

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

С. А. СЛАВАТИНСКИЙ

Московский физико-технический институт, Долгопрудный Московской обл.

FUNDAMENTAL PARTICLES

S. A. SLAVATINSKII

A brief popular overview of one of the most significant accomplishments of high-energy physics in the last thirty years, i.e., the modern picture of the structure of particles based on the quark model is presented.

Приведен краткий популярный обзор одного из крупнейших достижений физики высоких энергий последних трех десятилетий – создания современной картины строения частиц на основе кварковой модели.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Еще сравнительно недавно элементарными считались несколько сот частиц и античастиц. Детальное изучение их свойств и взаимодействий с другими частицами и развитие теории показали, что большинство из них на самом деле не элементарны, так как сами состоят из простейших или, как сейчас говорят, фундаментальных частиц. Фундаментальные частицы сами уже ни из чего не состоят. Многочисленные эксперименты показали, что все фундаментальные частицы ведут себя как безразмерные точечные объекты, не имеющие внутренней структуры, по крайней мере до наименьших, изученных сейчас расстояний $\sim 10^{-16}$ см.

Среди бесчисленных и разнообразных процессов взаимодействия между частицами имеются четыре основных или фундаментальных взаимодействия: сильное (ядерное), электромагнитное, слабое и гравитационное. В мире частиц гравитационное взаимодействие очень слабое, его роль еще неясна, и о нем дальше мы говорить не будем.

В природе существуют две группы частиц: адроны, которые участвуют во всех фундаментальных взаимодействиях, и лептоны, не участвующие только в сильном взаимодействии.

Согласно современным представлениям, взаимодействия между частицами осуществляются посредством испускания и последующего поглощения квантов соответствующего поля (сильного, слабого, электромагнитного), окружающего частицу. Такими квантами являются калибровочные бозоны, также являющиеся фундаментальными частицами. У бозонов собственный момент количества движения, называемый спином, равен целочисленному значению постоянной Планка $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$ эрг · с. Квантами поля и соответственно переносчиками сильного взаимодействия являются глюоны, обозначаемые символом g (джи), квантами электромагнитного поля являются хорошо известные нам кванты света – фотоны, обозначаемые γ (гамма), а квантами слабого поля и соответственно переносчиками слабых взаимодействий являются W^\pm (дубль ве)- и Z^0 (зет нуль)-бозоны.

В отличие от бозонов все остальные фундаментальные частицы являются фермионами, то есть частицами, имеющими полуцелое значение спина, равное $h/2$.

В табл. 1 приведены символы фундаментальных фермионов — лептонов и кварков.

Каждой частице, приведенной в табл. 1, соответствует античастица, отличающаяся от частицы лишь знаками электрического заряда и других квантовых чисел (см. табл. 2) и направлением спина относительно направления импульса частицы. Античастицы мы будем обозначать теми же символами, как и частицы, но с волнистой чертой над символом.

Частицы в табл. 1 обозначены греческими и латинскими буквами, а именно: буквой ν (ню) — три различных нейтрино, буквами e — электрон, μ (мю) — мюон, τ (тау) — таон, буквами u, c, t, d, s, b обозначены кварки; их наименования и характеристики приведены в табл. 2.

Частицы в табл. 1 сгруппированы в три поколения I, II и III в соответствии со структурой современной теории [1]. Наша Вселенная построена из частиц первого поколения — лептонов и кварков и калибровочных бозонов, но, как показывает современная наука о развитии Вселенной, на начальной стадии ее развития важную роль играли частицы всех трех поколений.

Таблица 1

Лептоны			Кварки		
I	II	III	I	II	III
ν_e	ν_μ	ν_τ	u	c	t
e	μ	τ	d	s	b

ЛЕПТОНЫ

Сначала рассмотрим более подробно свойства лептонов. В верхней строке табл. 1 содержатся три разных нейтрино: электронное ν_e , мюонное ν_μ и тау-нейтрино ν_τ . Их масса до сих пор точно не измерена, но определен ее верхний предел, например для ν_e равный 10^{-5} от величины массы электрона (то есть $\leq 10^{-32}$ г).

