

в принципе возможен, но его не наблюдают, так как идет распад $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$, который на 12—13 порядков более вероятен. Однако взаимодействие, приводящее к этому процессу, можно изучать в нейтринных опытах:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow \Sigma^0 + e^+, \quad \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \Sigma^0 + \mu^+.$$

§ 110. Кварковая модель адронов

1. Обилие уже открытых и вновь открываемых адронов (в том числе резонансов) наводит на мысль, что все они построены из каких-то других, более фундаментальных частиц. С наибольшим успехом эта идея реализована в кварковой модели адронов. Кварковая модель объясняет не только систематику, но и динамику адронов. Она приводит к массе оправдывающихся предсказаний и в настоящее время считается общепризнанной.

В 1964 г. Гелл-Манном и независимо от него Цвейгом (р. 1937) была выдвинута гипотеза, подтвержденная дальнейшими исследованиями, что все адроны построены из более фундаментальных частиц, которые, по предложению Гелл-Манна, были названы *кварками*. На основе кварковой гипотезы не только была понята структура уже известных адронов, но и предсказано существование новых. Ниже дается понятие о кварковой модели без каких-бы то ни было претензий на полноту и обоснование полученных результатов.

К настоящему времени установлено существование пяти разновидностей (или так называемых *ароматов*) кварков: *u*, *d*, *s*, *c*, *b*. Их массы: $m_u \approx 5$ МэВ, $m_d \approx 7$ МэВ, $m_s \approx 150$ МэВ, $m_c \approx \approx 1,3$ ГэВ, $m_b \approx 5$ ГэВ. На эти данные надо смотреть как на оценочные и грубо ориентировочные, так как кварки в свободном состоянии не наблюдались и поэтому их массы нельзя было измерить прямыми методами (см. пункт 7). Неоднократно поступали предварительные сообщения об открытии *t*-кварка ($m_t \geq 22$ ГэВ), но окончательно существование *t*-кварка еще не установлено. Каждому кварку соответствует свой антикварк.

Все кварки имеют спин 1/2 и барионный заряд 1/3. Кварки *u*, *c*, *t* называют *верхними*, так как они имеют дробный электрический заряд +2/3. Остальные кварки *d*, *s*, *b* с электрическим зарядом —1/3 принято называть *нижними*. В соответствии с этой терминологией кварки можно расположить в таблице:

$$u, c, t \text{ (заряд } 2/3); \quad d, s, b \text{ (заряд } -1/3). \quad (110.1)$$

Кварк *s* является носителем странности, *c* — очарования, *b* — красоты (прелести).

Протон состоит из двух *u*-кварков и одного *d*-кварка ($p \rightarrow uud$), нейтрон состоит из одного *u*-кварка и двух *d*-кварков

$(n \rightarrow udd)$. Их античастицы построены из антикварков: $\bar{p} \rightarrow \bar{u}\bar{d}\bar{d}$, $\bar{n} \rightarrow \bar{u}\bar{d}\bar{d}$.

2. Мезоны построены из двух частиц: кварка и антикварка. Поэтому их барионное число равно нулю. Посмотрим, какие комбинации из двух таких частиц могут быть составлены из трех самых легких кварков u , d , s и их антикварков \bar{u} , \bar{d} , \bar{s} . Очевидно, всего таких комбинаций будет девять:

$$\begin{array}{lll} u\bar{u}, & u\bar{d}, & u\bar{s}, \\ d\bar{u}, & d\bar{d}, & d\bar{s}, \\ s\bar{u}, & s\bar{d}, & s\bar{s}. \end{array} \quad (110.2)$$

Кварки и антикварки могут входить в эти (и всякие другие) комбинации с различными орбитальными угловыми моментами. Спины кварков и антикварков могут различно ориентироваться друг относительно друга. Общий угловой момент составленной из кварков и антикварков частицы (античастицы) найдется по правилу векторного сложения спинового и орбитального моментов.

