

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

ПОЧЕМУ НЕТ СВОБОДНЫХ КВАРКОВ*)

Й. Намбу

Как получается, что элементарные частицы материи, объясняющие так много свойств других частиц, сами до сих пор не наблюдались? Возможно, они удерживаются внутри других частиц силами, неотъемлемо связанными с их природой.

Элементарная частица материи есть, строго говоря, то, что не имеет структуры, т. е. то, что не может быть разделено на более мелкие составляющие части. В последнее десятилетие или около этого стало очевидным, что многие частицы, долгое время считавшиеся элементарными, включая такие привычные, как протон и нейтрон, на самом деле вовсе не элементарны, а являются сложными структурами, составленными из более фундаментальных сущностей, названных кварками, во многом подобно тому, как атом составлен из ядра и электронов.

Кварковая модель означает впечатляющее упрощение природы. В первоначальной формулировке теории предполагалось существование всего трех кварков, которых было достаточно для объяснения свойств целого класса частиц, охватывающего несколько десятков адронов. Каждую известную частицу из этого класса можно было представить как комбинацию кварков, более того, каждая разрешенная комбинация, составленная из кварков, соответствовала известной частице. Соответствие теории с опытом было слишком хорошим, чтобы его можно было считать случайным, и были предприняты экспериментальные попытки обнаружить сами кварки.

Если кварки действительно существуют, то разумно считать, что мы можем их наблюдать. Мы знаем, что атом состоит из ядра и окружающего его облака электронов, потому что можем разделить атом на части, и изучать эти части по отдельности. Мы знаем, что ядро, в свою очередь, состоит из протонов и нейтронов потому, что ядро всегда можно расщепить и зарегистрировать составляющие его частицы. Легко представить себе аналогичный эксперимент, в котором частицы, о которых мы думаем, что они состоят из кварков, например, протоны, разрушаются в результате очень сильного воздействия. Однако, когда мы пытаемся это проделать, получаемые осколки опять состоят из протонов и других известных частиц. Никаких объектов со свойствами, ожидаемыми у кварков, при этом не наблюдается. Физики искали всюду, но свободные кварки найдены не были.

*) Yoichiro Nambu, The Confinement of Quarks, Scientific American 235(5), 48—60 (November 1976). Перевод М. Б. Волошина.

Йоширо Намбу — декан физического факультета Чикагского университета, США.

© Scientific American, Inc., 1976.

© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической
литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук», 1978.

Не исключено, конечно, что кварки искали не там, где надо, или при помощи не тех приборов, но теперь такая возможность кажется маловероятной. Возможно также, что кварки просто не существуют, однако физикам нелегко расстаться с теорией, обладающей такой предсказательной силой. Успех теории представляет убедительное доказательство того, что кварки существуют внутри таких частиц, как протон; с другой стороны, неизменная неудача экспериментальных поисков свободных кварков

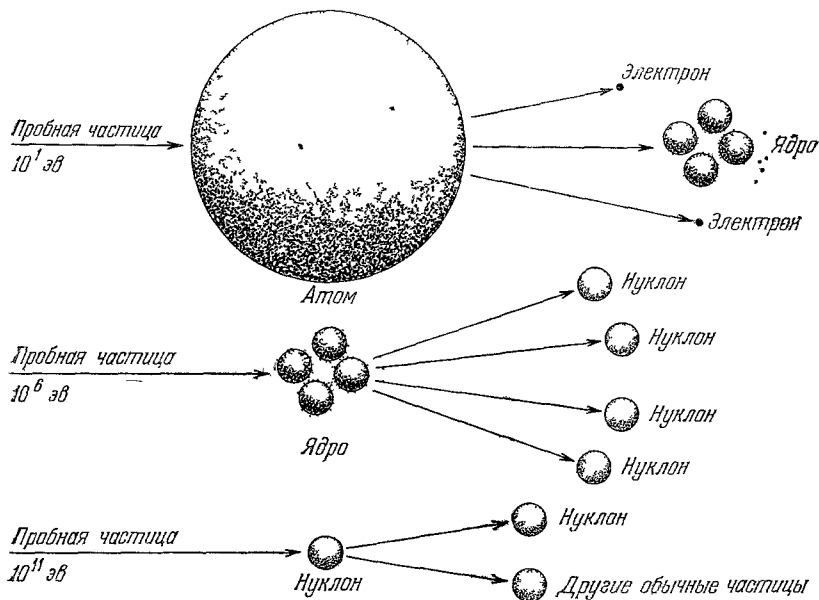


Рис 1. Структура вещества исследовалась во все более мелких деталях с помощью процессов разрушения.

Атом может быть расщеплен на его составные части с помощью частиц — снарядов, обладающих сравнительно малой энергией — несколько электрон-вольт. Это процесс, называемый ионизацией, в крайнем случае в этом процессе разделяются свободные электроны и ядро. Ядро также может быть разрушено, хотя для этого требуется большая энергия. Ядро расщепляется на свободные протоны и нейтроны, которые имеют общее название — нуклоны. Нуклоны в свою очередь, по-видимому, состоят из точечных сущностей, называемых кварками, и, казалось бы, кварки можно высвободить, ударив по нуклону пробной частицей с достаточно большой энергией. Однако, когда мы пытаемся поставить такой опыт, то свободные кварки не наблюдаются, вплоть до самых высоких достижимых в настоящее время энергий (несколько сотен миллиардов электрон-вольт). Вместо этого наблюдается образование обычных частиц, включая те, которые считаются составленными из кварков. Возможное объяснение этого явления состоит в том, что кварки постоянно удерживаются внутри нуклона.

говорит о том, что кварки не существуют независимо. Этот парадокс может быть разрешен только с помощью дальнейших теоретических предположений о кварках и связывающих их силах. Нужно показать, что кварки существуют, но что по какой-либо причине они не проявляют себя вне частиц. Теоретики, и в первую очередь те из них, кто изобрел кварки, озабочены теперь тем, чтобы объяснить, почему кварки не покидают частиц, в состав которых они входят.

□

Частицы, считающиеся составленными из кварков, называются адронами. Они отличаются тем, что взаимодействуют друг с другом с большой силой, той силой, которая связывает частицы в атомном ядре. (Слово «адрон» образовано от греческого *αδρός*, что означает крепкий или сильный.) Никакие другие частицы эту силу не чувствуют.

Адроны разделяются на две большие подгруппы — барионы и мезоны. Эти два типа частиц различаются по многим свойствам, и в действительности

сти играют разные роли в структуре вещества, однако именно в кварковой модели различие между ними может быть сделано наиболее четким. Все барионы состоят из трех кварков, и также существуют антибарионы, состоящие из трех антикварков. Протон и нейтрон являются наиболее легкими и наиболее изученными из барионов. Мезоны же имеют другую структуру — они состоят из кварка и антикварка. π -мезон, или пион, является легчайшим из мезонов. Свойства адронов можно проиллюстрировать, рассматривая их в сопоставлении с другой основной группой частиц — лептонами. Лептоны нечувствительны к сильному взаимодействию (в противном случае они были бы адронами). Лептонов известно всего четыре: электрон, мюон, электронное нейтрино и мюонное нейтрино (вместе с соответствующими античастицами). Лептоны, по-видимому, истинно элементарны — они не имеют внутренней структуры. В самом деле, они явно не имеют сколько-либо протяженных размеров, и поэтому их можно представлять в виде точечных объектов, у которых невозможно предположить наличие какой-либо внутренней структуры.

Адроны отличаются от лептонов во многих отношениях и дают нам много оснований считать их составными. Адроны имеют конечный размер, хотя и чрезвычайно малый — около 10^{-13} см. Эксперименты, в которых протоны и нейтроны сталкиваются при высокой энергии с другими частицами, дают достаточно прямое свидетельство в пользу существования у них внутренней структуры: электрическое и магнитное поля, а также поле, связанное с сильным взаимодействием, по-видимому, порождаются точечными источниками, находящимися внутри частиц. Наконец, существует огромное множество адронов. Число известных в настоящее время адронов куда больше сотни, большинство из них имеет очень короткое время жизни, и есть все основания полагать, что существует еще очень много частиц, не наблюдавшихся до сих пор только потому, что современные ускорители элементарных частиц не дают достаточной энергии для их создания. Нет никакого очевидного ограничения на число частиц, которые могут быть найдены, если будут построены более мощные ускорители.

Таблица I

Свойства кварков определяются квантовыми числами, прсбегающими дискретный ряд значений. В первоначальной формулировке кварковой модели было введено три кварка, обозначаемых буквами u , d и s («up», «down» и «sideways» или «strange»). Сейчас имеются указания на существование четвертого кварка, обозначаемого c («charm»). Кварки имеют дробные электрические заряды и дробные значения барионного числа — квантового числа, отличающего мезоны от барионов. Спиповое квантовое число отражает внутренний момент импульса кварков; странность и очарование относятся к некоторым специфическим свойствам s - и c -кварков. Для каждого кварка существует соответствующий ему антикварк с противоположными квантовыми числами.

| | | Спин (J) | Электрический заряд (Q) | Барионное число (B) | Странность (S) | Очарование (C) |
|------------|---------------------|--------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| Кварки | u (up) | 1/2 | +2/3 | 1/3 | 0 | 0 |
| | d (down) | 1/2 | -1/3 | 1/3 | 0 | 0 |
| | s (strange) | 1/2 | -1/3 | 1/3 | -1 | 0 |
| | c (charmed) | 1/2 | +2/3 | 1/3 | 0 | +1 |
| Антикварки | \bar{u} (up) | 1/2 | -2/3 | -1/3 | 0 | 0 |
| | \bar{d} (down) | 1/2 | +1/3 | -1/3 | 0 | 0 |
| | \bar{s} (strange) | 1/2 | +1/3 | -1/3 | +1 | 0 |
| | \bar{c} (charmed) | 1/2 | -2/3 | -1/3 | 0 | -1 |

Именно изобилие адронов привело к формулировке модели кварков. Без какого-либо упорядочивающего принципа такое обширное семейство частиц казалось чрезвычайно громоздким, а возможность, что все эти частицы могут быть элементарными, вызывала раздражение у тех, кто был убежден, или по крайней мере надеялся, что природа должна быть устроена просто. Кварковая модель заменила все многообразие адронов всего лишь тремя кирпичиками, из которых могли быть построены все адроны. Она была предложена в 1963 г. независимо М. Гелл-Манном и Г. Цвейгом, которые оба работали в Калифорнийском технологическом институте. Термин кварк предложен Гелл-Манном, который заимствовал его из фразы в романе Дж. Джойса «Поминки по Финнегану»: «Три кварка для мистера Марка!».

