

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

**ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И СИЛ\*)***Х. Джорджи*

*На расстояниях порядка  $10^{-29}$  см мир может быть очень простым и содержать лишь один сорт частиц и один вид взаимодействия. Если предлагаемая единая теория верна, вся материя нестабильна.*

Нет ничего проще, чем элементарная частица: это неделимый кусочек вещества без внутренней структуры, форма и размер которого не поддаются измерению. Следовало бы ожидать соответствующей простоты в теориях, описывающих такие частицы и силы их взаимодействия; по крайней мере, структура мира должна была бы объясняться с привлечением минимального числа частиц и сил. Оценивая по этому критерию экономичности, можно констатировать, что описание природы, развитое на протяжении нескольких последних лет, достигло заметных успехов. Материя построена лишь из двух типов элементарных частиц: лептонов, таких, как, например, электрон, и кварков, являющихся конститuentами (составляющими частями) протона, нейтрона и других родственных им частиц. Четыре основные силы действуют между элементарными частицами. Гравитация и электромагнетизм уже давно известны в макромире; слабые и сильные взаимодействия проявляются только в ядерных процессах. В принципе, с помощью этого набора частиц и сил можно объяснить всю наблюдаемую иерархию материальных структур — от атомных ядер до звезд и галактик.

Понимание природы на таком уровне детализации является замечательным достижением; тем не менее можно представить себе более простую теорию. Существование двух принципиально разных типов элементарных частиц нельзя признать вполне удовлетворительным; в идеальном случае должно быть достаточно одного типа. Точно так же существование четырех сил кажется неоправданным излишеством; одна сила могла бы объяснять все взаимодействия элементарных частиц. Таковы честолюбивые планы новой теории, которая сейчас уже обещает, по крайней мере, частичное объединение в указанных направлениях. Эта теория не охватывает гравитацию, которая до сих пор является слабейшей из всех известных сил и может иметь фундаментальные отличия от остальных. Однако за выче-

\*) *Georgi H. A Unified Theory of Elementary Particles and Forces. — Scientific American, April 1981, v. 244, pp. 40—55. — Перевод Г. Г. Тахтамышева. Ховард Джорджи — профессор Гарвардского университета, США.*

© Scientific American, Inc., 1981.

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1982.

том гравитации теория объединяет все элементарные частицы и силы.

Первым шагом в построении единой теории была демонстрация того, что слабое, сильное и электромагнитное взаимодействия могут быть описаны теориями, имеющими одни и те же основные черты. Три взаимодействия остаются различными, но их действие проявляется через один и тот же механизм. В процессе продвижения по этому пути была выявлена глубокая связь между слабым взаимодействием и электромагнетизмом — связь, подразумевающая еще более великий синтез. Эта новая теория является сейчас основным претендентом на осуществление такого синтеза. Лептоны и кварки объединяются в одно семейство, причем существует возможность перехода одного типа частиц в другой. В то же время слабое, сильное и электромагнитное взаимодействия понимаются как разные аспекты единого фундаментального взаимодействия. Такая единая теория с одним лишь типом частиц и с одним взаимодействием (плюс гравитация) может считаться образцом экономности.

Известно, что лептоны и кварки весьма различны по своим свойствам. Как же они могут быть объединены в одно семейство? Слабое, сильное и электромагнитное взаимодействия отличаются величиной, радиусом действия и другими характеристиками. Как можно описывать их, исходя из некоторого единого взаимодействия? Единая теория не пытается скрыть эти различия; она лишь утверждает, что они не являются фундаментальными. Эти различия заметны в основном из-за того, что вселенная в настоящее время находится в холодном состоянии и частицы в среднем обладают низкой энергией. Если бы представилась возможность провести эксперименты при сверхвысоких энергиях, искомое единство предстало бы перед нами во всей очевидности и простоте. Лептоны и кварки свободно переходили бы друг в друга, и все три взаимодействия обладали бы одной и той же силой.

По оценкам энергия, необходимая для того, чтобы наблюдать единство частиц и сил в таком захватывающем виде, должна быть порядка  $10^{15}$  ГэВ. (1 ГэВ — это энергия, сообщаемая электрону, когда он ускоряется разностью потенциалов в 1 млрд. вольт.) Эта энергия превышает возможности даже крупнейших планируемых ускорителей в 10 триллионов раз, и маловероятно, что такая энергия будет когда-либо получена в лабораторных условиях. Может показаться, что теория, таким образом, никогда не будет проверена, но это не так; теория делает определенные предсказания для вполне достижимых энергий.

Во-первых, эта теория дает логическое объяснение некоторых обнаруженных особенностей физического мира, которые до сих пор казались произвольными и непонятными. Это касается квантования электрического заряда: известно, что заряд всегда наблюдается порциями некоторого наименьшего фундаментального заряда. С ее помощью можно сделать оценку относительной силы трех взаимодействий (при обычной лабораторной энергии), которая находится в разумном согласии с экспериментальными результатами. Помимо этого появляется возможность объяснения избытка вещества по сравнению с антивеществом во Вселенной. Не менее важно и то, что новая теория предсказывает новые явления, которые не следуют из предшествующих теорий. Наиболее замечательным является предсказание распада протона — частицы, которая рассматривалась до сих пор как абсолютно стабильная. Если протон распадается, то нестабилен и атом и все вещество не вечно.

Единая теория не намерена перечеркивать существующие теории слабого, сильного и электромагнитного взаимодействий. Наоборот, все эти теории включаются в структуру большой теории. Поэтому, чтобы

понять природу и истоки единой теории, лучше всего начать с теорией, являющихся ее самостоятельными компонентами, с тех сил, которые они описывают, и с элементарных частиц, на которые эти силы действуют.

□

Очевидно, что различия между лептонами и кварками весьма существенны. Лептонов известно шесть, и одним из них является электрон, который может рассматриваться как прототип. Он обладает сравнительно малой массой, около 500 000 эВ в энергетических единицах, и имеет единичный электрический заряд, который условились называть отрицательным. Два других лептона, мюон и тау-частица, имеют такой же заряд и очень похожи на электрон во всем, кроме массы. Мюон массивней электрона более чем в 200 раз; тау-лептон, который открыли лишь пять лет назад, имеет массу почти в 3500 раз превышающую массу электрона.

Остальные лептоны — это три сорта нейтрино, которые электрически нейтральны и имеют очень малую массу (если они вообще ее имеют). С каждым заряженным лептоном связан один сорт нейтрино. Кроме того, для каждого из шести лептонов существует антилептон с такой же массой, но с противоположным знаком электрического заряда, т. е. антиэлектрон (или позитрон), антимюон и антитау-частица все имеют заряд  $+1$ . Все антинейтрино, как и нейтрино, не имеют электрического заряда.

Лептоны существуют как свободные частицы, но никому еще не удавалось изучать изолированные кварки. Кварки существуют лишь как конститuentы частиц, называемых адронами, — большого и разнообразного класса, который включает в себя протон, нейтрон, пи-мезон и свыше 100 других известных частиц.

Имеются убедительные доказательства существования пяти типов кварков, которые принято обозначать символами  $d$ ,  $u$ ,  $s$ ,  $c$  и  $b$  \*). Шестой тип, обозначаемый символом  $t$  \*\*), был предсказан, но пока что не обнаружен. Эти разные типы кварков обычно называются ароматами; кроме того, кварки имеют дополнительный признак, называемый цветом. (И аромат, и цвет являются просто условными обозначениями, не имеющими ничего общего с вкусовыми, зрительными или иными ощущениями.) Каждый аромат кварка существует в трех цветах: красный, зеленый и синий. Цветовой признак и создает основное различие между лептонами и кварками. Пять или шесть ароматов кварков более или менее соответствуют шести разновидностям лептона, но аналога кваркового цвета у лептонов нет. Это различие имеет экспериментально наблюдаемое следствие. Сильное взаимодействие — это силы, действующие между цветами, и, поскольку лептоны не имеют цвета, они нечувствительны к сильному взаимодействию.

Еще один отличительный признак кварков — это их электрический заряд. Кварки  $d$ ,  $s$  и  $b$  имеют заряд  $-1/3$ , тогда как заряд кварков  $u$ ,  $c$ , и  $t$  равен  $+2/3$ . Антикварки, которые обозначаются  $\bar{d}$ ,  $\bar{u}$  и т. д., имеют противоположные электрические заряды; следовательно, заряд антикварка  $\bar{d}$  равен  $+1/3$ , а заряд антикварка  $u$  равен  $-2/3$ . Антикварки характеризуются также противоположными цветами, а именно антикрасным, антизеленым и антисиним.

Чтобы образовать адрон, кварки могут комбинироваться двумя путями. Либо объединяются три кварка, по одному кварку каждого цвета, либо

\*) Эти символы ассоциируются с английскими словами: down, up, strange, charm, bottom. (Прим. перев.)

\*\*) Соответственно от top. (Прим. перев.)

кварк с каким-либо цветом присоединяет к себе антикварк с соответствующим антицветом. Эти комбинации называются бесцветными и, как оказывается, помимо этого, обладают еще одной важной особенностью. Во всех разрешенных комбинациях дробные электрические заряды кварков складываются так, что дают целый суммарный заряд; никакие другие комбинации (кроме образованных путем сложения уже разрешенных комбинаций) не обладают этим свойством. Кварковый состав протона  $uud$ , что дает полный электрический заряд  $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3}$ , или  $+1$ . Нейтрон состоит из кварков  $udd$  с зарядами  $\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3}$ , что в итоге дает нуль. Положительный пи-мезон сделан из кварка  $u$  и антикварка  $\bar{d}$ ; заряды его компонентов  $+2/3$  и  $+1/3$  дают в сумме  $+1$ .

Тот факт, что все атомы электрически нейтральны, заставляет предполагать, что заряд протона в точности равен заряду электрона, хотя, конечно, знаки их зарядов противоположны. По тем же соображениям заряд нейтрона должен быть строго равен нулю. Из этих наблюдений следует, что заряды кварков должны быть в точности пропорциональны зарядам лептонов. Например, заряд

кварка должен составлять в точности одну треть от заряда электрона, и это соотношение не может носить приближенный характер. Эта точная связь между независимыми частицами представляет собой еще одну, казавшуюся произвольной, особенность, которая находит такое естественное объяснение в рамках единой теории.

Обычно лептоны и кварки разбивают на три поколения. Каждое поколение состоит из заряженного лептона, соответствующего ему нейтрино и двух кварков, один из которых имеет заряд  $-1/3$ , а второй  $+2/3$ .

	Лептоны		Кварки					
Третье поколение	$\nu_e$	0	$t$	$+2/3$	$t$	$+2/3$	$t$	$+2/3$
	$e^-$	-1	$b$	$-1/3$	$b$	$-1/3$	$b$	$-1/3$
Второе поколение	$\nu_\mu$	0	$c$	$+2/3$	$c$	$+2/3$	$c$	$+2/3$
	$\mu^-$	-1	$s$	$-1/3$	$s$	$-1/3$	$s$	$-1/3$
Первое поколение	$\nu_e$	0	$u$	$+2/3$	$u$	$+2/3$	$u$	$+2/3$
	$e^-$	-1	$d$	$-1/3$	$d$	$-1/3$	$d$	$-1/3$




 -красный, 
  -зеленый, 
  -синий.

Рис. 1. Лептоны и кварки отличаются многими важными свойствами; поэтому, вообще говоря, они относятся к разным семействам.

Одно из наиболее заметных различий заключено в электрическом заряде, который здесь приведен: заряды лептонов целые, а кварков — дробные. Далее, лептоны существуют в свободном виде, а кварки лишь являются составляющими более сложных частиц, называемых адронами. Обычно все лептоны и кварки подразделяются на три поколения; в обычном веществе есть только частицы из первого поколения. Кварк  $t$  экспериментально еще не наблюдался.

Первое поколение состоит из электрона, электронного нейтрино, кварка  $d$  и кварка  $u$ . Поскольку кварки существуют в трех цветах, в этом поколении есть восемь частиц. Все атомы и вся обычная материя может быть собрана из этих восьми частиц; представители старших поколений наблюдаются почти исключительно в лабораторных экспериментах с ускоренными частицами. В единой теории эти три поколения описываются независимо, но полностью аналогичным образом. Поэтому в дальнейшем я буду говорить только о первом поколении.

□

Из тех трех взаимодействий, которые здесь рассматриваются, строгая теория впервые была построена для электромагнетизма; точность этой теории до сих пор остается непревзойденной. Теория эта называется квантовой электродинамикой, или, сокращенно, КЭД. Она была развита в течение примерно 25 лет, причем основные успехи были достигнуты в 50-х годах

нашего столетия. Теория электромагнетизма может служить моделью для построения теорий других взаимодействий.

Концепция взаимодействия тесно связана с концепцией заряда. Электрический заряд — это свойство, присущее частице, реагирующей на воздействие электромагнитной силы, и реакция определяется количеством заряда. Когда две заряженные частицы приближаются друг к другу, между ними возникает сила притяжения или отталкивания, величина которой прямо пропорциональна произведению зарядов. В то же время эта сила обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами. Эти два правила составляют закон Кулона для электрических сил. Важно отметить, что, если одна из частиц имеет нулевой заряд, притяжения или отталкивания не возникает; такие нейтральные частицы не поддаются прямому воздействию электромагнитных сил.