Допустим, что все кварки не обладают орбитальными угловыми моментами; все их моменты чисто спиновые. Допустим, далее, что спины кварка и антикварка направлены противоположно. Тогда каждая комбинация представляет мезон со спином $J=0$. Наиболее легкие заряженные мезоны представляются комбинациями $u\bar{d}$ и $d\bar{u}$. Это — π -мезоны:

$$\pi^+ = u\bar{d}, \quad \pi^- = d\bar{u}. \quad (110.3)$$

Нейтральный π^0 -мезон состоит из таких же кварка и антикварка. Но он представляет собой линейную суперпозицию состояний $u\bar{u}$ и $d\bar{d}$. Он с равной вероятностью может находиться в состоянии $u\bar{u}$ и в состоянии $d\bar{d}$.

Более тяжелые К-мезоны содержат кварк s и антикварк \bar{s} :

$$K^+ = u\bar{s}, \quad K^0 = d\bar{s}, \quad \bar{K}_0 = s\bar{d}, \quad K^- = s\bar{u}. \quad (110.4)$$

K^+ и K^- являются частицей и античастицей по отношению друг к другу. То же относится к K^0 - и \bar{K}^0 -мезонам, которые, таким образом, не являются истинно нейтральными частицами: K^0 -мезон отличается от своей античастицы \bar{K}^0 странностью. У \bar{K}^0 -мезона странность +1, а у K^0 -мезона странность -1. С этим связано то, что K^0 в отличие от \bar{K}^0 слабо поглощаются веществом. Дело в том, что странность всех барионов отрицательна или равна нулю. Поэтому поглощение K^0 веществом может происходить лишь с несохранением странности, т. е. из-за слабого взаимодействия. Масса K^\pm -мезонов равна 493,7 МэВ, нейтрального K^0 -мезона — 497,7 МэВ. Частицы, содержащие s -кварк, являются странными, а сам s -кварк называется *странным кварком*. Диагональные члены $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$ соответствуют нейтральным мезонам. Линейная суперпозиция двух первых из них, как уже отмечалось,

лось выше, представляет π^0 -мезон. Двум остальным линейным суперпозициям $u\bar{u} + d\bar{d}$ и $s\bar{s}$ соответствуют истинно нейтральные частицы: η - и η' -мезоны с массами соответственно 548,8 и 957,6 МэВ.

Допустим по-прежнему, что орбитальных угловых моментов у кварков и антикварков нет, но их спины направлены параллельно. В этом случае возможны те же девять комбинаций кварков с антикварками. Однако спин каждой комбинации будет 1. Этим комбинациям соответствует девять более тяжелых мезонов:

$$\rho^+ \rho^- \rho^0, \quad K^{*+} K^{*0} K^{*-} \bar{K}^{*0}, \quad \omega^0, \quad \phi^0.$$

770 МэВ 892 МэВ 783 МэВ 1020 МэВ

3. Обратимся теперь к барионам. Спин их полуцелый. Следовательно, если кварки не обладают орбитальными моментами, то барионы должны быть построены из четного числа частиц. Рассмотрим случай, когда такими частицами являются кварки u , d , s . Спин бариона может быть равен либо $1/2$ (когда спины двух кварков параллельны, а спин третьего направлен противоположно), либо $3/2$ (когда спины всех трех кварков параллельны). В первом случае образуется октет (восьмерка) барионов:

$$p(uud), \quad n(udd), \quad \Lambda^0(uds),$$

$$\Sigma^-(dds), \quad \Sigma^0(uds), \quad \Sigma^+(uus), \quad \Xi^-(dss), \quad \Xi^0(uss).$$

Барионы со спином $3/2$ образуют декуплет (десятку) барионов:

ddd	udd	uud	uuu	$\Delta^- \Delta^0 \Delta^+ \Delta^{++}$	1232 МэВ,
dss	uds	uus		$\Sigma^- \Sigma^0 \Sigma^+$	1385 МэВ,
dss	uss			$\Xi^- \Xi^0$	1530 МэВ,
sss				Ω^-	1672 МэВ.

Ω^- -гиперон, находящийся в вершине этого перевернутого треугольника, был предсказан на основании кварковой модели барионов и обнаружен экспериментально в 1964 г. Были предсказаны и его свойства — масса, странность, время жизни; все это подтвердилось на опыте.

