конечной массой, — поперечных спиновых состояний для них не существует. Хотя в некотором формальном смысле фотон имеет три спиновых состояния, а гравитон имеет их пять, на практике могут быть обнаружены только два состояния

□

Первой калибровочной теорией с локальной симметрией была теория электрических и магнитных полей, выдвинутая в 1868 г. Максвеллом. Основу теории Максвелла составляло предположение, что электрический заряд окружен электрическим полем, простирающимся до бесконечности, и что движение электрического заряда порождает магнитное поле, также простирающееся до бесконечности. Оба поля являлись векторными величинами, определенными в каждой точке пространства величиной и направлением.

В теории Максвелла величина электрического поля в любой точке определяется в конечном счете распределением зарядов вокруг точки. Однако часто полезно определить потенциал или напряженность, которые

также задаются распределением зарядов, в частности, чем больше плотность зарядов в области пространства, тем выше ее потенциал. Электрическое поле между двумя точками теперь удобно определять также разностью потенциалов между ними.

Характер симметрии, которая делает теорию Максвелла калибровочной теорией, можно иллюстрировать рассмотрением мысленного эксперимента. Представим, что система электрических зарядов помещена в лаборатории, а электрическое поле, генерируемое зарядами, измеряется и его свойства записываются. Если заряды неподвижны, то магнитное поле существовать не может (магнитное поле возникает от движения зарядов); следовательно, поле зарядов является полем чисто электрическим. В этой экспериментальной ситуации легко просматривается глобальная симметрия: преобразование симметрии заключается в увеличении общего напряжения, под которым находится лаборатория, или в увеличении ее электрического потенциала. Если теперь повторить измерение, никаких изменений в электрическом поле не будет обнаружено. Причина состоит в том, что поле, как его определил Максвелл, зависит только от разности электрических потенциалов, а не от абсолютной величины потенциала. Именно по этой причине белка может гулять по неизолированному проводу линии электропередачи без риска для жизни.

Это свойство теории Максвелла обязано симметрии: электрическое поле инвариантно по отношению к добавлению или вычитанию произвольного глобального потенциала. Однако, как отмечалось выше, такая симметрия является глобальной симметрией, так как результат эксперимента остается неизменным, если только потенциал изменяется повсюду и одновременно. Если потенциал увеличивается нами только в одной области и не увеличивается в другой, то в любом эксперименте, там, где пересекается граница этих областей, можно будет почувствовать разность потенциалов, точно так же, как это почувствует белка, если дотронется сразу до обоих проводов, замыкая таким образом сеть.

Полная теория электромагнитного поля должна содержать не только статически упорядоченные заряды, но также и движущиеся заряды. В этой связи глобальную симметрию теории следует преобразовать в симметрию локальную. Если бы электрическое поле было единственным полем, действующим между заряженными частицами, локальная симметрия не имела бы места. В действительности, когда заряды находятся в движении, присутствует не только электрическое поле — движение порождает другое поле, названное магнитным. Именно действие магнитного поля порождает локальную симметрию.

Точно так же, как электрическое поле (которое в конечном счете определяется распределением зарядов, но более удобным образом может быть получено из электрического потенциала), магнитное поле, которое генерируется движением зарядов, более просто представляется магнитным потенциалом. Именно в этой системе потенциальных полей имеют место локальные преобразования, оставляя неизменными все исходные электрические и магнитные поля. Система дуальных, взаимосвязанных полей обладает точной локальной симметрией, хотя одно электрическое поле такой симметрии не имеет. Любое локальное изменение в электрическом потенциале может быть объединено с компенсирующим изменением в магнитном потенциале таким образом, что электрические и магнитные поля останутся без изменения.

□

Теория электромагнетизма Максвелла является классической теорией, но соответствующая симметрия может быть также обнаружена в кванто-

вой теории электромагнитных взаимодействий. В такой теории электрон описывается как волна или поле, в соответствии с общим принципом квантовомеханического описания любой материальной частицы. Оказывается, что в квантовой теории электронов изменение в электрическом потенциале влечет за собой также изменение в фазе волны электрона.

Электрон имеет полуцелый спин и в соответствии с этим имеет два спиновых состояния (параллельное и противоположное движению). Связанное с ним поле должно быть двухкомпонентным. Каждая из компонент представляется комплексным числом, т.е. числом, которое имеет как действительную (обычную) часть, так и мнимую часть, которая содержит в качестве множителя корень квадратный из (-1) . Поле электрона есть движущийся пакет волн, которые представляют осцилляции амплитуд реальной и мнимой компонент поля. Важно подчеркнуть, что это поле не просто является электрическим полем электрона, а есть поле материи. Оно могло бы существовать даже в том случае, если бы электрон не имел электрического заряда. Это поле определяет вероятность обнаружить электрон в определенном спиновом состоянии в данной точке и в данный момент времени. Вероятность дается суммой квадратов реальных и мнимых частей этого поля.

В отсутствие электромагнитных полей частота осцилляций поля электрона пропорциональна энергии электрона, а волновой вектор осцилляций пропорционален импульсу. Однако для того, чтобы определить осцилляции полностью, необходимо еще одно добавочное условие — надо задать фазу. Фаза измеряет смещение волны от некоторой произвольной выбранной точки и обычно выражается как угол. Если в некоторой точке реальная часть осцилляций, скажем, имеет положительный максимум в амплитуде, то фаза в этой точке может быть выбрана за начало отсчета и соответствовать нулю градусов. Точка, в которой реальная часть затем падает до нуля, соответствует фазе 90° и точка, где она достигает своего отрицательного максимума, соответствует фазе 180° . В общем случае, мнимая часть амплитуды имеет фазу, сдвинутую на 90° по сравнению с фазой реальной части, так что если в какой-то точке одна из них имеет максимум, другая имеет нуль.

Очевидно, что единственный способ измерить фазу поля электрона заключается в раздельном измерении вкладов реальных и мнимых частей амплитуды. Однако оказывается, что это невозможно даже в принципе. Всегда известна только сумма квадратов реальных и мнимых частей и не существует способа указать в любой точке или в любой момент времени, каковы в отдельности вклады от реальной части и от мнимой. В самом деле, точная симметрия теории предполагает, что оба эти вклада являются неразличимыми. Может быть измерена только разность фаз поля в двух точках пространства или в два момента времени, но не абсолютная их величина.

Тот факт, что фаза волны электрона не может быть измерена, имеет свое следствие — фаза не может оказывать влияние или входить явно в любой возможный эксперимент. В противном случае, такой эксперимент мог бы быть использован для определения фазы. Таким образом, поле электрона инвариантно по отношению к произвольному изменению фазы. Любой фазовый угол может быть добавлен или вычтен, однако, результаты всех экспериментов будут оставаться без изменений.

Этот принцип можно еще более прояснить, рассматривая эксперимент двухщелевой дифракции с электронами, который используется обычно как хорошо известная демонстрация волновой природы материи. В этом эксперименте пучок электронов проходит через две узкие щели в экране и регистрируется количество электронов, достигших второго экрана.

Распределение электронов по поверхности второго экрана образует дифракционную картину чередующихся пиков и долин.

Квантовомеханическая интерпретация этого эксперимента заключается в том, что волна электрона на первом экране разделяется на два пучка, которые затем интерферируют друг с другом. Там, где волны встречаются в фазе, интерференция приводит к увеличению результирующей амплитуды, и на втором экране регистрируется много электронов; однако там, где волны встречаются в противофазе, интерференция приводит к недостатке электронов. Ясно, что именно разность фаз определяет возникающую здесь картину. Так, в частности, если бы фазы обеих волн были сдвинуты на одну

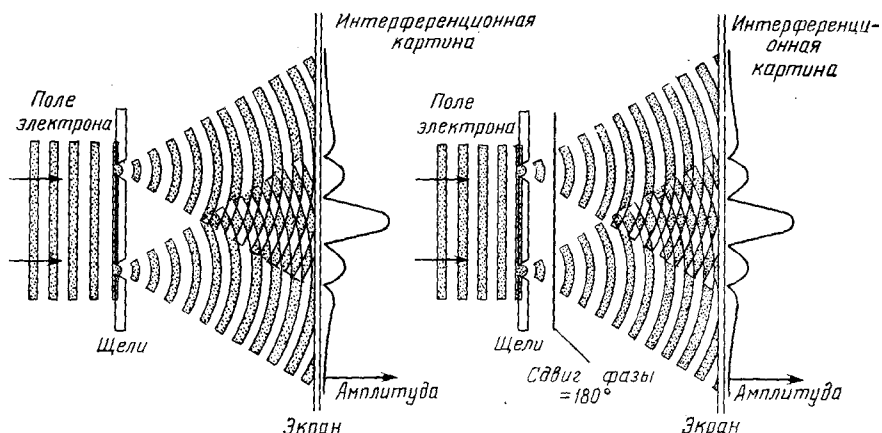


Рис. 4. Калибровочная симметрия электромагнетизма есть инвариантность по отношению к сдвигам фазы поля электрона.

Сама по себе фаза не может быть измерена, но она влияет на такую наблюдаемую величину, как интерференционная картина, формирующая при прохождении волн поля электрона через пару щелей. Пики на этой картине образуются там, где волны оказываются в фазе, а узлы — там, где они в противофазе. Сдвиг фазы существенно меняет конфигурацию поля, но оставляет неизменной наблюдаемую интерференционную картину. Симметрия является точной, а потому сдвиг фазы не может быть обнаружен. Следовательно, выбор фазы при теоретическом описании поля есть просто вопрос соглашения. В отсутствие сил, действующих между электронами, симметрия, однако, только глобальная: наблюдаемая картина не изменяется, только если всюду проведен одинаковый сдвиг фазы.

и ту же величину, т.е. разность фаз в каждой точке осталась бы без изменения, то та же самая картина чередующихся максимумов и минимумов продолжала бы наблюдаться.

Именно симметрии такого вида, вследствие которых фаза квантового поля может быть выбрана произвольной, называются калибровочными симметриями. Хотя абсолютная величина фазы не влияет на исход экспериментов, тем не менее при создании теории электронов фазу приходится фиксировать. Выбор ее величины, который может быть сделан по усмотрению теоретика, называется устранением калибровочного произвола теории.

Однако термин «калибровочная симметрия» не очень удачен для такой инвариантности. Тем не менее этот термин имеет большую предисторию: не может быть изменен в настоящее время. Он был введен примерно в 1920 г. Германом Вейлем, который в то время пытался сформулировать теорию, способную объединить электромагнетизм и общую теорию относительности. Вейль был первым, кто предложил теорию, которая оставалась инвариантной по отношению к произвольным расширениям или сжатиям пространства. В этой теории для каждой точки пространства-времени был принят различный масштаб длины и времени. Вейль сравнивал выбор

соглашения о масштабе с выбором калиброванных блоков, т. е. стальных полированных блоков, употребляемых как стандарт длины. Эта теория была угадана почти точно, при условии замены масштабов длин «фазовыми углами». Работа написана на немецком языке и Вейль употребил термин «Eich Invarianz», который был первоначально переведен как «масштабная инвариантность», но альтернативный перевод «калибровочная инвариантность» сейчас общепринят.

□

Симметрия поля электрона, описанная выше, является глобальной симметрией — фаза поля должна сдвигаться единообразно везде в один и тот же момент времени. Однако легко показать, что теория таких полей, сама по себе, без учета других форм материи или излучения не инвариантна по отношению к соответствующим локальным калибровочным преобразованиям. Рассмотрим снова эксперимент с двухщелевой дифракцией. Вначале такой эксперимент выполняется без всяких изменений и дифракционная картина записывается. Затем эксперимент повторяется, но одна щель теперь снабжена прибором, который сдвигает фазу волны на 180° . Теперь, когда волны, прошедшие через эти две щели, интерферируют, разность фаз между ними будет изменена на 180° . В результате, там, где в первом эксперименте интерференция приводила к максимуму, теперь регистрируется минимум суммарной амплитуды, и наоборот. Наблюдаемая дифракционная картина не останется неизменной. Положения всех пиков и впадин поменяются местами.