Насколько сильно электромагнитное взаимодействие между заряженными частицами? В каждом отдельном случае ответ зависит от зарядов частиц и расстояния, их разделяющего, однако этот ответ всегда может быть получен с помощью закона Кулона. Допустим, мы умножили силу, действующую между двумя частицами, на квадрат расстояния между ними; это произведение есть мера силы электромагнитного взаимодействия, которая не зависит от расстояния между частицами, хотя зависит от выбора единиц, в которых измеряется это расстояние. Разделив на скорость света и постоянную Планка (две величины органически присущие структуре релятивистского квантовомеханического мира), получим результат, который уже не зависит от выбора единиц. Этот результат является безразмерным числом; величина его одна и та же — производим ли мы измерения в граммах, сантиметрах и секундах или в тоннах, футах и годах, конечно, при условии, что скорость света и постоянная Планка выражаются в тех же единицах, которые употребляются для измерений.

Очевидно, что сила любого данного электромагнитного взаимодействия все еще зависит от величины участвующих зарядов. Например, если удвоить величину каждого заряда, взаимодействие усилится в четыре раза. Однако поскольку существует неделимая величина электрического заряда, взаимодействие двух  $e$  или двух  $e$  играет специальную роль. Все частицы, наблюдаемые по отдельности (т. е. все, за исключением кварков), имеют заряды, равные целому числу зарядов протона, поэтому протон-протонное взаимодействие выступает в качестве меры минимальной силы электромагнитного взаимодействия. Эта величина называется электромагнитной константой связи и является абсолютной мерой силы взаимодействия. Экспериментальное определение константы связи дает величину порядка  $1/137$ . Поскольку эта величина меньше единицы, электромагнитное взаимодействие можно считать довольно слабым.

Следует отметить, что квантование заряда не требуется и не предсказывается в квантовой электродинамике; скорее, это является экспериментальным фактом. Эта теория работала бы так же хорошо, если бы наблюдались частицы с дробным зарядом и даже иррациональные заряды, как, например, число  $\pi$  или  $\sqrt{2}$ .

В квантовой электродинамике взаимодействие двух заряженных частиц, например двух электронов, связывается с обменом третьей частицы. Промежуточной частицей является фотон — квант электромагнитного излучения. Фотон — это безмассовая частица, не имеющая собственного электрического заряда, которая движется (по определению) со скоростью света. Описание электромагнитных сил посредством обмена фотонами позволяет избежать введения затруднительного понятия действия на расстоянии. Взаимодействие строго ограничено двумя точечными событиями: испусканием и поглощением фотона. Правда, одновременно такое описание вводит

другую проблему: такой обмен фотоном будет нарушать законы природы, которые требуют, чтобы сохранялись энергия и импульс.

Очевидность этого нарушения может быть показана на примере, когда два электрона удерживаются неподвижно на небольшом расстоянии друг от друга с помощью пружинок. Поскольку мы можем измерить силу, действующую между электронами, мы должны полагать, что обмен фотонами происходит. Обычно, когда излучается фотон, он уносит с собой часть энергии и импульса излучающей частицы; точно так же, когда фотон поглощается, он добавляет энергию и импульс поглощающей частице. Таким образом, полное количество энергии и импульса системы не меняется. В рассматриваемом примере, однако, излучающая частица остается неподвижной, так что ее энергия и импульс не меняются, и то же самое справедливо относительно поглощающей частицы. Очевидно, обменный фотон

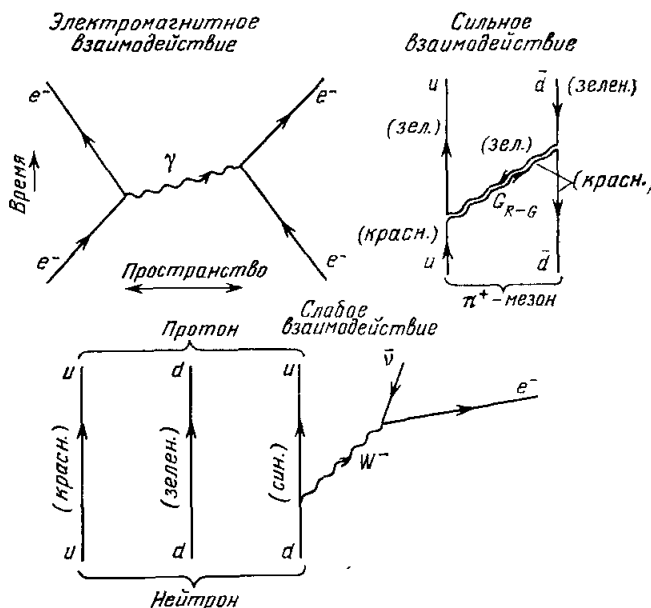


Рис. 2. Три силы природы осуществляют взаимодействия между элементарными частицами.

Каждое такое взаимодействие может описываться как обмен «виртуальной» частицей, которая служит переносчиком силы. При электромагнитном взаимодействии заряженные частицы обмениваются фотонами ( $\gamma$ ). Сильное взаимодействие передается глюонами ( $G$ ), которыми обмениваются частицы с цветовым зарядом. Частицы со слабым зарядом могут обмениваться  $W^-$  (показан здесь),  $W^+$  или  $Z^0$ . Античастицы на диаграммах показаны стрелкой, направленной назад во времени.

обладает какими-то специальными свойствами, отличающими его от фотонов, образующих солнечный свет или радиоволны. Чтобы отметить эти исключительные свойства обменного фотона, его называют виртуальным фотоном.

Такие необычные свойства виртуального фотона объясняются с помощью принципа неопределенности, введенного в квантовую механику Вернером Гейзенбергом. Принцип неопределенности не отменяет законы сохранения энергии и импульса, но он позволяет закрывать глаза на их временное нарушение, если баланс восстанавливается достаточно быстро. Неподвижные электроны имеют такие же энергии и импульсы до излучения виртуального фотона и после его поглощения; законы сохранения нарушаются лишь на короткое время перелета фотона. Принцип неопределен-

ности говорит, что такое явное нарушение допускается, если оно не является слишком долгим или слишком большим.

Что такое слишком долгое и слишком большое? Ответ зависит от величины совершенного нарушения: чем больший дефицит энергии и импульса вызван излучением виртуального фотона, тем раньше этот фотон должен быть поглощен. Высокоэнергичный виртуальный фотон может существовать лишь короткое время, в то время как низкоэнергичному разрешается существовать более долгое время до того, как баланс должен быть восстановлен. Говоря точнее, произведение дисбаланса энергии на время жизни фотона не может превышать постоянной Планка. Минимальная энергия любой частицы равна ее массе, выраженной в энергетических единицах, поэтому максимальная область действия виртуальной частицы обратно пропорциональна ее массе. Область действия электромагнитных сил бесконечна; следовательно, масса покоя фотона должна строго равняться нулю. Существование виртуальных частиц немного усложняет структуру нашего мира. С их появлением вакуум не может больше рассматриваться как пустое место. Виртуальный фотон может появиться в любой момент времени и исчезнуть опять, просуществовав столько, сколько ему позволено принципом неопределенности. Точно так же могут рождаться любые частицы, включая электрически заряженные; единственное ограничение состоит в том, что частица с зарядом должна появляться и исчезать в паре со своей античастицей. Возможность таких виртуальных процессов вызывает весьма серьезные последствия в теории электромагнетизма.

□

Рассмотрим, что происходит, когда реальный электрон находится в облаке виртуальных фотонов и виртуальных электрон-позитронных пар. Наличие фотонов не вносит существенных изменений, в то время как заряженные виртуальные частицы поляризуются: отрицательные виртуальные заряды отталкиваются реальным отрицательным зарядом, а положительные виртуальные заряды притягиваются к реальному электрону. В результате вблизи электрона находится облако положительных зарядов, которые загораживают или экранируют часть заряда электрона.

Отсюда следует, что «голый» заряд электрона намного больше того, который измеряется в эксперименте. Действительно, в квантовой электродинамике голый заряд считается равным бесконечности. Измеряемый заряд можно рассматривать как разность, которая остается после вычитания экранируемого заряда из полного заряда. Если бы можно было измерять заряд электрона на очень малых расстояниях, то обнаружилось бы, что по мере проникновения за экранирующий слой этот заряд увеличивается. Непосредственным следствием этого является вывод, что электромагнитная константа связи вовсе не является константой, а меняется с расстоянием между взаимодействующими частицами. Константа связи растет (что означает, что электромагнитное взаимодействие становится сильнее) при уменьшении этого расстояния. Измеренная величина константы связи около  $1/137$  наблюдается на атомных расстояниях порядка  $10^{-8}$  см.

Даже в эфемерном царстве виртуальных частиц есть один закон сохранения, который никогда не нарушается: сохранение электрического заряда. Поскольку фотон нейтрален, при обмене виртуальным фотоном заряд сохраняется автоматически; ни один из зарядов не меняется. Если же рождается или аннигилирует заряженная материя, это всегда происходит парами частица — античастица, так что сумма зарядов после каждого события остается той же, что была до него.

Сохранение электрического заряда и безмассовость фотона связаны с определенной группой симметрии в той математической системе, с помо-

стью которой описывается квантовая электродинамика. Эта группа симметрии обозначается  $U(1)$ ; следовательно, КЭД можно назвать теорией  $U(1)$ . Обозначение  $U(1)$  применяется в математической теории групп. Символ 1 означает, что фотон в любой момент времени может взаимодей-

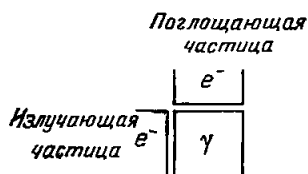


Рис. 3. Электромагнетизм описывается симметрией, называемой  $U(1)$  (термин, заимствованный из математической теории групп).

$U(1)$  — это группа преобразований, которые могут быть выполнены над единичным объектом или над матрицей один-на-один. В применении к электромагнетизму симметрия  $U(1)$  означает, что электромагнитные силы не меняют природу частицы. В матрице один-на-один находится фотон, который лишь преобразует электрон в другой электрон.

ствовать только с одним типом частиц. Фотон не способен переводить частицы одного типа в частицы другого типа. Сильное и слабое взаимодействия в этом отношении более сложные, соответственно более сложными являются и описывающие их группы.

□

Существующая в настоящее время теория сильного взаимодействия построена по образу квантовой электродинамики. Теория эта носит название квантовой хромодинамики, или КХД, и термин «хромо» означает, что силы действуют не между электрическими, а между цветовыми зарядами. Как и в КЭД, сила, действующая между двумя зарядами, пропорциональна произведению этих зарядов. На частицы, не имеющие цвета, сила не действует. Сила взаимодействия определяется некоторой безразмерной константой связи. Эта константа связи больше электромагнитной, как и можно было ожидать для взаимодействия, которое называется сильным.

Хотя КХД построена по тем же принципам, что и КЭД, она является более сложной теорией. Главный источник дополнительной сложности заключается в множественности цветовых зарядов. В то время как электро-

	Красный	Зеленый	Синий
Красный	$G_1 + G_2$	$G_{R-G}$	$G_{R-B}$
Зеленый	$G_{G-R}$	$G_1 + G_2$	$G_{G-B}$
Синий	$G_{B-R}$	$G_{B-G}$	$G_1 + G_2$

— красн., — зел., — син.

Рис. 4. Сильное взаимодействие описывается теорией с симметрией  $SU(3)$ , в которой связь глюонов с кварками можно представить матрицей три-на-три.

Любой цвет из левой колонки может преобразовываться в любой цвет из верхнего ряда; переход осуществляется глюоном, находящимся на пересечении соответствующей строки и столбца. Красный кварк может излучать глюон  $G_{R \rightarrow B}$  и стать синим. Есть два глюона, которые не меняют цвета, а осуществляют переходы типа «красный-красный».

магнетизм связан только с одним типом заряда, в сильных взаимодействиях действуют три цвета: красный, зеленый и синий. Каждый цвет представляет собой некоторую комбинацию основных цветовых зарядов.

Есть несколько способов определения цветовых зарядов. Способ, который я здесь привожу, предполагает вначале три вида цветовых зарядов. Назовем их «красный минус зеленый» ( $R - G$ ), «зеленый минус синий» ( $G - B$ ) и «синий минус красный» ( $B - R$ ). Величина каждого заряда может быть  $+1/2$ ,  $-1/2$  или 0, и каждый кварковый цвет имеет свою комбинацию зарядов. Кварк красный, если он имеет заряд  $R - G = +1/2$ , заряд  $G - B = 0$  и заряд  $B - R = -1/2$ . Зеленый кварк имеет заряды  $R - G = -1/2$ ,  $G - B = +1/2$  и  $B - R = 0$ . Заряды синего кварка



следующие:  $R - G = 0$ ,  $G - B = -1/2$  и  $B - R = +1/2$ . Антицвета, связанные с антикварками, получают простой заменой знаков всех зарядов.

