

DISCOVERY OF THE HEAVIEST ELEMENTARY PARTICLE

B. A. ARBUZOV

This article discusses the recent discovery of heavy t -quark. The basic principles of the elementary particles physics are considered, which have led to prediction of t -quark existence and to evaluation of its mass. A parallel is drawn between the t -quark discovery and a well-known discovery of planet Neptune.

Статья посвящена недавнему открытию тяжелого t -кварка. Рассматриваются основные принципы физики элементарных частиц, которые привели к предсказанию t -кварка и определению возможного значения его массы. Проводится аналогия открытия t -кварка с известным в истории науки открытием планеты Нептун.

ОТКРЫТИЕ САМОЙ ТЯЖЕЛОЙ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЧАСТИЦЫ

Б. А. АРБУЗОВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Весной 1995 года физиков облетело известие о том, что открыт t -кварк. Разумеется, оно вызвало большой интерес, однако событие это ожидалось уже довольно давно. Это открытие попадает в ряд предсказанных, сделанных, как говорили раньше, “на кончике пера” или, как можно сказать сейчас, за дисплеем компьютера.

В прошлом столетии чрезвычайно большое впечатление произвело не только на сообщество ученых, но и на широкую публику открытие новой планеты Нептун, тоже “на кончике пера”. Некоторые нерегулярности, или, как говорят, возмущения, в движении самой удаленной от Солнца, как тогда считали, планеты Уран не удавалось объяснить влиянием других планет, в первую очередь Сатурна и Юпитера. Тогда было высказано предположение, что существует еще одна планета, которая и вызывает возмущения в движении Урана. По небольшим отклонениям наблюдений от расчетов были вычислены параметры движения этой планеты — масса, расстояние от Солнца, форма орбиты и положение планеты на орбите. Астрономам оставалось только направить свои телескопы в нужное время на нужный участок неба — и они увидели новую планету. Это был триумф науки. В рациональном XIX веке это событие вызвало самый широкий интерес.

Открытие Нептуна было только самым ярким примером предсказательной силы науки. Вслед за этим открытием последовали многие другие, которые, правда, не вызывали повышенного интереса публики, за исключением, может быть, открытого в 1919 году отклонения луча света солнечным тяготением, предсказанного общей теорией относительности А. Эйнштейна.

Однако вернемся в наше время. Чем же интересен t -кварк и почему его открытие вызвало такой большой интерес? В чем аналогия с открытием планеты Нептун? Для того чтобы объяснить это, начнем с общей картины элементарных частиц, с того, что было известно к 1995 году.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Как известно, окружающее нас вещество и мы сами построены из атомов, состоящих из электронов и ядер, а последние, в свою очередь, состоят из протонов и нейтронов. Протоны и нейтроны принадлежат

к классу участвующих в сильном взаимодействии частиц, называемых адронами. Не участвующий в сильном взаимодействии электрон входит в группу лептонов¹.

Как и ядра атомов, адроны, в свою очередь, являются составными частицами. Их составляющие получили название “кварки”; они обладают своеобразными свойствами. Самое необычное свойство состоит в том, что кварки существуют только внутри адронов и не наблюдаются как изолированные объекты. В составе протона и нейтрона присутствуют два сорта кварков: u и d ; u -кварк имеет электрический заряд $2/3e$ и d -кварк соответственно $-1/3e$, где e — элементарный заряд, например заряд протона. Нейтрон n состоит из трех кварков (u, d, d), а протон p также из трех кварков, но в другой комбинации (см. рис. 1). Другие адроны также состоят из кварков, например, отрицательно заряженный π -мезон — ($d\bar{u}$), где черта над символом означает антикварк, имеющий противоположные своему кварку заряды, например, электрический заряд антикварка \bar{u} есть $-2/3e$. Кварки сильно взаимодействуют между собой, это взаимодействие и удерживает их внутри соответствующей частицы. Природа этого взаимодействия была выяснена более 20 лет тому назад. Причиной сильного взаимодействия является то, что кроме электрического заряда кварки имеют еще и новый, крайне своеобразный заряд, получивший название цветного, который приводит к появлению сил, связывающих кварки в адроны. Лептоны, в частности электрон и его античастица — позитрон, таким зарядом не обладают (они нейтральны или, как говорят, бесцветны) и поэтому сильно не взаимодействуют. В адроне, например в протоне или нейтроне, цветные заряды составляющих их кварков скомпенсированы и наблюдаемые частицы также являются бесцветными. В бесцветности всех наблюдаемых частиц и состоит поразительное свойство сильных взаимодействий цветных кварков.