Непосредственным толчком к появлению кварковой гипотезы явилось открытие, сделанное Гелл-Манном и Ю. Неemanом из университета Тель-Авива, что все адроны можно логичным образом сгруппировать в семейства, каждое из которых содержит небольшое количество частиц. Мезоны образуют семейства из одной и из восьми частиц, а барионы — семейства из одной, восьми и десяти частиц.

Классификация частиц упрощается, если их свойства выражать в числовой форме. Каждое число относится к одному свойству и может принимать только определенные дискретные значения. Так как эти числа выражаются в дискретных единицах, или квантах, то они называются квантовыми числами. Полный набор квантовых чисел частицы позволяет однозначно ее идентифицировать и определить ее свойства.

Типичным квантовым числом является электрический заряд. Фундаментальной единицей измерения является электрический заряд протона или электрона, и в этих единицах заряды всех известных частиц могут быть выражены простейшими целыми числами (такими, как 0, +1, -1). Другое квантовое число называется барионным числом. Барионам приписывается барионное число +1, а антибарионам -1. Мезоны имеют барионное число, равное нулю. Странность — свойство адронов, введенное в 1950 г. для того, чтобы объяснить странно большие времена жизни некоторых тяжелых частиц, — также учитывается соответствующим квантовым числом, принимающим также только целочисленные значения.

□

Одним из наиболее важных квантовых чисел является спиновый момент импульса. Согласно правилам квантовой механики свойства частицы относительно вращений являются внутренними неизменными свойствами, поэтому частица всегда должна обладать определенным и неизменным моментом импульса (момент импульса измеряется в единицах постоянной Планка, деленной на 2π , постоянная Планка равна $6,6 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек). Обычно делается существенное разделение между частицами с полуцелыми спинами (т. е. равными половине нечетного числа, например, $3/2$ или $1/2$) и частицами с целым спином (0, 1, 2). Как мы увидим, такое разделение определяет поведение частиц в тех случаях, когда они вместе образуют связанную систему; сейчас же достаточно отметить, что все барионы имеют полуцелый спин, а все мезоны — целый.

Семейства частиц, определенные Гелл-Манном и Неemanом, образуются по признаку спинового момента. Все частицы одного семейства имеют одинаковую величину спина. Внутри семейств частицы отличаются одна от другой двумя другими квантовыми числами — изотопическим спином и гиперзарядом. Несмотря на его название, изотопический спин не имеет никакого отношения к моменту импульса; он определяется по числу частиц, входящих в данную группу. Гиперзаряд определяется электрическим

рядом этих частиц, и он также связан как с барионным числом, так и со странностью. Из всех возможных комбинаций значений, которые могут принимать эти два числа, можно построить решетку квантовых чисел для каждого семейства адронов. Эти решетки из одного, восьми или десяти узлов предсказывают существование всех известных частиц и никаких других. Построение таких решеток может быть формально описано разделом математики, называемым теорией групп. При этом говорят, что эти решетки образуют представления группы симметрии $SU(3)$, которая обозначает группу унитарных матриц размера 3×3 с определителем, равным единице.

Кварки также описываются группой симметрии $SU(3)$. Гелл-Манн обозначил кварки произвольными буквами u , d и s , что означает «up» «down» и «sideways» *). Все они имеют одинаковый момент импульса, равный $1/2$, и по $SU(3)$ группе образуют одно целое семейство, т. е., очевидно, семейство из трех членов. Все три члена кваркового семейства отличаются значениями изотопического спина и гиперзаряда, другие их квантовые числа также различны. Особенно необычны приписываемые им значения электрического заряда. u -кварк имеет заряд равный $+2/3$, а d - и s -кварки имеют заряд по $-1/3$. Барионные числа кварков также дробные — все кварки имеют барионное число, равное $+1/3$. С другой стороны, странность остается целым квантовым числом — u - и d -кварки имеют нулевую странность, а странность s -кварка равна -1 . Для соответствующих антикварков, которые обозначаются символами \bar{u} , \bar{d} и \bar{s} , все эти квантовые числа имеют такие же абсолютные значения, но с противоположным знаком.

Основное правило для построения адронов из кварков выглядит чрезвычайно просто; оно утверждает, что все квантовые числа адрона могут быть получены простым сложением квантовых чисел составляющих его кварков. Протон, например, состоит из двух u -кварков и одного d -кварка; такая конфигурация записывается в виде uud . Следовательно, электрический заряд протона равен $2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$. Барионное число равно $1/3 + 1/3 + 1/3 = +1$, а странность протона равна нулю, так как равна нулю странность каждого из входящих в него кварков. Все эти суммы находятся в полном соответствии с наблюдаемыми свойствами протона.

Положительно заряженный π -мезон составлен из u -кварка и \bar{d} -антикварка. Электрические заряды составляющих кварков, следовательно, равны $+2/3$ и $+1/3$ и в сумме дают $+1$, а их барионные числа равны $+1/3$ и $-1/3$, что дает требуемое для мезона нулевое значение барионного числа. Странность и в этом случае равна нулю. Вычисление спинового момента импульса требует несколько более изощренных расчетов, поскольку спины кварков могут быть расположены относительно друг друга двумя различными способами, и это расположение определяет знаки, которые должны быть приписаны спиновым квантовым числам кварков при их суммировании. Однако в любом случае комбинации из трех кварков или трех антикварков (барионы и антибарионы) должны обладать полужелым спином, в то время как комбинации из кварка и антикварка (мезоны) должны иметь целочисленное значение спина.

Великая сила кварковой модели заключается в том, что она при помощи этой простой процедуры сложения правильно предсказывает все квантовые числа известных адронов. Необходимо, в частности, подчеркнуть, что все разрешенные комбинации кварков дают целочисленные значения электрического заряда и барионного числа и что никакие другие

*) «Верхний», «нижний», «боковой» (Приж. перев.).

комбинации этим свойством не обладают (за исключением тривиальных случаев кратного повторения разрешенных комбинаций). Более того, все известные адроны могут быть построены либо из трех кварков, либо из кварка и антикварка.

В последние несколько лет стало ясно, что может существовать четвертый кварк, несущий новое квантовое число, несколько похожее на странность и названное, весьма произвольно, очарованием. Новый кварк (обозначаемый буквой s) добавляет новое измерение в группу симметрии адронов, что влечет за собой предсказание множества новых частиц, некоторые из которых, возможно, уже найдены. Введение очарования в кварковую модель, которое все сильнее подкрепляется экспериментальными данными, несет в себе много привлекательных черт и может считаться дополнительным свидетельством в пользу модели, однако оно мало поясняет проблему невылетания кварков.

□

Во многих отношениях кварки похожи на лептоны. Частицы обоих сортов могут быть представлены как безразмерные точки, а если они не имеют протяженности, то предположительно они не имеют и внутренней структуры. Все кварки и все лептоны обладают общим свойством — их спин равен $1/2$. Наконец, если правильна гипотеза очарования, то каждая из этих групп включает по четыре частицы; в действительности именно симметрия была первоначально основной побуждающей причиной для введения понятия очарования. (С другой стороны, число четыре вовсе не обязательно должно быть окончательным числом кварков и лептонов. В обеих группах могут появиться новые неизвестные пока частицы.)

Сходство между кварками и лептонами носит отнюдь не поверхностный характер, однако существуют также важные различия между этими двумя сортами элементарных частиц. В первую очередь, кварки участвуют в сильных взаимодействиях, а лептоны — нет. Кварки также образуют составные системы (адроны), тогда как никаких подобных систем, составленных из лептонов, не существует. Почему, однако, кварки образуют только совершенно определенные составные системы, т. е. состоящие либо из трех кварков, либо из кварка и антикварка? Можно представить себе множество других комбинаций — четыре кварка, два кварка, один кварк и два антикварка и даже состояния, составленные из сотен или тысяч кварков, однако никаких сведений о существовании таких состояний нет. Особый интерес представляет одиночный кварк. Отдельный лептон — явление обычное; какое же отличительное свойство запрещает кваркам появляться по отдельности?

Понятие, которое дало первые, спекулятивные ответы на эти вопросы, было введено для того, чтобы залатать явный пробел в кварковой теории. Этот пробел заключался в явном противоречии между поведением кварков и одним из их квантовых чисел — спиновым моментом импульса. Приписывание спина $1/2$ каждому из кварков важно для того, чтобы правильно предсказать спины барионов. Квантовая механика определяет правила поведения частиц с полуцелым спином, и кварки, как казалось, этим правилам не подчинялись.

Законы квантовой механики устанавливают связь между спином частицы и ее «статистикой», набором правил, определяющих, как могут несколько одинаковых частиц образовывать определенное состояние. О частицах с целочисленным спином говорят, что они подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна, которая позволяет неограниченному числу частиц занимать одно и то же состояние. Частицы с полуцелым спином подчиня-

ются статистике Ферми — Дирака, которая запрещает даже двум тождественным частицам занимать одно квантовое состояние. Это есть принцип запрета, сформулированный В. Паули, — квантовый эквивалент интуитивного ощущения, что никакие два предмета не могут одновременно находиться в одном и том же месте.

Наиболее широко известно применение статистики Ферми — Дирака и связанного с ней принципа запрета в атомной физике, где они определяют порядок, в котором электроны (которые, будучи лептонами, имеют спин, равный $1/2$) заполняют атомные оболочки — уровни энергии в поле ядра. Если на определенном уровне энергии находится один электрон, то на этот уровень можно добавить еще один электрон, при условии, что его спин будет направлен противоположно спину первого. При противоположных направлениях спинов электроны не обладают вполне идентичными квантовыми числами, и поэтому могут находиться в одном энергетическом состоянии, в данном случае на одной атомной оболочке. Поскольку существуют только два возможных расположения электронных спинов, добавление новых электронов на этот уровень совершенно невозможно.

Связь между спином и статистикой пока еще не до конца понята на теоретическом уровне, однако ее существование не вызывает сомнений. В действительности, имеются формальные доказательства, показывающие, что принципу запрета должны подчиняться все частицы с полупелым спином без исключения. Подобно электронам, кварки движутся по оболочкам, хотя их движение происходит не вокруг ядра, а по отношению друг к другу, или, другими словами, вокруг их общего центра масс. В наиболее легких адронах все кварки должны занимать одну и ту же, наинизшую, оболочку. Отсюда следует, что никакие два кварка в адроне не могут иметь в точности одинаковые квантовые числа.