Можно сделать несколько замечаний относительно этого распределения зарядов. Во-первых, возможны 27 комбинаций трех зарядов, если каждый заряд имеет одно из трех допустимых значений. Тем не менее в природе существуют лишь кварки всего с тремя комбинациями, которые дают цвета красный, синий и зеленый. Во-вторых, этот набор возможных цветовых зарядов обладает интересным отличительным свойством. Каждая из наблюдаемых комбинаций подобрана так, что сумма трех зарядов

Кварки

Цветовые заряды				
	$R-G$	$G-B$	$B-R$	
↑ Красный	$+1/2$	$0$	$-1/2$	$=0$
↑ Зеленый	$-1/2$	$+1/2$	$0$	$=0$
↑ Синий	$0$	$-1/2$	$+1/2$	$=0$
	$=0$	$=0$	$=0$	

Глюоны

↑ $G_1$	$0$	$0$	$0$	$=0$
↑ $G_2$	$0$	$0$	$0$	$=0$
(красн) ↓ (зел) $G_{RG}$	$+1$	$-1/2$	$-1/2$	$=0$
(зелен) ↓ (крас) $G_{GR}$	$-1$	$+1/2$	$+1/2$	$=0$
(зелен) ↓ (син) $G_{GB}$	$-1/2$	$+1$	$-1/2$	$=0$
(синий) ↓ (зел) $G_{BG}$	$+1/2$	$-1$	$+1/2$	$=0$
(красн) ↓ (син) $G_{RB}$	$+1/2$	$+1/2$	$-1$	$=0$
(синий) ↓ (крас) $G_{BR}$	$-1/2$	$-1/2$	$+1$	$=0$
	$=0$	$=0$	$=0$	

Рис. 5. Цветовые заряды кварков и глюонов можно определить как красный минус зеленый ( $R - G$ ), зеленый минус синий ( $G - B$ ), и синий минус красный ( $B - R$ ). Каждый из кварковых цветов — красный, зеленый и синий — определяется комбинацией трех зарядов. Важно, что сумма зарядов для каждого цвета равна нулю. Этим подразумевается, что три заряда не являются полностью независимыми и для определения цвета частицы достаточно только двух. (Здесь для наглядности сохранены все три цвета.) В триплете кварков, содержащем по одному кварку каждого цвета, сумма величин каждого заряда тоже равна нулю. Шесть глюонов имеют такие цветовые заряды, чтобы преобразовывать кварки из одного цвета в другой. Из распределения зарядов в кварковом триплете и наличия заряженных глюонов вытекает требование квантования цветового заряда: возможны только полуцелые и целые величины цветового заряда.

равна нулю и никакие другие комбинации, кроме наблюдаемых, не обладают этим свойством. (Вообще говоря, есть еще одна комбинация с нулевым полным цветовым зарядом — комбинация, когда каждый заряд равен нулю. Однако частица, совсем не имеющая цветового заряда, не есть кварк.)

Факт равенства нулю суммы трех цветовых зарядов указывает на то, что один из этих зарядов не является независимым от остальных двух. Если известны любые два заряда, третий может быть вычислен. Следовательно, можно сделать вывод, что в действительности существуют лишь две разновидности цветовых зарядов, которых достаточно для полного определения трех цветов. При этом неважно, какие два заряда считать основными и какой производным от них; ниже я полагаю основными заряды  $R - G$  и  $G - B$ , но заряд  $B - R$  также будет упоминаться, хотя информация о нем является излишней.

Можно отметить некоторые другие соотношения между цветовыми зарядами. В системе, содержащей один красный, один зеленый и один

синий кварк, полная величина цветового заряда опять-таки равна нулю. Другими словами, комбинация трех цветов приводит нас к цвето-нейтральному состоянию, так же как комбинация протона и электрона образует систему (атом водорода), которая нейтральна по отношению к электрическому заряду. Именно таким способом образуются цвето-нейтральные адроны такие, как, например, протон. Бесцветная система может также образовываться путем комбинирования цвета с соответствующим антицветом; поскольку цветовые заряды имеют противоположные знаки, они сокращаются. Примером такого способа образования адронов путем связывания цвета с его антицветом может служить пи-мезон. Других путей комбинирования цветовых кварков так, чтобы сумма всех цветовых зарядов была бы равной нулю, не существует, если не говорить о соединении вышеупомянутых комбинаций (например, шестикварковая система, включающая по два кварка каждого цвета).

Механизм передачи сильного взаимодействия подобен механизму передачи электромагнетизма: взаимодействие между двумя заряженными частицами описывается как обмен некоторой третьей частицей. Однако и в этом пункте квантовая хромодинамика более разнообразна. В то время как КЭД оперирует с одним безмассовым фотоном, КХД имеет восемь безмассовых частиц, названных глюонами. Более того, фотон не имеет электрического заряда, а некоторые глюоны переносят цветовой заряд. Наличие заряженных частиц-переносчиков фундаментальным образом меняет характер взаимодействия.

Так как глюоны заряжены, они не только переносят сильное взаимодействие, но и могут менять цвета кварков. Излучение или поглощение фотона, напротив, никогда не изменяет электрического заряда частицы. Существуют девять возможных переходов между кварковыми цветами, определяемых матрицей три на три. Например, красный кварк может перейти в красный (тождественное преобразование), в зеленый кварк или в синий. Три тождественных преобразования (красный в красный, зеленый в зеленый, синий в синий) образуют диагональные элементы матрицы. Очевидно, что глюоны, ответственные за тождественные переходы, не могут иметь цветовые заряды, иначе они меняли бы цвета кварков. Может показаться, что должны существовать три таких цветонейтральных глюона, по одному для каждого тождественного преобразования. Однако, поскольку достаточно лишь двух независимых цветовых зарядов, чтобы получить три кварковых цвета, существуют только два цветонейтральных глюона. Я буду обозначать их  $G_1$  и  $G_2$ .

□

Шесть остальных переходов между кварковыми цветами, естественно, связаны с изменением цвета. Каждому из этих переходов соответствует определенный глюон и каждый из этих шести глюонов несет цветовой заряд. Я буду использовать наглядное обозначение цветозаряженных глюонов. Например, глюон «красный-в-зеленый», или  $G_{R \rightarrow G}$ , может быть испущен красным кварком, который посредством этого преобразуется в зеленый кварк.

Цветовые заряды, которые несет глюон, могут быть выведены из требования сохранения цветового заряда. Рассмотрим процесс перехода красного кварка в зеленый с испусканием глюона  $G_{R \rightarrow G}$ . В процессе этого перехода  $R - G$ -заряд кварка меняется от  $+1/2$  до  $-1/2$ ; если полная величина заряда должна остаться неизменной, глюон должен иметь  $R - G$ -заряд  $+1$ . Таким же образом  $G - B$ -заряд кварка из  $0$  становится равным  $+1/2$ , так что глюон обязан нести  $G - B$ -заряд  $-1/2$ . Кварковый заряд  $B - R$  меняется от  $-1/2$  до  $0$ , что опять приводит нас

к заключению, что  $B - R$ -заряд глюона равен  $-1/2$ . Следовательно, цветовые заряды глюона равны  $+1, -1/2, -1/2$  соответственно. Кварк, который осуществляет обратное преобразование от зеленого к красному, должен иметь заряды такой же величины, но противоположного знака.

Наличие у глюонов цветового заряда имеет своим непосредственным следствием квантование цветового заряда. В электромагнитной теории фотон, в принципе, может быть излучен или поглощен частицей с любой величиной электрического заряда. Частицы же с цветовым зарядом могут взаимодействовать через обмен глюонами, только если разность их зарядов есть целое или полуцелое число. Можно также показать, что цветовой заряд системы должен быть симметричен относительно нуля, т. е. сумма всех положительных и сумма всех отрицательных зарядов должны быть по абсолютной величине равны.

Квантование цветового заряда может быть продемонстрировано еще одним способом. Любая система частиц с цветом может быть построена из простейшего триплета: красного, зеленого и синего кварка. Триплет антикварков может быть образован путем комбинирования кварков парами. Я не имею в виду, что антикварк действительно является связанным состоянием двух кварков. Тем не менее все цветовые характеристики антикварка правильно передаются в таком синтезе. Заметим, что у красного кварка цветовые заряды  $R - G, G - B$  и  $B - R$  равны соответственно  $+1/2, 0$  и  $-1/2$ . Антикрасный антикварк должен иметь противоположные по знаку заряды:  $-1/2, 0$  и  $+1/2$ . Это в точности те же величины, которые получаются при сложении зарядов зеленого кварка  $(-1/2, +1/2, 0)$  и синего кварка  $(0, -1/2, +1/2)$ . Следовательно, в некотором смысле, антикрасный эквивалентен сумме зеленого и синего. Подобным образом антизеленый состоит из красного и синего, а антисиний состоит из красного и зеленого. Это замечательное соответствие есть простое следствие того способа, которым цветовые заряды распределены в кварковом триплете. Поскольку полный заряд триплета равен нулю, сумма зарядов двух любых кварков должна равняться заряду третьего, взятому с обратным знаком.

Глюоны тоже можно конструировать из кварков и антикварков, хотя опять-таки никаких физических следствий из таких построений делать не следует. Глюон «красный-в-зеленый» с зарядами  $+1, -1/2$  и  $-1/2$  можно представить как «состоящий» из красного кварка  $(+1/2, 0$  и  $-1/2)$  и антизеленого антикварка  $(+1/2, -1/2$  и  $0)$ . Разумеется, антизеленый антикварк может быть далее разложен на красный и синий кварки, так что глюон «красный-в-зеленый» обладает свойствами двух красных и одного синего кварков

□

Есть и еще одно немаловажное следствие того, что глюоны обладают цветовыми зарядами. Как объяснялось выше, электрон в вакууме окружен облаком виртуальных фотонов и виртуальных электронно-позитронных пар; заряженные виртуальные частицы поляризуются и частично экранируют основной заряд электрона. Таким же образом и кварки в вакууме замыкаются в облаке виртуальных глюонов и виртуальных кварк-антикварковых пар, но результат этого качественно иной. Облако виртуальных кварков и антикварков поляризуется обычным образом, причем антикварки группируются вокруг реального цветового заряда и частично его экранируют. Однако виртуальные глюоны действуют прямо противоположным образом. Доминирующий цветовой заряд глюона вблизи кварка такой же, как и заряд самого кварка. Кроме того, виртуальных глюонов больше, чем виртуальных кварков, так что их влияние сильнее. В резуль-

тате заряд кварка оказывается распределенным в пространстве, и по мере приближения к кварку его заряд убывает.

Если бы не было заряженных глюонов, сильное взаимодействие изменялось бы с расстоянием таким же образом, как и электромагнитное. Поскольку глюоны не имеют массы, как и фотоны, область действия сил была бы бесконечной и сила взаимодействия уменьшалась бы обратно пропорционально квадрату расстояния. Тот факт, что глюоны несут цветовые заряды, меняет характер взаимодействия. Поскольку облако виртуальных глюонов как бы расширяет цветовой заряд, цветная сила взаимодействия двух кварков не растет так быстро, как электромагнитная, с уменьшением расстояния. В результате константа связи в КХД уменьшается, когда расстояние, на котором она измеряется, становится меньше

Сборка антикварков

R-G G-B B-R

↑ Зеленый	-1/2	+1/2	0
+ ↑ Синий	0	-1/2	+1/2
↓ Антикрасн.	-1/2	0	+1/2
↑ Красн.	+1/2	0	-1/2
+ ↑ Синий	0	-1/2	+1/2
↓ Антизелен.	+1/2	-1/2	0
↑ Красный	+1/2	0	-1/2
+ ↑ Зеленый	-1/2	+1/2	0
↓ Антисиний	0	+1/2	-1/2

Сборка глюонов

R-G G-B B-R

↑ Красн.	+1/2	0	-1/2
+ ↓ Антизел.	+1/2	-1/2	0
↑ Зелен. G-R-G	+1	-1/2	-1/2
↑ Красн.	+1/2	0	-1/2
↑ Красн.	+1/2	0	-1/2
↑ Синий	0	-1/2	+1/2
↑ Зелен. G-R-G	+1	-1/2	-1/2
↑ Красн.			

Рис. 6. Операция сборки антикварков и глюонов правильно предсказывает их цветовые свойства в предположении, что они являются комбинациями кварков основного цветного триплетта.

Любой антикварк (который должен иметь противоположные цветовые заряды по отношению к соответствующему кварку) может быть «построен» путем сложения цветовых зарядов двух кварков. Любой глюон может быть собран из цветов кварка и антикварка или, поскольку антикварк можно разложить, из цветов трех кварков. Все возможные комбинации находят себе объяснение. Операция является чисто формальной; не следует думать, что антикварки и глюоны физически составлены из кварков.

(тогда как константа связи в КЭД увеличивается на малых расстояниях). Говоря об асимптотической свободе кварков, обычно имеют в виду, что константа связи в КХД стремится к нулю, когда расстояние стремится к нулю.