Предположим теперь, что теорию желательно привести в соответствие с преобразованиями локальной калибровочной симметрии. При этом действовать можно несколькими способами, в частности, можно добавить еще одно поле, которое должно компенсировать изменения в фазе электронной волны. Новое поле, конечно, должно не только исправить дефекты в одном из наших экспериментов. Оно должно сохранить инвариантность всех наблюдаемых величин, когда фаза электронного поля меняется произвольным образом от точки к точке и от одного момента времени к другому. Математически сдвигу фаз должна быть сопоставлена произвольная функция координат и времени.

Может показаться невероятным, но такое поле удастся легко построить и удовлетворить всем этим требованиям. Оказывается, что требуемое при таких условиях поле есть векторное поле, соответствующее квантам со спином единица. Более того, это поле должно иметь бесконечный радиус действия, так как не существует расстояний, на которых фазы электронных полей могли бы потерять свой смысл. Требование бесконечного радиуса действия подразумевает, что кванты поля должны быть безмассовыми. Свойства такого поля хорошо известны. В данном случае это есть электромагнитное поле, чьим квантом является фотон.

Как же электромагнитное поле обеспечивает калибровочную инвариантность поля электронной волны? Чтобы понять это, вспомним, что действие электромагнитного поля заключается в передаче сил между заряженными частицами. Эти силы изменяют состояние движения этих частиц, и, что более важно в этом контексте, могут изменить их фазу. Когда электрон испускает или поглощает фотон, фаза поля электрона сдвигается. Электромагнитное поле само по себе обладает точной локальной симметрией, а теперь, при совместном описании этих полей, локальная симметрия может быть распространена на каждое из них.

Связь между двумя полями лежит во взаимодействии заряда электрона с электромагнитным полем. Из-за этого взаимодействия распространение электронной волны в электрическом поле может быть описано,

только если предварительно уточнен электрический потенциал. Аналогично, чтобы описать электрон в магнитном поле, должен быть уточнен магнитный вектор-потенциал. Если эти два потенциала заданы, определенная величина фазы электронной волны фиксирована повсюду. Однако локальная симметрия электромагнитного поля позволяет электрическому потенциалу оставаться произвольным, причем последний может быть выбран независимо для любой точки и для любого момента времени. По этой причине фаза поля электронной волны может также иметь любую

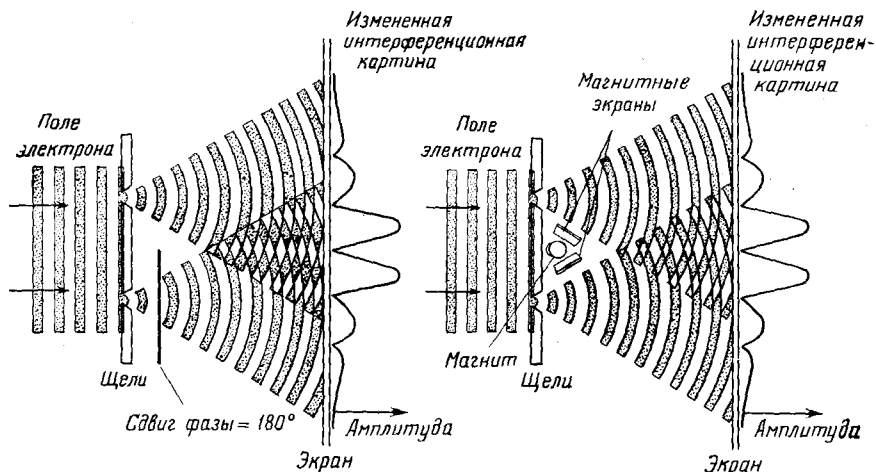


Рис. 5. Восстановление локальной калибровочной симметрии происходит только при учете магнитных полей.

Ясно, что сдвиг фазы только в одном из дифрагирующих электронных пучков меняет наблюдаемую интерференционную картину (левая часть рисунка). Тот же самый эффект может быть получен, однако, и введением слабого магнитного поля, перпендикулярного к электронному пучку и расположенного между щелями (правая часть рисунка). Замечательно то, что магнитное поле индуцирует сдвиг фазы даже тогда, когда экраны устроены так, что поле не может проникнуть в область, где начинают интерферировать электронные волны. Экспериментатор, изучающий интерференционные картины, не сможет отличить эффект сдвига фазы, вызванный произвольным изменением фазы одного из пучков, от эффекта магнитного поля, введенного между щелями. Любой локальный сдвиг фазы поля электрона может быть воспроизведен с помощью электрических и магнитных полей. Теория, в которой объединены поля электрона с электрическими и магнитными полями, называется квантовой электродинамикой.

величину для любой точки, но тем не менее эта фаза должна быть всегда согласована с условиями, принятыми для электрического и магнитного потенциалов.

Для двухщелевого дифракционного эксперимента это означает, что эффекты, возникающие от сдвига в фазе электрона, точно так же имитируются приложением электромагнитного поля. Например, изменение в наблюдаемой интерференционной картине, вызванное размещением пластины на фронте одной из волн после щели, легко достигается, если поместить эти щели между полюсами магнита. Располагая только результирующей картиной эксперимента, оказывается невозможным ответить на вопрос, каким образом такая картина была получена. Так как калибровочные условия для электрического и магнитного потенциалов могут быть выбраны локально, то и фаза поля электрона также может быть выбрана локально.

Теория, которая явилась результатом объединения полей электрон-ной волны с электромагнитными полями, названа квантовой электродинамикой. Формулировка такой теории в ее согласованном виде, впервые рассмотренная П. А. М. Дираком в 20-х г., была завершена только через 20 лет, около 1948 г. в работах Р. П. Фейнмана, Ю. Швингера, С.-И. Томонаги и других авторов.

□

Хотя свойства симметрии квантовой электродинамики были однозначно определены, однако такая теория могла иметь физическую значимость, только если она согласуется с результатами экспериментов. В то же время до серьезной экспериментальной проверки квантовую электродинамику следует независимо проверить на ее внутреннюю согласованность. Например, квантовомеханическая теория предсказывает вероятности событий, однако, эти вероятности не должны быть отрицательными и все вероятности, взятые вместе, не должны превосходить единицу. Кроме того, энергиям следует приписать положительные величины, но последние не должны быть бесконечными.

Было совершенно не очевидно, что квантовую электродинамику можно принять как физически приемлемую теорию. Каждый раз здесь возникала проблема даже при попытке вычислить результат простейшего электромагнитного взаимодействия, например, взаимодействия между двумя электронами. Для такого взаимодействия наиболее вероятная последовательность событий заключается в том, что один электрон испускает виртуальный фотон, а другой электрон поглощает его. Однако более усложненный обмен также возможен и, кроме того, их число бесконечно. Например, электроны могут взаимодействовать, обмениваясь двумя фотонами, тремя и так далее. Полная вероятность взаимодействия определяется суммой вкладов всех возможных событий.

Фейнман ввел систематическую процедуру для табулирования этих вкладов, сводящуюся к вычерчиванию диаграмм событий в одном пространственном и одном временном измерении. Наиболее трудоемкий класс диаграмм образовали те из них, которые включали петли, так как петли в пространстве-времени соответствовали виртуальному фотону, испущенному и впоследствии поглощенному тем же электроном. Максимальная энергия виртуальной частицы, как это было показано выше, ограничена временем ее жизни. Когда виртуальный фотон испускается и поглощается той же самой частицей, пройденное им расстояние и время жизни является нулевым, так что энергия такой частицы становится бесконечной. Именно по этой причине некоторые диаграммы с петлями дают бесконечный вклад в силу взаимодействия.

Бесконечности, на которые сразу же натолкнулись в квантовой электродинамике, привели к предсказаниям, которые не имели разумной физической интерпретации. Любому взаимодействию электронов с фотонами приписывалась бесконечная вероятность. Бесконечности портили даже описание изолированного электрона — было найдено, что так как электрон мог испускать и поглощать виртуальные частицы, то он должен был иметь бесконечный заряд и бесконечную массу.

Спасением от этого нашествия бесконечностей является процедура, названная перенормировкой. Грубо говоря, при этом для каждой положительной бесконечности находится своя отрицательная бесконечность, так что в сумме все возможные вклады бесконечностей сокращаются. Достижение Швингера и других физиков, которые работали над этой проблемой, заключалось в том, что им удалось показать, что конечный результат также получается этим методом. Этот конечный результат и есть предсказание теории. Он единственным образом определен требованием конечности и положительности вероятностей всех взаимодействий.

Смысл этой процедуры объясняется следующим образом. Когда сделано измерение над электроном, то в действительности измеренные величины не есть масса или заряд точечной частицы, с которой теория имела дело вначале, а это есть свойства электрона совместно с его облаком виртуальных частиц. Только такие масса и заряд должны быть конечны на всех этапах

вычисления. Свойства точечных объектов, которые названы «затравочной» массой и «затравочным» зарядом, не являются хорошо определенными.

Первоначально считалось, что затравочной массе следовало бы приписать бесконечное отрицательное значение — абсурд, который заставил многих физиков подозревать перенормированную теорию в несостоятельности. Однако более тщательный анализ показал, что если затравочная масса и должна иметь какое-то определенное значение, то оно стремится к нулю. В любом случае все величины с неправдоподобными значениями в перенормируемых теориях ненаблюдаемы даже в принципе. Что касается квантовой электродинамики, то другое возражение является более состоятельным — математически квантовая электродинамика несовершенна. Из-за методов, которые должны быть использованы для получения предсказаний в теории, эти предсказания ограничены точностью в несколько сотен десятичных знаков.

□

Ясно, что логическая и внутренняя согласованность методов перенормировок оставляет желать лучшего. Возможно, однако, что лучшее оправдание теории заключается просто в том, что она прекрасно работает. Теория воспроизводит результаты, которые согласуются с экспериментами с точностью до одной биллионной, что делает квантовую электродинамику наиболее точной физической теорией среди до сих пор созданных. Это есть модель для теорий других фундаментальных сил и эталон, с помощью которого такие теории будут оцениваться.

Ко времени, когда квантовая электродинамика была завершена, была известна уже более 30 лет другая теория, основанная на локальной калибровочной симметрии. Это — теория гравитации Эйнштейна. Симметрия, о которой идет речь, имеет теперь отношение не к полю, распределенному в пространстве и времени, а к структуре самого пространства-времени.

Каждая точка в пространстве-времени может быть помечена четырьмя числами, которые определяют ее положение в трех пространственных измерениях и в одном временном измерении. Эти числа есть координаты события, а процедура выбора таких чисел для каждой точки в пространстве-времени фиксирует координатную систему. На Земле, например, три пространственные координаты обычно выбираются как длина, ширина и высота, а временная координата может отсчитываться в часах, например, после полудня. Началом в этой координатной системе является точка, где все четыре координаты имеют нулевые значения. Эта точка определяется в полдень на поверхности моря, где гринвичский меридиан пересекает экватор.

Ясно, что выбор такой координатной системы есть дело соглашения. Корабли на море могли бы плавать так же успешно, если бы начало координат было сдвинуто, например, в Нидерланды в г. Утрехт. Тогда каждой точке Земли и каждому событию в ее истории следовало бы приписать новые координаты, но вычисления, сделанные с этими координатами, привели бы к тем же результатам, что и вычисления, сделанные в старой системе. В частности, любое вычисление расстояния между двумя точками дало бы тот же ответ.