При взгляде на табл. 1 невольно возникает вопрос о том, зачем природе потребовалось создание трех разных нейтрино. Ответа на этот вопрос пока нет, ибо не создана такая всеобъемлющая теория фундаментальных частиц, которая бы указала на необходимость и достаточность всех таких частиц и описала бы их основные свойства. Возможно, эта проблема будет решена в XXI веке (или позже?).

Нижняя строка табл. 1 начинается с наиболее изученной нами частицы — электрона. Электрон был открыт еще в конце прошлого века английским физиком

Дж. Томсоном. Роль электронов в нашем мире огромна. Они являются теми отрицательно заряженными частицами, которые вместе с атомными ядрами образуют все атомы известных нам элементов Периодической таблицы Менделеева. В каждом атоме число электронов в точности равно числу протонов в атомном ядре, что и делает атом электрически нейтральным.

Электрон стабилен, главной возможностью уничтожения электрона является его гибель при соударении с античастицей — позитроном e^+ . Этот процесс получил название аннигиляции:

$$e^- + e^+ \longrightarrow \gamma + \gamma. \quad (1)$$

В результате аннигиляции образуются два гамма-кванта (так называют фотоны высокой энергии), уносящие и энергии покоя e^+ и e^- , и их кинетические энергии. При высокой энергии e^+ и e^- образуются адроны и кварковые пары (см., например, (5) и рис. 4).

Реакция (1) наглядно иллюстрирует справедливость знаменитой формулы А. Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии: $E = mc^2$.

Действительно, при аннигиляции остановившегося в веществе позитрона и покоящегося электрона вся масса их покоя (равная 1,22 МэВ) переходит в энергию γ -квантов, которые не имеют массы покоя.

Во втором поколении нижней строки табл. 1 расположен мюон — частица, являющаяся по всем своим свойствам аналогом электрона, но с аномально большой массой. Масса мюона в 207 раз больше массы электрона. В отличие от электрона мюон нестабилен. Время его жизни $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ с. Мюон преимущественно распадается на электрон и два нейтрино по схеме

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu. \quad (2)$$

Еще более тяжелым аналогом электрона является τ -лептон (таон). Его масса более чем в 3 тыс. раз превосходит массу электрона ($m_\tau = 1777$ МэВ/ c^2), то есть таон тяжелее протона и нейтрона. Время его жизни равно $2,9 \cdot 10^{-13}$ с, а из более чем ста разных схем (каналов) его распада возможны следующие:

$$\tau^- \begin{cases} e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\tau, \\ \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau. \end{cases} \quad (3)$$

Говоря о лептонах, интересно сравнить слабые и электромагнитные силы на некотором определенном расстоянии, например $R = 10^{-13}$ см. На таком расстоянии электромагнитные силы больше слабых сил почти в 10 млрд раз. Но это вовсе не значит, что роль слабых сил в природе мала. Отнюдь нет.

Именно слабые силы ответственны за множество взаимных превращений различных частиц в другие частицы, как, например, в реакциях (2), (3), и такие

взаимопревращения являются одной из характернейших черт физики частиц. В отличие от реакций (2), (3) в реакции (1) действуют электромагнитные силы.

Говоря о лептонах, необходимо добавить, что современная теория описывает электромагнитные и слабые взаимодействия с помощью единой электрослабой теории. Она разработана С. Вайнбергом, А. Саламом и Ш. Глэшоу в 1967 году [2].

КВАРКИ

Сама идея кварков возникла в результате блестящей попытки классифицировать большое количество частиц, участвующих в сильных взаимодействиях и называемых адронами. М. Гелл-Ман и Г. Цвейг предположили, что все адроны состоят из соответствующего набора фундаментальных частиц – кварков, их антикварков и переносчиков сильного взаимодействия – глюонов [3].

Полное число адронов, наблюдаемое в настоящее время, составляет более ста частиц (и столько же античастиц). Много десятков частиц еще не зарегистрировано. Все адроны подразделяются на тяжелые частицы, названные барионами, и средние, названные мезонами.