Асимптотическая свобода была открыта Дэвидом Политцером, который сейчас работает в Калифорнийском Технологическом институте, а также Дэвидом Гроссом и Фрэнком Вильчеком из Принстонского университета. Это явление было проверено и подтверждено во многих экспериментах, в которых зондировалась кварковая структура адрона на малых расстояниях. Сильное взаимодействие между кварками на больших расстояниях еще не изучено, но, по-видимому, сила взаимодействия не убывает как квадрат расстояния, а вообще остается постоянной независимо от расстояния. Если это так, то требуется бесконечно большая энергия для разделения двух цветных кварков, что возможно и является объяснением пожизненного заключения кварков в адроне.

Квантовая хромодинамика называется теорией  $SU(3)$ , где  $SU(3)$  представляет собой еще один термин из теории групп. Символ 3 относится

к трем цветам, которые преобразуются один в другой с помощью глюонов. Символ  $S$  указывает, что сумма цветовых зарядов в каждом семействе  $SU(3)$  равна нулю. Аналогично  $U(1)$  для КЭД,  $SU(3)$  для КХД является описанием группы симметрий, которая связана с сохранением цветового заряда и безмассовостью глюонов.

Высокий порядок симметрии в цветовой теории  $SU(3)$  может быть продемонстрирован геометрически. Договоримся откладывать три цветовых заряда  $R - G$ ,  $G - B$  и  $B - R$  на трех осях на плоскости. Оси расположены симметрично под углом  $120^\circ$  друг к другу. Если изобразить

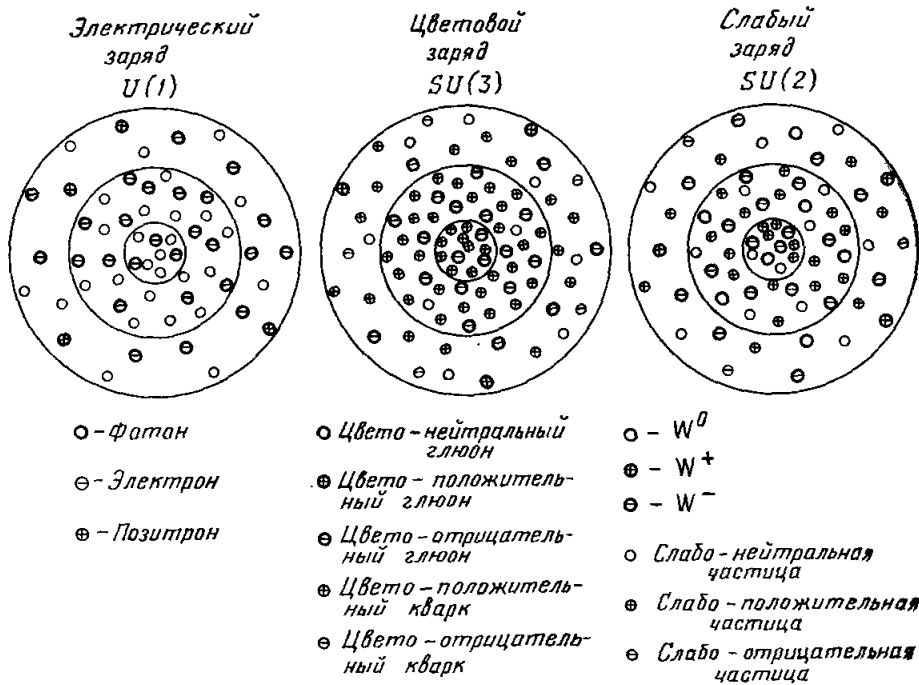


Рис. 7. Облако виртуальных частиц окружает центральный точечный заряд и меняет его реакцию на воздействие силы.

Положительный электрический заряд окружен виртуальными фотонами и виртуальными электрон-позитронными парами. Фотоны не дают видимого эффекта, но заряженные виртуальные частицы поляризованы, так что отрицательные частицы группируются вокруг настоящего заряда, уменьшая его эффективную величину. Положительный цветовой заряд окутан облаком виртуальных глюонов и виртуальных кварк-антикварковых пар. Кварки и антикварки поляризуются, как электроны и позитроны, но глюоны действуют не так, как фотоны. Фотоны электрически нейтральны, тогда как некоторые глюоны имеют цветовой заряд, причем преимущественно той же полярности, что и настоящий заряд. Вследствие этого цветовой заряд распределяется в пространстве и итоговый заряд в любом сферическом объеме становится меньше по мере уменьшения радиуса сферы. Окончательный результат этих эффектов состоит в том, что электромагнитное взаимодействие усиливается на близких расстояниях, тогда как сильное взаимодействие ослабевает. У слабого взаимодействия тоже есть заряженные частицы-переносчики, поэтому оно также ослабевает на малых расстояниях, хотя и в меньшей степени, чем сильное взаимодействие.

три цвета кварков на этом графике, согласно компонентам их цветовых зарядов, они расположатся в вершинах равностороннего треугольника. Антицвета будут располагаться напротив соответствующих цветов, так что получается второй треугольник, повернутый относительно первого на  $180^\circ$ . Эти два треугольника вместе образуют звезду Давида (Соломонову звезду).

Можно продемонстрировать существование еще более высокой симметрии в единой теории, если добавить к этому графику третье измерение. Предположим, что уже изображенные цветовые заряды относятся к квар-

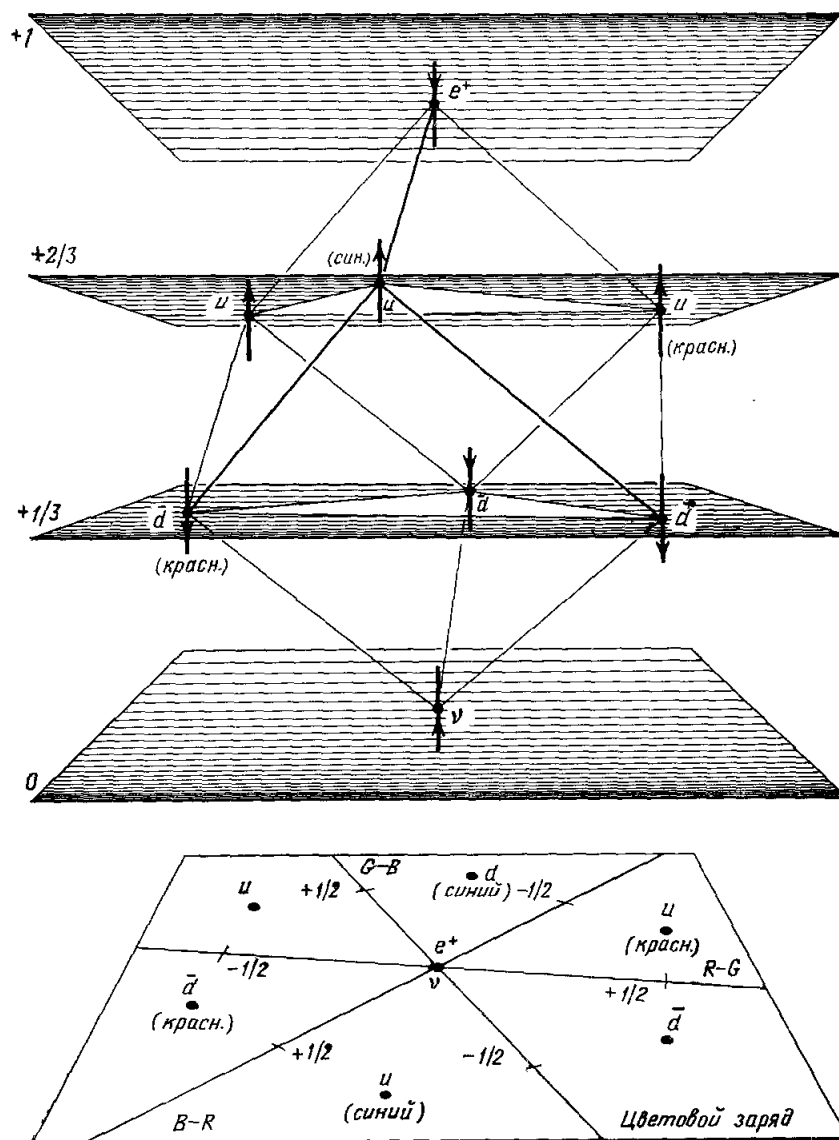


Рис. 8. Кубическая симметрия обнаруживается, если определенные свойства элементарных частиц представить на трехмерном графике.

Частицы являются членами семейств, называемых лептонами и кварками. Положение частицы на горизонтальной плоскости определяется тремя видами «цветового заряда». Кварки  $u$  существуют в трех цветах и лежат в вершинах равностороннего треугольника; антикварки  $\bar{d}$  имеют три соответственных антицвета и образуют треугольник с противоположной ориентацией. Лептоны, представленные здесь позитроном ( $e^+$ ) и нейтрино ( $\nu$ ), не имеют цвета и лежат в центре плоскости. Если сместить каждую частицу по вертикали на расстояние, пропорциональное заряду, образуется куб. Тот факт, что ансамбль частиц образует простую симметричную геометрическую фигуру, заставляет предполагать существование некоторой связи между лептонами и кварками, которая может быть объяснена единой теорией.

ку  $u$  и антикварку  $\bar{d}$ . Добавим сюда еще два лептона: электронное нейтрино и позитрон. Поскольку лептоны не имеют цветового заряда, они будут помещаться в начале координат, в центре плоскости. Третье измерение будем сопоставлять с электрическим зарядом: каждая частица смещается по вертикали, на расстояние пропорциональное ее электрическому заряду. Нейтрино остается на своем месте, три антикварка  $\bar{d}$  смещаются вверх на одну треть, в некоторых выбранных единицах, кварки  $u$  смещаются вверх на две трети, и позитрон смещается на одну единицу. Если выбрать масштабы осей соответствующим образом, эти восемь частиц будут находиться в вершинах куба, поставленного на угол. То, что кварки и лептоны могут быть встроены в столь простую геометрическую фигуру, заставляет нас предполагать существование какой-то внутренней связи между ними.

□

Для обсуждения последнего из трех взаимодействий, слабого, необходимо ввести еще одно свойство, присущее частицам, — спиновый момент количества движения. Наблюдения показывают, что все лептоны и все кварки имеют одно и то же фиксированное значение момента, равное  $1/2$

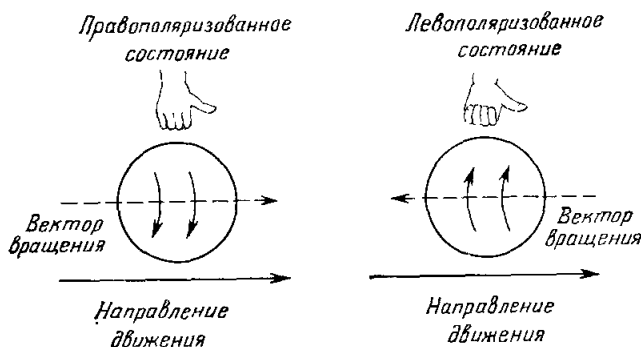


Рис. 9. Спиральность частицы определяется ориентацией ее внутреннего момента количества движения.

Когда вектор, определяющий ось вращения, параллелен направлению движения частицы, частица называется правополяризованной; причина названия в том, что, когда четыре пальца правой руки загнуты в сторону вращения частицы, большой палец указывает направление движения. Если вектор вращения антипараллелен траектории полета, направление движения указывает большой палец левой руки и соответственно частица называется левополяризованной. Электромагнетизм и сильное взаимодействие нечувствительны к спиральности, но для слабого взаимодействия спиральность очень важна. Частица, обладающая массой, может изменить свою спиральность, безмассовая — не может.

в основных единицах. Можно представить, что эти частицы вращаются вокруг своей оси, как земля или волчок, но не теряя при этом энергии. Момент представляется вектором или стрелкой, направленной вдоль оси вращения.

Частица со спином  $1/2$  кванта внутреннего момента может иметь только две ориентации; в простейшем случае, когда частица движется, вектор спина может быть направлен или по движению, или против движения. Эти два направления соответствуют двум различным состояниям частицы. Состояние, в котором вектор спина параллелен направлению движения, называется правополяризованным, потому что, если мы «возьмем» частицу в правую руку так, что четыре пальца будут направлены в сторону вращения, то большой палец будет указывать направление движения частицы. Если вращение происходит в противоположную

сторону, то направление движения показывает большой палец левой руки, и соответственно такое состояние называется левополяризованным.

Поляризованность (или спиральность) частицы, вообще говоря, можно изменить, остановив ее и затем ускорив в обратном направлении, не меняя спина. Отсюда следует, что большинство частиц может иметь компоненты как левополяризованного, так и правополяризованного состояния. Исключение составляют безмассовые частицы по той причине, что безмассовая частица всегда движется со скоростью света и не может быть приведена в состояние покоя. Следовательно, спиральность безмассовой частицы не может быть изменена. Из всех кварков и лептонов только нейтрино, возможно, являются безмассовыми. Экспериментально наблюдались только левополяризованные нейтрино и правополяризованные антинейтрино; предполагается, что правополяризованные нейтрино и левополяризованные антинейтрино не существуют.

