

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

КВАРКИ С ЦВЕТОМ И АРОМАТОМ *)

Ш. Глэшоу

Частицы, называемые кварками, могут быть истинно элементарными. Их «цвет» объясняет, почему они не могут быть изолированы; их «аромат» различается по четырем основным видам, включая тот, который имеет свойство, называемое очарованием.

«Atomos» — слово с греческим корнем «атом» означает неделимый; ранее принималось, что атомы являются основными неделимыми составными частями материи, т. е. они рассматривались как элементарные частицы. Одним из принципиальных достижений физики XX века было открытие, что атом не является неделимым или элементарным, а имеет сложную структуру. В 1911 г. Э. Резерфорд показал, что атом состоит из малого плотного ядра, окруженного облаком электронов. Затем было обнаружено, что само ядро может быть разложено на составные части — протоны и нейтроны, и открыто много новых родственных частиц. В течение последних десяти лет стало очевидным, что эти частицы являются скорее сложными, чем элементарными. В настоящее время полагают, что они состоят из более простых частиц, называемых *кварками*. Отдельный кварк никогда не наблюдался, несмотря на многочисленные попытки его изолировать. Тем не менее имеются достаточные основания считать, что кварки действительно существуют. Более того, они могут оказаться последним звеном в длинном ряду структур микромира. Они, вероятно, действительно элементарны.

Когда более десяти лет назад была высказана гипотеза о существовании кварков, считалось, что имеются три вида кварков. В окончательном варианте теории, который я здесь излагаю, требуется уже 12 видов. Согласно причудливой терминологии, которая была развита при обсуждении кварков, говорят, что кварки различаются по четырем ароматам и каждый аромат подразделяется по трем цветам. («Аромат» и «цвет», разумеется, спорные термины; они не имеют никакого отношения к обычным значениям этих слов.) Один из ароматов кварка отличается тем, что он обладает свойством, которое называют «очарованием» (еще один спорный термин). Концепция очарования была предложена в 1964 г., но до последнего года она оставалась непроверенной. Несколько последних экспериментальных находок, включая открытие осенью 1974 г. частиц,

*) Sheldon Lee Glashow, Quarks with Color and Flavor, Scientific American 233 (4), 38 (October 1975). Перевод Э. Д. Лозанского.

Ш. Глэшоу — профессор физики Гарвардского университета, США.

© Scientific American, Inc., 1975.

© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической
литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук», 1976 г.

называемых j или ψ , могут рассматриваться как подтверждение гипотезы очарования.

Основное понятие о том, что некоторые субатомные частицы состоят из кварков, получило всестороннее признание, несмотря на отсутствие доказательств из прямых наблюдений. Тщательно разработанная теория, включающая цвет и очарование, остается в значительной степени умозрительной. Представляемая в данной статье точка зрения является лишь моей частной, и она далека от общепринятой. С другой стороны, большое количество фактов говорит за то, что эта новая концепция может играть некоторую роль в описании природы. Она дает возможность соединить много, казалось бы, не связанных между собой теоретических положений, выдвинутых за последние 15 лет, в изящную картину структуры материи. Действительно, кварки представляют собой наиболее многообещающее и в то же время наиболее мистическое создание современной физики элементарных частиц. Они с большим успехом объясняют структуру субатомных частиц, но мы не можем еще понять, почему этот успех достигается.

Частицы, которые, как полагают, состоят из кварков, образуют класс, называемый «адроны». Это частицы, взаимодействующие между собой посредством «сильных» сил. Сюда включаются протоны и нейтроны; и действительно, именно сильное взаимодействие ответственно за удержание протонов и нейтронов в атомных ядрах. Благодаря сильному взаимодействию происходит также быстрый распад многих адронов.

Другой класс частиц, определенный в отличие от адронов, это лептоны. Всего имеется четыре лептона: электрон и электронное нейтрино, мюон и мюонное нейтрино (а также четыре их античастицы). Лептоны не подвержены сильному взаимодействию. Поскольку электрон и мюон несут электрический заряд, они «чувствуют» электромагнитные силы, которые примерно в 100 раз слабее сильных. Два вида нейтрино, не имеющие электрического заряда, не «чувствуют» ни сильные, ни электромагнитные силы, а взаимодействуют исключительно посредством третьего вида сил, на несколько порядков слабее, называемых слабыми силами. Сильные, электромагнитные и слабые силы совместно с гравитационными силами, по-видимому, обеспечивают все взаимодействия материального мира.

Лептоны дают все указания на то, что они являются элементарными частицами. Электрон, например, ведет себя как точечный заряд, и даже при разгоне его до огромных энергий на самых больших ускорителях никакой внутренней структуры обнаружить не удалось. Адроны, с другой стороны, кажется, имеют сложную структуру. Они имеют размер около 10^{-13} см. Их имеется несколько сотен, причем все, за исключением небольшого количества, были открыты в последние 25 лет. Наконец, все адроны, кроме протона и антипротона, нестабильны в свободном состоянии. Они распадаются на стабильные частицы, такие, как протон, электрон, нейтрино или фотон. (Фотон, который является носителем электромагнитных сил, принадлежит к особой категории; он не является ни адроном, ни лептоном.)

Адроны подразделяются на три семейства: барионы, антибарионы и мезоны. Барионы включают в себя протоны и нейтроны; мезоны включают в себя такие частицы, как пионы. Барионы не могут быть ни созданы, ни разрушены, кроме как парами барионов и антибарионов. Этот принцип определяет закон сохранения, и он более удобно может быть трактован с помощью систематики натуральных чисел, именуемых квантовыми. В этом случае соответствующее квантовое число называется *барионным числом*. Для барионов оно равно $+1$, для антибарионов -1 и для мезонов

О. Из сохранения барионного числа следует правило, что в любой реакции сумма барионных чисел не может измениться.

Барионное число позволяет отличать барионы от мезонов, но это *искусственный* метод и он ничего не говорит о свойствах двух видов частиц. Более существенное отличие может быть установлено проверкой другого квантового числа, спинового углового момента, или просто спина.

Согласно правилам квантовой механики частица или система частиц может находиться лишь в определенных вращательных состояниях и, следовательно, может иметь только дискретный ряд значений углового момента. Угловой момент измеряется в единицах $\hbar/2\pi$, где $\hbar$ — постоянная Планка, равная примерно $6,6 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек. Барионы являются частицами с полуцелым спином, таким, как $1/2$ или $3/2$. Мезоны имеют целый спин: 0 или 1.

Различие в спинах имеет важные следствия для поведения двух видов адронов. Говорят, что частицы с целым спином подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна (и поэтому называются бозонами). Частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми — Дирака (и называются фермионами). В таком контексте «статистика» означает поведение группы идентичных частиц. Частицы, подчиняющиеся статистике Бозе — Эйнштейна, могут находиться вместе без всяких ограничений; неограниченное количество пионов, например, может занимать одно и то же состояние. Статистика Ферми — Дирака, с другой стороны, требует, чтобы никакие две частицы из данной системы не имели одинаковую энергию и одинаковый набор всех квантовых чисел. Это требование эквивалентно принципу исключения, сформулированному в 1925 г. В. Паули. Он применил его, в частности, к электронам, которые имеют спин $1/2$ и поэтому являются фермионами. Согласно этому принципу каждый энергетический уровень в атоме может быть заполнен только двумя электронами, спины которых направлены в противоположные стороны.

Одним из ключей к разгадке сложной структуры адронов является то, что их имеется очень много. Большинство предпринимающихся попыток заключается в поисках некоторого принципа, который позволил бы упорядочить это множество.

Впервые адроны были объединены в небольшие группы частиц, которые назывались зарядовыми мультиплетам или изотопическими спиновыми мультиплетам; каждый мультиплет состоит из частиц, имеющих приблизительно одинаковую массу и идентичных во всех остальных свойствах, за исключением электрического заряда. Мультиплеты имеют один, два, три или четыре члена. Протон и нейтрон образуют мультиплет из двух частиц (дублет); обе части рассматриваются как различные проявления одного состояния материи, нуклона, со средней массой, эквивалентной энергии $0,939$ Гэв. Пионы образуют триплет со средней массой $0,137$ Гэв и тремя зарядовыми состояниями: $+1,0$ и -1 . В сильных взаимодействиях члены мультиплетов совершенно эквивалентны, так как электрический заряд не играет роли в сильных взаимодействиях.

В 1962 г. было достигнуто еще лучшее упорядочение, когда зарядовые мультиплеты были объединены в супермультиплеты, в которых частицы помимо различия по зарядам могут различаться и по другим свойствам. Идея супермультиплетов была выдвинута независимо М. Гелл-Манном из Калифорнийского технологического института и Ю. Нейманом из Тель-Авивского университета (см. статью Дж. Ч у, М. Гелл-Манна и А. Розенфельда «Сильно взаимодействующие частицы» (перевод: УФН 83, 695 (1964). — *Ред.*)). Введение новой системы непосредственно ведет к гипотезе кварков.