Мы знаем, что атомы обычно электрически нейтральны, но, например, в сильно нагретом газе происходит ионизация, то есть один или несколько электронов отрываются от атома и вещество (плазма) теперь состоит из заряженных частиц (ионов и электронов). Оказывается, что аналогичный процесс для кварковых атомов — адронов — невозможен. В адроне, например в протоне, цветные заряды трех кварков скомпенсированы. Из этого следует, что три кварка должны обязательно иметь различные заряды, то есть существуют три разных заряда, три различных цвета. Оказывается, что большего разнообразия и не нужно. Таким образом, имеется три сорта (цвета) каждого кварка u и каждого кварка d . Нумеруя их индексом $i = 1, 2, 3$, получаем точное описание компенсации цвета: в протоне должны быть кварки всех трех цветов $p = u^1 u^2 d^3 + \dots$, где мно-

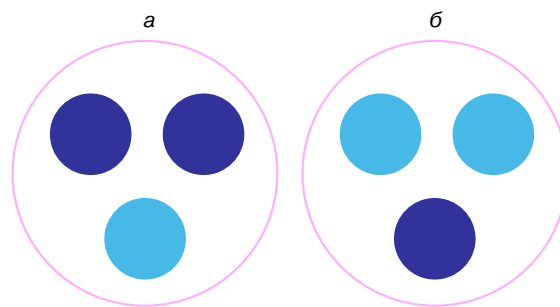


Рис. 1. Кварковый состав протона (а) и нейтрона (б). Темный кружок соответствует кварку u , светлый кружок — кварку d .

готочие обозначает различные перестановки кварков. Далее, точно так же, как с электрическим зарядом связано знакомое нам электромагнитное поле, с этими цветными зарядами связано поле, получившее название глюонного. Это глюонное поле связывает кварки внутри адронов и вообще осуществляет взаимодействие между ними.

Свойство бесцветности наблюдаемых частиц и, наоборот, ненаблюдаемости цветных частиц, например самих кварков, объясняется тем, что если цветной заряд оказывается нескомпенсированным, глюонное поле становится настолько сильным, что обязательно найдет где-то недостающую для компенсации частицу, притянет ее и вернет систему в бесцветное адронное состояние. Таким образом, разделение адрона на его цветные составляющие произойти не может. Нет аналога ионизации атома. Это общее свойство сильного взаимодействия получило многочисленные экспериментальные подтверждения.

Однако мир элементарных частиц не исчерпывается электроном, позитроном, цветными u - и d -кварками и их антикварками, а также электромагнитными и глюонными полями и квантами. Существует большое количество других частиц, которые требуют для своего описания расширения числа элементарных составляющих — кварков и лептонов.

О лептонах. Лептоны, оказывается, объединяются в пары. Заряженному электрону соответствует нейтральная частица нейтрино электронное ν_e , а позитрону — антинейтрино электронное $\bar{\nu}_e$. Таких пар к настоящему времени открыто три: в дополнение к электронной еще мюон μ (который тяжелее электрона в 207 раз) со своим нейтрино ν_μ и тау-лептон τ (в 3478 раз тяжелее электрона) и его нейтрино ν_τ .

Кварки тоже группируются в пары. С одной парой мы уже знакомы: u (заряд $2/3e$) и d (заряд $-1/3e$). Следующая пара кварков: c ($2/3e$) и s ($-1/3e$). Наконец, существует тяжелый кварк b ($-1/3e$), возможный партнер которого с зарядом $2/3e$ был предсказан и назван t -кварком. Почему он был предсказан? Совсем на поверхности лежит проявляющаяся

¹ Проблемам классификации частиц и их основным свойствам посвящено много книг, например [1].