В кварковой модели мезонов требования статистики Ферми — Дирака могут быть легко выполнены. Двумя частицами, составляющими мезон, являются кварк и антикварк, и их квантовые числа различны (в некоторых случаях они даже прямо противоположны). Однако в барионах спин и статистика накладывают взаимно противоречивые требования. По крайней мере в трех барионах (*uuu*, *ddd* и *sss*) все три кварка обладают идентичными квантовыми числами. Так как в барионе находятся три кварка, то по меньшей мере у двух из них спины должны быть направлены в одну сторону, а во многих случаях необходимо, чтобы спины всех трех кварков были ориентированы одинаково. Таким образом, создается впечатление, что принцип запрета нарушается.

Способ, которым можно избежать этого нежелательного заключения, был впервые предложен О. Гринбергом из университета Мэриленда. Гринберг предположил, что кварки могут не удовлетворять статистике Ферми — Дирака, а вместо этого подчиняются другому необычному набору правил, которые он назвал пара-ферми-статистикой по модулю 3. В то время как в статистике Ферми — Дирака определенное состояние может быть занято только одной частицей, в пара-ферми-статистике оно может быть занято тремя частицами, но не более.

Другой подход к этой проблеме был несколько позднее предложен М.-И. Ханом из университета Дьюка и мной, а также, независимо, А. Тавхелидзе в Объединенном институте ядерных исследований в СССР и Й. Миямото в Токийском университете. Вместо того чтобы менять правила, мы изменили кварки. Предполагая наличие у каждого кварка дополнительного квантового числа, которое может принимать три значения, можно составить барион из кварков с различными квантовыми числами, т. е. находящихся в разных квантовых состояниях. Все, что было нужно, — это найти механизм, который в каждом случае гарантировал бы, что кварки,

входящие в барион, имеют различные значения нового квантового числа. Это дополнительное квантовое число известно теперь под названием *цвет*. Трем значениям этого числа удобно сопоставить три основных цвета — красный, зеленый и синий; антикварки обладают антицветами, которые могут быть представлены дополнительными к основным — соответственно сине-зеленый, пурпурный и желтый. (Ни один из этих терминов, разумеется, не имеет никакой связи с его повседневным значением — это всего лишь произвольные обозначения.).

Пара-ферми-статистику можно рассматривать как частный случай гипотезы цвета. Обе теории эквивалентны в предположении, что цвет полностью ненаблюдаем. В этом случае кварки разных цветов будут казаться идентичными по всем свойствам, и, так как не будет способа отличить их один от другого, будет казаться, что идентичные частицы подчиняются необычной статистике. Цвет в этом случае был бы невидимым, или, другими словами, природа обладала бы цветовой слепотой. Гипотеза цвета, однако допускает, что цвет может быть видимым при определенных обстоятельствах.

Таблица II

Дополнительное квантовое число кварков называется цветом и может принимать три значения, представленные тремя основными цветами: красным, зеленым и синим. В отличие от цвета, первоначальные обозначения кварков u , d , s и c иногда называют кварковыми ароматами. (Как цвет, так и аромат являются произвольно выбранными терминами, не имеющими никакого отношения к их повседневным значениям). Предполагается, что кварк каждого аромата существует в трех цветных разновидностях. В одной модели (верхние две строки для каждого аромата кварков), красный, зеленый и синий кварки одного аромата неразличимы, они имеют одни и те же значения электрического заряда (Q), барионного числа (B) и других квантовых чисел. В другой теории (нижние две строки), предложенной автором и М.-Й. Ханом, кварки разных цветов отличаются электрическим зарядом и барионным числом, которые в этой модели могут иметь целые значения. Модель Хана — Намбу не может быть с уверенностью исключена, однако в этой статье мы в основном придерживаемся модели дробнозарядных кварков.

| Ароматы кварков | Цвета кварков | | |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | красный | зеленый | голубой |
| u | $Q = +2/3$ $B = +1/3$ | $Q = +2/3$ $B = +1/3$ | $Q = +2/3$ $B = +1/3$ |
| | $Q = 0$ $B = 0$ | $Q = +1$ $B = 0$ | $B = +1$ $Q = +1$ |
| d | $Q = -1/3$ $B = +1/3$ | $Q = -1/3$ $B = +1/3$ | $Q = -1/3$ $B = +1/3$ |
| | $Q = -1$ $B = 0$ | $Q = 0$ $B = 0$ | $Q = 0$ $B = +1$ |
| s | $Q = -1/3$ $B = +1/3$ | $Q = -1/3$ $B = +1/3$ | $Q = -1/3$ $B = +1/3$ |
| | $Q = -1$ $B = 0$ | $Q = 0$ $B = 0$ | $Q = 0$ $B = +1$ |
| c | $Q = +2/3$ $B = +1/3$ | $Q = +2/3$ $B = 1/3$ | $Q = +2/3$ $B = +1/3$ |
| | $Q = 0$ $B = 0$ | $Q = +1$ $B = 0$ | $Q = +1$ $B = +1$ |

Введение цвета с необходимостью утраивает число кварков. Если рассматриваются только три введенных первоначально кварка, то с учетом цвета их становится девять; если же в рассмотрение включается очарованный кварк, он также должен выступать в красной, зеленой и синей разновидностях, и общее число кварков доходит до 12. При этом, однако, число адронов за счет цвета не увеличивается; цветовая гипотеза не предсказывает новых частиц. Число адронов остается неизменным из-за специального способа, которым цвета распределяются среди кварков в адроне. Если при помощи цвета мы хотим решить проблему кварковой статистики, то существенно, что каждый барион содержит по одному кварку каждого цвета. Если бы барион мог быть составлен из трех, например, красных кварков, то опять квантовые числа всех трех кварков могли бы оказаться идентичными. Только лишь в случае, если все три цвета одинаково представлены в барионе, можно гарантировать выполнение требований принципа запрета. Так как мы приписали кваркам основные цвета, то такая комбинация может быть названа белой или бесцветной. Как мы увидим, теория подразумевает, что все адроны, как барионы, так и мезоны, являются бесцветными. Барионы состоят из равных количеств красного, зеленого и синего цветов, а мезоны являются смесью цвета и антицвета (дополнительного цвета. — *Прим. перев.*).

Формальное рассмотрение цветов кварков влечет за собой постулирование еще одной группы симметрии $SU(3)$, в точности аналогичной той, которая определяет остальные свойства кварков. Два квантовых числа, определяющих цвета кварков, по аналогии с обычной $SU(3)$ -группой, называют цветовым изотопическим спином и цветовым гиперзарядом. Свойства, определяемые обычной $SU(3)$, иногда называют также ароматами кварков, и аромат, в отличие от цвета, легко наблюдаем, его как бы можно «попробовать». Значки u , d , s и c обозначают ароматы кварков,

Таблица III

Объединяясь, кварки образуют класс частиц, называемых адронами. Возможны два типа комбинаций кварков. В комбинациях первого типа три кварка, объединяясь, образуют барион (например, протон) либо три антикварка образуют антибарион (например, антинейтрон). В комбинациях второго типа кварк и антикварк образуют мезон (например, пион). Свойства составных адронов определяются по простому правилу, гласящему, что квантовые числа адрона получаются путем сложения квантовых чисел составляющих его кварков. Все допустимые кварковые комбинации имеют целочисленный электрический заряд. Барионные числа складываются таким образом, что в результате барионы имеют барионное число, равное $+1$, антибарионы -1 , а мезоны 0 . Странными называются те частицы (например, лямбда-барион), которые содержат по крайней мере один s -кварк, а очарованными — те, которые содержат хотя бы один c -кварк. Спиновое квантовое число обладает векторными свойствами и требует несколько более сложной арифметики; в результате сложения спинов кварков все барионы и антибарионы имеют полуцелый спин, а все мезоны — целый. Большой заслугой кварковой теории является то, что все разрешенные комбинации приводят к известным адронам, и никакие другие комбинации этим свойством не обладают. Проблема невылетаия кварков состоит в том, чтобы объяснить, почему в природе существуют только такие комбинации и почему не наблюдаются отдельные кварки.

| Свойства | Составляющие кварки | | | Адроны, протон (p) | |
|-------------------------|--|---|-----|-----------------------|----------|
| | u | u | d | | |
| Спин (J) | (1/2, 1/2) + (1/2, 1/2) + (1/2, -1/2) = (1/2, 1/2) | | | | |
| Электрический заряд (Q) | 2/3 | + | 2/3 | - 1/3 = +1 | |
| Барионное число (B) | 1/3 | + | 1/3 | + | 1/3 = +1 |
| Странность (S) | 0 | + | 0 | + | 0 = 0 |
| Очарование (C) | 0 | + | 0 | + | 0 = 0 |

Продолжение табл III

| | u | \bar{d} | Пион (π^+) | |
|-----------------------------|---------------|-----------|-----------------------------|---------------------------|
| Спин (J) | $(1/2, 1/2)$ | $+$ | $(1/2, -1/2)$ | $= (0, 0)$ |
| Электрический заряд (Q) | $2/3$ | $+$ | $1/3$ | $= +1$ |
| Барионное число (B) | $1/3$ | $-$ | $1/3$ | $= 0$ |
| Странность (S) | 0 | $+$ | 0 | $= 0$ |
| Очарование (C) | 0 | $+$ | 0 | $= 0$ |
| | \bar{u} | \bar{d} | \bar{d} | Антинейтрон (\bar{n}) |
| Спин (J) | $(1/2, -1/2)$ | $+$ | $(1/2, 1/2)$ | $= (1/2, 1/2)$ |
| Электрический заряд (Q) | $-2/3$ | $+$ | $1/3$ | $= 0$ |
| Барионное число (B) | $-1/3$ | $-$ | $1/3$ | $= -1$ |
| Странность (S) | 0 | $+$ | 0 | $= 0$ |
| Очарование (C) | 0 | $+$ | 0 | $= 0$ |
| | u | d | s | Лямбда (Λ^0) |
| Спин (J) | $(1/2, 1/2)$ | $+$ | $(1/2, -1/2)$ | $= (1/2, 1/2)$ |
| Электрический заряд (Q) | $2/3$ | $-$ | $1/3$ | $= 0$ |
| Барионное число (B) | $1/3$ | $+$ | $1/3$ | $= +1$ |
| Странность (S) | 0 | $+$ | 0 | $= -1$ |
| Очарование (C) | 0 | $+$ | 0 | $= 0$ |
| | c | \bar{u} | Очарованный мезон (D^0) | |
| Спин (J) | $(1/2, 1/2)$ | $+$ | $(1/2, 1/2)$ | $= (0, 0)$ |
| Электрический заряд (Q) | $2/3$ | $-$ | $2/3$ | $= 0$ |
| Барионное число (B) | $1/3$ | $-$ | $1/3$ | $= 0$ |
| Странность (S) | 0 | $-$ | 0 | $= 0$ |
| Очарование (C) | 1 | $+$ | 0 | $= +1$ |

и они определяют все наблюдаемые свойства, такие, как электрический заряд, образуемых ими адронов. Симметрия между ароматами не является совершенной, и кварки различных ароматов имеют несколько разные массы. Цвет, с другой стороны, имеет точную симметрию; в обычной формулировке теории кварк данного аромата обладает одной и той же массой и свойствами независимо от его цвета.