Группировка адронов в супермультиплеты включает восемь квантовых чисел, и поэтому ее называют «восьмеричным путем». Математическая основа восьмеричного пути содержится в теории групп, развитой в XIX веке норвежским математиком С. Ли. Группа Ли, образующая восьмеричный путь — это $SU(3)$ -симметрия. Семейства в супермультиплетах могут иметь один, три, шесть, восемь, 10 или более членов. Если бы восьмеричный путь был точной теорией, то все члены одного семейства имели бы одинаковую массу. Однако поскольку эта теория является некоторым приближением, то внутри семейства имеются существенные различия в массах.

Конструкция восьмеричного пути начинается с классификации адронов на широкие группы, имеющие общее значение спина. Каждая группа частиц с одинаковым спином затем распределяется еще по двум другим квантовым числам: изотопическому спину и странности. Изотопический спин не имеет ничего общего со спином частицы; он имеет лишь общее наименование, так как обладает теми же алгебраическими свойствами, что и спиновое квантовое число. Изотопический спин определяет количество частиц в мультиплете, которое рассчитывается по формуле: количество частиц в мультиплете на единицу больше удвоенного значения изотопического спина. Так, нуклон (дублет) имеет изотопический спин $1/2$; для триплета пионов изотопический спин равен 1.

Странность — это квантовое число, введенное для описания некоторых адронов, которые впервые наблюдались в 1950 г. и были названы странными частицами из-за их аномально большого времени жизни. Они обычно распадаются за времена от 10^{-10} до 10^{-7} сек. Несмотря на то, что это довольно короткий интервал по обычным стандартам, он все же гораздо больше, чем характерные времена жизни многих других адронов, 10^{-23} сек.

Подобно изотопическому спину странность зависит от свойств мультиплета, но она определяет скорее распределение заряда среди частиц, чем их количество. Квантовое число странности равно удвоенному среднему заряду (сумме всех зарядов, деленной на число частиц в мультиплете) минус барионное число. При этом странность равна нулю для всех адронов, кроме странных. Триплет пионов имеет, например, средний заряд 0 и барионное число 0; его странность поэтому также равна 0. Дублет нуклона имеет средний заряд $+1/2$, а барионное число $+1$, так что эти частицы также имеют странность 0. С другой стороны, лямбда-частица является нейтральным барионом и образует синглет. Ее средний заряд 0, а барионное число $+1$, поэтому странность равна -1 .

На графике зависимости электрического заряда от странности адроны образуют упорядоченные системы. Мезоны со спином 0 образуют октет и синглет; октет представляется графически как шестиугольник с частицей в каждой вершине и двумя частицами в центре, а синглет — как точка в начале координат. Мезоны со спином 1 дают идентичное представление, так же как и барионы со спином $1/2$. Наконец, барионы со спином $3/2$ образуют декаплет (группу из десяти членов), которая может быть изображена как большой треугольник, состоящий из синглета, дублета, триплета и квартета. Восьмеричный путь был принят с некоторым скептицизмом, но открытие в 1964 г. отрицательно заряженной омега-частицы, предсказанного синглета в барионном декаплете, убедило всех в его разумности.

Упорядоченность и экономичность супермультиплетов удовлетворяют всех эстетически, но они в какой-то степени мистичны. Известные адроны все, без исключения, попадают в такие семейства. Мезоны попадают только в семейства из одной и восьми частиц, а барионы — только в семейства

из одной, восьми и десяти. Однако синглеты, октеты и декаплеты — только некоторые из многих возможных представлений SU -группы. Семейства из трех или шести частиц также вероятны, но они пока не наблюдаются. На самом деле, разнообразие возможных семейств, в принципе, неограниченно. Почему же только три представления появляются в природе? С самого начала было понятно, что восьмеричный путь в некотором приближении справедлив, но было также понятно и то, что еще следует выяснить очень многое.

В 1963 г. независимо Гелл-Манном и Цвейгом из Калифорнийского технологического института (США) было предложено некоторое объяснение. Они предположили, что неожиданная упорядоченность может быть понятна, если считать, что все адроны состоят из более фундаментальных компонент, которые Гелл-Манн назвал кварками (табл. I). Кварки принадлежат простейшему нетривиальному семейству восьмеричного пути — семейству из трех частиц. (Имеется, конечно, и другое семейство, из трех антикварков.)

Таблица I

Адроны образуют класс частиц, которые, по-видимому, состоят из кварков. (Они подразделяются на барионы, состоящие из трех кварков, и мезоны, состоящие из кварка и антикварка; антибарионы состоят из трех антикварков.) Группы различаются барионным числом и спиновым угловым моментом, который имеет полуцелые значения для барионов и целые — для мезонов. Каждая строка в таблице представляет мультиплет частиц, идентичных по всем свойствам, кроме электрического заряда, при условии пренебрежения небольшими различиями в массах. Изотопический спин является функцией числа частиц в мультиплете, а странность определяет распределение электрического заряда среди частиц мультиплета. Показаны только некоторые адроны

	Наименование	Символ	Масса, Гэв	Зарядовые состояния	Барионное число	Спин	Изотопический спин	Странность
Барионы	Нуклон	N	0,939	0, +1	+1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	Ламбда	Λ	1,115	0	+1	$\frac{1}{2}$	0	-1
	Омега	Ω	1,672	-1	+1	$\frac{3}{2}$	0	-2
Мезоны	Пион	π	0,139	-1, 0, +1	0	0	1	0
	Каон	K	0,496	0, +1	0	0	$\frac{1}{2}$	+1
	Фи	ϕ	1,019	0	0	1	0	0
	Джи	j	3,095	0	0	1	0	0

Кварки должны обладать довольно-таки особыми свойствами, среди которых имеется их электрический заряд. У всех наблюдаемых частиц, без исключения, заряд равен целому числу зарядов электрона; у кварков, однако, должен быть заряд, составляющий долю от заряда электрона. Гелл-Манн обозначил три кварка буквами u , d и s в соответствии с английскими словами up, down, sideways *).

Механика кварковой модели полностью описывается тремя простыми правилами. Мезоны неизменно состоят из одного кварка и одного

*) Верхний, нижний, боковой. (Прим. перев.)

антикварка. Барионы также неизменно состоят из трех кварков, а антибарионы — из трех антикварков. Никаких других комбинаций кварков не требуется для образования адронов. Комбинаций из трех кварков по этим правилам вполне достаточно для получения всех наблюдаемых или предсказываемых в настоящее время адронов. Более того, каждая разрешенная комбинация кварков дает известную частицу.

Большинство необходимых свойств кварков может быть выведено из этих правил. Установлено, например, что у каждого кварка должно быть барионное число $+1/3$, а у каждого антикварка — барионное число $-1/3$. Следовательно, любой набор из трех кварков будет иметь барионное число $+1$ и, таким образом, определять барион; три антикварка образуют частицу с барионным числом -1 , т. е. антибарион. Для мезонов барионные числа кварков ($+1/3$ и $-1/3$) уничтожаются, в силу чего у мезона, как и требуется, барионное число 0.

Таким же образом описывается спин адронов, если принять, что спин кварка имеет полуцелое значение. Частица, составленная из нечетного числа кварков, такая, как барион, должна поэтому также иметь полуцелый спин, в соответствии с известным свойством барионов. Частица, составленная из четного числа кварков, такая, как мезон, должна иметь целый спин.

u -кварк и d -кварк образуют изотопический дублет: они имеют приблизительно одинаковую массу и идентичны по всем остальным свойствам, за исключением электрического заряда. u -кварку приписывают заряд $+2/3$, а d -кварку — заряд $-1/3$. Средний заряд этого дублета поэтому $+1/6$, а удвоенный средний заряд $+1/3$; так как барионное число всех кварков $+1/3$, то, по определению странности, она как для u -кварка, так и для d -кварка равна 0. s -кварк имеет массу больше, чем u - или d -кварк и образует изотопический синглет. Ему приписывают электрический заряд $-1/3$, и, следовательно, он имеет странность -1 . Антикварки, обозначаемые теми же символами, что и кварки, но с черточкой сверху, имеют противоположные свойства, $\bar{u}$ -антикварк имеет заряд $-2/3$, а $\bar{d}$ $+1/3$; у обоих этих кварков странность 0. $\bar{s}$ -антикварк имеет заряд $+1/3$ и странность $+1$.

Только двух кварков u и d достаточно для объяснения структуры всех адронов, встречающихся в обычных условиях. Протон, например, можно получить из двух u -кварков и одного d -кварка; эта комбинация записывается в виде uud . Быстрый подсчет покажет, что все свойства протона, определяемые составляющими его кварками, находятся в согласии с измеряемыми значениями. Его заряд равен $2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$. Точно так же барионное число равно $+1$, а спин $1/2$. Положительный пион состоит из u -кварка и $\bar{d}$ -антикварка (записывается $u\bar{d}$). Его заряд равен $2/3 + 1/3 = +1$, а спин и барионное число оба равны 0.

Третий кварк, s , необходим только для построения странных частиц, и, действительно, это предусмотрено в точном определении странности: странная частица — это та, которая содержит по крайней мере один s -кварк или один $\bar{s}$ -антикварк. Ламбда-барион, например, как можно показать из распределения зарядов его мультиплет, имеет странность -1 ; этот результат подтверждается его кварковой структурой uds . Точно так же нейтральный K -мезон, странная частица, имеет странность $+1$, что подтверждается его структурой $\bar{d}s$.