В результате появления нового состояния число различных элементарных частиц, которое и так уже достаточно велико, почти удваивается. В первом поколении частиц существуют два лептона (электрон и электронное нейтрино) и два кварковых аромата ( $u$  и  $d$ ). Три кварковых цвета дают в сумме восемь частиц, и, если учесть соответствующие античастицы, то полное число вырастает до 16. Если все частицы могут иметь как левые, так и правые компоненты, то это число еще раз удваивается. Поскольку не существует правополяризованных нейтрино и левополяризованных антинейтрино, имеется 30 различных состояний частиц и античастиц. Это те 30 состояний, которые должны рассматриваться в рамках единой теории. Состояния с разной спиральностью различимы в силу того, что слабое взаимодействие действует по-разному на левую и правую компоненты частицы.

Слабое взаимодействие тоже связано с зарядом, и сила взаимодействия определяется некоторой безразмерной константой связи. Однако слабый заряд довольно необычен, поскольку он зависит от спиральности. Только левополяризованные частицы и правополяризованные античастицы несут слабый заряд; правополяризованные частицы и левополяризованные античастицы нейтральны по отношению к слабым силам и не участвуют в слабом взаимодействии.

Поскольку, например, слабые заряды лево- и правополяризованного электрона различны, слабый заряд не сохраняется. Величина слабого заряда зависит от того, в какую сторону движется электрон, и она должна меняться, когда меняется направление движения. Слабый заряд мог бы сохраняться, только если бы все лептоны и кварки были безмассовыми, так как в этом случае ни одна из частиц не могла бы остановиться и изменить направление движения.

Слабые силы действуют на дублеты частиц. Такое взаимодействие описывается теорией, называемой  $SU(2)$ , и в рамках этой теории партнеры дублета могут переходить друг в друга. Например, левополяризованное нейтрино и левополяризованный электрон образуют один дублет; им приписываются слабые заряды  $+1/2$  и  $-1/2$  соответственно. Левополяризованный кварк  $u$  и левополяризованный кварк  $d$  составляют второй дублет (или три дублета, если рассматривать каждый цвет отдельно), и они тоже имеют соответствующие слабые заряды  $+1/2$  и  $-1/2$ . Остальные дублеты сформированы из четырех правополяризованных античастиц: позитрона, электронного нейтрино, антикварка  $\bar{d}$  и антикварка  $\bar{u}$ . Каждая правополяризованная античастица имеет слабый заряд противоположного знака по отношению к соответствующей левополяризованной частице. Остается шесть частиц: правые компоненты электрона, кварка  $d$ , кварка  $u$ , а также левые компоненты позитрона, антикварка  $\bar{d}$  и анти-



кварка  $\bar{u}$ . Они не входят в состав дублетов, а остаются изолированными синглетами и имеют нулевой слабый заряд.

Три частицы, связанные со слабой симметрией  $SU(2)$ , осуществляют переходы между партнерами каждого дублета. Этими тремя промежуточными частицами являются  $W^+$ , имеющий как слабый, так и электрический заряд  $+1$ ;  $W^-$ , имеющий слабый и электрический заряды  $-1$ , и  $W^0$ , который нейтрален как по отношению к слабым, так и по отношению

Рис. 10. Слабый заряд зависит от спиральности частицы и имеет любопытную связь с электрическим зарядом.

Левополяризованные частицы и правополяризованные античастицы образуют дублеты по слабому взаимодействию, и им приписываются слабые заряды плюс или минус  $1/2$ .  $W^+$  и  $W^-$ , переносящие слабое взаимодействие, способны преобразовывать один партнер дублета в другой. Правополяризованные частицы и левополяризованные античастицы остаются синглетами и не получают слабый заряд, так что слабые переходы между ними невозможны. Электрический заряд каждой частицы есть сумма слабого заряда и еще одной величины, называемой зарядом  $U(1)$ , который равен среднему электрическому заряду частиц данного синглета или дублета. Это соотношение указывает на некую внутреннюю связь между слабым взаимодействием и электромагнетизмом.

	Слабый заряд	Заряд $U(1)$	Электрический заряд	Частицы	Переходы
Дублеты	$+1/2$	$-1/2$	$0$	$\uparrow \nu_{\text{левое}}$	$W^+ \downarrow \uparrow W^-$
	$-1/2$		$-1$	$\uparrow e^-_{\text{левый}}$	
	$+1/2$	$+1/6$	$+2/3$	$\uparrow u_{\text{левый}}$	$W^+ \downarrow \uparrow W^-$
	$-1/2$		$-1/3$	$\uparrow d_{\text{левый}}$	
	$+1/2$	$+1/2$	$+1$	$\downarrow e^+_{\text{правый}}$	$W^+ \downarrow \uparrow W^-$
	$-1/2$		$0$	$\downarrow \bar{\nu}_{\text{правое}}$	
Синглеты	$+1/2$	$-1/6$	$+1/3$	$\downarrow \bar{u}_{\text{правый}}$	$W^+ \downarrow \uparrow W^-$
	$-1/2$		$-2/3$	$\downarrow \bar{d}_{\text{правый}}$	
	$0$	$-1$	$-1$	$\uparrow e^-_{\text{правый}}$	
	$0$	$+1$	$+1$	$\downarrow \nu_{\text{левый}}$	
	$0$	$+2/3$	$+2/3$	$\uparrow u_{\text{правый}}$	
	$0$	$-2/3$	$-2/3$	$\downarrow \bar{d}_{\text{левый}}$	
	$0$	$-1/3$	$-1/3$	$\uparrow d_{\text{правый}}$	
	$0$	$+1/3$	$+1/3$	$\downarrow \bar{u}_{\text{левый}}$	

к электромагнитным силам. Частица  $W^0$ , как и фотон и глюоны  $G_1$  и  $G_2$ , является переносчиком взаимодействия между частицами с зарядом, при котором их свойства не меняются. Частицы  $W^+$  и  $W^-$ , наоборот, преобразуют ароматы частиц. Левополяризованный электрон может излучить  $W^-$  и преобразоваться вследствие этого в левополяризованное нейтрино; при этом электрический заряд меняется от  $-1$  до  $0$ , слабый заряд от  $-1/2$  до  $+1/2$ . Общеизвестным слабым процессом является ядерный  $\beta$ -распад, при котором нейтрон (кварковый состав  $udd$ ) излучает электрон и антинейтрино и преобразуется в протон ( $uud$ ). Рассматривая это событие более детально, можно сказать, что оно начинается с испускания кварком  $d$  виртуальной частицы  $W^-$  и перехода в кварк  $u$ ;  $W^-$  затем распадается с образованием электрона и антинейтрино.

□

Анализируя события, подобные вышеприведенному, можно обнаружить некоторые весьма заманчивые взаимосвязи между слабым взаимодействием и электромагнетизмом. Во-первых,  $W$ -частицы переносят одно и то же количество слабого и электрического заряда. Во-вторых, в структуре слабых синглетов и дублетов наблюдается некоторое любопытное постоянное соотношение между слабым зарядом и электрическим зарядом. Элект-

рический заряд частицы неизменно равен сумме ее слабого заряда и среднего электрического заряда того синглета или дублета, в котором находится эта частица. Этот средний заряд я буду называть зарядом  $U(1)$ . Для синглетов заряд  $U(1)$  просто равен электрическому заряду самой частицы, и это правило звучит как тавтология: оно устанавливает, что электрический заряд равен электрическому заряду, поскольку слабый заряд синглетной частицы всегда равен нулю. Для дублетов, однако, это соотношение уже намного интереснее. Примечательно, что оно справедливо как для лептонных дублетов, где усредняются целые заряды, так и для кварковых, в которых компоненты имеют дробные заряды.

Как и другие заряды, заряд  $U(1)$  связан с некоторой симметрией. Симметрия  $U(1)$ , которая заложена в слабом взаимодействии, ассоциирована с частицей, которую я буду называть  $V^0$ . Подобно  $W^0$  и фотону,  $V^0$  не имеет ни электрического, ни слабого заряда. Так как заряды  $U(1)$ ,

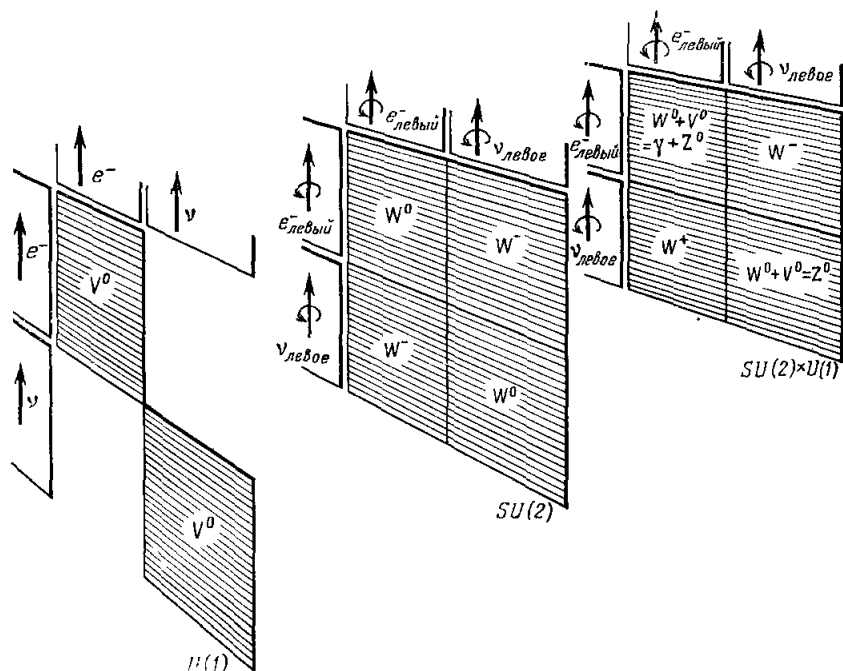


Рис. 11. Слабое взаимодействие и электромагнетизм могут быть описаны совместно теорией, имеющей симметрию, представленную произведением двух групп:  $SU(2) \times U(1)$ .

Компонента  $SU(2)$  индуцирует все возможные преобразования двух объектов или матрицы два-два. Объектами являются партнеры слабых дублетов, представленные здесь левыми компонентами электрона и нейтрино. Существуют три частицы  $SU(2)$ , все они безмассовые:  $W^+$  и  $W^-$  преобразуют электрон в нейтрино и наоборот, и  $W^0$  осуществляет тождественное преобразование электрона в электрон и нейтрино в нейтрино. Компонента  $U(1)$  связана с другой промежуточной частицей  $V^0$ , которая способна только на тождественные преобразования. В комбинированной теории  $SU(2) \times U(1)$   $W^0$  и  $V^0$  оказываются смешанными; наблюдаемыми состояниями являются фотон ( $\gamma$ ) и переносчик слабого взаимодействия  $Z^0$ . Симметрия  $SU(2) \times U(1)$  спонтанно нарушается, вследствие чего  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$  получают большие массы, в то время как фотон остается безмассовым.

слабый и электрический взаимосвязаны, должна существовать взаимосвязь и между тремя частицами-переносчиками. Оказывается, что  $W^0$  и  $V^0$  не наблюдаются в природе в чистом виде; наблюдаемыми являются их смешанные состояния. Одним из таких смешанных состояний является фотон; другая возможная комбинация обычно обозначается  $Z^0$ . Как фотон, так и  $Z^0$  осуществляют взаимодействие, в котором частица переходит

сама в себя, так что ее внутренние свойства не меняются. Различие между ними состоит в том, что фотон связывает только частицы с электрическим зарядом, в то время как  $Z^0$  связывает частицы со слабым зарядом, включая нейтрино. Поскольку фотон,  $W^-$  и  $Z$ -частицы описываются одной теорией, частичное объединение слабого взаимодействия и электромагнетизма уже достигнуто. Объединенная теория обозначается как произведение групп, входящих в нее:  $SU(2) \times U(1)$ .

По аналогии с квантовой электродинамикой  $U(1)$  и квантовой хромодинамикой  $SU(3)$ , можно было бы ожидать, что для слабых взаимодействий группы  $SU(2)$  и  $U(1)$  обеспечивают строгую симметрию теории. Тогда слабый заряд должен был бы сохраняться, частицы  $W$  и  $Z$  были бы безмассовыми и имели бы бесконечный радиус действия. Однако, как сказано выше, слабый заряд не сохраняется; кроме того, наблюдаемый радиус действия слабых сил крайне мал, возможно — около  $10^{-15}$  см. Причина этого заключается в том, что массы  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$  очень велики, порядка 100 ГэВ, или в сто раз больше массы протона. Что происходит с симметрией  $SU(2) \times U(1)$  слабых и электромагнитных взаимодействий при этих условиях? Более того, если фотон,  $W$  и  $Z$  взаимосвязаны, как может одна частица оставаться безмассовой, в то время как другие приобретают большие массы?

Именно в связи с поисками ответов на эти вопросы было достигнуто существенное продвижение на пути формулирования объединенной теории слабых и электромагнитных сил. Общепризнанный в настоящее время ответ заключается в том, что первичное взаимодействие действительно строго симметрично и в некотором гипотетическом начальном состоянии все переносчики слабого взаимодействия не имеют массы. Несимметричным же является квантовомеханический вакуум — та среда, в которой действуют силы. Структура вакуума спонтанно нарушает симметрию  $SU(2) \times U(1)$ , вследствие чего три переносчика слабого взаимодействия получают массу, но фотон остается по-прежнему безмассовым. Аналогичную потерю симметрии можно наблюдать, например, в кристалле поваренной соли. Для ионов кристалла все направления в пространстве равноправны; можно сказать, что ионы обладают симметрией по отношению к вращению. Однако в решеточной структуре кристалла эта симметрия нарушается, и некоторые направления, как, например, параллельные осям решетки, приобретают особое значение.