Свобода в выборе начала координатной системы отражает симметрию природы. В действительности существуют три относящиеся к делу симметрии: все законы природы остаются инвариантными, когда координатная система преобразуется сдвигами, вращениями или зеркальными отражениями. Однако следует отметить, что такого рода симметрии являются только глобальными симметриями. Каждое преобразование симметрии

определяется как рецепт нахождения новых координат точки, исходя из старых координат. Такой рецепт следует применять одновременно и аналогичным образом ко всем точкам.

□

Общая теория относительности вытекает из фундаментального факта, утверждающего, что структура пространства-времени не обязательно должна находиться в соответствии с координатной системой, построенной на прямых линиях и прямых углах; вместо такой системы — криволинейная система координат может оказаться более предпочтительной. Кстати, линии меридианов и широт, употребляемых на Земле, имеют большее отношение к криволинейной системе координат, так как они следуют кривизне Земли.

В такой системе представить локальное преобразование координат весьма несложно. Для наглядности предположим, что вес определяется вертикальным удалением от поверхности Земли, а не удалением от среднего уровня моря. Вырытая шахта тогда могла бы изменить координатную систему, но не везде, а только в точках непосредственно над шахтой. Таким образом, раскопки представляли бы локальное преобразование координат. Оказалось, что законы физики (или правила навигации) не остаются инвариантными после таких преобразований. Точно то же произошло бы во Вселенной без гравитационных сил. Самолеты, которым было предписано летать на постоянной высоте, при пролете над шахтой стали бы внезапно проваливаться, а возникающие ускорения при их следовании вдоль нового профиля местности можно было бы легко обнаружить.

Так же как в электродинамике, в общей теории относительности локальная симметрия легко восстанавливается путем учета нового поля в теории; здесь такое поле есть, конечно, поле гравитации. Присутствие этого поля дает возможность представить другое объяснение ускорениям, обнаруженным в самолете; последние могли бы быть результатом не локального изменения координатной сетки, а наличия аномалий в поле гравитации. Источник аномалий не конкретизируется, в частности, им может быть концентрация массы в Земле или отдаленный объект в космосе. Основная идея заключается в том, что локальные изменения координатной системы могут быть воспроизведены соответствующим набором гравитационных полей. Пилот самолета не сможет отличить один эффект от другого.

Так же как теория электромагнетизма Максвелла, теория гравитации Эйнштейна во многом обязана своей красотой локальной калибровочной симметрии и успех такой теории уже давно вдохновлял физиков. Однако вплоть до последнего времени теоретическое описание двух других сил в природе было неудовлетворительным. Теория слабых сил, сформулированная в 1930 г. Энрико Ферми, объясняла некоторые основные черты слабого взаимодействия, но локальная симметрия не была присуща такой теории. Сильные взаимодействия выглядели джунглями таинственных полей и частиц-резонансов. Только теперь ясно, почему так долго не удавалось придать смысл этим силам — подходящие локальные калибровочные теории не были найдены.

Первый шаг был сделан в 1954 г. в теории, предложенной Ц. Н. Янгом и Робертом Миллсом, которые тогда работали в Брукхейвенской Национальной лаборатории. Подобная идея независимо была также предложена примерно в то же самое время Р. Шоу из Кембриджского университета. Вдохновленные успехом известных калибровочных теорий, эти теоретики исходили из факта установленной глобальной симметрии и анализировали, к каким следствиям привела бы ее замена локальной симметрией.

Симметрия в янг-миллсовской теории есть симметрия изотопического спина — правило, утверждающее, что сильное взаимодействие остается инвариантным (или почти инвариантным), если поменять местами все протоны и нейтроны. В рамках глобальной симметрии любое вращение внутренних «стрелок», которые фиксируют изотопическое состояние, должно осуществляться одновременно и повсюду. Постулирование локальной

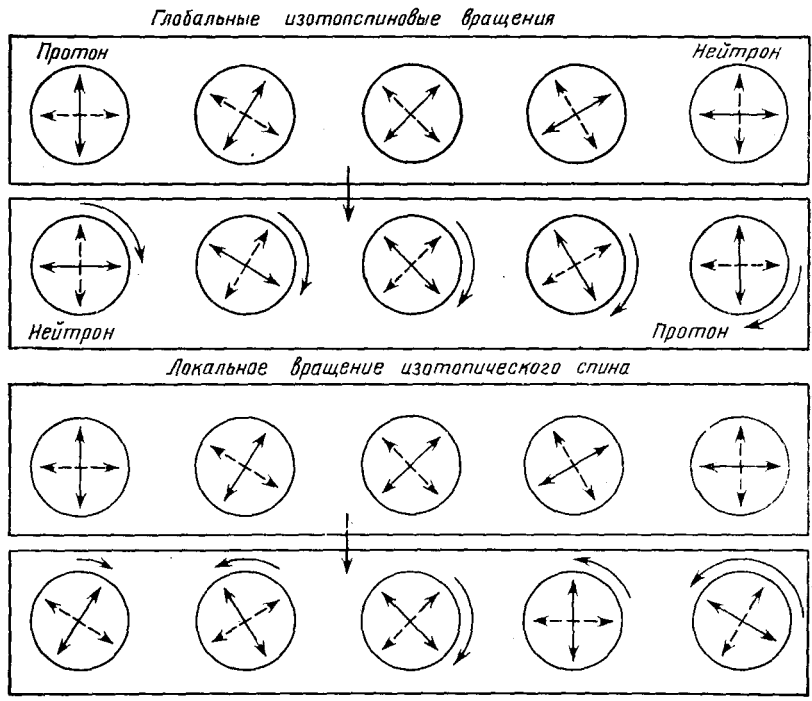


Рис. 6. Изотопическая симметрия составляет основу другой калибровочной теории, впервые открытой в 1954 г. Янгом и Миллсом.

Если изотопическая симметрия имеет место, то выбор того, какое именно положение стрелки во внутреннем пространстве указывает на то, что это протон или нейтрон, есть полностью вопрос соглашения. Глобальная симметрия (верхняя часть рисунка) требует, чтобы во всем пространстве было принято единое соглашение о выборе направления стрелки, и любое вращение стрелки должно быть одинаковым во всех точках пространства. В янг-миллсовской теории изотопическая инвариантность становится локальной симметрией (нижняя часть рисунка), так что направление стрелки может меняться от точки к точке. Для того чтобы сохранить инвариантность всех наблюдаемых величин по отношению к таким локальным изотопическим преобразованиям, необходимо ввести, по крайней мере, шесть полей, соответствующих трем безмассовым векторным частицам или векторным бозонам. Одна из этих частиц может быть отождествлена с фотоном; две другие несут на себе электрический заряд. Эта теория не получила широкого распространения, так как была нереалистичной. Она делала неотличимыми друг от друга протоны и нейтроны и предсказывала существование безмассовых заряженных частиц, которые не наблюдаются.

симметрии позволяет изменять ориентацию стрелок произвольным образом от точки к точке и от одного момента времени к другому моменту. Вращение стрелок может зависеть от любой произвольной функции точек и времени. Эта свобода в выборе соглашений в силу тождественности ядерной частицы в различных точках пространства-времени и образует суть локальной калибровочной симметрии.

Так же как в других случаях, где глобальная симметрия преобразуется в локальную симметрию, здесь инвариантность такого рода может быть достигнута только, если будет в такую теорию добавлено кое-что новое. Так как теория Янга — Миллса является более сложной теорией, чем все другие известные ранее калибровочные теории, то оказывается, что

должно быть добавлено достаточно много. Для такой теории при произвольных изотоп-спиновых вращениях от точки к точке к точке, законы физики остаются инвариантными, только если будет добавлено шесть новых полей. Все эти поля являются векторными и все они имеют бесконечный радиус действия. Янг-миллсовские поля устроены по подобию обычных электромагнитных полей. В самом деле, два из них всегда могут быть отождествлены с обычными электрическими и магнитными полями. Другими словами, эти поля описывают поле фотона. Остальные янг-миллсовские поля могут быть также взяты парами и интерпретированы как электрические и магнитные поля, но «фотоны», которые они описывают, по своим свойствам кардинально отличаются от известных обычных фотонов — эти новые фотоны, хотя и являются безмассовыми частицами со спином, равным единице, однако имеют электрический заряд. Один «фотон» отрицательно заряжен, другой — положительно.

□

Приписывание фотону электрического заряда приводит к замечательным следствиям. Фотон обычно определяется как квант поля, который переносит электромагнитные силы от одной заряженной частицы к другой. Если же фотон сам имеет заряд, то может существовать прямое электромагнитное взаимодействие между фотонами. Например, два фотона с противоположными зарядами могли бы связаться вместе, образуя «атом» света. Известный нейтральный фотон никогда не взаимодействует сам с собой подобным образом.

Удивительные эффекты заряженных фотонов становятся наиболее очевидными, если преобразование локальной симметрии применяется несколько раз к той же самой частице. Вспомним, что в квантовой электродинамике, как уже указывалось выше, действие преобразования симметрии заключается в локальном изменении фазы поля электрона, причем каждый такой фазовый сдвиг сопровождается взаимодействием с электромагнитным полем. Легко представить электрон, испытавший последовательно два фазовых сдвига, — скажем, эмиссию и поглощение фотона. Интуитивно предполагается, что если последовательность фазовых сдвигов будет обращена, так что вначале фотон поглощается, а затем испускается, то окончательный результат будет тем же самым. На самом деле это так и происходит. Может быть сделана неограниченная серия фазовых сдвигов, а окончательный результат будет просто алгебраической суммой всех сдвигов независимо от их последовательности.

В теории Янга-Миллса, где действие преобразования симметрии является локальным вращением изотопических спинов, результат нескольких последовательных преобразований может быть совершенно различным. Предположим, что адрон подвергается калибровочному преобразованию A , за которым сразу же следует другое преобразование, B , причем в конце этой последовательности преобразований изотоп-спиновая «стрелка» находится в конфигурации, которая соответствует протону. Теперь предположим, что те же преобразования применяются к тому же адрону, но в обратной последовательности: преобразование A следует за преобразованием B . Конечное состояние, вообще говоря, не будет тем же, в частности, частица может быть нейтроном вместо протона. Результирующий эффект двух преобразований явно зависит от последовательности, в которой они применялись.

Из-за этого различия квантовая электродинамика называется абелевой теорией, а янг-миллсовская теория названа неабелевой теорией. Эти термины заимствованы из математической теории групп и связаны с именем Нильса Хенрика Абеля, норвежского математика, который жил в начале

XIX века. Абелевы группы объединяют преобразования, которые, будучи выполнены последовательно, перестановочны друг с другом; неабелевы группы содержат неперестановочные преобразования.

Перестановочность хорошо известна в арифметике, как свойство сложения и умножения, где для любых двух чисел A и B можно утверждать, что $A + B = B + A$ и $A \times B = B \times A$. Как этот принцип применяется к группе преобразований, можно иллюстрировать простыми примерами в рамках группы вращений. Все возможные вращения двумерных объектов перестановочны, так что группа таких вращений является

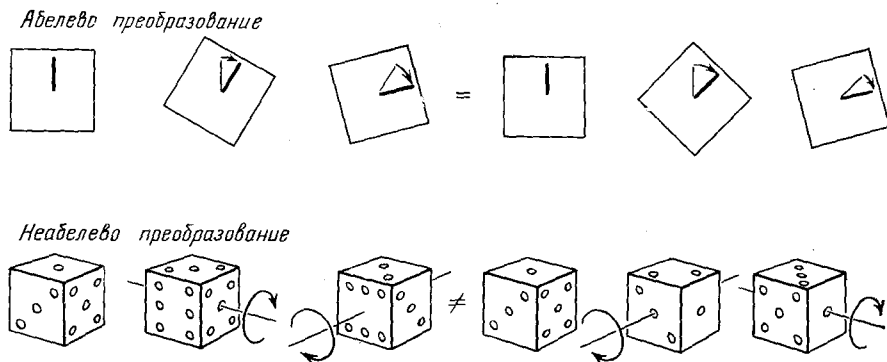


Рис. 7. Результаты серии последовательных преобразований отличают квантовую электродинамику, которая является абелевой теорией, от теории Янга — Миллса, которая неабелева.