До недавнего времени этих трех видов кварков было достаточно для описания всех известных адронов. Как мы увидим далее, эксперименты, проведенные в последние годы, привели к образованию адронов, чьи свойства, по-видимому, не могут быть описаны из трехкварковой модели. Эти

эксперименты могут быть интерпретированы как необходимость существования четвертого вида кварка, получившего название очарованного кварка и обозначаемого символом c ($charm$) *).

Утверждение о том, что трех кварков, u , d и s достаточно для композиции всех наблюдаемых адронов, может быть подкреплено более строго с помощью математического формализма восьмеричного пути. Так как мезон состоит из одного кварка и одного антикварка и поскольку имеются три вида (аромата) кварков, то всего можно построить девять комбинаций кварков и антикварков, которые будут давать мезоны. Можно также показать, что одна из этих комбинаций будет давать синглет, а остальные восемь — октет. Аналогично, поскольку барион состоит из трех кварков, имеется 27 возможных комбинаций кварков, которые будут давать барионы. Они могут быть разбиты на синглет, два октета и декаплет. Эти группировки в точности соответствуют наблюдаемым семействам адронов. Теория кварков объясняет, таким образом, почему в природе только некоторые из возможных представлений $SU(3)$ -группы реализуются как адронные супермультиплеты.

Кварковые правила дают исключительно экономичное объяснение образования наблюдаемых адронных семейств. Какие принципы, однако, могут объяснить эти кварковые правила, которые представляются довольно спорными? Почему можно объединять три кварка, но нельзя два или четыре? Почему мы не можем выделить один изолированный кварк? Первое, что приходит на ум при поиске ответов на эти вопросы, это то, что у кварковой теории имеются некоторые дефекты.

Как мы уже видели, у кварков должны быть полуцелые значения спина; в противном случае известные значения спинов барионов и мезонов предсказывались бы неправильно. Но частицы с полуцелым спином должны подчиняться статистике Ферми — Дирака, и поэтому к ним применим принцип исключения Паули: среди частиц квантовой системы не может находиться двух частиц с одинаковым набором всех квантовых чисел. Кварки, однако, не подчиняются этому принципу. При создании бариона часто необходимо, чтобы два идентичных кварка находились в одном и том же состоянии. Омега-частица, например, состоит из трех s -кварков, и все три должны находиться точно в одном и том же состоянии. Это возможно лишь для частиц, подчиняющихся статистике Бозе — Эйнштейна. Мы получили противоречие: кварки должны иметь полуцелый спин, но в то же время подчиняться статистике, годной для частиц с целым спином.

Связь между спином и статистикой является непоколебимым принципом релятивистской квантовой механики. Она следует непосредственно из теории, и отклонения от этого принципа никогда не наблюдались. Так как он выполняется для всех известных частиц, кварки не могут быть исключением из этого правила.

Путь к решению проблемы статистики кварков был предложен О. Гринбергом из Мэрилендского университета. Он предположил, что каждый аромат кварка может появляться в трех различных состояниях, идентичных по массе, спину, электрическому заряду и всем остальным измеряемым свойствам, но различающихся некоторым дополнительным параметром, который в дальнейшем получил название «цвет». В этом случае принцип Паули не будет нарушен, и кварки могут оставаться фермионами, так как теперь в барионах они уже не будут находиться

* Очарование (англ.). (Прим. перев.)

в одном состоянии. Кварки могут отличаться по цвету, даже если все остальные параметры у них будут одинаковы (табл. II).

Таблица II

Кварки и лептоны — два вида частиц, которые, по-видимому, являются элементарными, имеют сходную симметрию. (Кварки более тяжелые, чем лептоны, и они имеют дробные, а не целые заряды, но обе группы состоят из двух пар частиц (отделены горизонтальной чертой.) Каждый член пары легко преобразуется в партнера посредством слабого взаимодействия. Вся обычная материя может быть построена только из *d*- и *u*-кварков и электрона с электронным нейтрино; мюон, мюонное нейтрино и *s*- и *c*-кварки, которые представляют свойства странности и очарования соответственно, важны только для физики высоких энергий. Каждый вид, или аромат, кварка может иметь три цвета)

Кварки

Символ	Масса, Гэв	Электрический заряд	Странность	Очарование
<i>d</i>	0,338	$-\frac{1}{3}$	0	0
<i>u</i>	0,336	$+\frac{2}{3}$	0	0
<i>s</i>	0,540	$-\frac{1}{3}$	-1	0
<i>c</i>	1,5	$+\frac{2}{3}$	0	+1

Лептоны

Наименование	Символ	Масса, Гэв	Электрический заряд
Электрон	e^-	0,0005	-1
Электронное нейтрино	ν_e	0	0
Мюонное нейтрино	ν_μ	0	0
Мюон	μ^-	0,105	-1

Гипотеза цвета кварков требует выполнения двух дополнительных кварковых правил. Первое просто повторяет условие, для которого эта гипотеза была высказана: барионы должны состоять из трех кварков, различных по цвету. Второе описывает применение гипотезы цвета к мезонам: мезоны состоят из кварка и антикварка одного и того же цвета, но с равным представлением всех трех цветов. Следствием этих правил является то, что ни один адрон не имеет определенного цвета, т. е. все они бесцветны. Барион неизменно содержит кварки всех трех цветов, скажем, красный, желтый и синий. Можно представить себе, что в мезоне кварк и антикварк имеют какой-то один определенный цвет в данный момент, но постоянно у кварка и у антикварка происходит смена цвета, так что в любой измеримый интервал времени оба они существуют равное время как красные, желтые и синие кварки (рис. 1).

Цена гипотезы цвета заключается в утроении числа кварков; теперь их должно быть девять вместо трех (без учета очарования). В первый момент может показаться, что при этом резко увеличивается число адро-

нов, но это лишь иллюзия. С учетом цвета, казалось бы, число мезонов должно возрасти в девять раз, а число барионов — в 27, но правила композиции адронов из цветных кварков гарантируют, что никакие дополнительные частицы наблюдаться не будут.

Хотя из кварковых правил следует, что мы никогда не сможем увидеть цветную частицу, гипотеза цвета не является некоторой формальной конструкцией без предсказуемых следствий. Требуемое увеличение числа кварков может быть обнаружено по крайней мере двумя путями. Первый — это влияние цвета на время жизни нейтрального пиона, который почти всегда распадается на два фотона; С. Адлер из Института высших исследований показал, что скорость его распада зависит от квадрата числа цветных кварков. Наблюдаемое время жизни получается в предположении, что имеются три цвета.

Другой эффект цвета может быть обнаружен в экспериментах, где электроны и их античастицы, позитроны, аннигилируют при больших энергиях. В результате аннигиляции иногда возникает группа адронов, а иногда мюон и антимюон. При достаточно больших энергиях отношение числа адронов к числу мюон-антимюонных пар приближается к постоянному значению, равному сумме квадратов зарядов кварков. Утроение числа кварков также утраивает и ожидаемое значение этого отношения. Результаты экспериментов при энергиях от 2 до 3 Гэв находятся в разумном согласии с гипотезой цвета (которая предсказывает, что отношение равно двум) и совершенно не согласуется с первоначальной теорией кварков без цвета.

Введение квантового числа цвета разрешило проблему кварковой статистики, но оно снова потребовало выполнения правил, которые кажутся произвольными. Эти правила, однако, можно попытаться получить, используя некоторую другую групповую симметрию, аналогичную $SU(3)$, предложенную Гелл-Манном и Нейманом. Прежняя $SU(3)$ -симметрия относилась целиком к комбинациям из трех кварковых ароматов; новая симметрия должна иметь дело с тремя кварковыми цветами. Более того, в отличие от прежней $SU(3)$ -симметрии, которая была лишь приближенной, цветная $SU(3)$ -симметрия, по-видимому, должна быть точной симметрией, в силу чего кварки одного аромата, но разного цвета будут иметь одинаковые массы.

В цветной $SU(3)$ -теории все кварковые правила можно объяснить, если принять один постулат: все адроны должны быть представлены цветными синглетами; никакие более высокие степени мультиплетов не допускаются. Цветной синглет может быть построен двумя путями — комбинацией кварка и антикварка одного цвета с равным представлением всех трех цветов или комбинацией трех кварков или трех антикварков таким образом, чтобы включались все три цвета. Это условия, конечно, эквивалентны правилам композиции мезонов, барионов и антибарионов, и они обеспечивают бесцветность всех адронов. Никаких других путей для получения синглета в цветной $SU(3)$ -теории не существует; частица, полученная каким-либо другим путем, должна была бы принадлежать более высокому мультиплету, и она имела бы определенный цвет.

Хотя цветная $SU(3)$ -теория адронов способна объяснить все кварковые правила, она не может полностью избавиться от внутренних противоречий. Мы можем задать еще более фундаментальный вопрос: почему все адроны должны быть цветными синглетами? Один из подходов к ответу, довольно умозрительный, недавно был предложен многими исследователями; он заключается в введении цветной $SU(3)$ -модели адронов в один из классов теорий, называемых калибровочными.