Барионы характеризуются барионным числом $b = 1$ для частиц и $b = -1$ для антибарионов. Их рождение и уничтожение всегда происходят парами: бариона и антибариона. У мезонов барионный заряд $b = 0$. Согласно идее Гелл-Мана и Цвейга, все барионы состоят из трех кварков, антибарионы – из трех антикварков. Поэтому каждому кварку было приписано барионное число $1/3$, чтобы в сумме у бариона было $b = 1$ (или -1 для антибариона, состоящего из трех антикварков). Мезоны имеют барионное число $b = 0$, поэтому они могут быть составлены из любой комбинации пар любого кварка и любого антикварка. Помимо одинаковых для всех кварков квантовых чисел – спина и барионного числа имеются другие важные их характеристики, такие, как величина их массы покоя m , величина электрического заряда Q/e (в долях заряда электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ кулон) и некоторого набора квантовых чисел, характеризующих так называемый аромат кварка. К ним относятся:

1) величина изотопического спина I и величина его третьей проекции, то есть I_3 . Так, u -кварк и d -кварк образуют изотопический дублет, им приписан полный изотопический спин $I = 1/2$ с проекциями $I_3 = +1/2$, соответствующей u -кварку, и $I_3 = -1/2$, соответствующей d -кварку. Обе компоненты дублета имеют близкие значения массы и идентичны по всем остальным свойствам, за исключением электрического заряда;

2) квантовое число S – странность характеризует странное поведение некоторых частиц, имеющих ано-

мально большое время жизни ($\sim 10^{-8} - 10^{-13}$ с) по сравнению с характерным ядерным временем ($\sim 10^{-23}$ с). Сами частицы были названы странными, в их состав входит один или несколько странных кварков и странных антикварков. Рождение или исчезновение странных частиц вследствие сильных взаимодействий происходят парами, то есть в любой ядерной реакции сумма $\sum S$ до реакции должна быть равна $\sum S$ после реакции. Однако в слабых взаимодействиях закон сохранения странности не выполняется.

В опытах на ускорителях наблюдали частицы, которые было невозможно описать с помощью u -, d - и s -кварков. По аналогии со странностью потребовалось ввести еще три новых кварка с новыми квантовыми числами $C = +1$, $B = -1$ и $T = +1$. Частицы, составленные из этих кварков, имеют существенно большую массу (> 2 ГэВ/ c^2). Они имеют большое разнообразие схем распадов со временем жизни $\sim 10^{-13}$ с. Сводка характеристик всех кварков приведена в табл. 2.

Каждому кварку табл. 2 соответствует свой антикварк. У антикварков все квантовые числа имеют знак, противоположный тому, который указан для кварка. О величине массы кварков необходимо сказать следующее. Приведенные в табл. 2 значения соответствуют массам голых кварков, то есть собственно кварков без учета окружающих их глюонов. Масса одетых кварков за счет энергии, несомой глюонами, больше. Особенно это заметно для легчайших u - и d -кварков, глюонная шуба которых имеет энергию около 300 МэВ.

Кварки, которые определяют основные физические свойства частиц, называют валентными кварками. Помимо валентных кварков в составе адронов имеются виртуальные пары частиц – кварки и антикварки, которые испускаются и поглощаются глюонами на очень короткое время

$$t \leq \frac{\hbar}{E} \quad (4)$$

(где E – энергия виртуальной пары), что происходит с нарушением закона сохранения энергии в соответствии с соотношением неопределенности Гейзенберга [4]. Виртуальные пары кварков называют кварками моря или морскими кварками. Таким образом, в структуру адронов входят валентные и морские кварки и глюоны.