4. Триумфом кварковой модели является открытие очарованных частиц. Первая очарованная частица была открыта в 1974 г. двумя группами экспериментаторов независимо друг от друга: на протонном ускорителе в Брукхейвене (США) при бомбардировке протонами ядер Be и на ускорителе со встречными электронно-позитронными пучками в Стэнфорде (США). Первая группа назвала открытую частицу мезоном J , а вторая — мезоном ψ . Поэтому обнаруженный мезон и получил двойное название J/ψ . Его масса 3,096 ГэВ. Замечательная особенность вновь

открытой частицы состоит в ее относительно большой долговечности. Ее ширина 60 кэВ, тогда как обычные ширины для частиц таких энергий 10—70 МэВ, что примерно на три порядка больше. Этот факт, как и в случае странных частиц, указывает на запрет по какому-то новому квантовому числу. В результате было введено квантовое число *C*, получившее название *очарования*, или *шарма* (по-английски charm — очарование). Ему соответствует новый кварк *c*. В кварковой модели очарование определяется как разность между числом кварков (*c*) и антикварков (\bar{c}). Частицы с очарованием, отличным от нуля, называются *очарованными*. Очарование подобно странности сохраняется при сильных и электромагнитных взаимодействиях, но не сохраняется при слабых. Распады очарованных адронов происходит за счет *слабого взаимодействия*, при этом очарование меняется на единицу. J/ψ -мезон построен из кварка *c* и антикварка \bar{c} ($J/\psi = c\bar{c}$). Его очарование равно нулю и относят его к числу мезонов со *скрытым очарованием*. Скрытое очарование у частиц проявляется в том, что они легко распадаются на очарованные частицы, если распад не запрещен законами сохранения энергии и импульса, а распады на неочарованные частицы сильно подавлены (так как подавлена аннигиляция $c\bar{c}$ в более мелкие кварки), т. е. происходят с малой вероятностью.

По своей структуре квантовая система $c\bar{c}$, называемая *чармонием*, напоминает атом водорода (скорее, позитрония). Однако последний всегда называется *атомом водорода* независимо от того, в каком из возбужденных состояний он находится. Напротив, различные возбужденные состояния чармония (и любых других кварковых систем) условились считать *различными частицами* и обозначать *различными символами*. Мезон J/ψ является одним из *возбужденных состояний чармония*. После него было открыто несколько возбужденных состояний чармония. Были открыты и мезоны с *явным очарованием*:

$$\begin{array}{lll} D^+ - c\bar{d}, & D^0 - c\bar{u}, & F^+ - s\bar{c}, \\ D^- - d\bar{c}, & \bar{D}^0 - u\bar{c}, & F^- - s\bar{c}. \end{array}$$

1869 МэВ 1865 МэВ 2021 МэВ

Были открыты также и очарованные барионы.

5. История открытия нового кварка *b* аналогична истории открытия кварка *c*. В 1977 г. в Батавии (США) был открыт новый мезон, обозначенный через Υ . Он возникал при бомбардировке мишени из меди и свинца пучком протонов с энергией 400 ГэВ. Этот сверхтяжелый мезон при массе m_Υ характеризовался относительно малой шириной (около 0,04 МэВ). Свойства новой частицы не укладывались в схему четырехкварковой модели, и пришлось ввести пятый кварк *b*, который был назван *прелестным*, или *красивым*. (Адроны, в которые входит кварк *b*, назы-

вают *красивыми*, или *прелестными*.) Мезон Υ является одним из возбужденных состояний связанный системы $b\bar{b}$ со спином 1. В дальнейшем мезон Υ и другие возбужденные состояния той же системы Υ' , Υ'' , Υ''' получались во встречных электрон-позитронных пучках, а на встречных pp-пучках в ЦЕРН (Швейцария) был также обнаружен первый, самый легкий «красивый» барион $\Lambda_b = udb$ массой 5400 МэВ. Разность между числами b -кварков и их антикварков \bar{b} называется *красотой*. *Красота сохраняется при сильных и электромагнитных взаимодействиях и может нарушаться при слабых.*

Если просмотреть все квантовые числа для адронов, то легко обнаружить, что электрический заряд адрона можно вычислить по формуле

$$Q = T_3 + (1/2)(B + S + C + b). \quad (110.5)$$

В частности, эта формула применима для нуклонов. У них $S = C = b = 0$, $B = +1$, для протона $T_3 = +1/2$, для нейтрона $T_3 = -1/2$.