Цветная калибровочная теория постулирует существование восьми частиц с массой, равной нулю, иногда называемых глюонами, которые являются носителями сильного взаимодействия, так же как фотон является носителем электромагнитного взаимодействия. Подобно фотону они электрически нейтральны и имеют спин, равный 1; поэтому они называются векторными бозонами (бозонами, так как частицы с целым спином подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна; векторными, поскольку частицы со спином 1 описываются волновой функцией, которая имеет вид четырехмерного вектора). Глюоны, подобно кваркам, никогда не были обнаружены.

Когда кварк испускает или поглощает глюон, он изменяет свой цвет, но не меняет аромат. Например, испускание глюона преобразует красный u -кварк в синий или желтый u -кварк, но оно не может трансформировать его в d - или s -кварк любого цвета. Так как цветные глюоны являются квантами сильного взаимодействия, отсюда следует, что цвет — это наиболее важное свойство кварков в таких взаимодействиях. Действительно, описывая взаимодействия, которые включают в себя только сильные силы, можно не интересоваться ароматом кварков (рис. 2).

Цветная калибровочная теория утверждает, что силы, объединяющие вместе цветные кварки, дают правильный характер сильного взаимодействия. Более известное сильное взаимодействие адронов (то, которое связывает протоны и нейтроны в ядре) — проявление тех же фундаментальных сил, но взаимодействия бесцветных адронов — не более чем слабый остаток от основного взаимодействия цветных кварков. Точно так же как ван-дер-ваальсовы силы между молекулами — только слабый след электромагнитных сил, которые притягивают электроны к ядру, сильные силы, действующие между адронами, — лишь слабый след сил, действующих внутри отдельного адрона.

Из этих теоретических положений можно сделать весьма любопытное заключение о причинах ненаблюдаемости кварков. Это заключение было сделано Дж. Когутом и К. Вильсоном из Корнеллского университета и Л. Заскиндоном из Йешиевского университета. Если их доказательство верно, то оно объясняет, что неудачи в попытках наблюдения кварков происходят не из-за несовершенства экспериментальной техники, а являются прямым следствием природы сильного взаимодействия.

К рис. 1. Наличие кварков в известных субъядерных частицах может быть объяснено, если считать, что кварки могут появляться в трех видах, различающихся, например, цветом.

Бариион (такой, как протон или нейтрон) является системой из трех разноцветных кварков (а), так что бариион как целое бесцветен. Кварки объединяются вместе под действием сильных сил, которые также скрепляют атомные ядра. Силы, действующие между цветными кварками, отличаются, однако, от сил, действующих между сложными бесцветными частицами: они не уменьшаются с расстоянием, а остаются постоянными. В результате, когда кварк отделяется от барииона (б), потенциальная энергия системы резко возрастает и может достичь огромных значений, если не начнут действовать другие процессы: из этой потенциальной энергии образуются кварк и антикварк (в). Новый кварк восстановит бариион в его прежнем виде, а антикварк (светлый кружок) присоединится к удаленному кварку, образуя другой вид частицы — мезон (г). В любой данный момент кварк и антикварк в мезоне одного цвета, но все три цвета равновероятны и представлены одинаковым интервалом времени. Благодаря такой природе сильных сил невозможно наблюдать отдельный кварк; любая попытка его изолировать приведет лишь к образованию нового адрона или нескольких адронов.

К рис. 2. Странные и очарованные частицы должны образовываться при обычных взаимодействиях.

Взаимодействия представлены здесь как пересечения линий, соответствующих кваркам и другим частицам. Внутри адрона кварки постоянно обмениваются безмассовыми частицами, называемыми глюонами (волнистые линии), носителями сильных сил. Испуская глюон, кварк меняет свой цвет, но не меняет аромат. Странные частицы могут образовываться (а), когда u -кварк в протоне и u -антикварк в пионе аннигилируют, в результате чего возникают s -кварк и s -антикварк. Продуктами такой реакции являются K -мезон и лямбда-бариион. При больших энергиях эта же аннигиляция может давать c -кварк и c -антикварк (б). Этот процесс, который еще не наблюдался, давал бы при этом очарованный мезон и очарованный бариион.

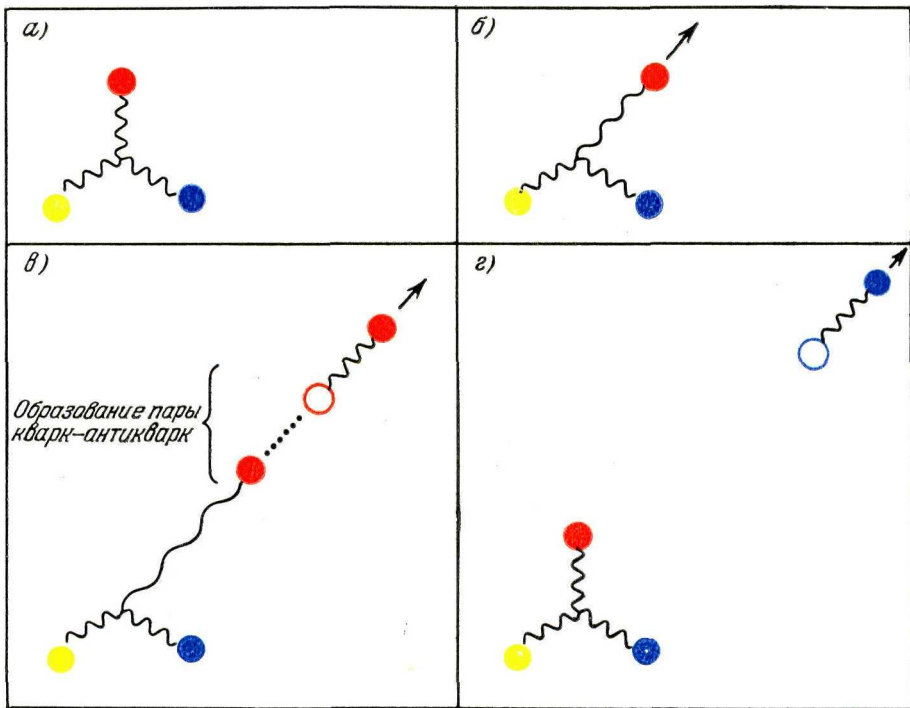


Рис. 1.

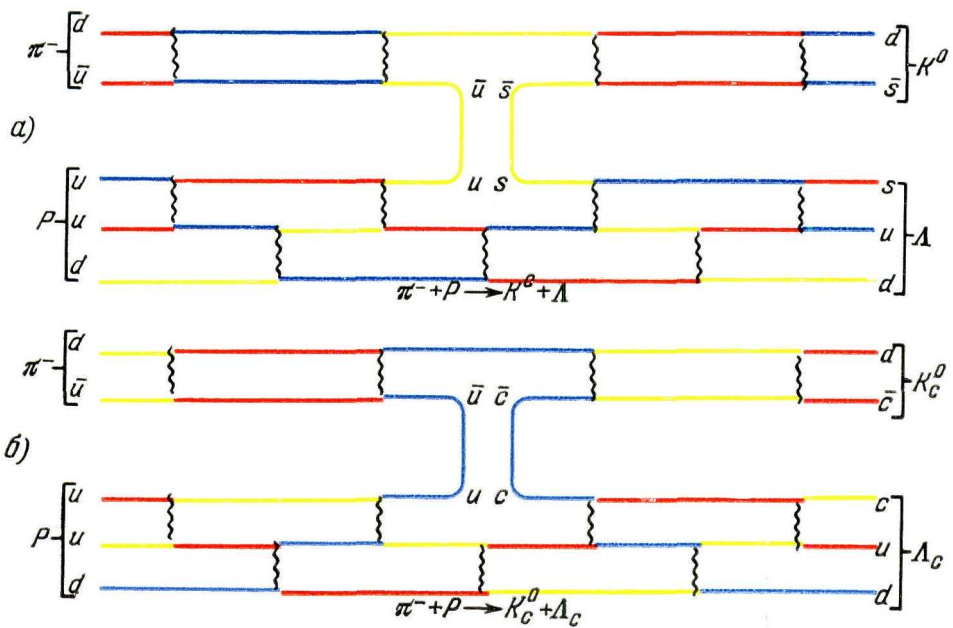


Рис. 2.