Главная особенность всех кварков в том, что они являются обладателями соответствующих сильных зарядов. Заряды сильного поля имеют три равноправные разновидности (вместо одного электрического заряда в теории электрических сил). В исторически сложившейся терминологии эти три разновидности заряда называют цветами кварков, а именно: условно красным, зеленым и синим. Таким образом, каждый кварк в табл. 1 и 2 может быть в трех ипостасях и является цветной

Таблица 2. Характеристики кварков

Кварки	<i>u</i> (up)	<i>d</i> (down)	<i>s</i> (strange)	<i>c</i> (charm)	<i>b</i> (bottom)	<i>t</i> (top)
Масса m_0	(1,5–5) МэВ/ c^2	(3–9) МэВ/ c^2	(60–170) МэВ/ c^2	(1,1–4,4) ГэВ/ c^2	(4,1–4,4) ГэВ/ c^2	174 ГэВ/ c^2
Изотопоспин I	1/2	1/2	0	0	0	0
Проекция I_3	+1/2	-1/2	0	0	0	0
Электрический заряд Q/e	+2/3	-1/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
Странность S	0	0	-1	0	0	0
Чарм C	0	0	0	+1	0	0
Боттом B	0	0	0	0	-1	0
Топ T	0	0	0	0	0	+1

частицей. Смешение всех трех цветов, подобно тому как это имеет место в оптике, дает белый цвет, то есть обесцвечивает частицу. Все наблюдаемые адроны бесцветны.

Взаимодействия кварков осуществляют восемь разных глюонов. Термин “глюон” означает в переводе с английского языка клей, то есть эти кванты поля есть частицы, которые как бы склеивают кварки между собой. Как и кварки, глюоны являются цветными частицами, но поскольку каждый глюон изменяет цвета сразу двух кварков (кварка, который испускает глюон, и кварка, который поглотил глюон), то глюон окрашен дважды, неся на себе цвет и антицвет, как правило отличный от цвета.

Масса покоя глюонов, как и у фотона, равна нулю. Кроме того, глюоны электрически нейтральны и не обладают слабым зарядом.

Адроны принято также делить на стабильные частицы и резонансы: барионные и мезонные. Для резонансов характерно чрезвычайно малое время жизни ($\sim 10^{-20}$ – 10^{-24} с), так как их распад обусловлен сильным взаимодействием.

Десятки таких частиц были открыты американским физиком Л.В. Альваресом. Поскольку путь таких частиц до распада столь мал, что они не могут наблюдаться в детекторах, регистрирующих следы частиц (таких, как пузырьковая камера и др.), все они были обнаружены косвенно, по наличию пиков в зависимости вероятности взаимодействия различных частиц друг с другом от энергии. Рисунок 1 поясняет сказанное. На рисунке приведена зависимость сечения взаимодействия (пропорциональное величине вероятности) положительного пиона π^+ с протоном p от кинетической энергии пиона. При энергии около 200 МэВ виден пик в ходе сечения. Его ширина $\Gamma = 110$ МэВ, а полная масса частицы Δ^{++} равна $T_{\max}^* + M_p c^2 + M_\pi c^2 = 1232$ МэВ/ c^2 , где T_{\max}^* – кинетическая энергия соударения частиц в системе их центра масс. Большинство резонансов мож-

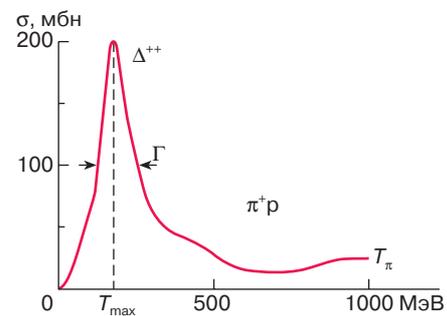


Рис. 1. Зависимость сечения σ π^+ -взаимодействия от кинетической энергии пиона. При энергии $T_{\max} \sim 200$ МэВ образуется Δ^{++} -резонанс

но рассматривать как возбужденное состояние стабильных частиц, так как они имеют тот же кварковый состав, что и их стабильные аналоги, хотя масса резонансов больше за счет энергии возбуждения.