Абелевы преобразования коммутативны: если последовательно проведены два преобразования, то результат не зависит от того, в какой последовательности они проведены. Примером является вращение в пространстве двух измерений. Неабелевы преобразования некоммутируют: два преобразования, вообще говоря, дадут различные результаты, если поменять последовательность их проведения. Вращения в трехмерном пространстве демонстрируют эту зависимость от последовательности. Теория Янга — Миллса не является абелевой, поскольку конечный результат двух изотопических вращений оказывается различным, если поменять порядок преобразований: одна последовательность может привести к протону, а другая — к нейтрону.

абелевой. Например, вращения на 60 градусов в одну сторону и на 90° в другую производят суммарное вращение на 30° независимо от того, какое вращение было первым. Для трехмерных объектов произвольные вращения вокруг трех осей не перестановочны и группа трехмерных вращений — неабелева. Как пример, рассмотрим самолет, летящий точно на север. 90°-ное отклонение влево, за которым следует 90°-ное левое вращение, меняет положение самолета так, что теперь самолет оказывается летящим на запад, развернутый левым крылом точно вниз. Замена последовательности преобразований, так что девяностоградусное вращение влево предшествует девяностоградусному левому отклонению, переводит самолет в пикирующий полет с крыльями, ориентированными вдоль оси «север-юг».

Как и янг-миллсовская теория, общая теория относительности является неабелевой — при проведении двух последовательных координатных преобразований порядок, в котором они выполняются, влияет на результат. За прошедшие 10 лет (или немногим более) были предложены новые неабелевы теории и даже электромагнитные взаимодействия были встроены в более общую теорию, которая является неабелевой. По крайней мере сегодня кажется весьма вероятным, что все силы природы описываются неабелевыми калибровочными теориями.



Монументальная значимость янг-миллсовской теории не вызывала сомнений, однако, в ее первоначальной формулировке она была полностью непригодной для описания реального мира. Первая претензия к такой теории заключалась в том, что изоспиновая симметрия здесь оставалась точной и в результате протон и нейтрон являлись неразличимыми, что, очевидно, противоречит действительности. Еще более тревожило предсказание электрически заряженных фотонов, которые с необходимостью являются безмассовыми частицами, так как они имеют бесконечный радиус взаимодействия. Однако существование любой другой электрически заряженной частицы, более легкой, чем электрон, изменило бы окружающий нас мир до неузнаваемости. Конечно, нигде такая частица не наблюдалась. Несмотря на все эти трудности, янг-миллсовская теория обладала большой привлекательностью и глубоким философским содержанием. Принятая в то время стратегия устранения ее дефектов заключалась в попытке искусственным образом обеспечить отличную от нуля массу квантам заряженного поля.

Предположение конечной массы для квантов заряженных полей не исключало существование самих полей, но ограничивало их действие конечным радиусом. В частности, если масса выбирается достаточно большой, то радиус может быть сделан как угодно малым. После того как эффекты дальнего действия устранены, существование таких полей не противоречит экспериментальным наблюдениям. Более того, выделение нейтрального янг-миллсовского поля, как единственного поля, обладающего дальним действием, автоматически отличает протон от нейтрона. Так как это поле является электромагнитным полем, протон и нейтрон могут быть различимы по степени их взаимодействия с этим полем, или, другими словами, по их различным электрическим зарядам.

В результате такой модификации локальная симметрия янг-миллсовской теории нарушается; она сохраняется только приближенно. Теперь вращение изоспиновых «стрелок» должно приводить к наблюдаемым следствиям. Этот факт сам по себе не является фундаментальной трудностью такой теории, так как приближенные симметрии весьма распространены в природе. (Двусторонняя симметрия человеческого тела является только приближенной.) Более того, на масштабах много меньших, чем радиус действия массивных компонент янг-миллсовского поля, локальная симметрия все больше восстанавливается. Таким образом, в смысле микроскопической структуры теория может остаться локально-симметричной, но этой симметрии не будет в предсказаниях макроскопических наблюдаемых событий.

Модифицированная янг-миллсовская теория более доступна для понимания, однако ей нужно придать и квантовомеханическую интерпретацию. Оказалось, что присущая ей проблема бесконечностей более сложна, чем это было в квантовой электродинамике и стандартная процедура перенормировок ее не решает. Предстояло найти новую технику.

Важная идея была высказана в 1963 г. Фейнманом. Он ввел в янг-миллсовскую теорию фиктивную частицу — «дух», т. е. частицу, которая должна быть добавлена в теорию в процессе вычисления и исключена из теории, когда вычисления окончены. С самого начала было ясно, что такая частица является фиктивной, но ее использование может быть оправдано, если она никогда не появляется в конечном состоянии. Этого можно достигнуть, сделав нулевой полную вероятность рождения таких частиц.

Среди теоретических групп, которые продолжали работу над теорией полей Янга — Миллса, метод «фиктивных» частиц был серьезно вос-

принят только в Утрехтском университете, где я тогда был студентом. Мартин Д. Г. Велтман, который был моим научным руководителем, совместно с Джоном С. Беллом из Европейской Организации ядерных исследований (ЦЕРН, Женева), изучая метод фиктивных частиц, пришли к заключению, что теперь слабые взаимодействия также могут быть описаны некоторой разновидностью янг-миллсовской теории. Велтман провел также систематический анализ проблемы перенормируемости модифицированной янг-миллсовской модели (модели с массивными заряженными полями), проверяя последовательно каждый класс диаграмм. Было показано, что диаграммы, не имеющие замкнутых петель, дают только конечный вклад в полную вероятность взаимодействия. Диаграммы с одной петлей, действительно, содержат бесконечные члены, но, учитывая свойства фиктивных частиц, можно добиться точной компенсации положительных и отрицательных бесконечностей.

Когда число петель увеличивается, то число диаграмм, содержащих эти петли, резко возрастает, причем требуемые вычисления каждой диаграммы становятся весьма запутанными. В частности, проверка всех двухпетлевых диаграмм оказалась под силу только ЭВМ, для которой была составлена нужная программа алгебраических манипуляций с соответствующими вероятностями. Машина вычисляла коэффициенты перед ожидаемыми бесконечными величинами, после того как вклады всех диаграмм теории были просуммированы. Если бесконечности должны были уничтожаться в теории, то все такие коэффициенты, без исключения, должны были быть нулями. В 1970 г. был получен результат машинного счета — некоторые бесконечности все же сохранялись, хотя вероятность ошибки при счете была исключена.

□

Этот недостаток модифицированной янг-миллсовской теории ставился в вину не самой формулировке теории Янга — Миллса, а скорее, ее модификации. Массы заряженных полей вводились «руками», и в результате инвариантность по отношению к локальным изоспиновым вращениям была потеряна. В то же самое время советскими физиками Л. Д. Фаддеевым, В. Н. Поповым, Е. С. Фрадкиным и И. В. Тютиним было показано, что чистая теория янг-миллсовских полей с безмассовыми полями на самом деле может быть перенормирована. Проблемы в такой теории были связаны не только с тем, что она была нереалистической теорией, но и с тем, что она содержала дальнедействующие поля, с которыми было трудно работать.

Между тем новый успех в формулировке калибровочных теорий был достигнут усилиями Ф. Энглерта и Р. Х. Брауна из Брюссельского университета и П. Хиггса из университета Эдинбурга. Они нашли способ набить янг-миллсовские поля массой без нарушения точной калибровочной симметрии. Теперь эта техника названа механизмом Хиггса.

Фундаментальная идея механизма Хиггса заключается во введении теорию добавочного поля, которое обладает тем своеобразным свойством, что оно не исчезает в вакууме. Вакуум обычно понимается как пустое пространство, однако в физике вакуум определяется более точно, как состояние, в котором все поля имеют наименьшую возможную энергию. Для большинства полей энергия минимизируется, когда поле равно нулю по-люду или, другими словами, когда поле «выключается». Поле электронов, например, имеет свою минимальную энергию, когда электронов вообще нет. Хиггсовское поле является необычным в этом отношении. Ведение его к нулю требует затраты энергии, а его энергия становится наименьшей, когда поле равно некоторой отличной от нуля величине.

Действие хиггсовского поля создает выделенную систему, в которой может быть определена ориентация изоспина. Хиггсовское поле можно

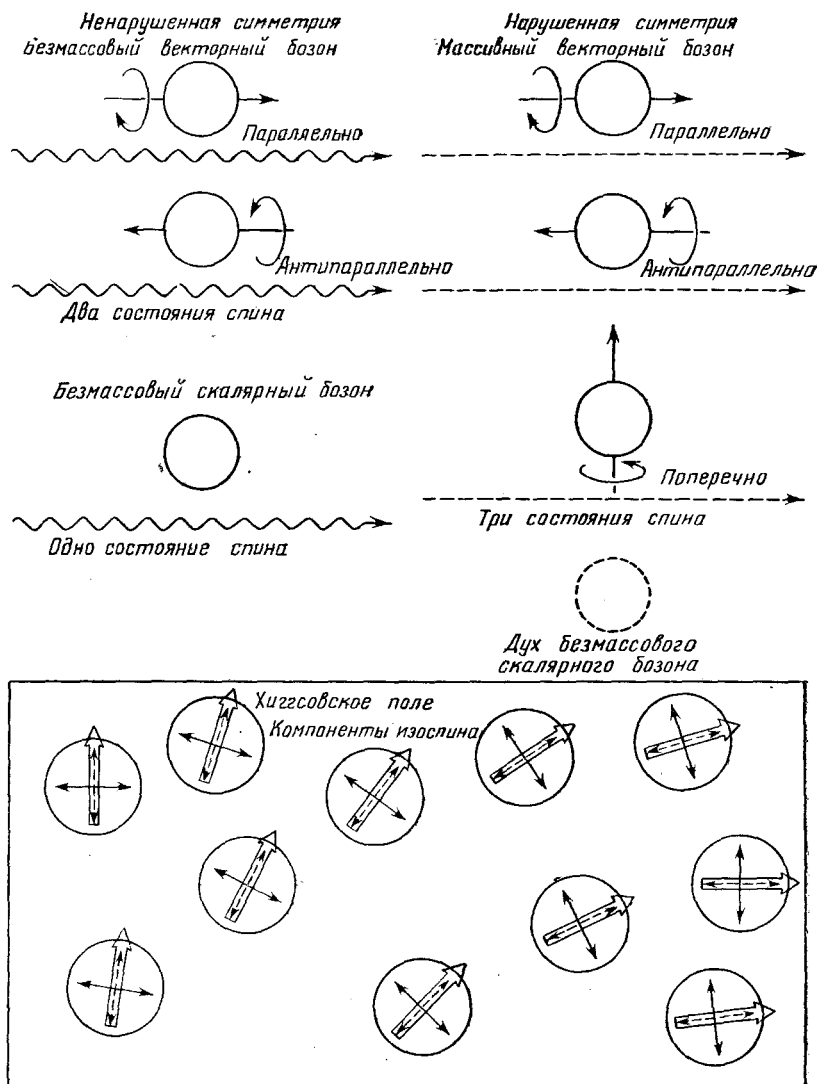


Рис. 8. Механизм Хиггса может придать массу фотоподобным векторным бозонам янг-миллсовской теории, сделав тем самым эту теорию более реалистичной.*

Бесмассовые бозоны имеют три возможные ориентации спина (параллельно, антипараллельно и перпендикулярно к направлению движения), но только два из этих состояний наблюдаемы; поперечное состояние не существует, что является характерной особенностью всех бесмассовых частиц, которые движутся со скоростью света. Если янг-миллсовские частицы приобретают массу, поперечное состояние становится наблюдаемым, и эта дополнительная мода движения должна иметь какой-то источник. В механизме Хиггса этим источником является дополнительное скалярное поле, соответствующее бесмассовому бозону со спином 0. Говорят, что янг-миллсовская частица «съедает» хиггсовский бозон, который вслед за тем становится ненаблюдаемым «духом». Хиггсовское поле задает также систему отсчета (светлые стрелки), в которой протоны можно отличить от нейтронов. Стрелка хиггсовского поля вращается совместно с другими стрелками при калибровочных преобразованиях, и, следовательно, нет направления абсолютной ориентации, но относительная ориентация изотопических стрелок может быть измерена по отношению к хиггсовской стрелке. Симметрия теории, которая без механизма Хиггса уничтожала бы все различие между протоном и нейтроном, оказывается не потерянной, а лишь скрытой.