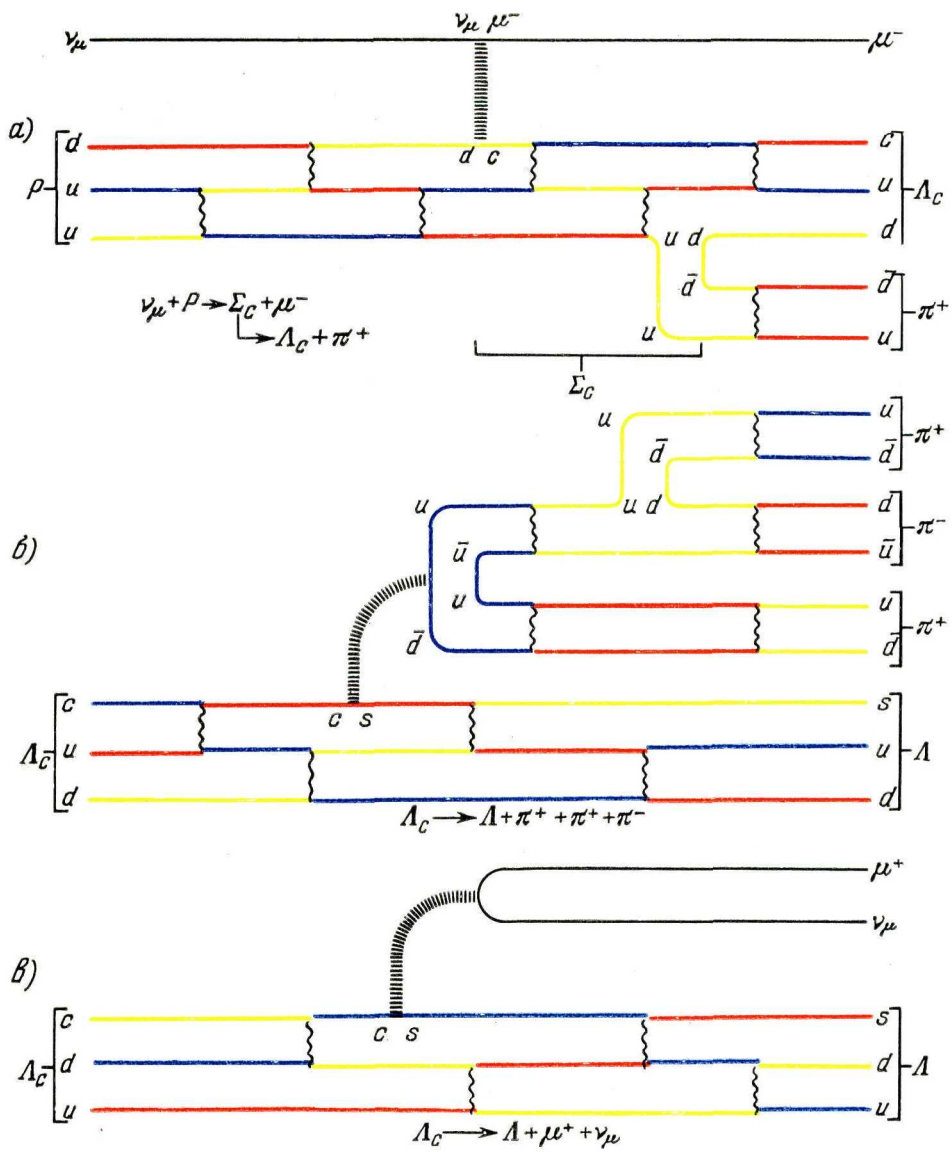


Рис. 3.

Электромагнитное взаимодействие между двумя заряженными частицами описывается законом Кулона: сила уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния между частицами. Гравитационные силы подчиняются подобному закону. На больших расстояниях обеими силами можно пренебречь. Когут, Вильсон и Заскинд считают, что сильное взаимодействие между двумя цветными частицами ведет себя совершенно иначе: оно не уменьшается с расстоянием, а остается постоянным, не зависящим от разделения кварков. Если это верно, то для того, чтобы изолировать один кварк, требуется огромное количество энергии.

Удаление электрона с валентной оболочки требует всего нескольких электрон-вольт. Расщепление атомного ядра требует уже нескольких миллионов электрон-вольт. В противоположность этим значениям, удаление отдельного кварка даже на дюйм от протона, компонентом которого он является, потребовало бы энергии 10^{13} Гэв, т. е. энергии, достаточной, чтобы поднять автора на 30 футов над поверхностью Земли.

Однако задолго до того, как такой энергетический уровень будет достигнут, начнут действовать другие процессы. Из энергии, вкладываемой на отделение кварка, материализовались бы кварк и антикварк. Новый кварк заменил бы кварк, удаляемый из протона, и восстановил эту частицу. Новый антикварк «прилип» бы к удаляемому кварку и образовал мезон. Вместо изоляции цветного кварка, все, чего бы мы достигли, — это образование бесцветного мезона (см. рис. 1). Согласно этой теории мы никогда не сможем увидеть уединенный кварк или глюон или любую комбинацию кварков или глюонов с определенным цветом.

Если эта интерпретация ненаблюдаемости кварков верна, то она дает интересную возможность ограничить бесконечное дробление структуры материи. Атомы можно разложить на электроны и ядра, ядра — на протоны и нейтроны, а протоны и нейтроны — на кварки, но теория неразделимости кварков предполагает, что на этом все кончается. Трудно представить себе, как частица может иметь внутреннюю структуру, если она даже не может быть образована.

Кварки одного аромата, но разного цвета, идентичны по всем своим свойствам, кроме цвета; действительно, именно для этого и была введена концепция цвета. Однако кварки, которые отличаются ароматом, имеют совершенно различные свойства. Именно потому, что u -кварк и d -кварк различаются электрическим зарядом, протон заряжен, а нейтрон не заряжен. Точно так же из-за того, что s -кварк значительно превосходит по массе и u -кварк, и d -кварк, странные частицы — наиболее тяжелые члены своих семейств. Очарованный кварк, c , должен быть еще тяжелее, и поэтому очарованные частицы, как правило, тяжелее всех остальных. Именно аромат кварков, а не их цвет, вносит разнообразие в мир адронов.

Как мы могли видеть, ароматы кварков не затрагиваются сильным взаимодействием. В слабом взаимодействии, кроме того, кварк может изменять свой аромат (но не цвет). Слабые взаимодействия также играют

К рис. 3. Слабые взаимодействия, осуществляемые W -частицей (штриховые линии), могут изменять аромат кварка, но не меняют его цвет.

Поэтому посредством слабых сил может быть создана отдельная очарованная частица, в то время как в других взаимодействиях они образуются только парами. Нейтрино, взаимодействуя с протоном (а), преобразует d -кварк в s -кварк, причем нейтрино при этом преобразуется в мюон. Промежуточным продуктом является очарованный сигма-барион, но он быстро распадается на очарованный лямбда-барион, испуская пион. Очарованная лямбда-частица может сама распасться с испусканием W -частицы при переходе s -кварка в u -кварк, образуя таким путем лямбда-барион. Странный лямбда-барион может сопровождаться тремя пионами, производимыми при повторном образовании кварковой пары (б). Последний процесс, возможно, наблюдался недавно в Брукхейвенской Национальной лаборатории. Кроме того, странный лямбда-барион может сопровождаться мюоном и нейтрино (в) — способ распада, который может объяснить некоторые события, зарегистрированные в Национальной Ускорительной лаборатории им. Ферми.

определенную роль в отношениях кварков с лептонами. Классическим примером таких отношений является ядерный β -распад, при котором нейтрон превращается в протон с испусканием электрона и антинейтрино. В терминах теории кварков такое превращение означает переход d -кварка в u -кварк с одновременным испусканием двух лептонов.

Переносчиком слабых взаимодействий, так же как сильных и электромагнитных, являются векторные бозоны. Главный из них, обозначаемый через W и имеющий длинное название «промежуточный векторный бозон», был предсказан в 1938 г. Х. Юкавой. Он имеет электрический заряд -1 и отличается от фотона и цветного глюона тем, что обладает массой, причем довольно большой. Кварки могут изменять свой аромат, испуская или поглощая W -частицу. β -распад, например, можно интерпретировать как испускание W -частицы d -кварком, который при этом становится u -кварком; затем W распадается, давая электрон и антинейтрино. Из этих процессов следует, что W может также взаимодействовать с лептонами и осуществлять, таким образом, связь между двумя группами, по-видимому, элементарных частиц (рис. 3).

Осознание того факта, что сильные, слабые и электромагнитные силы в качестве переносчика имеют все один и тот же вид частиц — векторные бозоны со спином 1, — наводит на размышление, что все три взаимодействия имеют некоторую общую основу в рамках какой-то простой единой теории. Шагом по направлению к этой теории могло бы быть согласование слабого и электромагнитного взаимодействий. Д. Швингер из Гарвардского университета предпринял такую попытку в середине 50-х годов (в то время я был одним из его аспирантов, работавших над этими вопросами). Его теория имела серьезные недостатки. Один был преодолен в 1961 г., когда мною был введен второй нейтральный векторный бозон, называемый сейчас Z , в дополнение к электрически заряженному W . Другие трудности сохранялись в течение десяти лет, пока в 1967 г. С. Вайнберг из Гарварда и А. Салам из Международного Центра теоретической физики в Триесте независимо не нашли решение. К 1971 г. было достигнуто соглашение, в основном благодаря работе Г. Хоофта из Утрехтского университета, что решение Вайнберга — Салама приемлемо (см. статью С. Вайнберга «Единая теория взаимодействия элементарных частиц» (перевод: УФН 118, 505 (1976). — *Ред.*)).

В унифицированной теории слабых и электромагнитных взаимодействий кварки и лептоны оказываются тесно связанными. Эти взаимодействия «различают» четыре лептона и три кварковых аромата. W -частица может превратить нейтрино одного вида в электрон, а нейтрино другого вида в мюон. Точно так же W -частица может преобразовать u -кварк в d -кварк; она может также «заставить» u -кварк стать s -кварком, но с гораздо меньшей вероятностью.