КВАРКОВАЯ МОДЕЛЬ АДРОНОВ

Кварковую модель адронов начнем описывать с рисунка силовых линий, исходящих из источника – кварка с цветным зарядом и заканчивающихся на антикварке (рис. 2, б). Для сравнения на рис. 2, а мы показываем, что в случае электромагнитного взаимодействия силовые линии расходятся от их источника – электрического заряда веером, ибо виртуальные фотоны, испущенные одновременно источником, не взаимодействуют друг с другом. В результате получаем закон Кулона.

В отличие от этой картины глюоны сами обладают цветными зарядами и сильно взаимодействуют друг с другом. В результате вместо веера из силовых линий мы имеем жгут, показанный на рис. 2, б. Жгут протянут между кварком и антикварком, но самое удивительное то, что сами глюоны, имея цветные заряды, становятся источниками новых глюонов, число которых нарастает по мере их удаления от кварка. Такая картина взаимодействия соответствует зависимости потенциальной

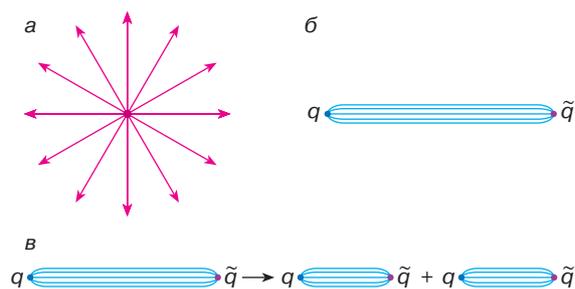


Рис. 2. Схема силовых линий электрического поля в электростатике (а) и глюонного поля между кварком и антикварком (б), а также схема разрыва жгута при его большом растяжении (в)

энергии взаимодействия между кварками от расстояния между ними, показанной на рис. 3. А именно: до расстояния $R < 10^{-13}$ см зависимость $U(R)$ имеет воронкообразный характер, причем сила цветного заряда в этой области расстояний относительно невелика, так что кварки при $R < 10^{-15}$ см в первом приближении можно рассматривать как свободные, невзаимодействующие частицы. Это явление имеет специальное название асимптотической свободы кварков при малых R . Однако при R больше некоторого критического $R_{кр} \approx 10^{-13}$ см величина потенциальной энергии взаимодействия $U(R)$ становится прямо пропорциональной величине R . Отсюда прямо следует, что сила $F = -dU/dR = \text{const}$, то есть не зависит от расстояния. Никакие другие взаимодействия, которые физики ранее изучили, не обладали столь необычным свойством [5].

Расчеты показывают, что силы, действующие между кварком и антикварком, действительно, начиная с $R_{кр} \approx 10^{-13}$ см, перестают зависеть от расстояния, оставаясь на уровне огромной величины, близкой 20 т. На расстоянии $R \sim 10^{-12}$ см (равном радиусу средних атомных ядер) цветные силы более чем в 100 тыс. раз больше электромагнитных сил. Если сравнить цветную силу с ядерными силами между протоном и нейтроном внутри атомного ядра, то оказывается, что цветная си-

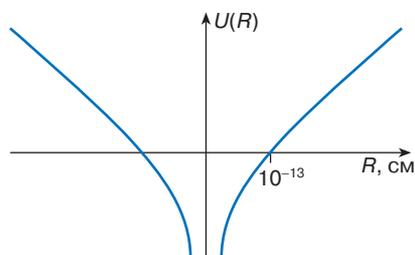


Рис. 3. Зависимость потенциальной энергии взаимодействия кварка с антикварком от расстояния между ними

ла в тысячи раз больше! Таким образом, перед физиками открылась новая грандиозная картина цветных сил в природе, на много порядков превышающих ныне известные ядерные силы. Конечно, сразу же возникает и вопрос о том, можно ли такие силы заставить работать как источник энергии. К сожалению, ответ на этот вопрос отрицательный.