Та же самая аналогия может пояснить еще одну особенность спонтанно нарушенной симметрии. То, как выглядит наш физический мир, зависит от масштаба, при котором он изучается. На расстояниях, намного меньших  $10^{-8}$  см (размер атома), можно наблюдать внутреннюю структуру атома, который полностью симметричен, и кристаллическая структура на этом уровне несущественна. На расстояниях порядка  $10^{-8}$  см начинают играть роль силы, ответственные за сцепление атомов в кристалле, и наблюдаемые явления становятся крайне сложными. На расстояниях, намного больших  $10^{-8}$  см, геометрия кристалла становится вполне очевидной, и симметрия по отношению к вращению заметным образом нарушается.

□

Подобную же иерархию масштабов можно определить в связи со спонтанным нарушением симметрии  $SU(2) \times U(1)$ , но критическое расстояние меньше: около  $10^{-16}$  см. На расстояниях, много меньших этого, наблюдается полная симметрия. Обмен массивными частицами  $W$  и  $Z$  происходит на столь близких расстояниях так же легко, как и обмен безмассовыми фотонами, поэтому слабое и электромагнитное взаимодействия могут быть

объединены. Другой путь пояснения той же идеи связан с соотношением между расстоянием и энергией. Согласно принципу неопределенности, энергия, необходимая для зондирования данного расстояния, обратно пропорциональна этому расстоянию. Эксперимент, исследующий структуру частицы на расстояниях меньше  $10^{-16}$  см, должен проводиться при энергии больше 100 ГэВ. При такой энергии частицы  $W$  и  $Z$  могут свободно рождаться и различие масс между ними и фотоном становится несущественным; все промежуточные частицы можно считать легкими по сравнению с энергией эксперимента.

На расстояниях около  $10^{-16}$  см в игру включаются сложные явления, ответственные за нарушение симметрии  $SU(2) \times U(1)$ . Частицы  $W$  и  $Z$  по-прежнему наблюдаются, но они отличаются от фотона, поскольку их масса сравнима с энергией эксперимента. При еще больших расстояниях симметрия между фотоном и частицами  $W$  и  $Z$  полностью затемняется; действительно, энергии не хватает для образования реальных  $W$  и  $Z$ , так что непосредственно их наблюдать нельзя. Наблюдаются только редкие короткодействующие эффекты виртуального обмена (такие, как  $\beta$ -распад нейтрона). Это и есть современная область физики элементарных частиц.

Концепция спонтанного нарушения симметрии позволяет ответить на вопрос о сохранении слабого заряда. При энергиях, много больших 100 ГэВ, когда симметрия  $SU(2) \times U(1)$  непосредственно наблюдается, массой кварка или лептона можно пренебречь; следовательно, спиральность частицы в значительной степени фиксируется, поэтому слабый заряд эффективно сохраняется. При низкой энергии, когда симметрия спонтанно нарушена, слабый заряд не сохраняется. Он может уходить в вакуум, когда массивная частица меняет спиральность.

Эта теория слабого и электромагнитного взаимодействия была разработана в 60-х годах Шелдоном Л. Глэшоу и Стивеном Вайнбергом из Гарвардского университета и Абдусом Саламом из Международного центра теоретической физики в Триесте.

Глэшоу первый создал теорию вида  $SU(2) \times U(1)$ , но он не знал, как включить в нее массы частиц  $W$  и  $Z$ . Вайнберг и Салам независимо пришли к виду  $SU(2) \times U(1)$  с применением идеи о спонтанном нарушении симметрии, сформулировав тем самым последовательную теорию.

Теория  $SU(2) \times U(1)$  есть лишь частичное объединение, поскольку она по-прежнему включает две различных силы, каждая со своей группой симметрии и со своей константой связи. Отношение этих констант есть свободный параметр, который выбирается подгонкой к экспериментальным результатам. Другим недостатком теории является то, что электрический заряд только частично квантован. Структура дублетов частиц, связанных переходами  $SU(2)$ , требует, чтобы все разности между электрическими зарядами были бы целыми числами, так чтобы каждая частица могла перейти в другую, излучив  $W^+$  или  $W^-$ . Однако средний заряд дублета не квантован. Средний заряд есть заряд  $U(1)$ , определение которого связано с электромагнитным зарядом из квантовой электродинамики; как и там, здесь нет видимых причин ограничивать заряды только целыми величинами.

В самом деле в дублетах, состоящих из кварков, интервал между зарядами есть целое число, но сами заряды дробные.

Старания, направленные на построение единой теории слабого, сильного и электромагнитного взаимодействий не следует рассматривать как попытки покончить с цветной моделью  $SU(3)$  или моделью  $SU(2) \times U(1)$ . Эти индивидуальные теории слишком хорошо работают, чтобы от них отказываться.

Единая теория скорее представляется суперструктурой, в которой могли бы быть заложены  $SU(3)$  и  $SU(2) \times U(1)$ . Эта суперструктура реализовала бы еще большую симметрию, в которой кварки и лептоны были бы тесно связаны.

Поиск такой большей симметрии нужно начинать с поиска большей группы, которая включает и  $SU(3)$ , и  $SU(2) \times U(1)$ , как свои компоненты. Таким свойством обладают многие группы, но среди них есть один кандидат, имеющий достаточно много преимуществ по сравнению с остальными. Это группа  $SU(5)$ , группа всех возможных преобразований пяти различных объектов, для матрицы пять-на-пять. Это наименьшая простая

Рис. 12. Единное семейство элементарных частиц охватывает и лептоны, и кварки.

В этом семействе пять членов: три правополяризованных кварка (три цвета кварка  $d$ ) и два правополяризованных антилептона (позитрон и антинейтрино). Каждой частице приписывается определенный электрический заряд, слабый заряд и два цветовых заряда, в качестве которых здесь выбраны красный минус зеленый ( $R - G$ ) и зеленый минус синий ( $G - B$ ). Третий цветовой заряд опущен, поскольку он несет избыточную информацию. Для каждого заряда сумма зарядов всех частиц равна нулю. Далее, в единой теории существуют частицы, осуществляющие переходы, которые несут все виды зарядов. Из этих двух фактов следует, что все заряды частиц должны быть квантованы. Единая теория связана с группой симметрий  $SU(5)$ .

	Электрич. заряд	Слабый заряд	Заряд $R - G$	Заряд $G - B$
$d$ красн. правый	$-1/3$	$0$	$+1/2$	$0$
$d$ зелен. правый	$-1/3$	$0$	$-1/2$	$+1/2$
$d$ син. правый	$-1/3$	$0$	$0$	$-1/2$
$e^+$ правый	$+1$	$+1/2$	$0$	$0$
$\nu_e$ правый	$0$	$-1/2$	$0$	$0$
	$= 0$	$= 0$	$= 0$	$= 0$

--- красн., --- зел., --- син.

группа, которая может включать в себя в качестве составляющих симметрии  $SU(3)$  и  $SU(2) \times U(1)$ , и я верю, что эта группа может быть группой полной симметрии природы. Единая теория, основанная на симметрии  $SU(5)$ , была разработана в 1973 г. Глэшоу и мною.

В простейшем представлении группы  $SU(5)$ , пятью объектами являются правые компоненты кварка  $d$  во всех цветах, красном, зеленом и синем, правая компонента позитрона и правая компонента электронного антинейтрино (которое имеет только правую компоненту). Каждой из этих пяти частиц приписывается величина каждого из четырех независимых зарядов: электрический заряд, слабый заряд и два цветовых заряда, в качестве которых я выберу  $R - G$  и  $G - B$ .

Двадцать четыре промежуточные частицы обеспечивают все возможные переходы между этими пятью состояниями материи. Четыре из них — это фотон,  $Z^0$  и глюоны  $G_1$  и  $G_2$ , которые непосредственно связаны с четырьмя фундаментальными зарядами. Поскольку эти частицы не несут заряд, они участвуют только в тех взаимодействиях, в которых частица остается сама собой. Из остальных 20 промежуточных частиц восемь уже нам знакомы. Это  $W^+$  и  $W^-$ , которые могут превращать позитрон в антинейтрино и наоборот, и шесть глюонов, преобразующие цвета кварков. Этот комплект из 12 частиц-переносчиков позволяет учитывать все взаимодействия, наблюдавшиеся в природе до настоящего времени. Однако группа  $SU(5)$  включает еще 12 промежуточных частиц, которые необходимы, если мы хотим, чтобы теория обладала максимальной возможной симметрией. Эти 12 дополнительных частиц обозначаются  $X$  и осуществляют взаимные

переходы между лептонами и кварками. Каждая частица  $X$  несет слабый заряд, цветовой заряд и электрический заряд; электрический заряд может быть равен плюс или минус  $1/3$  и плюс или минус  $4/3$ .

Как и в случае распределения цветовых зарядов в  $SU(3)$ , таблица соответствия зарядов в  $SU(5)$  обладает некоторыми интригующими закономерностями. Для каждого вида заряда сумма зарядов пяти основных частиц равна нулю. Например, каждый из трех кварковых цветов имеет заряд  $-1/3$ , но эти заряды уравниваются электрическим зарядом

	$\uparrow$ красный правый	$\uparrow$ зеленый правый	$\uparrow$ синий правый	$\downarrow$ $e^+$ правый	$\downarrow$ $\bar{\nu}$ правое
$\uparrow$ красный правый	$G_1 + G_2 + \gamma + Z^0$	$G_{R-G}$	$G_{R-B}$	$X_{-4/3}^{\text{красн}}$	$X_{-1/3}^{\text{красн}}$
$\uparrow$ зеленый правый	$G_{G-R}$	$G_1 + G_2 + \gamma + Z^0$	$G_{G-B}$	$X_{-4/3}^{\text{зелен}}$	$X_{-1/3}^{\text{зелен}}$
$\uparrow$ синий правый	$G_{B-R}$	$G_{B-G}$	$G_1 + G_2 + \gamma + Z^0$	$X_{-4/3}^{\text{син}}$	$X_{-1/3}^{\text{син}}$
$\downarrow$ $e^+$ правый	$X_{+4/3}^{\text{красн}}$	$X_{+4/3}^{\text{зелен}}$	$X_{+4/3}^{\text{син}}$	$\gamma + Z^0$	$W^+$
$\downarrow$ $\bar{\nu}$ правое	$X_{+1/3}^{\text{красн}}$	$X_{+1/3}^{\text{зелен}}$	$X_{+1/3}^{\text{син}}$	$W^-$	$Z^0$

--- красн., --- зел., --- син.

Рис. 13. Симметрия  $SU(5)$  разрешает все возможные переходы между пятью членами единого семейства.

Симметрии индивидуальных взаимодействий входят в теорию  $SU(5)$  как подгруппы: симметрия сильных взаимодействий  $SU(3)$  представлена матрицей три-на-три в левом верхнем углу, а симметрия слабых взаимодействий — матрицей два-на-два в нижнем правом. Симметрия  $U(1)$  проявляется в связи фотона ( $\gamma$ ) и  $Z^0$  в диагональных элементах. Теория  $SU(5)$  постулирует существование 12 новых промежуточных частиц, обозначаемых  $X$ , которые осуществляют переходы от кварка к лептону и от лептона к кварку. Взаимопревращения кварков и лептонов возможны только в единой теории.

позитрона  $+1$ . Можно видеть также, что некоторые из промежуточных частиц  $SU(5)$  переносят все четыре разновидности заряда. Глюоны обладают цветом,  $W^+$  и  $W^-$  имеют как слабый, так и электрический заряд, и  $X$ -частицы переносят все четыре вида заряда.

Из этих двух фактов следует, что все заряды должны быть квантованы. Все электрические заряды должны складываться из  $1/3$ ; если в семействе будет частица с каким-то иным зарядом, излучение или поглощение частицы-переносчика в рамках  $SU(5)$  станет невозможным без нарушения сохранения заряда. Более того, фиксирован не только минимальный интервал между зарядами; требование равенства нулю полного заряда определяет реальные величины всех зарядов. Наконец, мы получили объяснение квантования электрического заряда. Это же требование объясняет строгую пропорциональность зарядов лептона и кварка, что в свою очередь позволяет быть уверенным в строгой нейтральности атома. В дополнение к этому, из организации всего семейства следует еще одно интригующее совпадение, что все цветонейтральные системы частиц имеют целый электрический заряд.