симметрия между лептонами и кварками: три пары лептонов — три пары кварков:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Это на поверхности, но под этой, казалось бы, поверхностной симметрией лежат глубокие основания. Оказывается, что если каждой паре лептонов нет соответствующей пары цветных кварков именно с таким распределением зарядов, как мы привели выше, то теория, описывающая взаимодействия кварков и лептонов, так называемые электрослабые, становится противоречивой. Таким образом, существование t -кварка необходимо с общей теоретической точки зрения. Но как его искать, какова его возможная масса? Это фактически аналог вопроса, куда направить телескоп, чтобы увидеть Нептун. Вопрос требует более тщательного рассмотрения. Чтобы перейти к этому, надо пояснить, что же такое электрослабое взаимодействие и как оно устроено.

ЭЛЕКТРОСЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Электрослабое взаимодействие объединяет электромагнитное и слабое взаимодействия в рамках единого описания. Электромагнитные взаимодействия соответствуют широкому кругу явлений, связанному с электромагнитным полем. Это и закон Кулона, и магнитные явления, и электромагнитные волны (фотоны). На протяжении последних десятилетий выяснилось, что слабые взаимодействия, приводящие к распадам многих частиц, в сильной степени подобны электромагнитным, но приводят к силам, которые в отличие от дальнодействующих кулоновых являются короткодействующими. Короткодействие означает, что частицы, соответствующие полям, осуществляющим перенос взаимодействий, имеют массу не нулевую, как фотоны, а определенную, причем довольно большую. Тогда вместо закона Кулона для потенциала, например, между двумя лептонами, мы имеем закон Юкавы:

$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-\mu r}, \quad \mu = \frac{Mc}{\hbar}; \quad (2)$$

здесь M — масса частицы и g — соответствующий полю заряд, который несет на себе лептон, c — скорость света и $\hbar = 1,054513 \text{ Дж} \cdot \text{с}$ — постоянная Планка. Всего таких массивных частиц имеется три: две электрически заряженные W^+ и W^- и нейтральная Z . Объединенную теорию, описывающую взаимодействия W^+ , W^- , Z и фотона γ между собой и с кварками и лептонами, предложили в 1967 году С. Вайнберг (США) и А. Салам (Пакистан); см., например,

[2]. Основные черты теории, которые понадобятся нам в дальнейшем изложении, состоят в следующем. Частицы W^+ , W^- , Z , называемые промежуточными бозонами, имеют массы, значения которых определяются экспериментально наблюдаемыми величинами: временем жизни мюона (напомним, что слабое взаимодействие как раз и приводит к распадам частиц), элементарным электрическим зарядом e и интенсивностью взаимодействия нейтрино с веществом. К середине семидесятых годов уточнение опытов по измерению последней величины привело к предсказанию масс для заряженных частиц W^+ и W^- и для нейтральной Z :

$$M_W \approx 80 \text{ ГэВ}/c^2, \quad M_Z \approx 90 \text{ ГэВ}/c^2. \quad (3)$$

Поясним смысл единицы массы, которая здесь использована: $\text{ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$, а электронвольт (эВ) есть известная (внесистемная) единица энергии, равная энергии, приобретаемой одним электроном при прохождении разности потенциалов 1 В. Пользуясь знаменитым соотношением $E = Mc^2$, мы связываем единицу энергии с массой.

Далее, взаимодействие устроено так, что нейтральный промежуточный бозон Z может переходить в пары кварк–антикварк и лептон–антилептон, а эти пары в свою очередь могут объединяться в Z . Идут, например, такие процессы:

$$\begin{aligned} Z &\longrightarrow e^+ e^-, & Z &\longrightarrow \nu_e \bar{\nu}_e, & Z &\longrightarrow \mu^+ \mu^-, \dots \\ Z &\longrightarrow u \bar{u}, & Z &\longrightarrow d \bar{d}, & Z &\longrightarrow s \bar{s}, \dots \\ e^+ e^- &\longrightarrow Z, & \nu_e \bar{\nu}_e &\longrightarrow Z, & \mu^+ \mu^- &\longrightarrow Z, \dots \\ u \bar{u} &\longrightarrow Z, & d \bar{d} &\longrightarrow Z, & s \bar{s} &\longrightarrow Z, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

где многоточием мы обозначили пары других лептонов и кварков, которые приведены в формулах (1).