Естественно, встает и другой вопрос: до каких расстояний R между кварками потенциальная энергия линейно растет с ростом R ? Ответ простой: при больших расстояниях жгут силовых линий рвется, так как энергетически более выгодно образовать разрыв с рождением кварк-антикварковой пары частиц. Это происходит, когда потенциальная энергия в месте разрыва больше массы покоя кварка и антикварка. Процесс разрыва жгута силовых линий глюонного поля показан на рис. 2, в.

Такие качественные представления о рождении кварка-антикварка позволяют понять, почему одиночные кварки вообще не наблюдаются и не могут наблюдаться в природе. Кварки навечно заключены внутри адронов. Это явление невылета кварков называется конфайнментом [5]. При высоких энергиях жгуту может быть выгоднее разорваться сразу во многих местах, образовав множество $q\bar{q}$ -пар. Таким путем мы подошли к проблеме множественного рождения кварк-антикварковых пар и образованию жестких кварковых струй.

Рассмотрим сначала строение легких адронов, то есть мезонов. Они состоят, как мы уже говорили, из одного кварка и одного антикварка.

Чрезвычайно важно, что оба партнера пары имеют при этом одинаковый цветной заряд и такой же антизаряд (например, кварк синий и антикварк антисиний), так что их пара независимо от ароматов кварков не имеет цвета (а только бесцветные частицы мы и наблюдаем).

Все кварки и антикварки имеют спин (в долях от \hbar), равный $1/2$. Поэтому суммарный спин сочетания кварка с антикварком равен либо 0, когда спины антипараллельны, либо 1, когда спины параллельны друг другу. Но спин частицы может быть и больше 1, если сами кварки вращаются по каким-либо орбитам внутри частицы.

В табл. 3 приведены некоторые парные и более сложные комбинации кварков с указанием, каким известным ранее адронам данное сочетание кварков соответствует.

Из наиболее изученных в настоящее время мезонов и мезонных резонансов наибольшую группу составляют легкие неароматные частицы, у которых квантовые числа $S = C = B = 0$. В эту группу входят около 40 частиц. Таблица 3 начинается с пионов $\pi^{\pm, 0}$, открытых английским физиком С.Ф. Пауэллом в 1949 году. Заряженные

Таблица 3. Кварковый состав некоторых адронов

Кварки	Мезоны		Кварки	Барионы	
	$J = 0$	$J = 1$		$J = 1/2$	$J = 3/2$
	частицы	резонансы		частицы	резонансы
$u\bar{d}$	π^+ (пион+)	ρ^+ (ро+)	uuu		Δ^{++} (дельта++)
$\bar{u}d$	π^- (пион-)	ρ^- (ро-)	uud	p (протон)	Δ^+ (дельта+)
$u\bar{u} - d\bar{d}$	π^0 (пион0)	ρ^0 (ро0)	udd	n (нейтрон)	Δ^0 (дельта0)
$u\bar{u} + d\bar{d}$	η (эта)	ω (омега)	ddd		Δ^- (дельта-)
$d\bar{s}$	K^0 (каон0)	K^{0*} (каон0*)	uus	Σ^+ (сигма+)	Σ^{+*} (сигма+*)
$u\bar{s}$	K^+ (каон+)	K^{+*} (каон+*)	uds	Λ^0 (лямбда0)	Σ^{0*} (сигма0*)
$\bar{u}s$	K^- (каон-)	K^{*-} (каон-*)	dds	Σ^- (сигма-)	Σ^{*-} (сигма-*)
$c\bar{d}$	D^+ (дэ+)	D^{+*} (дэ+*)	uss	Ξ^0 (кси0)	Ξ^{0*} (кси0*)
$c\bar{s}$	D_s^+ (дэ-эс+)	D_s^{+*} (дэ-эс+*)	dss	Ξ^- (кси-)	Ξ^{*-} (кси-*)
$c\bar{c}$	Чармоний	J/ψ (джей-пси)	sss	Ω^- (омега-)	
$b\bar{b}$	Боттоний	Ипсилон	udc	Λ_c^+ (лямбда-цэ+)	
$c\bar{u}$	D^0 (дэ0)	D^{0*} (дэ0*)	uuc	Σ_c^{++}	
$b\bar{u}$	B^- (бэ-)	B^{*-} (бэ*)	udb	Λ_b^- (лямбда-бэ)	

пионы живут около 10^{-8} с, распадаясь на лептоны по следующим схемам:

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \text{и} \quad \pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

Их “родственники” в табл. 3 – резонансы $\rho^{\pm,0}$ (ро-мезоны) имеют в отличие от пионов спин $J = 1$, они нестабильны и живут всего около 10^{-23} с. Причина распада $\rho^{\pm,0}$ – сильное взаимодействие.