□

Цвет был введен в кварковую теорию ad hoc как элемент для решения проблемы кварковой статистики. С тех пор он стал центральной характеристикой модели. В частности, предполагается, что он определяет силы, удерживающие кварки вместе внутри адрона, и следовательно, оказывает глубокое влияние на невыедание кварков. В таком контексте качественное различие между лептонами и кварками начинает становить-

ся понятным. Важным элементом в этом различии является то, что лептоны не образуют сильно связанных систем. Если же цветовое квантовое число является ответственным за связывание кварков в адроны, то легко понять отсутствие сильной связи у лептонов, так как они не имеют цвета.

Для того чтобы понять свойства сил, действующих между кварками, полезно рассмотреть сначала более знакомые силы — электромагнитные. Электромагнитные силы описываются законом Кулона, который утверждает, что сила между двумя заряженными телами убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Например, сила, действующая между одним из протонов в ядре и одним из электронов, окружающих это ядро, описывается этим законом. Эту силу можно рассматривать как переносимую полем или дискретными частицами, фотонами — квантами электромагнитного поля. В конечном счете, как сила, так и поле получаются из зарядов частиц; поскольку заряды противоположны, то сила, действующая между ними, является силой притяжения.

Силы, действующие между кварками, во многих отношениях похожи на электромагнитные, однако они устроены несколько более сложно. В случае электромагнитного поля только одно квантовое число (электрический заряд) участвует в создании поля, тогда как кварковые поля создаются двумя квантовыми числами — цветовым изотопическим спином и цветовым гиперзарядом. Чтобы продолжить аналогию с электромагнетизмом, эти квантовые числа можно рассматривать как две разновидности цветного заряда.

Для того чтобы комбинация кварков была стабильной, силы между ними, очевидно, должны быть силами притяжения. Это может быть, если все кварки, например, в барионе, имеют разные цвета, так как в этом случае кварки будут иметь разные значения двух разновидностей цветного заряда. Красный и зеленый кварки окажутся связанными друг с другом потому, что их цветовые изотопические спины имеют противоположные значения, синий кварк будет связан с двумя другими из-за различия в знаках цветового гиперзаряда. Аналогичный механизм обеспечивает силу притяжения между кварком одного цвета и антикварком соответствующего антицвета в мезоне. Эти силы притяжения делают наиболее предпочтительными именно те комбинации кварков, которые были определены как белые или бесцветные.

На самом деле ситуация еще более сложна. Если электромагнитная сила переносится частицами одного типа, фотонами, то сила, связанная с цветами кварков, требует восьми полей и восьми промежуточных частиц. Эти частицы были названы глюонами, так как они «склеивают» кварки в адронах *). Подобно фотонам все они безмассовые и имеют спин, равный единице; подобно кваркам они не были обнаружены как свободные частицы.

Можно считать, что эти восемь глюонов имеют сложные цвета, составленные из различных комбинаций трех цветов и трех антицветов. Всего имеется девять таких комбинаций, но в одну из них дают одинаковый вклад сочетания: красный — антикрасный, зеленый — антизеленый и синий — антисиний. Так как эта комбинация эффективно бесцветная, она представляет собой тривиальный случай и исключается из рассмотрения. При этом остаются восемь цветных глюонов.

Кварки взаимодействуют посредством обмена глюонами; когда такой обмен происходит, они могут изменить свои цвета, но не ароматы. В каждый момент времени барион содержит красный, зеленый и синий кварки, но, поскольку постоянно между кварками происходит обмен глюонами, невозможно в данный момент сказать, каким из цветов обладает каждый

*) «Glue» по-английски означает клей. (Прим. перев.)

кварк. Аналогично мезон всегда состоит из кварка одного цвета и антикварка соответствующего дополнительного антицвета, однако все три сочетания цвета и антицвета представлены равноправно. В квантовой механике мы не можем точно знать цвета кварков в каждый момент времени,

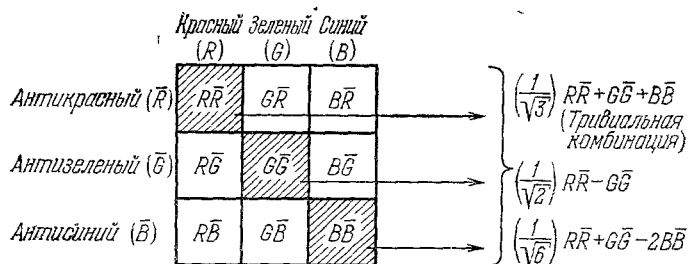


Рис. 2. Цветные глюоны — это частицы, переносящие силы, действующие между кварками; они являются квантами полей, создаваемых цветными квантовыми числами, так же как фотоны являются квантами электромагнитного поля.

Глюоны можно рассматривать как комбинацию цвета и антицвета. Всего имеется девять возможных комбинаций из трех цветов и трех антицветов; шесть из них (незаштрихованные клетки) очевидны, однако три остальные (заштрихованные клетки) требуют специального рассмотрения. В этих трех клетках выписаны комбинации, содержащие цвет и соответствующий ему антицвет, т. е. такие комбинации, в которых все квантовые числа взаимно сокращаются. Состояния с нулевыми квантовыми числами можно складывать с произвольными коэффициентами, однако каждый раз достаточно рассматривать только три линейно независимые комбинации комбинаций. Одна из таких линейных комбинаций имеет вид $R\bar{R} + G\bar{G} + B\bar{B}$ и в ней все квантовые числа по-прежнему равны нулю. Эта комбинация тривиальна и может быть исключена из рассмотрения. Оставшиеся две имеют вид $R\bar{R} - G\bar{G}$ и $R\bar{R} + G\bar{G} - 2B\bar{B}$, и их можно рассматривать наравне с шестью другими глюонами, введя лишь необходимые поправочные численные множители.

вместо этого мы можем знать только вероятность того, что кварк имеет определенный цвет. Если все адроны бесцветны, вероятности каждого из цветов одинаковы.

Модели адронов, в которой эти частицы составляются из кварков, связанных за счет глюонного обмена, может быть придана очень элегантная математическая форма. Эта модель является примером неабелевой калибровочной теории. Теории такого типа были впервые построены. Ц. Янгом из Нью-Йоркского университета в Стони-Брук и Р. Миллсом из университета Огайо. Калибровочная теория строится по образу электродинамики Максвелла. Для таких теорий характерным является то, что каждая частица, несущая определенное квантовое число или заряд, создает дальнoдействующее поле, напряженность которого пропорциональна этому квантовому числу. В теории Максвелла квантовым числом, создающим поле, является электрический заряд, в модели структуры адронов таких квантовых чисел два, а именно те квантовые числа, которые связаны с цветом кварка.

Теория Максвелла является абелевой теорией; неабелевы теории отличаются от нее тем, что в них поля сами несут квантовые числа. Таким образом, в неабелевой теории поле действует как источник самого себя. Теория гравитации Эйнштейна также является неабелевой, и в ней гравитационное поле само является источником гравитации. Электромагнетизм и слабое взаимодействие, ответственное за некоторые радиоактивные распады, недавно были объединены в еще одну калибровочную теорию Стивенom Вайнбергом из Гарвардского университета и Абдусом Саламом из Международного центра теоретической физики в Триесте. Модель цветных кварков также дает возможность описать аналогичным образом сильные взаимодействия. Эти четыре взаимодействия — сильное, слабое, электро-

магнитное и гравитационное, исчерпывают все известные в природе силы, и если бы все их удалось понять на основе теорий одного типа, это принесло бы огромное эстетическое удовлетворение.

□

Прежде чем обсуждать модели невыедания кварков, полезно было бы обсудить противоположную возможность, когда невыедания вовсе нет. Может быть, свободные кварки успешно существуют, а мы просто не смогли обнаружить их присутствие, или спутали с другими обычными частицами. Если бы дробно-зарядный кварк смог покинуть адрон, то сам по себе он почти наверняка был бы стабилен. Один кварк мог бы распадаться, давая другой кварк, возможно, наряду с обычными частицами, но по крайней мере один из кварков, с наименьшей массой, должен быть абсолютно стабильным. Он не мог бы распадаться, потому что все остальные частицы, кроме кварков, имеют целые заряды и не могут составлять продуктов распада дробно-заряженного кварка.

Такие свободные, стабильные кварки вполне могли бы находиться среди атомов обычного вещества, а также, если бы они могли вылетать из адронов, должны были бы присутствовать в продуктах высокоэнергетических столкновений адронов, как на ускорителях, так и при соударениях космических лучей с атомами в атмосфере. Главным аргументом против существования таких свободных кварков является то, что они не были найдены даже в самых микроскопических концентрациях в обычном веществе, и не обнаружены в продуктах адронных столкновений. Если бы дробно-заряженные кварки существовали, их легко можно было бы зарегистрировать и опознать. Заряженные частицы регистрируются по ионизации ими окружающих атомов. Степень ионизации пропорциональна квадрату электрического заряда частицы. Поэтому кварк с зарядом $1/3$ вызывал бы ионизацию, равную всего лишь одной девятой ионизации от частицы с единичным зарядом, и его легко можно было бы отличить от обычных частиц.

Возможно, однако, что кварки не имеют дробных зарядов. С введением цвета в кварковую теорию становится возможным приписать каждому кварку целые значения как электрического заряда, так и барионного числа. Такая модель была предложена Ханом и мной в 1965 г. Эта модель делает цвет видимым, в том смысле, что кварки разных цветов имеют разные массы, электрические заряды и барионные числа и, таким образом, могут быть отличены друг от друга. Для каждого аромата кварков весь электрический заряд ($+1$ или -1) приписывается кварку одного цвета, а кварки двух других цветов имеют нулевой заряд. Если все цвета представлены в адроне равноправно, то полный заряд адрона имеет правильную величину. Если кварки действительно имеют целочисленные заряды, то свободный кварк на опыте мало отличался бы от обычного бариона и их легко можно было бы спутать. Такая возможность все еще не может быть с уверенностью исключена.