6. Успешная классификация адронов на основе кварковой модели явилась веским аргументом в ее пользу. Другим аргументом являются опыты по прямому просвечиванию нуклонов и других адронов высоконеэнергетическими электронами. Происходящий при этом процесс называется *глубоконеупругим рассеянием*. Теоретический анализ его привел к заключению, что внутри адронов электроны рассеиваются на точечных частицах с зарядами $+2/3$ и $-1/3$ и спином $1/2$. На этих частицах электроны резко меняют свои импульсы и энергию, сообщая их кварку, подобно тому как это происходит с α -частицами при рассеянии на ядрах в опытах Резерфорда. О конечных размерах кварков эти опыты ничего не говорят. Из них можно заключить только, что во всяком случае на расстояниях от силового центра больше 10^{-15} см кварки ведут себя еще как бесструктурные точечные частицы. Возможно, что за пятым кварком b и предполагаемым шестым t будут открыты и другие кварки. Возможно, что увеличение числа кварков будет небольшим и ограничено общими принципами или внутренними свойствами симметрии элементарных частиц. Возможно, что и бесструктурность кварков отражает лишь достигнутый уровень исследования этих материальных объектов.

7. Многочисленные поиски свободных кварков, производившиеся на ускорителях высоких энергий, в космических лучах и окружающей среде, оказались безуспешными. В частности, кварки искали при измерении заряда капель по методу Милликена (1868—1953). Обнаружение капель с дробным зарядом свидетельствовало бы о присутствии кварка, так как дробный заряд кварка не мог бы быть компенсирован целочисленным зарядом электрона или иона. Такие опыты производились в наше время с гораздо большей точностью, чем это мог делать Милликен.

К отрицательному результату привел и очень точный массспектроскопический анализ воды, который дал для верхнего предела отношения числа свободных夸克ов к числу протонов величину порядка 10^{-27} . Сейчас большинство специалистов склоняется к тому, что в свободном состоянии夸克и не существуют.

Итак,夸克овая модель предполагает, что夸克и внутри адронов существуют, но опыт вынуждает признать, что вылететь оттуда и появиться в свободном состоянии они не могут. Такое положение называют английским словом «конфайнмент», которое означает «пление, тюремное заключение».夸克, получивший энергию в результате столкновения с электропом, не вылетает наружу из адрона, а растрачивает ее на образование夸克-анти夸ковых пар, т. е. на образование новых адронов, в основном мезонов.

Одной из причин ненаблюдаемости夸克ов в свободном состоянии, возможно, являются их очень большие массы. Это препятствует рождению夸克ов при тех энергиях, которые достигаются на современных ускорителях. Не исключена возможность, что в свободном состоянии夸克и принципиально не могут появиться в силу специфики их взаимодействия. Приводились доводы экспериментального и теоретического характера, согласно которым силы взаимодействия между夸克ами не ослабевают с расстоянием. Если это так, то для отделения их друг от друга требуются бесконечно большие энергии, при которых такое отделение делается невозможным. Все это — только предположения, ни в какой степени не претендующие на достоверность и даже правдоподобность.

8. Волновые функции систем夸克ов, образующих барионы, должны быть антисимметричными, так как夸克и имеют спин $1/2$. Между тем встречаются барионы с одинаковыми ориентациями спинов: $\Delta^{++}(u_{\downarrow}u_{\uparrow}u_{\uparrow})$, $\Omega^-(s_{\uparrow}s_{\uparrow}s_{\uparrow})$, которые симметричны относительно перестановки夸克ов, если только последние не обладают какими-либо дополнительными характеристиками. Такие характеристики и пришлось ввести. Они называются цветами. Каждый тип (аромат)夸ка характеризуется тремя цветами. Им условно присвоили названия: красный R (red), зеленый G (green) и голубой B (blue). Анти夸кам присвоили антицвета \bar{R} , \bar{G} , \bar{B} . Каждый антицвет является дополнительным к своему цвету, так что комбинации $R\bar{R}$, $G\bar{G}$, $B\bar{B}$ считаются бесцветными (белыми). Точно также бесцветной будет и комбинация $R\bar{R} + G\bar{G} + B\bar{B}$.