представить как стрелку, наложенную на другие изоспиновые индикаторы в воображаемом внутреннем пространстве адрона. Отличительной чертой

стрелки хиггсовского поля является фиксированная длина, определяемая вакуумным значением этого поля. Ориентация других изоспиновых стрелок теперь может быть измерена по отношению к оси, задаваемой хиггсовским полем. Таким образом, протон можно отличить от нейтрона.

Могло бы показаться, что введение хиггсовского поля портит калибровочную симметрию теории и поэтому снова ведет к неперенормируемой теории. Однако в действительности, калибровочная симметрия не нарушается, хотя видимость такого нарушения существует. В калибровочных теориях все законы физики должны остаться инвариантными при произвольном вращении от точки к точке изоспиновых стрелок. Это утверждение подразумевает, что абсолютная ориентация стрелки не может быть определена, так как любой эксперимент, в котором измеряется ориентация, обнаружил бы отклонение в некой физической величине при повороте стрелки. При введении хиггсовского поля абсолютная ориентация стрелки также не может быть фиксирована, потому что стрелка, представляющая хиггсовское поле, тоже вращается при калибровочном преобразовании. Единственное, что можно измерить, — это угол между стрелкой хиггсовского поля и изоспиновыми стрелками, т. е., другими словами, их относительную ориентацию.

Механизм Хиггса является примером процесса, названного «спонтанным нарушением симметрии», который уже давно хорошо известен в других областях физики. Эта концепция была впервые выдвинута Вернером Гейзенбергом при описании ферромагнитных веществ. Гейзенберг указал, что теория, описывающая ферромагнетик, обладает точной геометрической симметрией, поскольку она не выделяет никакого направления в пространстве. Однако когда вещество намагничивается, одна из осей, а именно направление намагниченности, становится выделенной. Теория является полностью симметричной, а объект ее описания — нет. Точно так же янг-миллсовская теория сохраняет свою калибровочную симметрию по отношению к вращениям изоспиновых стрелок, но объекты, описываемые ею, — протоны и нейтроны, — такой симметрии не выражают.

Как же механизм Хиггса приводит к появлению масс у квантов янг-миллсовского поля? Этот процесс может быть объяснен следующим образом. Хиггсовское поле является скалярным полем, имеющим только величину, так что кванты поля должны иметь нулевой спин. Янг-миллсовские поля векторные, подобно электромагнитному полю, и представлены квантами со спином единица. Обычно частицы со спином единица имеют три спиновых состояния (ориентированных параллельно, противоположно и перпендикулярно к направлению движения), но так как янг-миллсовские частицы безмассовые и потому движутся со скоростью света, они представляют собой особый случай — у них поперечные состояния отсутствуют. Если эти частицы приобретают массу, то они должны будут потерять свой специальный статус и все три спиновых состояния должны быть наблюдаемы. В квантовой механике счет спиновых состояний проводится абсолютно точно и потому добавочное спиновое состояние для векторной частицы должно откуда-то происходить — в данном случае его источником будет хиггсовское поле. Каждый янг-миллсовский квант объединяется с одной хиггсовской частицей; в результате такой квант приобретает массу и добавочное спиновое состояние, в то время как хиггсовская частица его теряет. Образное описание этого процесса было предложено Абдус Саламом в Международном центре теоретической физики в г. Триесте; безмассовые янг-миллсовские частицы «съедают» хиггсовские частицы и набирают вес, а «проглоченные» хиггсовские частицы становятся «духами».

□

В 1971 г. Велтман предложил мне исследовать перенормируемость янг-миллсовской теории. К этому времени правила построения необходимых фейнмановских диаграмм такой теории были уже сформулированы в работах Фаддеева, Попова, Фрадкина и Тютина, а также независимо в работах Б. С. Де Витта из Техасского университета в Остине и Стенли Мандельштама из Калифорнийского университета в Беркли. Я должен был применить к этой задаче более мощные методы теории перенормировок, развитые Велтманом.

Внешние результаты были обнадеживающие, но так как теория претендовала на теорию реалистическую, необходимо было найти какие-нибудь средства для удержания янг-миллсовских полей в конечной области. Именно в это время, будучи на летней школе, я узнал, что Курт Симанчик из ДЕЗИ (ускорительный центр в ФРГ) и Бенджамин В. Ли из ФНАЛ (Национальная ускорительная лаборатория им. Ферми) добились успеха в перенормировке теоретических моделей, в которых глобальная симметрия спонтанно нарушалась. Поэтому казалось естественным в рамках янг-миллсовских теорий испытать механизм Хиггса, где нарушенная симметрия остается локальной.

Несколько простых моделей дали обнадеживающие результаты: в этих специально отобранных примерах все бесконечности сокращались вне зависимости от того, как много калибровочных частиц обменивалось, и вне зависимости от того, как много петель содержалось в фейнмановских диаграммах. Однако решающий вывод был сделан после того как теория была обработана на ЭВМ, где проверялось сокращение бесконечностей во всех возможных диаграммах с двумя петлями. В июле 1971 г. результат такой проверки стал доступен: каждая бесконечность сокращалась точно. Последующая проверка показала, что бесконечности отсутствовали также даже в чрезвычайно сложных фейнмановских диаграммах. Мой результат вскоре подтвердили другие авторы, в частности, Ли и Жан Зинн-Джустин из Центра ядерных исследований Сакле вблизи Парижа.

Первоначально янг-миллсовская теория преподносилась как модель сильных взаимодействий, но после того как она была перенормирована, интерес сконцентрировался в основном на ее применении к теории слабых взаимодействий. В 1967 г. С. Вайнберг из Гарвардского университета и независимо (но позднее) Салам и Дж. С. Уорд из Университета Дж. Гопкинса предложили модель слабых взаимодействий, основанную на одном из вариантов янг-миллсовской теории, в котором калибровочные кванты приобретали массу посредством механизма Хиггса. Они предполагали, что эту теорию можно будет перенормировать, но не доказали этого. Их попытки такого доказательства содержали много непроверенных предположений и только четыре года спустя, с помощью моих результатов, оказалось, что именно такой подкласс янг-миллсовских теорий, объединенный с механизмом Хиггса, может быть перенормирован.

Самая яркая черта слабых сил — их короткодействие: они оказывают существенное влияние только на расстояниях 10^{-15} см или, грубо говоря, на $1/100$ радиуса протона. Сила оказывается весьма слабой, прежде всего потому, что радиус ее действия слишком мал: мала вероятность для частиц приблизиться так близко друг к другу, чтобы провзаимодействовать. Малый радиус взаимодействия предполагает также, что виртуальные частицы, которыми происходит обмен в слабом взаимодействии, должны быть очень массивными. Современные оценки масс таких частиц находятся между 80 и 100 массами протона.

Модель Вайнберга — Салама — Уорда в действительности объединяет слабые силы с электромагнитными. Предположение, на котором эта

модель в конечном счете построена, связано с постулированием локальной инвариантности изотопического спина — для сохранения этой инвариантности вводятся четыре фотоподобных поля, а не три, как в исходной янг-миллсовской теории. Четвертый фотон отождествляется с некоторой изначальной формой электромагнетизма. Он соответствует выделенной силе, которая должна быть добавлена в теорию без объяснений. По этой причине

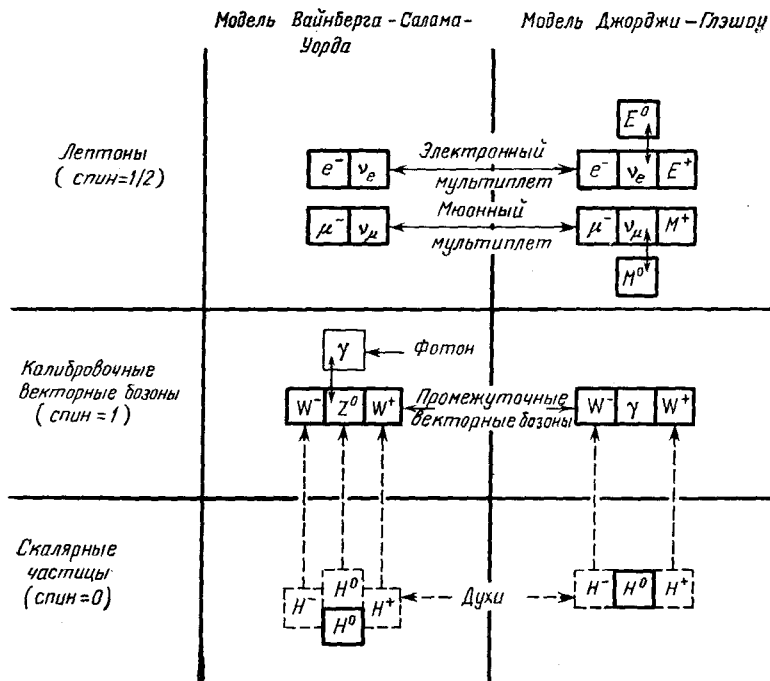


Рис. 9. Модель Вайнберга — Салама — Уорда объединяет электромагнитные и слабые силы в рамках одной локальной калибровочной теории.

Эта модель приложима к взаимодействиям частиц, названных лептонами, которые включают в себя электрон (e^-), мюон (μ^-) и два сорта нейтрино (ν_e и ν_μ). Требование того, чтобы взаимодействие между этими частицами оставалось инвариантным по отношению к локальным преобразованиям лептонного заряда (эквивалента изотопического спина), приводит к появлению четырех безмассовых полей. Три из них затем получают массу с помощью механизма Хиггса; они становятся промежуточными векторными бозонами W^+ , W^- и Z^0 . Четвертый векторный бозон оказывается фотоном. Три хиггсовские частицы «сбедаются» векторными бозонами и становятся «духами», но четвертая выживает и должна быть наблюдаемой. Эта теория не является удовлетворительным вариантом объединения электромагнитных и слабых сил, так как фотон все еще сам по себе образует семейство. Теория Г. Джорджи и Ш. Л. Глашоу предлагает более приемлемый вариант объединения, при котором фотон и массивные векторные бозоны принадлежат к одному и тому же семейству, но в настоящее время он противоречит эксперименту.

эта модель не может быть названа единой теорией поля. Силы по своей природе остаются различными — именно их перешлетение делает модель столь специфической.