□

Как же быть с остальными частицами первого поколения? Одна из наиболее привлекательных особенностей теории  $SU(5)$  заключается в том, что пять правополяризованных частиц из наименьшего семейства

SU(5) комбинируются в пары и дают семейство из 10 левополяризованных частиц. Эти 10 состояний образуют следующее попростоте представление группы. Это левые компоненты кварка  $d$ , кварка  $u$  и антикварка  $\bar{u}$  (в трех

		Тип заряда			
		Электрический	Слабый	R-G	G-B
$\uparrow$	$d$ красный правый	$-1/3$	0	$+1/2$	0
$+$	$e^+$ правый	$+1$	$+1/2$	0	0
$\uparrow$	$u$ красный левый	$+2/3$	$+1/2$	$+1/2$	0
$\uparrow$	$d$ зеленый правый	$-1/3$	0	$-1/2$	$+1/2$
$+$	$e^+$ правый	$+1$	$+1/2$	0	0
$\uparrow$	$u$ зеленый левый	$+2/3$	$+1/2$	$-1/2$	$+1/2$
$\uparrow$	$d$ синий правый	$-1/3$	0	0	$-1/2$
$+$	$e^+$ правый	$+1$	$+1/2$	0	0
$\uparrow$	$u$ синий левый	$+2/3$	$+1/2$	0	$-1/2$
$\uparrow$	$d$ красный правый	$-1/3$	0	$+1/2$	0
$+$	$\bar{v}$ правое	0	$-1/2$	0	0
$\uparrow$	$d$ красный левый	$-1/3$	$-1/2$	$+1/2$	0
$\uparrow$	$d$ зеленый правый	$-1/3$	0	$-1/2$	$+1/2$
$+$	$\bar{v}$ правое	0	$-1/2$	0	0
$\uparrow$	$d$ зеленый левый	$-1/3$	$-1/2$	$-1/2$	$+1/2$
$\uparrow$	$d$ синий правый	$-1/3$	0	0	$-1/2$
$+$	$\bar{v}$ правое	0	$-1/2$	0	0
$\uparrow$	$d$ синий левый	$-1/3$	$-1/2$	0	$-1/2$
$\downarrow$	$e^+$ правый	$+1$	$+1/2$	0	0
$+$	$\bar{v}$ правое	0	$-1/2$	0	0
$\downarrow$	$e^+$ левый	$+1$	0	0	0
$\uparrow$	$d$ зеленый правый	$-1/3$	0	$-1/2$	$+1/2$
$+$	$d$ синий правый	$-1/3$	0	0	$-1/2$
$\downarrow$	$\bar{u}$ красный левый	$-2/3$	0	$-1/2$	0
$\uparrow$	$d$ красный правый	$-1/3$	0	$+1/2$	0
$+$	$d$ синий правый	$-1/3$	0	0	$-1/2$
$\downarrow$	$\bar{u}$ зеленый левый	$-2/3$	0	$+1/2$	$-1/2$
$\uparrow$	$d$ красный правый	$-1/3$	0	$+1/2$	0
$+$	$d$ зеленый правый	$-1/3$	0	$-1/2$	$+1/2$
$\downarrow$	$\bar{u}$ синий левый	$-2/3$	0	0	$+1/2$

Рис. 14. Семейство 10 частиц получается комбинированием всех возможных пар из пяти состояний, представляющих простейшее семейство SU(5). Все члены семейства пяти правополяризованы, но, комбинируясь в пары, они образуют левополяризованные состояния. Как и при конструировании антикварков путем спаривания кварков, не следует понимать этот процесс буквально; левополяризованная частица не есть связанное состояние двух правополяризованных частиц. Тем не менее такое спаривание дает правильные заряды левополяризованных состояний. Эти и еще два семейства, такого же размера и с аналогичной структурой, вмещают все элементарные частицы первого поколения и не содержат пустых мест.

цветах каждый) и позитрона. Как и в случае образования антикварков и глюонов из основного триплета кварковых цветов, этот процесс не следует интерпретировать как физический способ построения частиц. Левополяризованный лептон или кварк не является в действительности

связанным состоянием двух правополяризованных частиц. Тем не менее 10 возможных способов спаривания пяти правых состояний дают правильные значения зарядов для левополяризованных частиц.

Такая схема попарного смешивания частиц правильно определяет также возможные для каждой частицы переходы. Сюда включаются как кварк-лептонные, так и кварк-антикварковые переходы. Не менее важно то, что переходы, которые в действительности не наблюдаются, не разрешаются структурой этой группы. Каждое семейство частиц обладает свойством полноты или замкнутости. Каждый разрешенный переход приводит к образованию другой частицы из того же семейства, и никакие другие переходы не возможны.

Семейство пяти правых и десяти левых состояний содержит в сумме 15 частиц. Можно сконструировать еще два семейства, слегка отличных по форме, чтобы принять 10 оставшихся правополяризованных и 5 оставшихся левополяризованных частиц, которые являются античастицами 15 состояний в первых двух семействах. Следовательно, в теории есть место для каждого из 30 элементарных состояний и пустых мест нет. Можно сконструировать эквивалентные представления для высших поколений, заменяя электрон на мюон или  $\tau$ -лептон, кварк  $d$  на кварк  $s$  или  $b$  и так далее.

Резюмируем кратко, что было сделано до сих пор. Во-первых, группа  $SU(5)$  была выбрана, как наименьшая группа, в которую можно включить  $SU(3)$  и  $SU(2) \times U(1)$ . Потом пять правых компонент частиц были выбраны в качестве членов простейшего семейства  $SU(5)$ . Оставшиеся компоненты должны были затем войти в некоторое другое семейство  $SU(5)$ , и они так и сделали. Без потерь и без переполнения они заняли места в соседнем простейшем семействе. Более того, композиция описываемого семейства была определена простой процедурой комбинирования частиц парами. Важно то, что эта процедура объединения вовсе не обязана была работать. Во многих других группах она не работала бы. Это представляет первый, простейший и в некоторых отношениях самый замечательный, успех теории  $SU(5)$ .

□

Наиболее очевидное значение объединения  $SU(5)$  заключается в том, что принципиального различия между лептонами и кварками больше не существует. Теперь они являются членами одного семейства, и переходы кварка в лептон (и наоборот) осуществляются так же легко, как и переходы кварка в другой кварк или лептона — в другой лептон. Дальнейшее следствие объединения состоит в том, что слабое, сильное и электромагнитное взаимодействия обладают одной силой или одной и той же константой связи. Ни одно из этих ожиданий не оправдывается в том нашем мире, каким мы его видим сегодня. В миллионах взаимодействий элементарных частиц, которые зарегистрированы физиками, не наблюдалось случая кварк-лептонного перехода. Далее, константы связи трех взаимодействий различаются во много раз: сильное взаимодействие примерно в сто раз сильнее электромагнитного, а слабое находится где-то между ними. Таким образом, если  $SU(5)$  и есть симметрия природы, она очевидным образом является нарушенной симметрией.

Нарушение симметрии может вызываться механизмом, похожим на тот, который нарушает симметрию  $SU(2) \times U(1)$  слабых и электромагнитных взаимодействий. Вследствие этого  $X$ -частицы приобретают большие массы и эффекты обмена  $X$ -частицами оказываются сильно подавленными. Однако в  $SU(5)$  это нарушение должно происходить при много больших энергиях, или, что то же самое, при много меньших расстояниях,



чем в  $SU(2) \times U(1)$ . Это расстояние есть масштаб объединения, т. е. то расстояние, на котором становится очевидной полная симметрия.

В рамках теории  $SU(5)$  можно строить гипотезы о том, как выглядит наш мир при разных расстояниях или энергиях. В эксперименте, который зондирует расстояния много меньше масштаба объединения  $SU(5)$  калибровочная инвариантность мира была бы вполне очевидной. Все взаимодействия, включая кварк-лептонные и кварк-антикварковые переходы, были бы в одинаковом положении, так как все промежуточные частицы  $SU(5)$  (фотон, глюоны,  $W$ - и  $Z$ -частицы и  $X$ -частицы) рождались бы с одинаковой вероятностью. Массы частиц  $W$ ,  $Z$  и  $X$  были бы почти неотличимы от масс фотона и глюонов, так как все массы были бы малы по сравнению с энергией эксперимента.

На расстояниях, близких к масштабу объединения, должны наблюдаться сложные физические явления, связанные со спонтанным нарушением симметрии  $SU(5)$ .  $X$ -частицы могут излучаться, но их массы сильно отличают их от других частиц. На расстояниях, много больших масштаба объединения (но много меньше  $10^{-16}$  см), симметрия  $SU(5)$  почти полностью скрыта. Частицы  $X$  уже не могут рождаться в свободном состоянии, что приводит к разделению лептонов и кварков в разные семейства, связь между которыми почти отсутствует. С другой стороны, симметрия  $SU(2) \times U(1)$  полностью сохраняется, так что никаких различий между слабым и электромагнитным взаимодействиями не существует. На расстояниях, больших  $10^{-16}$  см, симметрия  $SU(2) \times U(1)$  тоже нарушается и наблюдаются три отдельные взаимодействия.

□

Спонтанное нарушение симметрии может также объяснить неравенство констант связи. Ключевым пунктом объяснения является наличие в вакууме виртуальных частиц, окружающих точечный заряд. Будем помнить, что в случае сильного взаимодействия облако виртуальных глюонов, окутывающих кварк, эффективно размывает цветовой заряд, в результате чего константа связи уменьшается, если она измеряется на более близких расстояниях. Виртуальные  $W$ -частицы похожим образом влияют на слабый заряд, хотя эффект несколько меньше из-за того, что существует меньше  $W$ -частиц, переносящих слабый заряд, чем глюонов, несущих цветовой заряд. С другой стороны, в теории  $U(1)$  отсутствие заряда у  $Z^0$  приводит к совсем другим явлениям. Из-за поляризации виртуальных электронов и позитронов константа связи  $U(1)$  растет на более близких расстояниях.

Такие тенденции в поведении констант связи приводят к простому заключению. На больших расстояниях константа связи  $SU(3)$  наибольшая, но убывает она тоже быстрее других; константа связи слабого взаимодействия  $SU(2)$  меньше и убывает медленнее; константа  $U(1)$  меньше всех, но растет, когда уменьшается расстояние. Следовательно, может существовать такое расстояние, на котором все три константы связи будут иметь приблизительно одну и ту же величину.

На расстояниях меньше  $10^{-16}$  см все константы связи довольно малы, и ход их изменения с энергией поддается расчету. Можно вычислять их значения при все меньших расстояниях; расстояние, на котором эти три константы сойдутся, и есть масштаб объединения. Если проследить таким путем поведение двух констант, то можно предсказать величину третьей при всех энергиях. Такие вычисления были проделаны с использованием в качестве входных данных сильной и электромагнитной констант; последняя, в свою очередь, есть комбинация констант связи  $U(1)$  и  $SU(2)$ . В результате была получена величина масштаба объединения

и отношение констант  $U(1)$  и  $SU(2)$ , которое в неединичных теориях является произвольным параметром.

В 1974 г. я проделал такие расчеты вместе с Элен Р. Квинн (которая работает сейчас в Стэнфордской лаборатории линейного ускорителя) и Вайнбергом для некоторого класса единых теорий, включающего  $SU(5)$ . Мы получили расстояние около  $10^{-29}$  см для масштаба объединения и величину 0,2 для отношения  $U(1)$  к  $SU(2)$ . В то время этот результат не был слишком обнадеживающим, поскольку измерения этого отношения давали

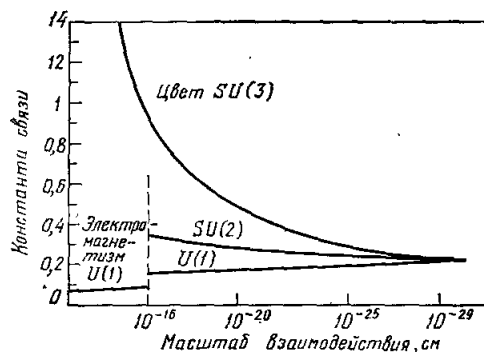


Рис. 15. Объединение взаимодействий станет очевидным в рамках теории  $SU(5)$  при крайне высоких энергиях или при очень малых расстояниях.

Сила каждого взаимодействия оценивается безразмерной константой связи, ассоциированной с внутренней симметрией. Из-за виртуальных частиц, окружающих заряд, сильное взаимодействие  $SU(3)$  уменьшается, когда частицы сближаются. Взаимодействие  $SU(2)$  тоже ослабевает на близких расстояниях, но не так быстро. Взаимодействие  $U(1)$ , наоборот, становится сильнее. Экстраполируя величины, измеренные при сравнительно больших расстояниях, можно предсказать, что эти кривые сойдутся при расстоянии около  $10^{-29}$  см, что эквивалентно энергии  $10^{16}$  ГэВ. При таких расстояниях и энергиях все взаимодействия будут иметь одинаковую силу, и все переходы между элементарными частицами будут происходить с одинаковой вероятностью. При расстояниях больше  $10^{-16}$  см симметрия  $SU(2) \times U(1)$  нарушается, и взаимодействия  $SU(2)$  и  $U(1)$  начинают существовать в различных образах. Симметрия электромагнетизма  $U(1)$  сохраняется, но слабое взаимодействие проявляется только через виртуальные обмены частицами  $W$  или  $Z$ .

величину около 0,35. После этого более точные измерения отношения констант связи дали меньшую величину. Теперь оно считается равным 0,22 плюс или минус 0,02, в соответствии с теоретическим расчетом.