Существует еще одна гипотеза, согласно которой кварки из адронов извлечь трудно, но не невозможно. Может быть они просто очень тяжелые, и существующие сегодня ускорители не обладают достаточной мощностью, чтобы высвободить кварки. Такая гипотеза, однако, требует, чтобы масса свободного кварка сильно отличалась от массы связанного. В самом деле, одиночный кварк должен быть тяжелее бариона, составленного из трех кварков. Такую точку зрения трудно понять, если только она вообще является постижимой.

Цветная теория структуры адронов естественно ведет по крайней мере к частичному невыеданию кварков. Атом является наиболее устой-

чивым, когда он электрически нейтрален, т. е. когда в нем содержится ровно столько электронов, чтобы уравновесить положительный заряд ядра. Любая попытка добавить еще один электрон или удалить один из связанных электронов наталкивается на сопротивление. Точно таким же образом система из кварков наиболее стабильна, когда в ней содержатся все три цвета или цвет и антицвет; в этом случае адрон нейтрален по отношению к обоим типам цветных зарядов. Едва ли этот результат удивителен — цветовые квантовые числа были введены именно для того, чтобы достигнуть одинакового представительства цветов кварков в барионах. Следовательно, поскольку отдельный кварк с необходимостью является цветной частицей, он представляет собой энергетически невыгодную конфигурацию. Свободные кварки будут стремиться объединяться в бесцветные адроны, точно так же как свободные электроны и ионизированные атомы стремятся рекомбинировать. Это проявление цвета кварков не исключает возможности их существования в свободном виде, однако оно сильно затрудняет образование свободных кварков. Это свойство цвета также означает, что свободный кварк или любая другая цветная система должны быть менее стабильны, или более массивны, чем бесцветные состояния.

□

Со времени своего появления в 1963 г. кварковая модель претерпела существенные изменения и стала значительно более развитой. Есть все основания полагать, что она будет развиваться дальше, и вполне возможно, что сегодняшняя настоятельная необходимость объяснения невылетания кварков отпадет ввиду появления новых событий, таких, возможно, как открытие свободных кварков. Однако сегодня остается фактом, что все экспериментальные поиски кварков, основанные на разумных предположениях об их свойствах, закончились неудачей. Этот неизменно отрицательный результат требует объяснения. Один из подходов к такому объяснению состоит в том, чтобы постулировать механизм, постоянно удерживающий кварки внутри адрона, и абсолютно запрещающий существование свободных кварков. Механизм невылетания кварков может быть обеспечен несколькими существующими теориями, некоторые из которых являются собой образцы исключительного остроумия.

Одна из таких идей непосредственно вытекает из калибровочной теории, лежащей в основе описания взаимодействий цветных кварков. Здесь еще раз можно ярко проиллюстрировать основной принцип, обратившись сначала к аналогичному явлению, наблюдаемому в электромагнитных взаимодействиях.

Поведение электростатического взаимодействия, обратно пропорционального квадрату расстояния (закон Кулона), с огромной точностью проверено на больших расстояниях; однако оно не вполне точно, если сила, действующая между двумя заряженными частицами, например, между электронами, измеряется на очень малых расстояниях. В этом случае расхождение с законом Кулона обусловлено пространственным распределением заряда электрона. В центре электрона сосредоточен отрицательный заряд, называемый голым зарядом, величина которого очень велика; по существу, этот заряд может быть и бесконечным. Этот заряд создает в окружающем его вакууме облако положительных зарядов, которое почти полностью компенсирует голый заряд. Эффективный заряд электрона, если его измерять с достаточного расстояния, есть просто разность зарядов облака и сердцевин. Пробная частица, способная приблизиться к центру электрона на очень малое расстояние, проникнет сквозь оболочку положительного заряда и начнет чувствовать большой голый заряд.

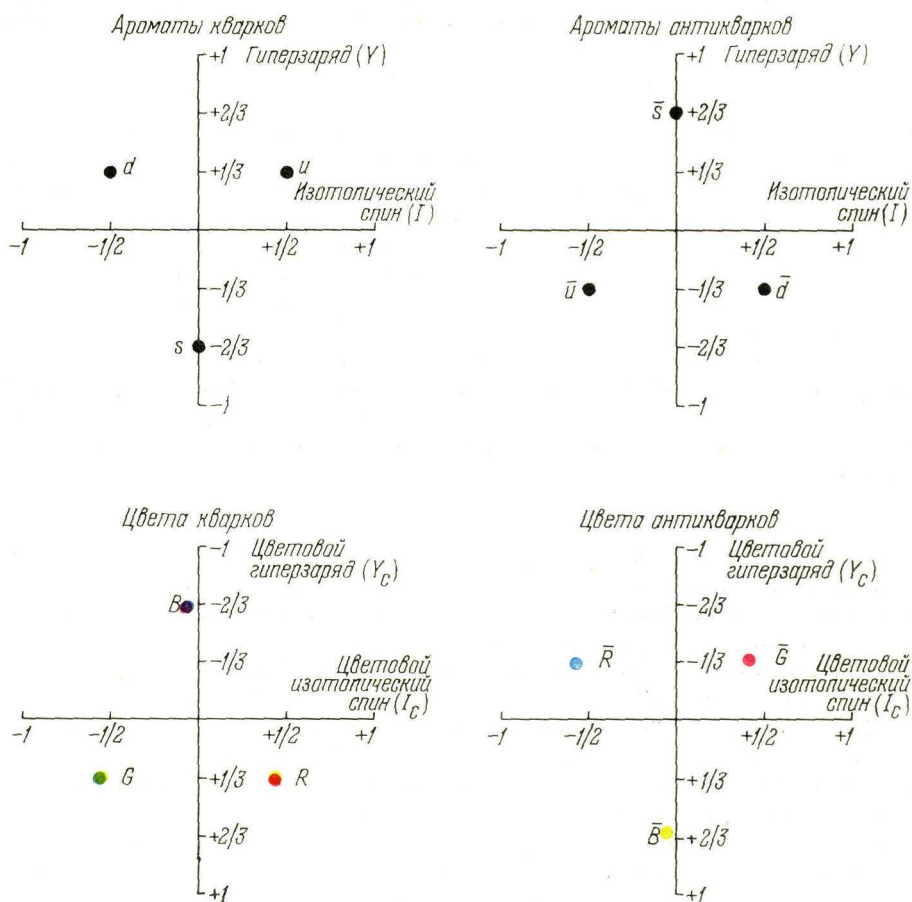


Рис. 3. Классификация кварков подчиняется фундаментальной симметрии природы.

Ароматы кварков определяются двумя квантовыми числами — изотопическим спином и гиперзарядом; каждому кварку или антикварку соответствует единственная пара этих чисел. Цвет определяется двумя другими квантовыми числами, по аналогии называемыми цветным изоспином и цветным гиперзарядом. Как аромат, так и цвет могут быть описаны с помощью понятия группы симметрии. Аромат отвечает «нарушенной симметрии», так как кварки разных ароматов отличаются по таким свойствам как масса и электрический заряд. Цвет отвечает строгой симметрии — два кварка одного аромата, но разных цветов отличаются только цветом, и по другим свойствам неразличимы. Предполагается, что цвета кварков создают силы, связывающие кварки. Эти силы обусловлены двумя типами полей, создаваемыми двумя цветными зарядами, связанными с цветным изотопическим спином и цветным гиперзарядом.

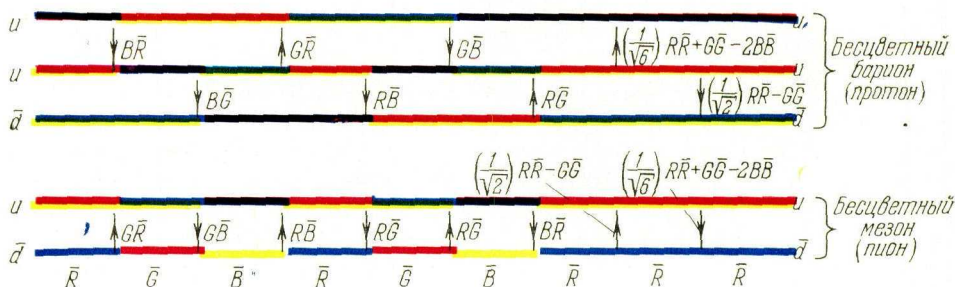


Рис. 4. Обмен глюонами связывает кварки в адроне и может одновременно изменять их цвета

В этих диаграммах вертикальный размер отвечает пространственному расстоянию между кварками, а горизонталь изображает ось времени. В каждой вершине, в которой излучается или поглощается глюон, цветовые квантовые числа должны сохраняться. Следовательно, слева вверху, где синий кварк излучает сине-антикрасный глюон, «синевая» кварка уносится глюоном, и кварк становится красным, чтобы уравновесить антикрасный цвет, содержащийся в глюоне. Когда этот глюон поглощается, антикрасный цвет из глюона и красный поглощающего кварка взаимно уничтожаются, и в результате кварк становится синим. Крайние справа глюоны имеют нулевые квантовые числа и не изменяют цвета кварков, а также никакой глюонный обмен не влияет на кварковые ароматы. Все время барион содержит красный, зеленый и синий кварки. В мезоне, в каждый из изображенных здесь моментов времени, цвет кварка компенсируется антицветом антикварка. В действительности, невозможно определить цвета кварков, можно лишь вычислить вероятность нахождения кварка того или иного цвета. В белых адронах вероятности всех цветов одинаковы.