Причина распада заряженных пионов обусловлена слабым взаимодействием, а именно тем, что составляющие частицу кварки способны испускать и поглощать в результате слабого взаимодействия на короткое время t в соответствии с соотношением (4) виртуальные калибровочные бозоны: $u \longrightarrow d + W^+$ или $d \longrightarrow u + W^-$, причем в отличие от лептонов осуществляются и переходы кварка одного поколения в кварк другого поколения, например $u \longrightarrow b + W^+$ или $u \longrightarrow s + W^+$ и т.д., хотя такие переходы существенно более редкие, чем

переходы в рамках одного поколения. Вместе с тем при всех подобных превращениях электрический заряд в реакции сохраняется.

Изучение мезонов, включающих s - и c -кварки, привело к открытию нескольких десятков странных и чармированных частиц. Их исследование проводится сейчас во многих научных центрах мира.

Изучение мезонов, включающих b - и t -кварки, интенсивно началось на ускорителях, и мы пока не будем говорить о них более подробно.

Перейдем к рассмотрению тяжелых адронов, то есть барионов. Все они составлены из трех кварков, но таких, у которых имеются все три разновидности цвета, поскольку, так же как и мезоны, все барионы бесцветны. Кварки внутри барионов могут иметь орбитальное движение. В этом случае суммарный спин частицы будет превышать суммарный спин кварков, равный $1/2$ или $3/2$ (если спины всех трех кварков параллельны друг другу).

Барионом с минимальной массой является протон p (см. табл. 3). Именно из протонов и нейтронов состоят все атомные ядра химических элементов. Число протонов в ядре определяет его суммарный электрический заряд Z .

Другой основной частицей атомных ядер является нейтрон n . Нейтрон немного тяжелее протона, он неустойчив и в свободном состоянии со временем жизни около 900 с распадается на протон, электрон и нейтрино. В табл. 3 показано кварковое состояние протона uud и нейтрона udd . Но при спине этой комбинации кварков $J = 3/2$ образуются резонансы Δ^+ и Δ^0 соответственно. Все другие барионы, состоящие из более тяжелых кварков s, b, t , имеют и существенно большую массу. Среди них особый интерес вызывал Ω^- -гиперон, состоящий из трех странных кварков. Он был открыт сначала на бумаге, то есть расчетным образом, с использованием идей кваркового строения барионов. Были предсказаны все основные свойства этой частицы, подтвержденные затем экспериментами.

Многие экспериментально наблюдаемые факты убедительно говорят сейчас о существовании кварков. В частности, речь идет и об открытии нового процесса в реакции соударения электронов и позитронов, приводящей к образованию кварк-антикварковых струй. Схема этого процесса показана на рис. 4. Эксперимент выполнен на коллайдерах в Германии и США. На рисунке показаны стрелками направления пучков e^+ и e^- , а из точки их столкновения вылет кварка q и антикварка \bar{q} под зенитным углом θ к направлению полета e^+ и e^- . Такое рождение $q + \bar{q}$ пары происходит в реакции

$$e^+ + e^- \longrightarrow \gamma_{\text{вирт}} \longrightarrow q + \bar{q}. \quad (5)$$

Как мы уже говорили, жгут силовых линий (чаще говорят струна) при достаточно большом растяжении рвется на составляющие. При большой энергии кварка и антикварка, как говорилось ранее, струна рвется во многих местах, в результате чего в обоих направлениях вдоль линии полета кварка q и антикварка \bar{q} образуются два узких пучка вторичных бесцветных частиц, как это показано на рис. 4. Такие пучки частиц названы струями. Достаточно часто на опыте наблюдается образование трех, четырех и более струй частиц одновременно.