Заряженные промежуточные бозоны W^\pm таким же образом взаимодействуют в обе стороны с парами кварк–антикварк и лептон–антилептон, имеющими суммарный заряд $\pm e$:

$$\begin{aligned} W^+ &\longleftrightarrow e^+ \nu_e, & W^+ &\longleftrightarrow \mu^+ \nu_\mu, & W^+ &\longleftrightarrow \tau^+ \nu_\tau, \\ W^+ &\longleftrightarrow u \bar{d}, & W^+ &\longleftrightarrow c \bar{s}, & W^+ &\longleftrightarrow b \bar{t}, \\ W^- &\longleftrightarrow e^- \bar{\nu}_e, & W^- &\longleftrightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu, & W^- &\longleftrightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau, \\ W^- &\longleftrightarrow \bar{u} d, & W^- &\longleftrightarrow \bar{c} s, & W^- &\longleftrightarrow \bar{b} t. \end{aligned} \quad (5)$$

На самом деле, зная набор элементарных частиц (1), можно получить переходы (4) и (5), поскольку нам надо только знать, что в переходах участвуют частицы, принадлежащие некоторой одной паре, при этом нужно следить, чтобы сохранялся электрический заряд. С небольшой интенсивностью возможны переходы между кварками из разных пар, но мы не будем обсуждать здесь этот малый эффект.

Теория была создана, она хорошо описала известные факты, но промежуточные бозоны W^\pm и Z^0 пока не были экспериментально зарегистрированы.

Для того чтобы породить частицы с такими большими массами (предсказанная масса W^\pm , например, в 85,5 раз больше массы протона), нужно столкнуть протоны с очень высокой энергией. Таких энергий не было в распоряжении физиков во время создания электрослабой теории.

Если, например, мы устроим столкновение протонного и антипротонного пучков, в каждом из которых энергия частицы равна E , то суммарная энергия столкновения будет $2E$. При условии $2E > Mc^2$ частица с массой M может быть рождена в этом столкновении. Как говорят, в этом случае энергии хватает на реализацию изучаемого явления. Рассмотрим процесс

$$p + \bar{p} \longrightarrow W^+ + X, \quad (6)$$

где под X понимается набор всевозможных состояний, например, $\bar{p}n, r\bar{p}\pi^-, \dots$ Как в реакции (6) может появиться W ? Процесс проиллюстрирован на рисунке 2. При этом кварк u из протона и антикварк \bar{d} из антипротона сливаются в W^+ согласно одному из элементарных процессов набора (5). Аналогичным образом пары $u\bar{u}$ или $d\bar{d}$ могут дать при слиянии нейтральный промежуточный бозон Z^0 . Но как увидеть рождение W или Z ? Ведь эти частицы за счет переходов (4) и (5) быстро распадаются. Среди каналов распада W , согласно (5), есть, например, такие:

$$W^+ \longrightarrow e^+ \nu_e, \quad W^+ \longrightarrow \mu^+ \nu_\mu. \quad (7)$$

Позитрон или положительно заряженный мюон с высокой эффективностью может быть зарегистрирован экспериментальной аппаратурой, и это будет служить меткой рождения W . Нейтрино при этом улетают, не оставляя следа, и уносят значительную долю энергии.

Что касается Z^0 , то здесь положение еще лучше. Ведь согласно (4) идут распады

$$Z \longrightarrow e^+ e^-, \quad Z \longrightarrow \mu^+ \mu^-. \quad (8)$$

Таким образом, нужно зарегистрировать пары положительно и отрицательно заряженных лептонов, образующихся в распадах (8).

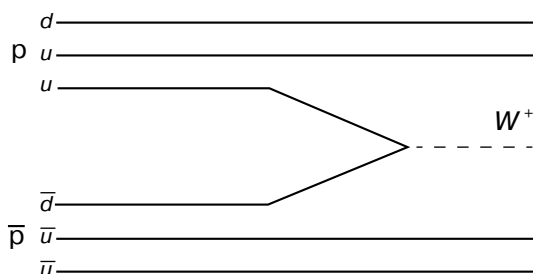


Рис. 2. Схематическое изображение процесса рождения промежуточного бозона W в протон-антипротонном столкновении. Кварки u и \bar{d} сливаются в W^+ .