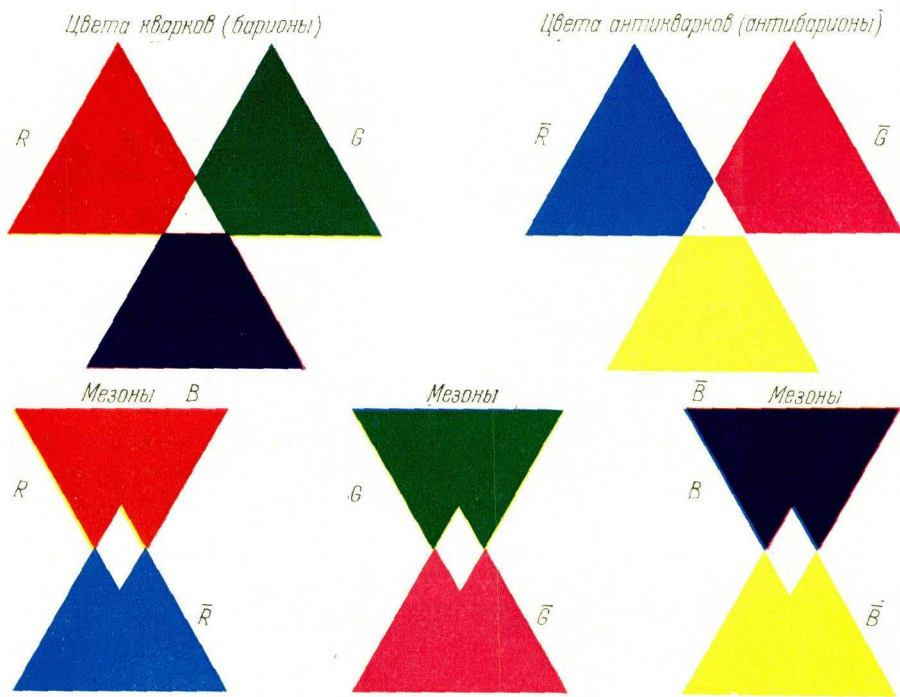


Рис. 5. Бесцветные адроны образуются из соответствующих сочетаний кварков.

Барион состоит из трех кварков, по одному каждого цвета — красного, зеленого и синего. (Каждый из кварков может иметь произвольный аромат, и именно ароматы кварков определяют все наблюдаемые свойства частицы). Аналогично, антибарион состоит из трех антикварков, по одному каждого антицвета. На этом рисунке антицвета изображены цветами, дополнительными и соответствующим основным цветам. В мезонах цвета и антицвета представлены одинаково. Полные цветовые квантовые числа каждой комбинации кварков, составляющей адрон, равны нулю, или, образно говоря, адроны являются белыми или бесцветными. Никакие другие комбинации цветов не могут привести к такому результату. Таким образом, можно объяснить, почему в природе существуют только такие комбинации кварков и почему запрещено появление одиночных кварков, постулировав, что наблюдаемыми являются лишь бесцветные частицы. При этом проблема невылетания кварков сводится к объяснению этого постулата.

Напомним, что электромагнетизм — абелева калибровочная теория, тогда как цветовая теория сильного взаимодействия является неабелевой; для рассматриваемого нами вопроса это отличие оказалось решающим, как это было показано Г. Политцером из Гарварда и Д. Гроссом и Ф. Вильчеком из Принстонского университета. Оказалось, что в неабелевой теории голый заряд создает не экранирующее облако зарядов, а «антиэкранирующее». Это значит, что кварк с цветным зарядом производит вокруг себя

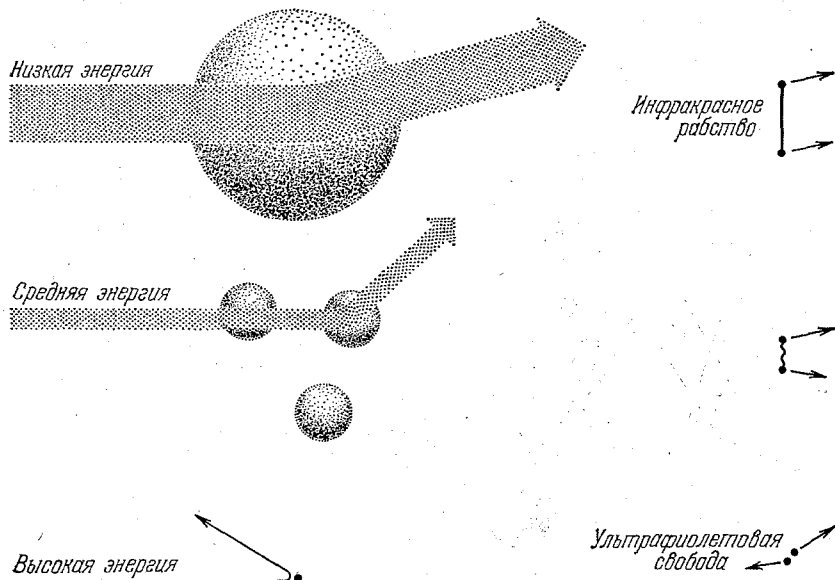


Рис. 6. Инфракрасное рабство — одно из предлагаемых объяснений невылетаия кварков — это понятие, выводимое непосредственно из полевой теории, описывающей взаимодействия кварков и глюонов.

Эта теория утверждает, что кварки на больших расстояниях (примерно равных размеру адрона, 10^{-13} см) сильно связаны друг с другом и движутся как единое целое. Поведение кварков на больших расстояниях исследуется при зондировании адрона частицами с низкой энергией, и действительно, при таких энергиях адрон выглядит как одно прочное единое тело. С другой стороны, когда кварки находятся близко друг к другу, они связаны слабо и могут двигаться независимо. На таких малых расстояниях взаимодействие кварков исследуется с помощью зондирования пробными частицами высоких энергий, и такие эксперименты обнаружили в адроне наличие центров, движущихся почти свободно. Названия «инфракрасное рабство» и «ультрафиолетовая свобода» даны этим явлениям по аналогии с относительными величинами энергий инфракрасного и ультрафиолетового света.

дополнительные заряды той же полярности. В результате цветовой заряд кварка является наименьшим на малых расстояниях, а по мере того, как пробная частица удаляется от кварка, заряд становится все больше и больше. Соответствующий закон для силы радикально отличается от кулоновского — при увеличении расстояния между двумя частицами, обладающими цветовым зарядом, сила, действующая между ними, может оставаться постоянной или даже расти.

Пробная частица, сталкивающаяся с адроном при высокой энергии, изучает поведение составляющих адрон кварков на малых расстояниях и в течение короткого отрезка времени. Математически этот факт устанавливается с помощью принципа неопределенностей, который связывает время и расстояния, на которых производится измерение, с энергией и импульсом пробной частицы. Интуитивно это соотношение можно понять, вспомнив, что высокоэнергичная частица движется почти со скоростью света, и поэтому она «видит» кварки очень малое время, за которое они успевают сместиться на очень малые расстояния. Неабелева

калибровочная теория предсказывает, что такая высокоэнергетичная пробная частица обнаружит, что кварки являются, по существу, свободными частицами, и движутся внутри адрона независимо друг от друга, поскольку на малых расстояниях цветной заряд почти исчезает, и на этих расстояниях кварки связаны друг с другом весьма слабо.

С другой стороны, при низкоэнергетическом исследовании кварки должны выглядеть сильно связанными друг с другом и движущимися как

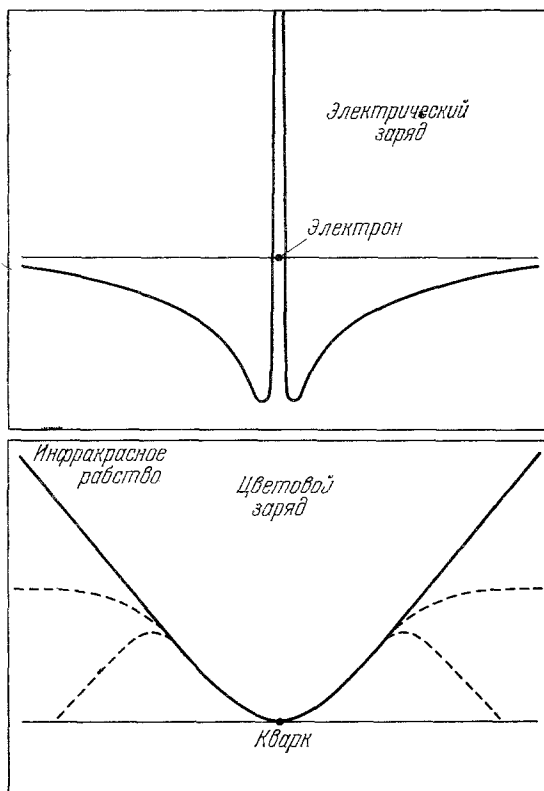


Рис. 7. Распределение цветового заряда могло бы объяснить явления инфракрасного рабства и ультрафиолетовой свободы.

Это распределение, по-видимому, совершенно отлично от распределения более привычного электрического заряда. Сердцевина электрона содержит большой, возможно, бесконечный, отрицательный заряд, который порождает в окружающем его вакууме положительный заряд почти такой же величины. Эффективный заряд электрона, наблюдаемый с достаточно большого расстояния, равен разности этих двух зарядов. В отличие от электрического, голый цветовой заряд предполагается очень малым, возможно, равным нулю, но он создает в окружающем пространстве заряд той же полярности, так что эффективный заряд возрастает, возможно, беспрельдно, по мере распространения в пространстве. При таком распределении заряда электрически заряженные частицы подчиняются закону Кулона—сила, действующая между ними, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. С другой стороны, частицы, несущие цветовой заряд, подчиняются совершенно иному закону: сила между ними остается постоянной, независимо от расстояния, и энергия их связи (энергия, необходимая для того, чтобы удалить их друг от друга) растет с расстоянием. Действительное распределение цветового заряда на больших расстояниях не измерено, поэтому возможны разные типы графиков (штриховые линии)

единое целое. При таких сравнительно низких энергиях кварки[†] наблюдаются в течение более продолжительного времени и могут взаимодействовать между собой на больших расстояниях. Следовательно, более мощные эффекты взаимодействия на больших расстояниях цветных калибровочных полей захватывают кварки и не позволяют им разойтись.

Так как теория неабелева, это рассуждение справедливо также и для глюонов, и они удерживаются внутри адронов так же эффективно, как

и кварки. Глюоны, или поля, ими представляемые, создают собственные поля, обладающие такими же характеристиками, как и цветные поля, создаваемые кварками. В итоге поведение глюонов резко отличается от свойств фотонов — квантов калибровочного поля в абелевой теории электромагнетизма. Фотоны сами не создают электромагнитного поля и проходят сквозь такое поле без каких-либо помех.

Двум рассмотренным выше противоположным проявлениям цветовой калибровочной теории были даны образные названия — инфракрасное рабство и ультрафиолетовая свобода. Эти названия не имеют отношения к определенным частям электромагнитного спектра, а обозначают просто низко- и высокоэнергетические явления, соответственно. Ультрафиолетовая свобода известна также под названием асимптотической свободы, поскольку к состоянию плотностью независимого движения кварков можно приближаться лишь асимптотически, никогда его реально не достигая. Этот эффект, по-видимому, наблюдался при изучении столкновений электронов с протонами, где было обнаружено, что при очень высокой энергии электрона протон ведет себя так, как будто он состоит из свободных кварков.