Как видно, в данном случае налицо очевидное отсутствие симметрии в этих связях. Лептоны составляют две пары, «обвенчанные» слабым взаимодействием: электрон и электронное нейтрино и мюон с мюонным нейтрино. Кварки, с другой стороны, присутствуют только трех ароматов, так что один должен оставаться «холостым». Эта схема могла бы быть более симметричной, если бы существовал четвертый кварковый аромат, чтобы стать партнером «холостого» кварка. При этом как кварки, так и лептоны состояли бы из двух пар частиц и каждый член пары мог бы превращаться в другого члена этой же пары просто испусканием W -частицы. Желательность такой кварково-лептонной симметрии побудила Дж. Бьёркена и меня, в числе других, постулировать существование четвертого кварка в 1964 г. Бьёркен и я назвали его очарованным кварком. Когда появилась

гипотеза о цветах кварков, то, с учетом существования четвертого кваркового аромата, потребовался уже четвертый новый триплет цветных кварков. Таким образом всего получается 12 кварков.

С 1964 г. появилось несколько дополнительных аргументов в пользу очарованного кварка. Для меня наиболее неотразимым из них является необходимость объяснения подавления некоторых взаимодействий, называемых нейтральными токами, изменяющими странность. Объяснение, основанное на свойствах очарованного кварка, было представлено в 1967 г. Дж. Илиопулосом, Л. Майани и мной. Нейтральные токи, изменяющие странность — это слабые взаимодействия, в которых полный электрический заряд адронов не меняется, а странность меняется; типичным случаем является переход s -кварка в d -кварк с испусканием двух лептонов. Примером может служить распад нейтрального K -мезона (странной частицы) на два противоположно заряженных мюона. Такие процессы наблюдаются в экспериментах чрезвычайно редко. Трехкварковая теория не в состоянии объяснить причины подавления таких реакций, а унифицированная теория слабых и электромагнитных взаимодействий предсказывает их интенсивность в миллион раз больше наблюдаемой.

Добавление четвертого кваркового аромата с тем же электрическим зарядом, что и у u -кварка, четко объясняет это подавление, хотя механизм, с помощью которого оно происходит, может показаться весьма причудливым. С двумя парами кварков появляются два возможных механизма взаимодействия, изменяющих странность, вместо одного такого механизма, когда имеются только три кварка. В макроскопическом мире добавление второго пути (или канала) реакции всегда ведет к увеличению скорости реакции. В мире же, управляемом законами квантовой механики, возможно как уменьшение, так и увеличение скорости. Если окажется, что знак в уравнении, определяющем одну из реакций, отрицателен, то два взаимодействия уничтожают одно другое.

Добавление четвертого кварка аромата должно, очевидно, увеличить количество адронов. Для того чтобы расположить новые предсказываемые частицы в супермультиплетах, должен быть расширен восьмеричный путь, в частности, должны быть введены другие схемы, применяемые для представления семейств, так что плоские фигуры прежней симметрии становятся геометрическими телами Платона и Архимеда.

К мезонному октету добавляются шесть очарованных частиц и одна неочарованная, образуя новое семейство из 15 частиц. Оно представляется как кубический восьмигранник, в котором одна плоскость содержит шестиугольник исходного неочарованного мезонного октета. Барионные октеты и декаплеты образуют два семейства, имеющие каждое по 20 членов. Они представляются как тетраэдр, усеченный в каждой вершине, и как обычный тетраэдр. Кроме того, имеется еще маленький тетраэдр, состоящий из четырех барионов. Здесь также каждая фигура содержит одну плоскость из неочарованных частиц (рис. 4).

Сейчас существует мнение, что первая из открытых новых частиц — мезон, который не является очарованным. Это заключение основано на предположении, что предсказываемый мезон — та же самая частица j или ψ , которая была открыта в ноябре 1974 г. Об этом открытии одновременно объявили С. Тинг и его коллеги из Брукхейвенской Национальной лаборатории и Б. Рихтер с группой физиков из Стэнфордского центра линейного ускорителя (SLAC). В Брукхейвене ее назвали j -мезоном, а в Стэнфорде — ψ -мезоном. Здесь я буду использовать обозначение j . Однако для двух возбужденных состояний этой же частицы будут применяться обозначения ψ' и ψ'' , так как они наблюдались только в экспериментах SLAC.

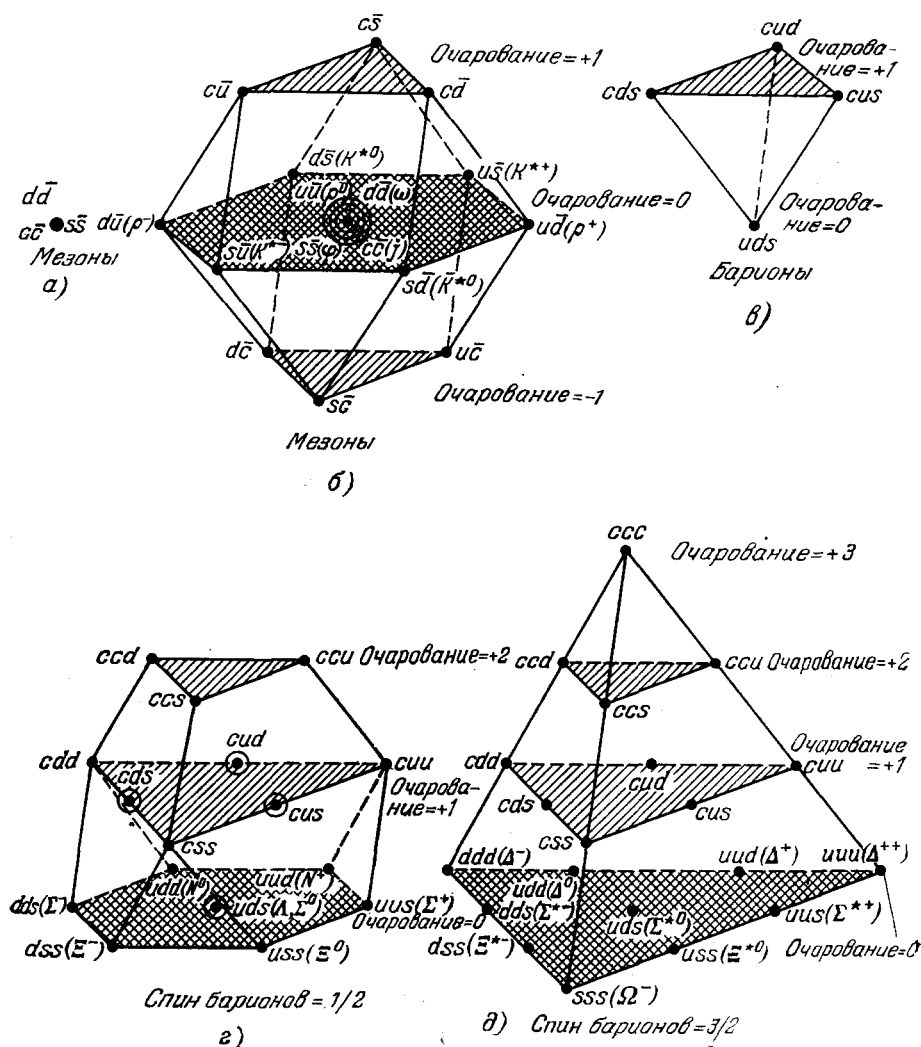


Рис. 4. Супермультиплеты адронов, которые включают предсказываемые очарованные частицы, могут быть расположены в виде многогранников.

Каждый супермультиплет состоит из частиц с одним и тем же значением спинового углового момента. Внутри каждого супермультиплета частицы занимают положения в соответствии с тремя квантовыми числами: положения на одинарно заштрихованных плоскостях определяются изотопическим спином и странностью; сами плоскости определяют значение очарования. Мезоны представляются точкой (а) и архимедовым геометрическим телом, называемым кубическим восьмигранником (б), который содержит 15 частиц, включая шесть очарованных. Показаны те мезоны, которые имеют спин 1, но все мезоны с другим спином попадают в те же точки в таком же представлении. Барionyны образуют маленький правильный тетраэдр (в) из четырех частиц, усеченный четырехгранник (г) из 20 частиц и большой правильный тетраэдр, также состоящий из 20 частиц. Как мезоны, так и барionyны полностью определяются их кварковой структурой, и для тех частиц, которые уже наблюдались, приведены установленные обозначения. Каждая фигура содержит одну плоскость (двойная штриховка) из неочарованных частиц, которая идентична первоначальному представлению восьмеричного пути.

j -частица была обнаружена как резонанс, т. е. как увеличение при определенной энергии вероятности взаимодействия между другими частицами. В Брукхейвене резонанс был обнаружен в ряде электрон-позитронных пар, получаемых при столкновении протонов с атомными ядрами. В группе SLAC он наблюдался в продуктах аннигиляции электронов и позитронов. Энергии, при которых наблюдались резонансы, и, следовательно, энергия или масса j -частицы, около 3,1 Гэв (см. статью С. Дрела, Scientific American, June 1975).

j -частица распадается за времена порядка 10^{-20} сек — достаточно короткий интервал. Тем не менее он в 1000 раз больше, чем ожидаемое время жизни частицы, имеющей такую же массу, как у j . Всеобщее возбуждение, связанное с открытием этой частицы, было вызвано именно ее большим временем жизни.