Вначале все четыре поля в модели Вайнберга — Салама — Уорда имеют бесконечный радиус действия и поэтому кванты этих полей являются безмассовыми: одно из полей переносит отрицательный электрический заряд, одно — положительный заряд и два других поля являются нейтральными. Спонтанное нарушение симметрии определяется также четырьмя хиггсовскими полями — здесь каждое поле представлено скалярной частицей. Три хиггсовские частицы поглощаются янг-миллсовскими частицами, так что как заряженные янг-миллсовские поля, так и одно нейтральное поле приобретают большую массу. Эти частицы имеют общее

название массивных промежуточных векторных бозонов и им приписаны символы W^+ , W^- и Z^0 . Четвертая янг-миллсовская частица, которая является нейтральной, остается безмассовой — это есть фотон обычной теории электромагнетизма. Три хиггсовские частицы, которые отдали массу янг-миллсовским полям, становятся ненаблюдаемыми, но одна

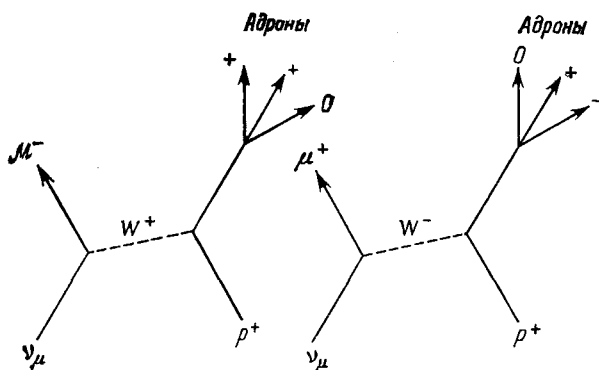
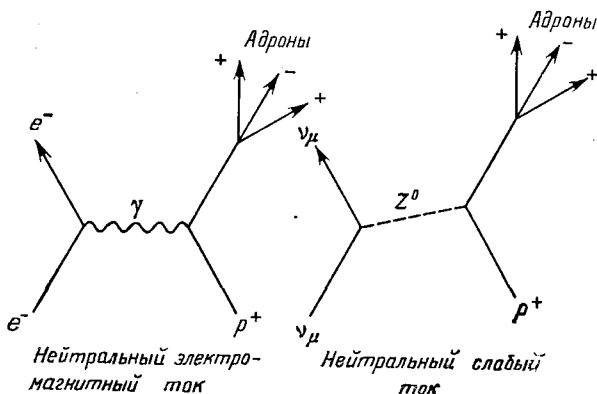


Рис. 10. Нейтральные слабые токи являются решающими для проверки модели Вайнберга — Салама — Уорда.

До некоторых пор казалось, что все слабые взаимодействия должны сопровождаться переносом электрического заряда между взаимодействующими частицами. Такие события могут быть объяснены с помощью только двух промежуточных векторных бозонов, а именно, W^+ и W^- . События, при которых не происходит переноса электрического заряда, были характерной чертой электромагнитных взаимодействий, где виртуальной частицей, которой происходит обмен, является фотон. Модель Вайнберга — Салама — Уорда предсказывает, что слабые процессы могут также идти без переноса заряда, посредником для этих слабых нейтральных токов служит нейтральный бозон Z^0 , идентичный фотону, однако имеет очень большую массу. Нейтральные слабые токи впервые наблюдались в 1973 г.

Заряженные слабые токи



Нейтральный электромагнитный ток

Нейтральный слабый ток

хиггсовская частица не поглощается и должна наблюдаться при энергиях, достаточных для ее рождения.

Наиболее интригующее предсказание модели заключалось в необходимости существования Z^0 -бозона (частицы, идентичной фотону во всех отношениях, кроме массы), который не рассматривался ранее при исследовании слабых сил. Без Z^0 -бозона любое слабое взаимодействие неизбежно влекло за собой изменение электрического заряда. События такого типа обуславливались заряженным слабым током. Z^0 -бозон обуславливает новый тип слабых взаимодействий, связанных с нейтральным слабым током. Обмениваясь Z^0 -бозоном, частицы могут взаимодействовать без передачи заряда, сохраняя свои первоначальные свойства. Слабые нейтральные токи были наблюдаемы впервые в 1973 г. в ЦЕРНе.

□

Попытки разработать удовлетворительный вариант калибровочной теории сильных взаимодействий адронов были безуспешны до тех пор, пока не был осознан фундаментальный факт: адроны не являются элементарными частицами. В 1963 г. М. Гелл-Манном из Калифорнийского Технологического института (Калтех) была предложена модель составных адронов.

Независимо от него и примерно в то же время подобная идея была высказана Ю. Нееманом из Тель-Авивского университета и Дж. Цвейгом из Калтеха. Адроны в такой модели сконструированы из более мелких частиц, названных Гелл-Манном кварками. Адрон может быть составлен из кварков двумя способами. Комбинации трех кварков образуют барионы (большую группу адронов, в которой принадлежат также протон и нейтрон). Связанные состояния кварка и антикварка образуют мезоны (другую большую

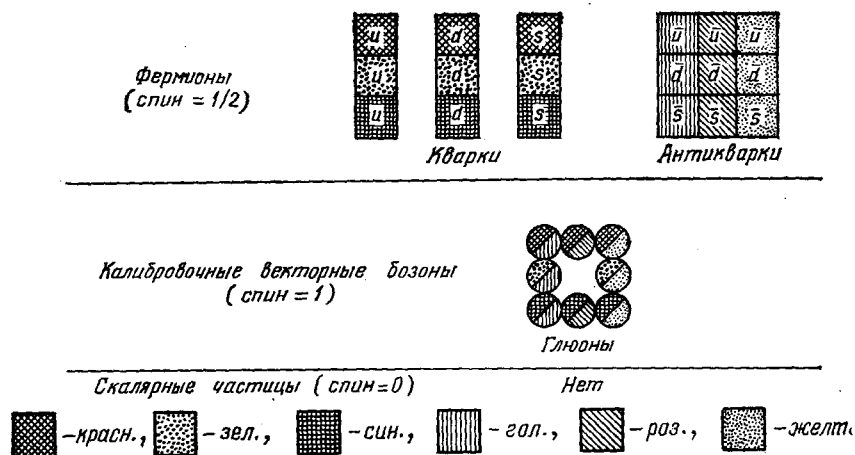


Рис. 11. В кварковой модели все адроны, включая нейтрон и протон, представляются как сложные частицы, составленные из меньших сущностей, названных кварками.

В первоначальном варианте модели предполагалось, что существуют три типа, или «аромата», кварков, обозначенных буквами u , d , s : каждый из «ароматов», как теперь говорят, должен иметь один из трех «цветов»: красный, зеленый или синий. Существуют также и антикварки с соответствующими антицветами: голубым, розовым и желтым. Взаимодействие кварков описывается теперь калибровочной теорией, основанной на инвариантности по отношению к локальным преобразованиям цвета. Необходимо ввести шестнадцать полей для сохранения этой инвариантности. Они объединяются в пары, составляя восемь безмассовых векторных бозонов, названных глюонами. Каждый глюон имеет признаки цвета и антицвета.

группу адронов, к которой, в частности, относятся пионы). Любой из известных адронов может быть представлен с помощью одной из двух упомянутых комбинаций кварков.

В первоначальной модели были введены три вида кварков, обозначаемых буквами u , d , s (от англ. *up* — вверх, *down* — вниз и *strange* — странный). Дж. Бьёркен из СЛАКа (Стэнфордский линейный ускоритель) и Шелдон Л. Глэшоу из Гарварда вскоре предложили добавить четвертый кварк, обладающий новым свойством, названным «очарованием» (*charm*.).

В 1971 г. изящные рассуждения Глэшоу, Дж. Илиопулоса из Парижа и Л. Майяни из Римского университета показали, что очарованный кварк необходим для того, чтобы устранить противоречия в калибровочной теории слабых взаимодействий. Оказалось, что если калибровочная теория и теория кварков правильны, то должен существовать очарованный кварк. Открытие в 1974 г. J/ψ -частицы, которая состоит из очарованного кварка и очарованного антикварка, подтвердило правильность модели Вайнберга — Салама — Уорда и убедило многих физиков в том, что кварковую модель в целом необходимо принимать всерьез. В настоящее время казывается, что необходимы по крайней мере еще два «аромата» (*flavours*) или сорта кварков. Их называли t и b -кварками (от англ. *top* — верх *bottom* — низ).

Любая теория сильных взаимодействий прежде всего должна дать объяснение необычным правилам построения адронов из кварков. Легко

объяснить структуру мезона: поскольку мезон состоит из кварка и антикварка, то достаточно просто предположить, что кварки обладают некоторым свойством, аналогичным электрическому заряду. Связь кварка и антикварка может быть тогда объяснена тем, что противоположные заряды притягиваются аналогично тому, как это происходит в атоме водорода. Структура барионов, однако, представляет собой значительно более серьезную проблему. Для того чтобы объяснить, как три кварка образуют связанное состояние, необходимо предположить, что три одинаковых заряда притягиваются. Теория, развитая для объяснения такой

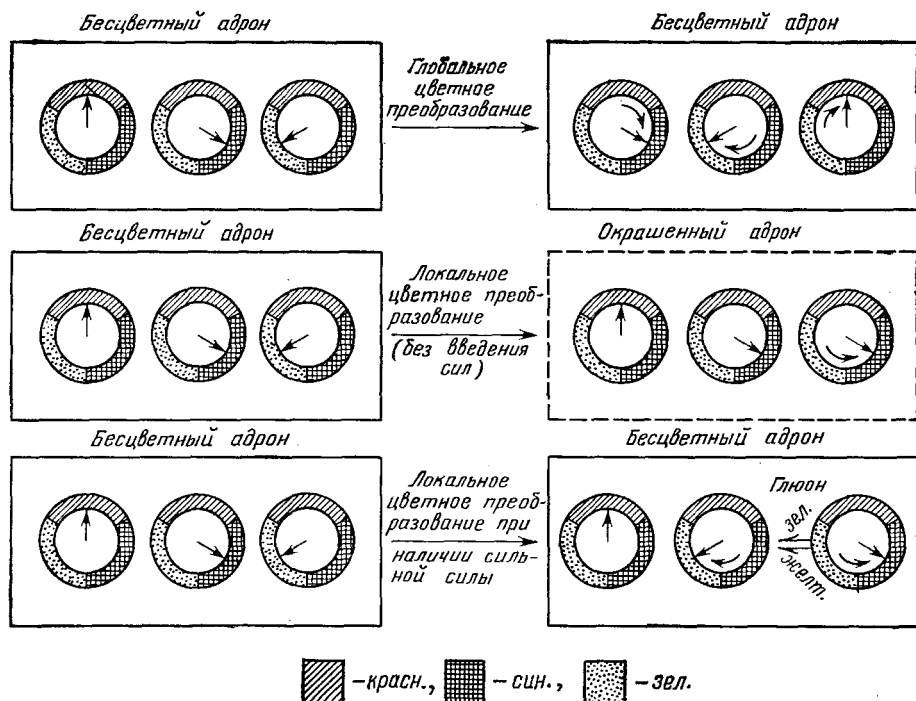


Рис. 12. Цветовая симметрия требует, чтобы все адроны оставались белыми или бесцветными даже тогда, когда цвета составляющих их кварков были изменены.

Цвет кварка можно показывать положением стрелки в воображаемом внутреннем пространстве. Глобальную симметрию осуществить легко. Если адрон состоит из трех кварков, каждый из которых «окрашен» в один из трех цветов, то любое синхронное вращение всех трех стрелок должно оставлять общий баланс цветов неизменным. Однако в отсутствие сил между кварками глобальная симметрия не может быть превращена в локальную симметрию. Если изменено положение одной из стрелок, указывающих цвет, а другие две стрелки остались неподвижными, то у адрона появится некоторый цвет. Должны быть введены силы для сохранения локальной цветовой симметрии. В частности, при изменении цвета одного из кварков должна быть испущена виртуальная частица, которая изменит цвета других кварков, так что адрон как целое останется бесцветным. Полями, которые требуются для обеспечения бесцветности всех адронов, являются восемь глюонных полей квантовой хромодинамики.

сильной связи, предсказывает существование взаимодействий описанных выше типов. Аналогом электрического заряда является свойство, названное цветом (хотя, оно, конечно, не имеет ничего общего с цветами видимого спектра). Выбор термина «цвет» объясняется тем, что с его помощью правила образования адронов могут быть сформулированы в сжатой форме: разрешены только «белые» или бесцветные комбинации кварков. Кваркам сопоставляют три основных цвета: красный, зеленый и синий; антикваркам — дополнительные «антицвета»: голубой, розовый и желтый. Каждый кварковый аромат существует в трех разновидностях или цветах, так что введение цвета утраивает число различных кварков.