Понятие инфракрасного рабства дает нам ясную основу для объяснения невылетаия кварков. Если эффективный цветовой заряд неограниченно растет при увеличении расстояния, то таким же образом растет и энергия, необходимая для удаления кварков друг от друга. Для того чтобы развести кварки на макроскопические расстояния, необходимо сообщить системе огромную энергию, что практически невозможно.

Однако пространственное распределение цветного заряда на макроскопических расстояниях неизвестно; по существу, о цветовых силах ничего не известно на расстояниях больших, чем примерный размер адрона — 10^{-13} см. Может или нет инфракрасное рабство объяснить невылетание кварков, зависит от деталей распределения заряда именно на таких расстояниях. Следует, однако, отметить, что для того, чтобы кварки оказались постоянно захваченными внутри адронов, вовсе не обязательно, чтобы заряд возрастал до бесконечности. Достаточно, чтобы заряд возрастал до того места, где энергия, необходимая для дальнейшего удаления кварков, сравнивается с энергией, необходимой для образования кварка и антикварка. Когда эта точка достигается, может родиться пара кварк — антикварк. Вновь созданный кварк заменяет тот, который мы удаляем, а антикварк из новой пары присоединяется к удаляемому нами кварку, и они образуют мезон. В результате кварк удален из адрона, но не освобожден, и все, что мы можем наблюдать, — это рождение мезона.

□

Растущий с расстоянием заряд и не зависящая от расстояния сила, казалось бы, противоречат интуитивным представлениям о поведении вещества. Квантовая механика тоже противоречила интуиции, не давая на этот счет никаких извинений, однако в нашем случае возможно объяснение и даже наглядное представление рассматриваемых нами явлений. Такое объяснение имеет место в модели невылетаия кварков, называемой моделью струны.

Модель струны возникла из математических формул, предложенных Габриелем Венециано из Вейцмановского института. В этой модели адроны рассматриваются как гибкие растяжимые струны, находящиеся в быстром вращении. Струны в этой модели не имеют массы, по крайней мере на них не напизано никаких материальных «шариков», хотя они и обладают потенциальной и кинетической энергией. Считается, что одним из главных

свойств, присущих струнам, является наличие у них постоянного натяжения, которое заставляет концы струны стремиться сжаться с постоянной силой. Это натяжение определяет потенциальную энергию струны (так же как сила натяжения растянутой пружины определяет ее потенциальную энергию), и величина этой энергии строго пропорциональна длине

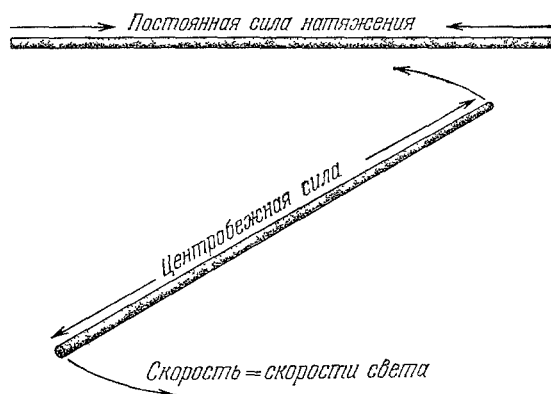


Рис. 8. Струнная модель структуры адрона ведет к другому возможному объяснению невылетания кварков.

В этой модели предполагается, что адрон состоит из безмассовой одномерной струны, одним из основных свойств которой является постоянное натяжение. Из-за этого натяжения струна стремится сжаться, но она может находиться в равновесии благодаря центробежной силе, если заставить ее вращаться так, чтобы концы струны двигались точно со скоростью света. Эти свойства приводят к тому, что энергия струны пропорциональна ее длине, а момент импульса пропорционален квадрату энергии. Последнее соотношение экспериментально установлено для адронов

струны. Если бы струна находилась в покое, то натяжение заставило бы ее сжаться, однако протяженная струна может находиться в равновесии, если придать ей вращение. При вращении струна растягивается, и когда скорость ее концов достигает скорости света, центробежная сила уравновешивает внутреннее натяжение. (Концы струны могут двигаться со скоростью света, и это действительно происходит, поскольку они безмассовые.)

В силу соотношений между длиной, энергией и скоростью вращения, устанавливаемых в модели струн, момент импульса системы оказывается пропорциональным квадрату полной энергии. В этом пункте модель отражает важное наблюдаемое на опыте свойство адронов: если нанести на график зависимость моментов импульса адронов от квадратов их масс (энергий), то результат изобразится в виде ряда параллельных линий, называемых траекториями Редже по имени итальянского физика Т. Редже. Соотношение между моментом импульса и энергией, имеющее место в модели струн, дает одно из возможных объяснений того факта, что все траектории Редже являются прямыми линиями.

Кварки можно ввести в модель струн, просто прикрепив их к концам струны. В этом случае предполагается, что кварки несут квантовые числа адрона, тогда как струна несет большую часть его энергии и импульса. Невылетание кварков вытекает как естественное следствие свойств струны. Предполагается, что кварк невозможно оторвать от конца струны, и поэтому единственным способом удаления кварков является растяжение струны. Однако любое увеличение длины нити требует пропорциональных этому увеличению затрат энергии, поэтому снова развести кварки невозможно. Даже если струну можно растянуть без сообщения ей необычайно большой энергии, струна может разорваться на две. В месте разрыва вновь созданные кварк и антикварк окажутся привязанными к новым

концам нитей так, что снова будут образовываться всего лишь новые мезоны. Можно показать, что во всех таких взаимодействиях модель струн дает результаты, эквивалентные результатам, следующим из гипотезы инфракрасного рабства, хотя лежащие в основе этих моделей описания структуры адрона имеют вполне различную форму.

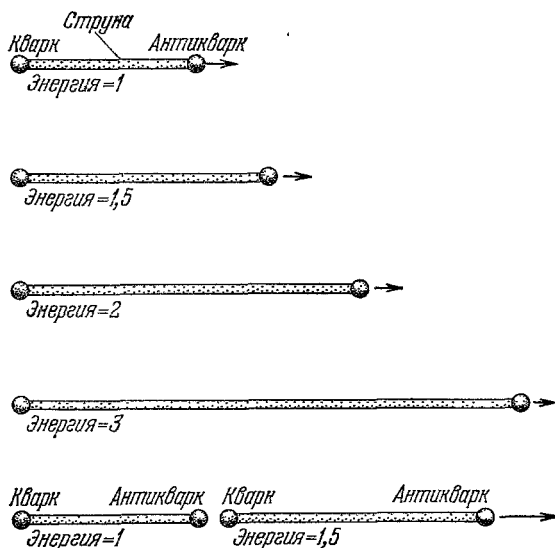


Рис. 9. Кварки, прикрепленные к струнам, могут эффективно удерживаться внутри адрона.

Чтобы удалить кварки друг от друга, необходимо растянуть струну, но поскольку энергия струны пропорциональна ее длине, энергия, необходимая для удаления кварков, возрастает пропорционально расстоянию между ними. Развести кварки на макроскопические расстояния можно лишь ценой затраты огромной энергии. На самом деле, отделение одного кварка от других может быть возможно не при любой энергии; как только сообщенная системе энергия достигнет величины, достаточной для образования кварка и антикварка, струна может разорваться, и на образовавшихся ее концах опять будут находиться кварк и антикварк. Таким образом, результатом попытки отделения кварка от адрона будет создание нового мезона.

Из чего сделана безмассовая вращающаяся струна? Весьма привлекательный ответ на этот вопрос был предложен Хольгером Б. Нильсеном и П. Ольсеном из института имени Нильса Бора в Дании. Чтобы пояснить их гипотезу, мы опять вернемся к рассмотрению электромагнетизма. Закон Кулона описывает электрическое поле в трехмерном пространстве, и если поле представляется в виде силовых линий, то ясно, что сила убывает с расстоянием, поскольку силовые линии рассеиваются в пространстве. Их плотность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, что и дает знакомый нам закон сил. Если же удалось бы сжать все силовые линии в одну тонкую трубку, то они не рассеивались бы в пространстве и сила оставалась бы постоянной, независимо от расстояния.

Характерная геометрия струны наводит на мысль, что ее можно рассматривать как такое одномерное калибровочное поле. Свойства самой струны, и, в частности, присущее ей натяжение и зависимость энергии от длины, предсказываются данной моделью. Более того, причудливые свойства цветных калибровочных полей находят теперь простое и интуитивно правдоподобное объяснение. Необычной теперь является не сила, которая остается обыкновенной, подчиняющейся таким же законам, как и электрическая. Все необычные свойства в этой модели связаны с требуемой геометрией поля.

Поля, являющиеся, по существу, одномерными, действительно могут быть созданы в макроскопических масштабах. Если сверхпроводник (электрический проводник, охлажденный до сверхпроводящего состояния) поместить в магнитное поле, то магнитные силовые линии оказываются вытолкнутыми из сверхпроводящей среды. Если же оба полюса магнита

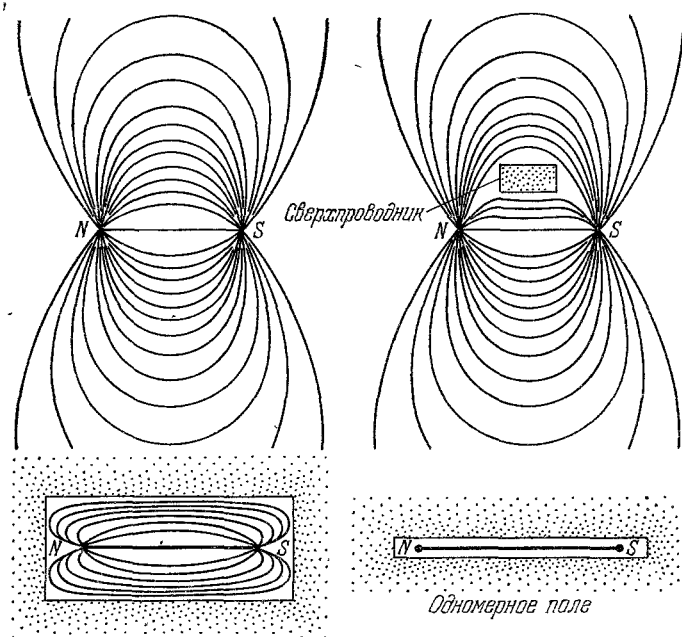


Рис. 10. Геометрия струны может быть объяснена по аналогии с поведением магнитного поля вблизи сверхпроводника.