По современным представлениям сильные взаимодействия осуществляются путем обмена между夸克ами безмассовыми частицами со спином 1 и нулевой массой покоя. Эти частицы называются глюонами. Предполагается существование восьми глюонов, обладающих характеристикой «цвет». Обмен глюонами между夸克ами меняет их цвет, но оставляет неизменными все

остальные квантовые числа (электрический заряд, странность, очарование, красоту), т. е. сохраняет аромат кварка. Каждый глюон содержит цвет и антицвет. Из трех цветов и антицветов можно составить всего девять комбинаций:

$$\begin{aligned} R\bar{R}, \quad R\bar{G}, \quad R\bar{B}, \\ G\bar{R}, \quad G\bar{G}, \quad G\bar{B}, \\ B\bar{R}, \quad B\bar{G}, \quad B\bar{B}. \end{aligned}$$

Каждой из таких комбинаций соответствует глюон. Цвет, подобно электрическому заряду, сохраняется. Поэтому шесть недиагональных явно окрашенных комбинаций не могут перемешиваться между собой. Три диагональные комбинации бесцветны, и перемешивание их между собой не меняет цвет. Каждая из диагональных комбинаций может быть получена путем линейной суперпозиции двух остальных комбинаций. Существует, следовательно, всего восемь соответствующих им глюонов.

Представим схематически взаимодействие между кварками путем обмена глюонами. Будем изображать красный, зеленый и голубой кварки любого аромата символами q_R , q_G , q_B ($q = u, d, s, c, b, t$). Тогда взаимодействие между красным и зеленым кварками запишется так:

$$q_R \rightarrow q_G + q_{R\bar{G}}, \quad q_G + q_{R\bar{G}} \rightarrow q_R.$$

Первое равенство означает, что красный кварк испустил красно-зеленый глюон и превратился в зеленый кварк q_G . Второе означает, что зеленый кварк, поглотив красно-зеленый глюон, превратился в красный кварк.

Изложенное имеет весьма формальный характер, а главное в общей физике не имеет каких-либо конкретных применений. Поэтому нет смысла заниматься этим дальше. Соответствующие вопросы относятся к специальной теоретической дисциплине — *квантовой хромодинамике* (КХД).

9. В заключение заметим, что к настоящему времени Вайпберг (р. 1915), Салам (р. 1926) и Глэшоу (р. 1932) создали теорию, в которой электромагнитное и слабое взаимодействия объединены в единое *электрослабое взаимодействие*. На расстояниях от силового центра, меньших радиуса действия слабых сил (10^{-16} см), различие между электромагнитными и слабыми взаимодействиями исчезает. На больших расстояниях, однако, сохраняется различие между ними, так что старая теория остается в силе. Мы не можем входить в рассмотрение этих вопросов по существу, так как они далеко выходят за пределы общего курса физики.

Отметим только, что за последние 15—20 лет в физике элементарных частиц произошли революционные открытия.

1. Достоверно установлено существование структуры у сильновзаимодействующих частиц — адронов (в том числе протона и нейтрона). Модель кварков не только объясняет систематику адронов, но и динамику их взаимодействия. На основе модели кварков предсказаны существование и свойства большого числа частиц, обнаруженных затем экспериментально.

2. Установлена общая природа электромагнитных и слабых взаимодействий. Открыты переносчики слабых взаимодействий: W^\pm - и Z^0 -бозоны.

3. Создана теория сильного взаимодействия кварков — квантовая хромодинамика. Подтверждены экспериментально свойства переносчиков этих взаимодействий — глюонов (в частности, спин 1). Предсказания КХД (в той области, где применима теория возмущений) блестяще подтверждаются на опыте.

4. Поставлен вопрос о единой природе всех сил (Великое объединение).

5. Обнаружена глубокая связь между физикой элементарных частиц и космологией.