Путем подходящего выбора цветов кварков можно получить белые состояния двумя различными способами: смешением трех основных цветов или смешением основного цвета со своим дополнительным. Барионы сконструированы в соответствии с первой схемой: требуется, чтобы три кварка, составляющие барион, имели различные цвета, так что в барионе обязательно представлены все три основных цвета. В мезоне каждый цвет сопровождается своим дополнительным антицветом.

Теория, объясняющая столь необычные взаимодействия, построена по аналогии с квантовой электродинамикой и называется квантовой хромодинамикой. Это неабелева калибровочная теория. Калибровочной симметрией является инвариантность по отношению к локальным преобразованиям цветов кварков.

Наглядно глобальную цветовую симметрию можно представить себе так. Цвет кварка подобно изоспину адрона может быть показан направлением стрелки в некотором воображаемом внутреннем пространстве. Последовательные вращения на треть периода изменяют цвет кварка с красного на зеленый, с зеленого на синий и с синего опять на красный. Бариону таким образом должно отвечать три стрелки — по одной на каждый из трех цветов. Глобальное преобразование симметрии по определению должно одновременно действовать на все три стрелки единым образом. Например, все три стрелки поворачиваются по часовой стрелке на треть периода. В результате такого преобразования все три кварка изменяют цвет, но все наблюдаемые свойства адронов останутся прежними. В частности, барион будет по-прежнему состоять из трех кварков различных цветов, а следовательно, останется бесцветным.

Квантовая хромодинамика требует, чтобы эта инвариантность сохранилась даже тогда, когда преобразования симметрии становятся локальными. В отсутствие сил или взаимодействий инвариантность, очевидно, исчезает. Тогда локальные преобразования могут изменить цвет одного кварка, оставив неизменными цвета других, что приведет к появлению у адрона некоторого цвета. Так же как и в других калибровочных теориях, для восстановления инвариантности по отношению к локальным преобразованиям симметрии необходимо ввести новые поля. В квантовой хромодинамике такие поля аналогичны электромагнитному полю, но значительно сложнее по своей структуре: они имеют в восемь раз больше независимых компонент, чем обычное электромагнитное поле. Именно эти поля и являются переносчиками сильных взаимодействий.

□

Кванты цветных полей называются глюонами (от англ. glue — клей; глюоны «склеивают» кварки друг с другом). Глюонов всего восемь, все они безмассовые и спин их равен единице. Другими словами, все они безмассовые векторные бозоны, подобные фотону. Подобно же фотону глюоны электрически нейтральны, но по цвету они не являются нейтральными. Каждый глюон несет на себе признак цвета и «антицвета». Возможно составить всего девять комбинаций цвета и «антицвета», но одна из них оказывается белой и исключается, оставляя окончательно восемь различных глюонных полей (см. рис. 11).

Глюоны сохраняют локальную цветную симметрию следующим образом. Кварку разрешается менять свой цвет и делать это он может независимо от других кварков, но любое изменение цвета должно сопровождаться испусканием глюона, подобно тому как электрон может изменить свою фазу, только испустив фотон. Глюон, распространяясь со скоростью света, поглощается затем другим кварком, чей цвет при этом меняется равно

настолько, чтобы в точности компенсировать первоначальное изменение цвета. Рассмотрим пример.

Пусть красный кварк меняет свой цвет на зеленый и излучает при этом глюон, несущий на себе признаки красного и «антизеленого» цветов. Затем глюон поглощается зеленым кварком и в происходящей после этого реакции зеленый цвет кварка и «антизеленый» глюона аннигилируют; остающийся в результате второй кварк оказывается красным. Следовательно, в конечном состоянии, так же как и в начальном, имеется один красный кварк и один зеленый. Таким образом, благодаря свойствам

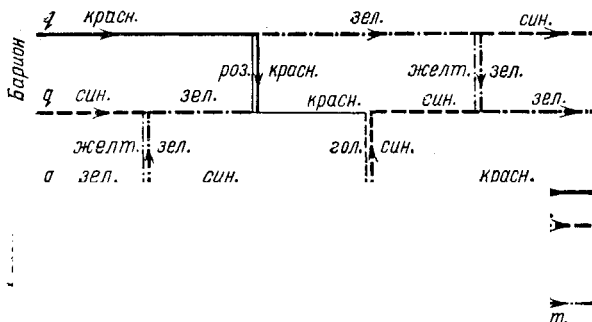


Рис. 13. Обмен глюонами сохраняет барцион (состоящий из трех кварков) или мезон (состоящий из кварка и антикварка) бесцветным.

В этом процессе суммарный цвет частиц сохраняется. Например, красный кварк может превратиться в зеленый кварк, только испустив глюон, несущий цвет красный и «антицвет» розовый; розовый цвет можно трактовать как антизеленый. Следовательно, красный цвет кварка перешел в красный цвет глюона и одновременно возникло одинаковое количество зеленого и антизеленого цвета. Если глюон поглощается зеленым кварком, то зеленый цвет кварка и антизеленый глюона аннигилируют, в результате остающийся кварк оказывается красным.

глюона адрон не может стать цветным, несмотря на то, что цвета кварков независимо изменяются от точки к точке. Все адроны остаются белыми, и сильные взаимодействия есть не что иное, как система взаимодействий, призванных сохранить это условие.

Несмотря на сложность структуры глюонного поля, квантовая электродинамика и квантовая хромодинамика удивительно похожи по форме. Сходство между фотоном и глюоном состоит в том, что они имеют одинаковый спин, оба они безмассовые и обладают равными электрическими зарядами. Тем более любопытно, что взаимодействие кварков при этом столь сильно отличается от взаимодействия электронов.

Как электроны, так и кварки образуют связанные состояния: электроны в атомах, кварки в адронах. Электроны, однако, наблюдаются и как независимые, свободные частицы. Небольшого количества энергии достаточно для ионизации атома и освобождения электрона. Одиночный же кварк не был обнаружен. Ионизация адрона кажется невозможной независимо от того, каким большим запасом энергии мы обладаем. Кварки, очевидно, связаны столь сильно, что не могут быть отделены друг от друга. Парадокс, однако, состоит в том, что исследование внутренней структуры адронов показывает, что кварки движутся свободно, т. е., так, как будто они никогда не были связаны.

Глюоны также никогда не наблюдались непосредственно в эксперименте. Само наличие глюонов в теории вызывает возражения, подобные тем, что выдвигались против чистой, безмассовой теории Янга — Миллса. Если бы безмассовые частицы, столь сильно похожие на фотон, существовали, их можно было бы легко обнаружить и они были бы давно уже

известны. Конечно, может быть возможно было бы придать глюонам массу с помощью механизма Хиггса. Однако попытка сделать таким способом ненаблюдаемыми восемь глюонов приводит к большим осложнениям. Более того, эта масса должна быть достаточно большой, иначе глюоны уже рождались бы в современных экспериментах на ускорителях высоких энергий. С другой стороны, если масса слишком велика, то радиус действия сил, связывающих кварки, становится слишком маленьким.



Возможное разрешение этого противоречия было найдено не на пути изменения теории цветных полей, а при более глубоком и полном исследовании их свойств. При обсуждении перенормируемости квантовой электродинамики я уже подчеркивал, что даже одиночный электрон окружен облаком виртуальных частиц, которые непрерывно излучаются и тут же вновь поглощаются. К виртуальным относятся не только нейтральные частицы, такие как фотоны, но также и пары противоположно заряженных частиц, таких как электрон и его античастица — позитрон. Именно заряженные виртуальные частицы этого облака при обычных условиях ведут к экранировке «бесконечного» отрицательного затравочного заряда электрона. Вблизи затравочного заряда электрон-позитронные пары слегка поляризуются: виртуальные позитроны под действием притяжения затравочного заряда оказываются в среднем ближе к нему, чем виртуальные электроны, которые от него отталкиваются. В результате затравочный заряд частично нейтрализуется. То, что видит наблюдатель на больших расстояниях, есть разность между величинами затравочного заряда и экранирующего заряда виртуальных позитронов. Только при приближении на расстояния, меньшие 10^{-10} см, незаэкранированное действие затравочного заряда становится существенным.

Разумно предположить, что тот же самый процесс должен происходить и для цветных зарядов. Так и происходит в действительности. Красный кварк (рис. 14) окружен облаком, состоящим из пар кварков и антикварков, и свободные заряды в этом облаке притягиваются к центральному кварку и стремятся заэкранировать его заряд. Однако в квантовой хромодинамике имеется конкурирующий эффект, какой отсутствует в квантовой электродинамике. В то время как фотон электрически нейтрален и, следовательно, не может непосредственно влиять на экранирующие центральный заряд электроны, глюон обладает цветным зарядом. (Это различие отражает тот факт, что квантовая электродинамика — абелева теория, а квантовая хромодинамика — неабелева.) Виртуальные глюонные пары также образуют облако вокруг заряженного кварка, но оказывается, что глюоны стремятся увеличить цветной заряд, а не уменьшить его. Все происходит так, будто красная компонента глюона притягивается к красному кварку и, таким образом, добавляет свой заряд к суммарному эффективному заряду. Если существует не более 16-ти сортов или ароматов кварков (в настоящее время известно только шесть), то эффект глюонного «антиэкранирования» имеет доминирующее значение.

Такое необычное поведение глюонов следует из довольно сложных вычислений, и трактовка результатов зависит от способа вычислений. Когда я провел вычисления, я заметил, что силы, ответственные за такое необычное поведение, являются аналогом цветного глюонного магнитного поля. Существенно, однако, и то, что виртуальные глюоны могут испускаться по одному, в то время как виртуальные кварки появляются только как кварк-антикварковые пары. Одиночный глюон, несущий цветной заряд, стремится увеличить силу притяжения между двумя кварками, обладающими различными цветными зарядами.

В результате такого «антиэкранирования» эффективный цветной заряд кварка растет с увеличением расстояния от кварка. Отстоящий на некотором расстоянии кварк реагирует на комбинированное поле центрального кварка и усиленные глюонные заряды; на небольшом расстоянии, когда уже удалось проникнуть внутрь глюонного облака, эффективно действует только небольшой затравочный заряд. Таким образом, кварки в адроне ведут себя так, как будто они связаны резиновыми лентами: на

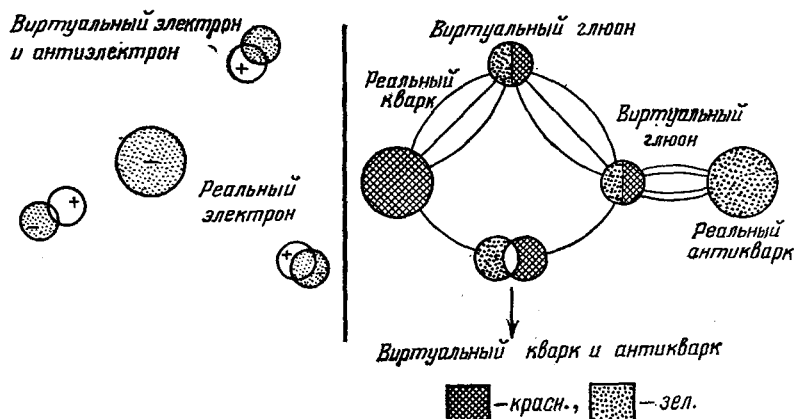


Рис. 14. Поляризация вакуума в какой-то мере объясняет необычный характер сил, которые предоставляют кваркам полную свободу движения внутри адрона, но запрещают изоляцию кварков или глюонов.