Другое предсказание модели  $SU(5)$ , которое можно проверить при доступных энергиях, было сделано в 1977 г. Анжеем Бурасом, Джоном Эллисом, Мэри К. Гайяр и Деметресом В. Нанополусом в Европейском Центре ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве. Они обнаружили, что в простейшей версии теории  $SU(5)$  можно определить отношение массы кварка  $b$  к массе  $\tau$ -лептона. Как и в случае констант связи, эти массы равны при расстояниях меньше масштаба объединения, но при больших расстояниях кварк  $b$  тяжелее из-за своего цветового заряда. Было вычислено, что при низких энергиях отношение масс должно быть примерно 3 : 1. Масса  $\tau$ -лептона известна: она немного меньше удвоенной массы протона. Масса кварка  $b$  известна не так хорошо, поскольку изолированные кварки не наблюдаются. По лучшим современным оценкам она составляет около пяти протонных масс, что дает отношение 5 : 2.

□

Масштаб объединения  $10^{-29}$  см представляет собой необычайно малое расстояние. (Если бы можно было раздуть один протон до размеров Солнца, масштаб объединения все еще был бы меньше микрона.) Объединение  $SU(5)$  предполагает, что в интервале расстояний от  $10^{-16}$  до  $10^{-29}$  см нет принципиально новых физических явлений; в частности, можно предполагать, что закон изменения константы связи с расстоянием не меняется. Такое предположение, конечно, вносит некоторое беспокойство, однако его нельзя считать совершенно невероятным. Известен еще один малый

масштаб, на котором ожидаются новые явления. На расстояниях около  $10^{-33}$  см гравитация может стать такой же сильной, как и другие виды взаимодействия, и тогда любая теория, описывающая события на таких расстояниях, должна включать и гравитацию. Тот факт, что масштаб объединения, хотя и очень мал, но все же в 10 000 раз больше  $10^{-33}$  см, кажется мне весьма ободряющим.

Расстояние  $10^{-29}$  см соответствует энергии около  $10^{15}$  ГэВ, или приблизительно  $10^{15}$  масс протона. Масса X-частиц должна соответствовать такой энергии. Для сравнения отметим, что самая тяжелая частица, которую можно сейчас создать с помощью ускорителей, имеет массу около 10 ГэВ. Можно ожидать, что на новом поколении ускорителей будет достигнут уровень 100 ГэВ или около того, необходимый для образования частиц W и Z. Для создания частиц X нужно поднять энергию еще на 13 порядков, что вряд ли когда-либо будет осуществлено.

Если даже никогда не будет возможно показать настоящую частицу X в лабораторных условиях, существование ее тем не менее можно продемонстрировать, зарегистрировав события, в которых происходит обмен виртуальной X-частицей. Даже такой обмен будет происходить крайне редко, так как он становится возможным, лишь когда две элементарные частицы случайно окажутся в пределах  $10^{-29}$  см друг от друга. Однако обмен X-частицей будет легко различим среди любого хаоса обычных событий, потому что X-частицы умеют делать то, что не умеют никакие другие: они могут преобразовывать кварк в лептон или кварк в антикварк. Этот процесс ставит под сомнение стабильность всего вещества.

## □

Взаимодействия, осуществляемые X-частицами, отличаются от всех других тем, что в них нарушается сохранение величины, называемой барионным числом. Барионное число любой частицы можно определить как одну треть числа кварков минус одна треть числа антикварков. Следовательно, протон и все другие частицы, сделанные из трех кварков, имеют барионное число  $+1$ , в то время как  $\pi$ -мезон и другие частицы, состоящие из кварка и антикварка, имеют барионное число 0. Конечно, для всех лептонов барионное число равно 0, так как они не содержат ни кварков, ни антикварков. Ни в сильных, ни в слабых, ни в электромагнитных взаимодействиях барионное число не меняется. Если сохранение барионного числа было бы абсолютным законом природы, протон никогда не мог бы распасться, поскольку протон — наилегчайшая частица с ненулевым барионным числом. Именно этот распад и предсказывается объединением SU(5).

Проиллюстрируем возможное нарушение сохранения барионного числа на примере протона, который составляет ядро водородного атома. Протон состоит из кварков u, u и d, по одному кварку каждого цвета. Если два из этих кварков окажутся на расстоянии  $10^{-29}$  см, между ними может произойти обмен X-частицей. Например, правополяризованный красный кварк d может излучить X с электрическим зарядом  $-4/3$  и цветовыми зарядами, соответствующими красному цвету. Этот кварк d, потеряв цветовой заряд и получив электрический заряд  $+1$  вместо  $-1/3$ , становится, таким образом, позитроном. Частица X затем может поглощаться левополяризованным зеленым кварком u, который переходит в левополяризованный антикварк  $\bar{u}$  антисинего цвета. Новый антикварк  $\bar{u}$  в комбинации с третьим кварком u образует нейтральный  $\pi$ -мезон. Барионное число u и у позитрона, и у  $\pi$ -мезона равно нулю, так что полное барионное число меняется от  $+1$  до 0.

Если бы такое событие наблюдалось в лабораторных условиях, обмен  $X$ -частицей не был бы отмечен непосредственно. Видимым был бы только распад протона в позитрон и нейтральный  $\pi$ -мезон. Более того, процесс на этом не заканчивается. Позитрон после этого столкнется с электроном (может быть, с электроном этого же атома водорода) и они аннигилируют, образовав  $\gamma$ -лучи, или высокоэнергичные фотоны. Кварк  $u$  и антикварк  $\bar{u}$ , входящие в состав нейтрального  $\pi$ -мезона, в конце концов тоже аннигилируют таким же образом и образуют добавочные  $\gamma$ -лучи. В конечном итоге атом водорода превратился в чистое излучение. Этот

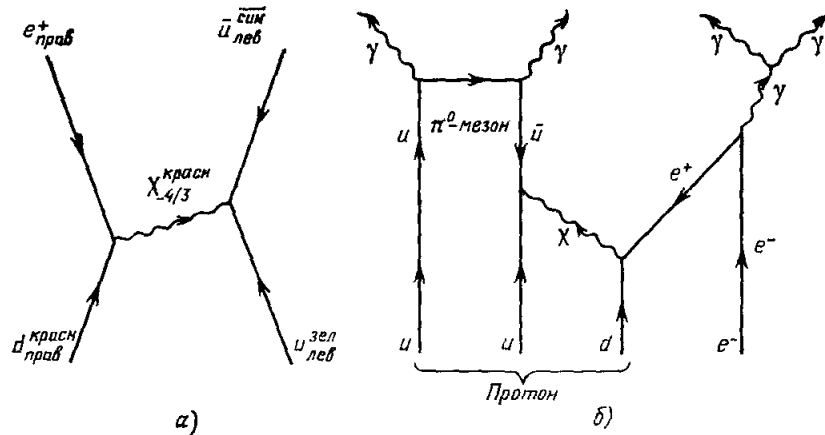


Рис. 16. Распад протона является неизбежным следствием переходов  $SU(5)$ , которые преобразуют кварк в лептон или кварк в антикварк.

Такой переход показан на диаграмме а). Вначале правополяризованный красный кварк  $d$  излучает красную частицу  $X$  с электрическим зарядом  $-4/3$ ; в результате кварк переходит в правополяризованный позитрон. Затем  $X$ -частицы поглощаются левополяризованным зеленым кварком  $u$ , который после этого становится левополяризованным антисиним антикварком  $\bar{u}$ . Диаграмма б) показывает результат процесса, который происходит с протоном, являющимся ядром атома водорода. Протон имеет кварковый состав  $uud$ . В результате обмена  $X$ -частицей кварк  $d$  становится позитроном, который затем сталкивается с электроном атома (или другим электроном) и они аннигилируют с образованием высокоэнергичных фотонов. В протоне после  $X$ -обмена остаются кварк  $u$  и антикварк  $\bar{u}$ , которые образуют нейтральный  $\pi$ -мезон. Этот нейтральный  $\pi$ -мезон тоже распадается на высокоэнергичные фотоны. Таким образом, конечным результатом  $X$ -обмена явилось преобразование полной массы водородного атома в электромагнитное излучение.

процесс представляет собой намного более эффективное превращение вещества в энергию, чем ядерное деление или термоядерный синтез. Образование гелия путем слияния атомов водорода высвобождает менее 1% их массы в виде энергии, тогда как процесс, описанный выше, освобождает 100% массы.

Внезапное исчезновение протона, а следовательно, и атома, должно быть довольно редким событием, иначе оно было бы давно замечено. Действительно, ожидаемая вероятность очень мала, так как частицы редко подходят друг к другу на расстояние, когда возможен обмен  $X$ -частицей.

Квинн, Вайнберг и я использовали наши расчеты масштаба объединения для оценки среднего времени жизни протона. Эти оценки впоследствии были улучшены другими, среди которых были Бурас, Эллис, Гайяр и Нанопулос из ЦЕРНа, Теренс Дж. Голдман и Дуглас А. Росс из Калифорнийского Технологического института и Уильям Дж. Марчиано из Рокфеллеровского университета. Эти оценки показывают, что среднее время жизни протона составляет около  $10^{31}$  лет.

□

Очевидно, ждать  $10^{31}$  лет распада одного протона, чтобы проверить теорию  $SU(5)$ , лишено практического смысла. Возраст Вселенной со времени Большого взрыва всего лишь около  $10^{10}$  лет. Однако поиск распада протона не безнадежен. Среднее время жизни  $10^{31}$  лет означает, что за год распадается один из каждых  $10^{31}$  протонов. В 1000 тонн вещества содержится около  $5 \cdot 10^{32}$  протонов и нейтронов, так что можно ожидать, что около 50 из них каждый год будут распадаться. Следовательно, стратегия поиска событий, нарушающих сохранение барионного числа, должна заключаться в наблюдении за всем, что происходит в объеме, содержащем не менее 1000 тонн вещества, и выделении случаев распада протонов и нейтронов среди обычных событий.

Несколько исследовательских групп планируют эксперименты такого масштаба. Эксперименты будут проводиться глубоко под землей или водой, чтобы свести к минимуму число космических лучей, проходящих через исследуемое вещество. Космические лучи вызывают взаимодействия, которые могут по ошибке быть приняты за распад протона. Один из экспериментов будет проводиться в соляной шахте вблизи Кливленда, второй — в серебряной шахте в штате Юта и третий — в железнорудной шахте в Миннесоте. Эксперименты несколько меньшего масштаба планируются в двух тоннелях под Альпами, и еще меньшие эксперименты уже начаты в золотых шахтах в Южной Дакоте и в Индии. Возможно, что энергия, необходимая для образования  $X$ -частиц, навсегда останется за пределами возможностей машин, созданных человеком, и, может быть, нигде в природе не существует процесса, способного генерировать такую энергию. Однако в более раннюю эру  $X$ -частицы были обычным явлением. Примерно через  $10^{-40}$  с после Большого взрыва размер Вселенной был сравним с масштабом объединения. Вселенная была такой горячей (около  $10^{18}$  К), что все частицы имели энергию, сравнимую с массой  $X$ -частиц. Следовательно, симметрия  $SU(5)$  только начала нарушаться и кварк-лептонные переходы происходили так же часто, как и любые другие взаимодействия. Никаких фундаментальных различий между кварками и лептонами или между сильным, слабым и электромагнитным взаимодействиями не было: был один вид материи и одно взаимодействие.

Остаток этой эры явной симметрии сохранился во Вселенной до сих пор: в некотором смысле наша Вселенная и есть этот остаток. Старая загадка астрофизики заключена в вопросе, почему Вселенная построена из вещества, а не из антивещества. Действительно, в простейшем случае можно было бы ожидать существования равного количества вещества и антивещества, которые затем аннигилируют, не оставляя после себя ничего, кроме излучения. Объединение  $SU(5)$  предлагает другое возможное объяснение существующего избытка вещества. Возможно, что свободный обмен  $X$ -частицами в короткий период, после  $SU(5)$ -симметрии, был нарушен, в результате чего образовалось больше кварков, чем антикварков, и, следовательно, больше барионов, чем антибарионов.

Это захватывающее предположение о том, что процессы, нарушающие сохранение барионного числа, ответственны за избыток барионов, впервые было высказано русским физиком Андреем Сахаровым в 1967 г. Несколько позже Мотохико Июшимура, из университета Тохоку, показал, что несохранение барионного числа, предсказываемое едиными теориями, обладает нужными свойствами, чтобы объяснить наблюдаемый избыток. В разработке этой идеи принимали участие и многие другие, в том числе Эллис, Гайяр, Нанопулос, Вайнберг, Савас Димопулос и Леонард Сасскинд из Стэнфордского университета и Сэм Б. Тримен, Антони Зи и Вильчек из Принстона. Они показали, что избыток барионов может возникать,

только если процессы, нарушающие сохранение барионного числа, выглядят по-другому, когда они направлены назад во времени. В теории  $SU(5)$  это условие выполняется. Таким образом, одним из вещественных доказательств в пользу объединения  $SU(5)$ , хотя и косвенным, является само существование материи.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Georgi H., Glashow S. L.— Phys. Rev. Lett., 1974, v. 32, p. 438.  
Georgi H.— Nature, 1980, v. 288, No. 5792, p. 649.