Были предложены многие различные объяснения для этой частицы, например, что, возможно, это Z -частица. Я лично считаю, что имеются

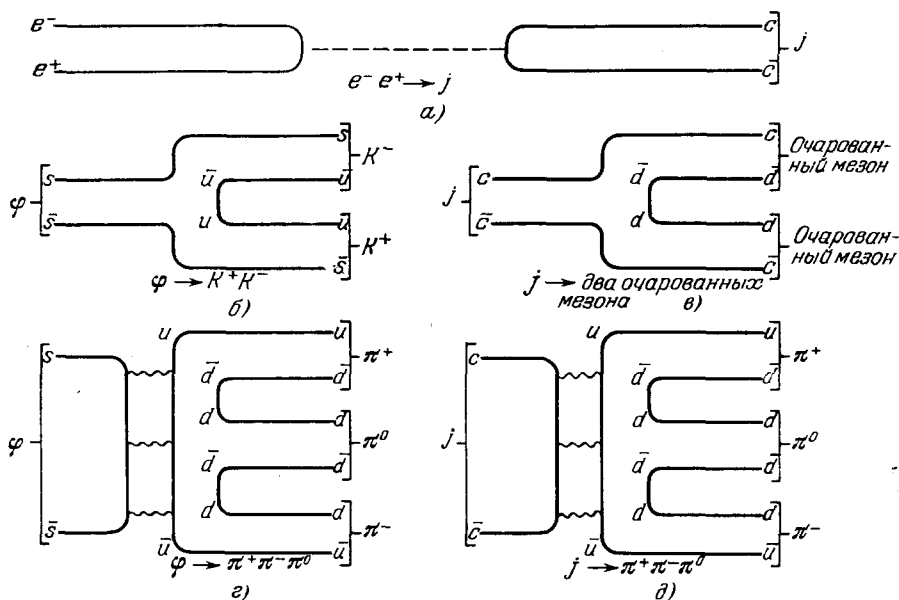


Рис. 5. j -частица интерпретируется как связанное состояние c -кварка и $\bar{c}$ -антикварка, называемое чармонием.

Она была открыта в ноябре 1974 г. физиками в Брукхейвене и в Стэнфордском Центре линейного ускорителя (SLAC). В SLAC она была образована (а), когда электроны и позитроны аннигилировали с образованием виртуального фотона (штриховая линия), который затем материализовался и образовал новый мезон. j -частица обладает массой 3,1 Гэв. Она не имеет очарования, так как квантовые числа очарования ее кварков (+1 и -1) в сумме дают нуль; подобным образом более известная частица, ϕ -мезон, имеет нулевую странность, так как она состоит из странного кварка и странного антикварка. Несмотря на эту аналогию, эти две частицы распадаются по-разному. Для обеих предпочтительный механизм распада состоит в передаче кварка и антикварка в два дочерних различных мезона. Для ϕ -мезона это возможно (б), так как масса (1,019 Гэв) немного больше, чем общая масса двух странных K -мезонов. Для j подобный механизм распада невозможен (в), так как легчайшая очарованная частица имеет массу больше половины массы j . Поэтому j должна распадаться через аннигиляцию своих кварков (г); аннигиляция дает три глюона (волнистые линии), которые преобразуются в три пиона. Этот механизм распада подавлен и эквивалентный процесс для ϕ -мезона (е) наблюдается крайне редко.

достаточные основания интерпретировать j -частицу как мезон, состоящий из очарованного кварка и очарованного антикварка, т. е. как мезон с кварковым содержанием $c\bar{c}$. Т. Аппельквист и Д. Политцер из Гарварда назвали такой мезон «чармоний», по аналогии с позитронием, состоящим из электрона и позитрона. Чармоний не имеет очарования, так как квантовые числа очарования его кварков (+1 и -1) при сложении дают нуль (рис. 5).

Гипотеза чармония может быть использована для объяснения аномального времени жизни j -частицы, если рассмотреть имеющиеся возможности распадов ее кварков. Всего имеется три возможности: кварки могут разделиться и стать компонентами двух дочерних адронов; они могут оба стать частью одной дочерней частицы или они могут аннигилировать. По эмпирическому правилу, впервые установленному Цвейгом, состояния, распадающиеся по первому типу, разрешены, а по двум другим, — запрещены. Для того чтобы j -частица могла распасться по разрешенному пути, она должна образовать две очарованные частицы, а именно, два адрона, один из которых будет содержать очарованный кварк, а другой — очарованный антикварк. Такой распад возможен только, если масса j больше суммы масс дочерних очарованных частиц. Имеются основания считать, что масса легкой очарованной частицы больше половины массы j и, следовательно, не может распасться по разрешенному пути. j не может распасться и вторым путем, сохраняя оба свои кварка в одной частице, так как j является наиболее легким состоянием, содержащим очарованный кварк и очарованный антикварк. Поэтому она должна распадаться посредством аннигиляции своих кварков, т. е. распадом, запрещенным правилом Цвейга. Это запрещение и может служить частичным объяснением удлинения времени жизни частицы.

Правило Цвейга было сформулировано для объяснения распада ф-мезона, который состоит из странного кварка и странного антикварка и имеет массу около 1 Гэв . Эти две частицы довольно похожи друг на друга, но распад j идет значительно медленнее, чем ф. Почему же правило Цвейга более эффективно для j , чем для ф? Более того, как объяснить недосказанное правило Цвейга?

Возможный ответ содержится в теоретической концепции, называемой асимптотической свободой, которая утверждает, что сильные взаимодействия становятся менее сильными при больших энергиях. При достаточно больших энергиях протон ведет себя так, как будто он состоит из трех свободно движущихся кварков, вместо трех жестко связанных между собой. Эта концепция получила свое название из того факта, что кварки приближаются к состоянию свободного движения асимптотически при увеличении энергии. Асимптотическая свобода дает возможность объяснить расхождения в применении правила Цвейга к j - и ф-частицам. Так как j -частицы очень тяжелы или, что то же самое, имеют большую энергию, сильное взаимодействие ослабляется и кварку и антикварку становится трудно аннигилировать.

Подобно позитронию чармоний может находиться в многих энергетических состояниях. Два из них были открыты в SLAC вскоре после обнаружения основного состояния; они обозначаются через ψ' с массой около $3,7 \text{ Гэв}$ и ψ'' с массой около $4,1 \text{ Гэв}$. По-видимому, это просто возбужденные состояния нижележащего состояния чармония, т. е. j -частица. ψ' распадается лишь не намного быстрее, чем j , а продуктами ее распада примерно в 50% случаев являются сама j -частица и два пиона. Таким образом, иногда она распадается по второму пути, запрещенному правилом Цвейга, который имеет в виду сохранение двух исходных кварков в третьей дочерней частице. Удлиненное время жизни означает, что ψ' также лежит ниже энергетического порога для образования пары очарованных частиц. ψ'' распадается гораздо быстрее и потому должна распадаться по пути, разрешенному правилом Цвейга. Продукты ее распада еще не определены, но, возможно, они будут включать в себя очарованные адроны.

Многочисленные другие возбужденные состояния чармония неизбежно вытекают из теории кварковых взаимодействий (рис. 6). Одно, назы-

Если j — действительно состояние чармония, то из ее массы можно получить массы всех адронов, содержащих очарованные кварки.

Важные исходные ограничения на возможные значения масс были сделаны при интерпретации подавления нейтральных токов, измеряющих странность. Если механизм подавления работает, то очарованный кварк не может быть намного тяжелее своих собратьев. С другой стороны, он

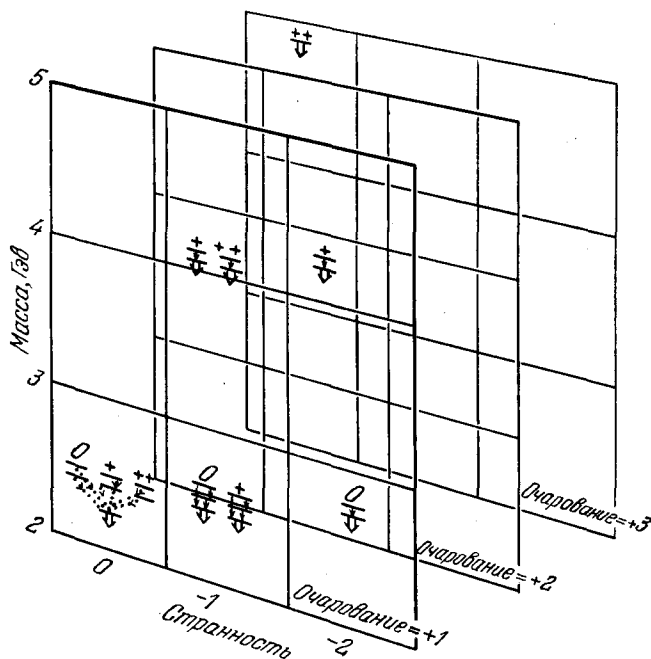


Рис. 7. Очарованные барионы, по-видимому, должны обладать массой, значительно большей, чем у других адронов.