В квантовой электродинамике (левая часть рисунка) виртуальные электрон-позитронные пары окружают любой изолированный заряд, например, электрон. Из-за электростатических сил положительно заряженные позитроны стремятся быть ближе к отрицательному заряду электрона и, таким образом, частично уменьшить его. Наблюдаемый заряд электрона есть разность между «голым» зарядом и экранирующим зарядом виртуальных позитронов. Подобным же образом пары виртуальных кварков уменьшают силы, действующие между реальным кварком и реальным антикварком. В квантовой хромодинамике имеется, однако, и конкурирующий эффект, который отсутствует в квантовой электродинамике. Поскольку глюоны имеют цветной заряд (в отличие от фотонов, не имеющих электрического заряда), виртуальные глюоны также оказывают влияние на величину цветных сил, действующих между кварками. Глюоны не экранируют заряд кварка, а усиливают его. В результате оказывается, что цветной заряд слабый, а кварки движутся вблизи него свободно. Для того чтобы развести два кварка на большое расстояние, понадобилась бы, может быть, бесконечно большая энергия.

очень малых расстояниях, когда ленты не натянуты, кварки движутся почти независимо, но на больших расстояниях, когда ленты сильно натянуты, кварки оказываются прочно связанными.

Поляризация за счет виртуальных глюонов приводит к тому, что поведение кварков на малых расстояниях может быть учтено с разумной точностью. Когда связи слабые, можно проводить вычисления движения частиц с большой достоверностью. Характер взаимодействия на больших расстояниях и, главным образом, запрет кваркам и глюонам появляться как свободными частицам, вероятно, может быть отнесен за счет того же механизма глюонной антиэкранировки. Похоже, что когда пытаются раздвинуть два цветных заряда, сила притяжения между ними становится бесконечно большой, а потому понадобилось бы бесконечно большое количество энергии для раздвижки зарядов на макроскопическое расстояние. Явление прочного удержания кварков может быть связано с определенными математическими свойствами калибровочной теории. Уверенность и надежду вселяет то, что постоянное удержание (или конфайнмент) действительно было найдено в некоторых существенно упрощенных моделях теории. В полной теории все методы расчетов оказываются непригодными, так как силы становятся очень большими, но, тем

не менее, основные принципы кажутся обоснованными. Кварки и глюоны могут, следовательно, прочно удерживаться внутри адронов.

Если господствующий вариант квантовой хромодинамики окажется правильным, то цветовая симметрия есть точная симметрия и цвета частиц совершенно не различимы. Такая теория есть чисто калибровочная теория именно такого вида, который был предложен первоначально Янгом и Миллсом. Калибровочные поля в ней по сути своей дальнodelействующие и имеют много общего с фотонным полем. Однако квантовомеханические ограничения на эти поля столь сильны, что наблюдаемые взаимодействия совершенно не похожи на электромагнитные и даже приводят к пленению целого класса частиц.

□

Даже в тех случаях, когда калибровочные теории правильно описывают реальность, они не всегда удобны. Расчеты, которые необходимо сделать для предсказания результатов эксперимента, громоздки и утомительны и, за исключением квантовой электродинамики, редко можно добиться большой точности. Главным образом именно из-за этих технических и практических трудностей проблема удержания кварков до сих пор не решена. Уравнения, описывающие протон в терминах кварков и глюонов, приблизительно так же сложны, как и уравнения, описывающие ядро средней величины в терминах протонов и нейтронов. Ни одна из этих систем уравнений не может быть решена строго.

Несмотря на эти ограничения, калибровочные теории внесли огромный вклад в понимание природы элементарных частиц и их взаимодействий. Наиболее существенным является даже не философски притягательный принцип локальной симметрии и даже не успех отдельных теорий, а постоянно растущее осознание того, что класс теорий, которые мы сейчас рассматриваем, включает в себя все возможные теории для любой совокупности элементарных частиц, взаимодействие между которыми не слишком велико. Эксперименты показывают, что если расстояние между частицами становится меньше, чем 10^{-14} см, общее взаимодействие между ними, включая эффекты всевозможных сил, известных или же еще нет, действительно становится слабым. (Кварки — особый случай: хотя взаимодействия между ними не малы, но эти взаимодействия могут быть отнесены за счет действия виртуальных частиц, а взаимодействие виртуальных частиц между собой уже не такое сильное.) Необходимо поэтому постоянно сравнивать с экспериментом существующие калибровочные теории.

□

Математическая структура калибровочных теорий жестко фиксирована, но остается некоторая свобода в подгоночных параметрах. Это означает, что предсказываемая величина взаимодействия между частицами зависит не только от структуры теории, но также и от значений, приписываемых определенным свободным параметрам, которые должны рассматриваться как мировые константы. Теория остается самосогласованной независимо от выбора этих констант, но экспериментальные предсказания существенно зависят от значений, приписываемых константам. Хотя константы могут быть измерены в процессе эксперимента, значения их не могут быть получены из самой теории. Примерами мировых констант являются заряд электрона и массы элементарных частиц, таких как электрон и кварки.

Сила калибровочных теорий в том, что они оставляют свободными относительно небольшое число таких параметров: около 18 констант, которые необходимо зафиксировать, ответственны за все известные силы.

Запутанная проблема сильного взаимодействия элементарных частиц, казавшаяся неразрешимой 15 лет назад, может быть теперь распутана с помощью теории, включающей лишь горстку свободных параметров. Все эти параметры, за исключением трех, достаточно малы, а потому ими можно пренебречь.

Далее, если число свободных параметров было уменьшено до поддающегося управлению небольшого числа, они, эти параметры, остаются существенной и неотъемлемой частью теории. Нет никаких объяснений

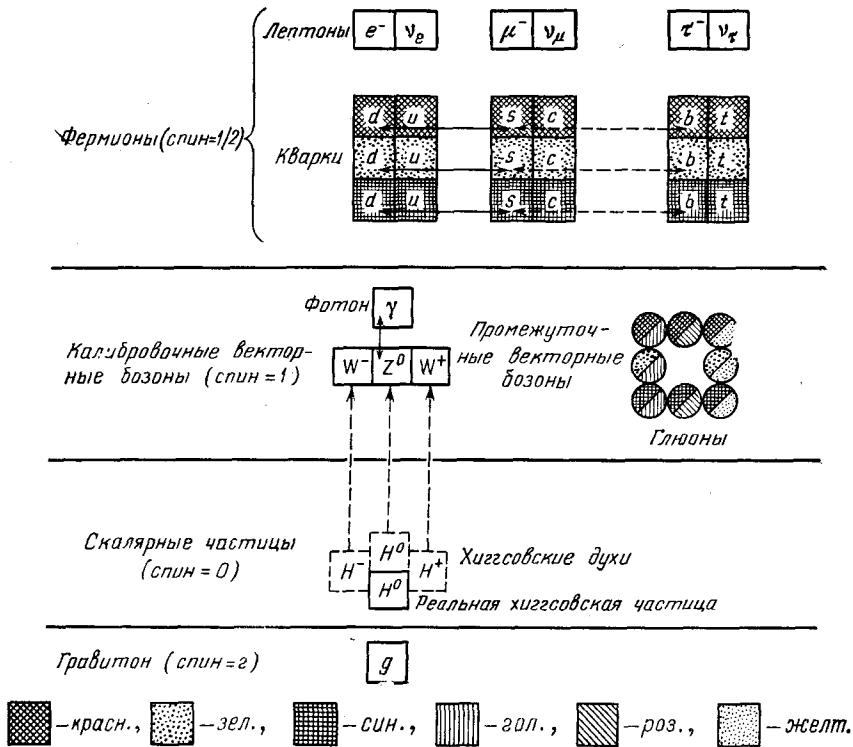


Рис. 15. Стандартная модель взаимодействий элементарных частиц описывает четыре известные силы в природе посредством трех неабелевых калибровочных теорий.

Фундаментальными частицами материи являются шесть лептонов и шесть сортов (ароматов) кварков; при этом каждый аромат представлен тремя цветами. Переносчиками электромагнитных и слабых сил являются калибровочные частицы модели Вайнберга — Салама — Уорда, а именно, безмассовый фотон и триплет очень массовых векторных бозонов — W^+ , W^- и Z^0 . Сильные силы передаются восемью безмассовыми глюонами квантовой хромодинамики. Гравитация возникает как результат обмена безмассовыми частицами со спином 2 — гравитонами, которые описываются еще одной локальной калибровочной теорией — общей теорией относительности. Кроме того, существует одна некомпенсированная хиггсова частица — массивная и электрически нейтральная. В ближайшие годы поиск массивных векторных бозонов и хиггсовской частицы послужит проверкой этих теорий.

того, почему параметры принимают те или иные значения. Фундаментальные вопросы, которые калибровочные теории оставляют нерешенными, концентрируются вокруг этих мировых констант. Почему кварки и другие элементарные частицы имеют ту массу, которую они имеют? Что определяет массу хиггсовской частицы? Что определяет фундаментальную единицу электрического заряда или величину взаимодействия цветных зарядов? Ответы на эти вопросы могут быть получены не в рамках калибровочных теорий, а только с помощью более общей теории.

При поиске более общей теории естественно попытаться еще раз применить процедуру, однажды принесшую успех. Очевидной программой, следовательно, является поиск глобальных симметрий и изучение след-

ствий, связанных с локализацией этих симметрий. Принцип этот не является обязательным, но желательно тем не менее его опробовать. Так же как максвелловская теория объединила электричество и магнетизм, а модель Вайнберга — Салама — Уорда связала электромагнитные и слабые взаимодействия, так, возможно, будет найдена некоторая более широкая теория, способная включить в себя модель Вайнберга — Салама — Уорда и квантовую хромодинамику. Такая теория в принципе могла бы быть основана на модели существующих калибровочных теорий. Необходимо найти более общую симметрию природы.

Локализация такой симметрии приведет к появлению сильных, слабых и электромагнитных сил. В придачу к этому, возможно, придется ввести дополнительные сверхслабые силы, которые до сих пор не наблюдались.

Работа над такими теориями сейчас в самом разгаре. В последнее время усилия направлены на изучение симметрий, допускающих совместные преобразования кварков и лептонов. (Лептон — класс частиц, к которому, в частности, принадлежит электрон.) С моей точки зрения, схемы, предложенные до сих пор, не являются убедительными. Высокая степень симметрии, которая в них предполагается, должна быть нарушена, для того, чтобы объяснить большую разницу в силах взаимодействия. Это требует введения некоторого количества хиггсовских полей. Получающаяся теория содержит столь же много произвольных констант, как и менее общие теории, которые она заменяет.

Недавно появился совершенно другой и на многое претендующий подход к проблеме объединения. Он получил названия «суперсимметрия» и «супергравитация». В этом подходе объединяются в одной группе частицы с различным значением спина, хотя до сих пор считалось, что частицы с различными спинами должны принадлежать к разным группам.

Выгодность суперсимметричных теорий еще должна быть продемонстрирована, но на них уже возлагается много надежд. Они дают не оставляющий большого произвола рецепт описания нескольких сотен частиц, включая гравитон, в терминах небольшого числа свободных подгоночных параметров. Пока что полученные результаты не слишком хорошо описывают реальный мир, но то же было и с первоначальной теорией Янга и Миллса, предложенной в 1954 г.

Теория, которую ищут очень давно и с большим энтузиазмом, должна объединить квантовую теорию поля и общую теорию относительности. Гравитационное поле, кажется, с неизбежностью приводит к квантовым теориям, которые не могут быть перенормируемы. На очень малых расстояниях (10^{-33} см) и при очень малых временах (10^{-44} с) становятся важными квантовые флуктуации пространства-времени, что уже само по себе ставит вопрос о самом смысле пространственно-временного континуума. Здесь проходит современная граница не только калибровочных теорий, но и всех известных физических теорий.

ЛИТЕРАТУРА

- Yang C. N., Mills R. L.— Phys. Rev., 1954, v. 96, p. 191.
 Weinberg S.— Scientific American, July 1974, v. 231, p. 50.
 Glasgow S. L.— Ibid., October 1975, v. 233, p. 38.