Напряженность магнитного поля убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, так как силовые линии рассеиваются по трехмерному пространству. Силовые линии выталкиваются из сверхпроводника, и поэтому если два магнитных полюса окружены сверхпроводящей средой, то магнитное поле оказывается сжатым в тонкую трубку. В этих условиях сила, действующая между полюсами, постоянна, и энергия, необходимая для того, чтобы развести полюсы на некоторое расстояние, пропорциональна этому расстоянию. Струна может оказаться аналогичным одномерным полем, сжатым не сверхпроводником, а вакуумом. Тогда невылетание кварков можно объяснить, даже если цветовой заряд и не растет с расстоянием, а ведет себя так же, как и электрический.

полностью погрузить в сверхпроводник, то силовые линии окажутся, заключенными в тонкой трубке между полюсами, в которой сверхпроводимость разрушается. Трубка тока содержит строго определенное количество энергии на единицу длины, и величина магнитного потока оказывается квантованной. Для точной аналогии мы должны предположить, лишь что влияние сверхпроводящей среды на магнитное поле в точности воспроизводится влиянием вакуума на цветное калибровочное поле. Теории, основанной на таком сравнении, была придана математическая форма; в ней кварки уподобляются гипотетическим носителям магнитного заряда — магнитным монополям.

□

Модель струн является новой и привлекательной моделью строения адронов, однако попытки сделать из нее полную количественную теорию наталкиваются на трудности. Размещение кварков на концах струны ни откуда не вытекает. Это не создает серьезных проблем в случае мезонов, которые могут рассматриваться как одиночные струны с кварком на одном

конце и антикварком — на другом, однако, совершенно неясно, какая структура должна быть приписана барионам. Здесь возможны несколько конфигураций, например, трехлучевая звезда, или треугольник с кварками в вершинах. Связь массы или энергии с моментом импульса очень сходна в барионах и в мезонах (их траектории Редже почти параллельны), что означает, что внутренняя динамика этих типов частиц также должна

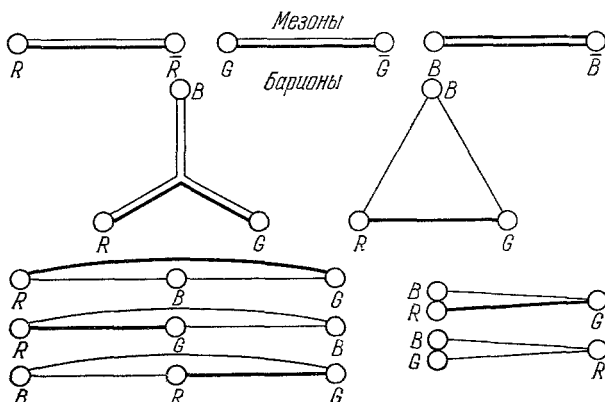


Рис. 11. Конфигурация струн, соединяющих кварки, в общем случае не очевидна и создает серьезное препятствие для дальнейшего развития модели струн.

Удобно обсуждать два вида струн, каждый из которых связан со своим цветовым квантовым числом: цветовым изотопическим спином (темные струны) и цветовым гиперзарядом (светлые струны). Связывание кварка и антикварка в мезоне с помощью этих струн очевидно, однако барионы требуют более сложных структур, и здесь имеется несколько возможностей. Барион может резонировать между различными возможными структурами, однако не все они являются удовлетворительными с теоретической точки зрения. Кварки должны быть в состоянии обмениваться цветом, не изменяя массы и других свойств адрона, но не во всех структурах это условие выполняется. Кроме того, цвета кварков создают в действительности восемь полей, связанных с восемью глюонами, а не два, и сейчас не видно способа включить все эти свойства в модель струн.

быть схожей. Это наблюдение, однако, делает предпочтительной другую возможную модель структуры бариона — одна струна с одним кварком на одном конце и двумя — на другом. В такой модели цвета могут быть приписаны кваркам тремя неэквивалентными способами. Может быть, барион резонирует между этими конфигурациями, подобно тому как бензольное кольцо резонирует между его различными возможными структурами.

Цветовой изотопический спин и цветовой гиперзаряд могут быть, учтены в модели струн, если предположить, что существует два типа струн, каждый из которых несет поле, связанное с одним из зарядов. Однако всегда имеется восемь калибровочных полей, представляемых глюонными комбинациями цвет — антицвет. Должно ли в этом случае существовать также восемь типов струн? Как мы должны описывать изменение цвета кварка, происходящее при испускании или поглощении глюона? На эти вопросы еще предстоит найти удовлетворительные ответы. Может быть простой, образный характер модели струн окажется слишком наивным для описания системы, в которой существенны квантовые эффекты.

Третья попытка объяснить невылетание кварков принимает за основу другой подход, но приводит к аналогичным выводам. Эта модель была предложена К. Джонсоном из Массачусетского технологического института и другими. В качестве одного из начальных условий в этой модели принимается, что кварки не вылетают, и из этого предположения делаются попытки вычислить известные свойства адронов.

Для обеспечения невылетания в этой модели привлекается одна из наиболее простых идей — кварки содержатся внутри мешка или пузыря. Для этой модели характерно, что кварки не могут проникнуть сквозь

стенки мешка, и оказывая давление на стенки, они могут его «надуть». Энергия самого мешка предполагается пропорциональной его объему, поэтому необходимы огромные и потенциально неограниченные количества энергии для того, чтобы разъединить кварки. Система достигает равновесия, когда стремление мешка сжаться, чтобы уменьшить свою энергию,

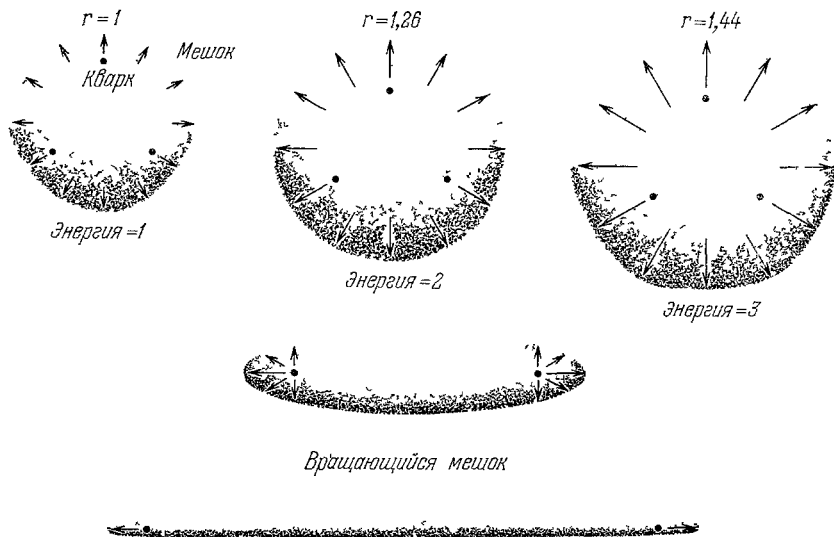


Рис. 12. Модель мешков предлагает третье объяснение невылетания кварков.

В этой модели невылетание, по существу, является одним из основных начальных предположений, т. е. предполагается, что кварки находятся внутри мешка, сквозь стенки которого они проникнуть не могут. Мешок оказывается «надутым» давлением находящихся внутри него кварков, во многом аналогично тому, как воздушный шар надувается находящимся внутри него газом. Кварки можно разводить друг от друга, только увеличивая размеры мешка. Однако энергия самого мешка пропорциональна его объему, поэтому любое увеличение расстояний между кварками требует затрат энергии. Модель мешков и модель струн тесно связаны друг с другом, и эта связь становится очевидной, когда мешок быстро вращается, в этом случае он вытягивается и образует объект, по существу, не отличный от струны.

уравновешивается давлением находящихся внутри кварков, которые движутся свободно подобно молекулам газа. Взаимодействие кварков внутри мешка описывается стандартной неабелевой калибровочной теорией.

В модели мешков можно вычислить различные свойства протона, нейтрона и других адронов с разумной точностью. Эта модель по духу не сильно отличается от интерпретации струн Нильсена — Ольсена. В одном случае критическим является соотношение между длиной и энергией, в другом — между объемом и энергией, однако результат остается тем же самым. Мешок можно рассматривать как струну с толщиной, равной ее длине. Наоборот, если закрутить круглый мешок, то он вытягивается и превращается в струну. Может быть, модель мешков окажется подходящей для описания основных состояний адронов, а модель струн будет применяться к их возбужденным вращающимся состояниям.

□

Каждая из трех рассмотренных моделей достигает своей основной цели — предлагает механизм удержания кварков внутри адронов. Каждая модель может также объяснить некоторые свойства адронов, однако ни одну из них нельзя считать окончательной. Возможно последователь-

ная теория, которая в конце концов появится, будет сочетать в себе черты нескольких моделей, например, было бы полезным иметь понятие ультрафиолетовой свободы в модели струн.

Один из подходов к такому синтезу предпринимается Кеннетом Дж. Вильсоном в Корнеллском университете. В модели Вильсона непрерывное пространство-время приближенно представляется в виде решетки, ячейки которой имеют адронные размеры. Кварки могут располагаться в узлах решетки, а цветные глюонные поля распространяются вдоль прямых линий (струн), их соединяющих. Невылетание кварков при этом происходит автоматически.

Кварки были придуманы теоретиками. Их изобрели тогда, когда не было никаких прямых указаний на их существование. Гипотеза очарования добавила еще один кварк, объясняющий свойства нового большого семейства адронов, еще тогда, когда сами эти адроны не были обнаружены. Цвет — понятие еще более абстрактное — постулирует существование трех разновидностей кварка, которые могут быть различными, но совершенно неразличимыми. Новые теории невылетания кварков позволяют думать, что все кварки вообще недостижимы и невидимы. Успех кварковой модели вернул нас снова к вопросу о реальности кварков. Если частица не может быть выделена и обнаружена, даже теоретически, то каким образом мы убедимся в том, что она существует?

ЛИТЕРАТУРА

- A. Chodos, R. L. Jaffe, K. Johnson, C. B. Thorn, V. K. Weisskopf, Phys. Rev. **D12**, 3471 (1974).
H. D. Politzer, Phys. Rept. **14C**, 129 (1974).
J. H. Schwartz, Scientific American **232**(2), 61 (February 1975).
T. De Grand, R. L. Jaffe, K. Johnson, J. Kiskis, Phys. Rev. **D12**, 2060 (1975).
Extended Systems in Field Theory. Proc. of the Meeting held at École Normal Supérieure (Paris, June 16-21), Phys. Rept. **23C**, 237 (1976).