Пока еще ни одна очарованная частица не была бесспорно зарегистрирована, но их массы можно предсказать из массы j -частицы. Некоторые из очарованных частиц должны существовать в более чем одном зарядовом состоянии (обозначаются нулями и плюсами) и в нескольких энергетических состояниях (обозначаются их положением по отношению к масштабу масс слева). Некоторые из частиц могут распадаться за счет сильного взаимодействия (пунктирные стрелки) или за счет электромагнитного взаимодействия (тонкие стрелки) в состояния, имеющие те же квантовые числа, но меньшие массы; другие могут распадаться только посредством слабых взаимодействий (двойные стрелки) на неочарованные частицы. Структура схемы в основном определяется требованием, чтобы барион состоял точно из трех кварков; например, не существует частица со странностью -2 или очарованием $+3$, из-за того, что это потребовало уже пяти кварков: двух странных и трех очарованных.

не может быть намного легче очарованных адронов, которые уже наблюдались. Из этих предварительных оценок можно заключить, что масса очарованных адронов должна находиться в интервале 2—3 Гэв.

После открытия j -частицы я вместе со своими коллегами по Гарварду А. Де-Рухулой и Г. Джорджи тщательно проанализировал создавшуюся ситуацию. Это же сделали и многие другие. Наши оценки показали, что самыми легкими очарованными состояниями являются мезоны, состоящие из c -кварка и $\bar{d}$ - или $\bar{u}$ -антикварка: их массы должны лежать между 1,8 и 2,0 Гэв. Значения внутри этого интервала находятся в согласии с предположением, что ψ' лежит ниже порога для образования пары очарованных мезонов, ψ'' — выше этого порога.

Самым легким очарованным барионом является комбинация кварков uds ; мы предсказываем, что его масса находится вблизи 2,2 Гэв. Как следует ожидать, поскольку c -кварк является наиболее тяжелым из всех четырех, наиболее тяжелый очарованный адрон — это ccc -барион. Мы оцениваем его массу около 5 Гэв (рис. 7).

Важным моментом, который следует учитывать при экспериментальных исследованиях очарованных адронов, является то, что в большинстве видов взаимодействий очарованные частицы могут создаваться только парами. Должны образовываться два адрона, один, содержащий очарованный кварк, а другой, — очарованный антикварк; отсюда следует очевидное следствие, что для образования очарованной частицы требуется двойная энергия. Важным исключением из этого правила является взаимодействие нейтрино с другими видами частиц, такими, как протоны. Дело в том, что нейтрино взаимодействует только через слабые взаимодействия, а кварковый аромат может изменяться в слабых процессах. Для поисков очарованных частиц в последние десять лет было использовано много различных экспериментальных методик, но пока ни одной частицы зарегистрировано не было. Тем не менее два последних эксперимента, оба включающие нейтринные взаимодействия, дали обнадеживающие результаты. В обоих случаях очарованные частицы, может быть, наконец, появились, но даже если это иллюзия, эти эксперименты дают четкие направления исследований.

Один из экспериментов был проведен в Национальной Ускорительной лаборатории им. Ферми в Батавии группой физиков, возглавляемой Д. Клайном из Висконсинского университета, А. Манном из Пенсильванского университета и К. Руббиа из Гарварда. Исследуя взаимодействия нейтрино при высоких энергиях, они обнаружили в нескольких процентах событий продукты, содержащие два противоположно заряженных мюона. Один из мюонов мог прямо образоваться из падающего нейтрино, но другой трудно интерпретировать с помощью известных неочарованных частиц. Наиболее вероятная интерпретация такова, что тяжелая частица, образованная в реакции, распадается посредством слабых сил, испуская мюон. Частица должна была бы иметь массу между 2 и 4 $G\text{эв}$, и если это адрон, то должно быть представлено объяснение его слабого распада. Большинство частиц с такими большими массами распадается посредством сильного взаимодействия. Присутствие очарованного кварка в частице может служить требующимся объяснением.

Второй эксперимент был выполнен группой исследователей под руководством Н. Саймиоса в Брукхейвене. Они сфотографировали треки, получающиеся в результате взаимодействия нейтрино с фотонами в пузырьковой камере. Среди нескольких сотен наблюдаемых столкновений имеется одна фотография, которая не поддается обычной интерпретации (рис. 8). Конечное состояние может быть представлено как продукты распада очарованного бариона. Этот процесс мог бы служить доказательством существования очарования, если бы он не проявился только в одном событии. Дальнейшие эксперименты с такими реакциями должны прояснить картину.

Было бы ошибочным считать, что описание адронов с помощью кварков трех цветов и четырех ароматов разрешило все проблемы, стоящие перед физической элементарных частиц. Например, продолжающиеся измерения отношения числа адронов к числу мюонных пар, образуемых при электрон-позитронной аннигиляции, не подтверждают предсказаний. Это отношение изменяется для различных кварковых моделей, и одним из аргументов в поддержку цветной гипотезы было то, что при энергиях от 2 до 3 $G\text{эв}$ это отношение равно примерно 2. При еще больших энергиях, достаточных для образования очарованных адронных пар, отношение должно возрасти от 2 примерно до 3,3. Отношение действительно возрастает, но оно перекрывает это значение и удерживается около 5. Возможно, при этом образуются очарованные частицы, но, по-видимому,

происходит что-то еще: образуются еще какие-то частицы, не предсказываемые теорией, которую я здесь излагаю. Один из моих коллег по Гарварду, М. Барнетт, считает, что мы недостаточно честолюбивы. Он предлагает ввести шесть кварков вместо четырех, так что уже должно было бы быть три аромата очарованных кварков. Также вероятно, что существуют более тяжелые лептоны, о которых мы пока ничего не знаем.

Наконец, даже если будет разработана полностью согласующаяся и могущая быть доказанная кварковая модель, все же останется много

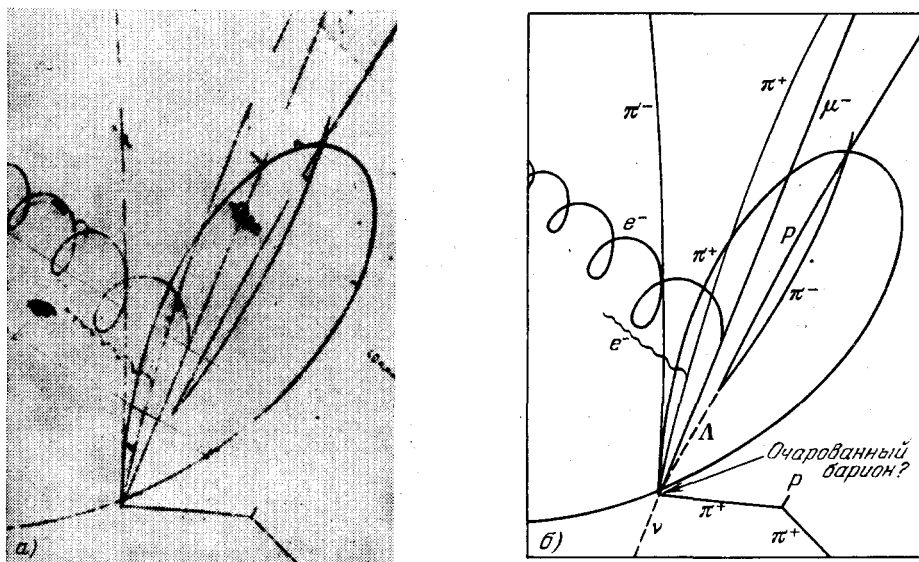


Рис. 8. Очарованный барион, возможно, был обнаружен Н. Саймиосом и его коллегами в Брукхейвене после столкновения между нейтрино и протоном.

Фотография рис. а) была сделана в пузырьковой камере, наполненной жидким водородом; трек частицы на фотографии идентифицируется на диаграмме рис. б). Нейтрино появляется снизу слева; его трек не виден, так как только заряженная частица ионизирует молекулы водорода и оставляет след из пузырьков в камере. Гипотетические очарованные барионы должны иметь электрический заряд, но их трек не может быть видимым, так как он очень короток; частица должна распасться за 10^{-12} сек, так что даже при очень больших скоростях она не сможет продвинуться достаточно далеко, чтобы ионизовать более чем несколько молекул водорода. Очарованная частица распадается на нейтральную лямбда-частицу, которая является странным барионом. Лямбда-частица не оставляет трек, но продукты ее распада образуют вершины, указывающие на начало взаимодействия. Образуются также четыре пиона и мюон, а также два электрона, выбитые быстрыми частицами и движущиеся по спирали влево в магнитном поле пузырьковой камеры. Присутствие очарованной частицы не очевидно; возможны и некоторые другие интерпретации, и, хотя все они маловероятны, исключить их нельзя.

фундаментальных вопросов. Одной из таких проблем является предпологаемая кварково-лептонная симметрия, которая ведет к гипотезе очарования. Как кварки, так и лептоны, все являющиеся элементарными частицами, могут быть подразделены на две подгруппы. В одну группу можно включить u - и d -кварки и электрон с электронным нейтрино. Этих четырех частиц достаточно, чтобы построить весь мир; их достаточно для создания атомов и молекул и даже для того, чтобы заставить светиться Солнце и другие звезды. Другая подгруппа будет состоять из странного и очарованного кварков и мюона с мюонным нейтрино. Некоторые из них наблюдались в космических лучах, но главным образом они создаются в мощных ускорителях. Казалось бы, что природа могла обойтись только первой подгруппой для своих целей. Разумеется, вторая подгруппа не создана лишь для развлечения и умственных упражнений физиков, но какова цель такого дублирования? На этот вопрос у нас нет ответа.