В экспериментах, которые проводились при сверхускорительных энергиях в космических лучах, в которых принимал участие и автор этой статьи, получены как бы фотографии процесса образования многих струй. Дело в том, что жгут или струна одномерны и поэтому центры образования трех, четырех и более струй также располагаются вдоль прямой линии [6].

Теория, описывающая сильные взаимодействия, называется квантовой хромодинамикой или сокращенно КХД. Она гораздо сложнее теории электрослабых взаимодействий. Особенно успешно КХД описывает так называемые жесткие процессы, то есть процессы взаимодействия частиц с большой передачей импульса между частицами. Хотя создание теории еще не завершено, многие физики-теоретики уже сейчас заняты созданием “великого объединения” — объединения квантовой хромодинамики и теории электрослабого взаимодействия в единую теорию.

В заключение кратко остановимся на том, исчерпывают ли шесть лептонов и 18 разноцветных кварков (и их античастицы), а также кванты фундаментальных полей — фотон, W^\pm , Z^0 -бозоны, восемь глюонов и, наконец, кванты гравитационного поля — гравитоны весь арсенал истинно элементарных, точнее, фундаментальных частиц. По-видимому, нет. Скорее всего, описанные картины частиц и полей суть отражение лишь наших знаний в настоящее время. Недаром уже сейчас есть много теоретических идей, в которые вводятся большая группа еще на наблюдаемых так называемых суперсимметричных частиц, октет сверхтяжелых кварков и многое другое.

Очевидно, современная физика еще далека от построения завершенной теории частиц. Возможно, был прав великий физик Альберт Эйнштейн, полагая, что лишь учет гравитации, несмотря на ее сейчас кажущуюся малую роль в микромире, позволит построить стро-

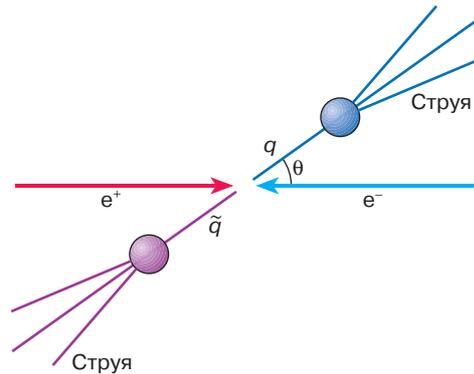


Рис. 4. Схема рождения двух кварковых струй в реакции $e^+ + e^- \rightarrow \gamma_{\text{вирт}} \rightarrow q + \bar{q}$.

гую теорию частиц. Но все это уже в XXI веке или еще позже.

ЛИТЕРАТУРА

1. Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1988.
2. Кобзарев И.Ю. Лауреаты Нобелевской премии 1979 г.: С. Вайнберг, Ш. Глэшоу, А. Салам // Природа. 1980. № 1. С. 84.
3. Зельдович Я.Б. Классификация элементарных частиц и кварки в изложении для пешеходов // Успехи физ. наук. 1965. Т. 8. С. 303.
4. Крайнов В.П. Соотношение неопределенности для энергии и времени // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 5. С. 77–82.
5. Намбу И. Почему нет свободных кварков // Успехи физ. наук. 1978. Т. 124. С. 146.
6. Жданов Г.Б., Максименко В.М., Славатинский С.А. Эксперимент “Памир” // Природа. 1984. № 11. С. 24

Рецензент статьи Л.И. Сарычева

* * *

Сергей Анатольевич Славатинский, доктор физико-математических наук, профессор, действительный член Российской академии естественных наук, зав. лабораторией Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, профессор кафедры общей физики Московского физико-технического института. Область научных интересов — физика высоких энергий и элементарных частиц, физика сверхвысоких энергий в космических лучах. Автор более 200 научных работ, в том числе задачника МФТИ по общей физике и нескольких учебных пособий.