Итак, для обнаружения тяжелых промежуточных бозонов W^\pm и Z^0 нужно было иметь встречные пучки протонов и антипротонов с достаточно высокими энергиями и аппаратуру для надежной регистрации высокоэнергичных электронов и мюонов. Такая задача была поставлена в середине 70-х годов и реализована к 1983 году в Европейском центре ядерных исследований (русское название ЦЕРН от французского CERN) в Женеве большим коллективом физиков, лидером которого был К. Руббиа (Италия). Пучки протонов и антипротонов с энергиями 270 ГэВ каждый позволили зарегистрировать первые несколько десятков случаев рождения W и Z и их распада по каналам (7) и (8). Массы их оказались в согласии с предсказаниями (2). Это было замечательное открытие, которое, по существу, доказало правильность представлений о природе элементарных взаимодействий. Промежуточные бозоны W и Z стали самыми тяжелыми из известных частиц, например, масса Z в 97 раз больше массы протона.

ТОЧНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

После открытия тяжелых промежуточных бозонов пошла работа по планомерному изучению новых явлений. Точность экспериментов улучшилась. На качественно новый уровень вышли исследования, когда были введены в строй встречные пучки электронов и позитронов в ЦЕРН с энергиями, достаточными для резонансного рождения Z^0 . А именно, энергии каждого пучка 45,51 ГэВ, складываясь, дают точно Mc^2 для Z^0 -частицы. А это значит, что электроны и позитроны из этих пучков с очень большой вероятностью сливаются в Z^0 -частицу, которая затем распадается по одному из возможных каналов. Изучая каналы распада Z^0 , мы убеждаемся в том, что переходы (4) действительно осуществляются с предсказанной интенсивностью.

Дальнейшее повышение точности позволило решить еще более сложные задачи. Дело в том, что, когда мы начинаем вычислять эффекты с высокой точностью, отдельные каналы переходов в (4) начинают влиять друг на друга. Например, промежуточный Z -бозон может перейти, как говорят, в виртуальную пару $t\bar{t}$, которая в свою очередь (практически мгновенно) может опять слиться в Z , который распадется на некоторое наблюдаемое состояние. Метод учета таких «петлевых» поправок называется теорией возмущений. Кстати, этот термин пришел из астрономии, где он означает метод точного вычисления орбит планет с учетом влияния притяжения не только Солнца, но и других планет. Действительно, основные движения планеты, например Урана, определяются по закону всемирного тяготения Ньютона притяжением Солнца и соответствуют законам Кеплера. Однако другие планеты также притягивают Уран и тем самым изменяют, «возмущают» его движение по орбите. Последовательный

учет такого влияния и получил название теории возмущений. Именно с помощью теории возмущений и были проведены расчеты, предсказавшие место, где надо искать новую планету Нептун и приблизительное значение ее массы.

Прослеживается яркая аналогия с влиянием нового, неоткрытого t -кварка на наблюдаемые процессы, в частности в распадах промежуточного бозона Z . Теория возмущений здесь также учитывает, как существование t -кварка влияет на вероятности измеряемых процессов и на их характеристики. Количественно это влияние зависит от величины массы t -кварка и от интенсивности его взаимодействия. Интенсивность предсказывается теорией (как сила тяжести), а масса определяется из соответствия вычисленных малых возмущений с измеренными эффектами (точно так же, как и в случае движения планет).

На протяжении нескольких последних лет были проведены очень точные экспериментальные исследования распадов промежуточного бозона Z^0 . Полученная точность позволила измерить малые возмущения за счет петлевых поправок. Среди них важное значение имеют поправки, пропорциональные квадрату массы t -кварка M_t^2 . Сравнение вычислений с опытом позволило определить интервал возможных значений массы t -кварка:

$$M_t = (169^{+23}_{-27}) \text{ ГэВ}/c^2. \quad (9)$$

Таким образом, предсказаны условия, которые необходимо выполнить для открытия t -кварка. Так же как и планета Нептун, t -кварк оказался “на кончике пера”.

ОТКРЫТИЕ t -КВАРКА, ОТВЕТЫ И НОВЫЕ ВОПРОСЫ

До того как было получено вполне определенное предсказание (9), поиски t -кварка велись, как говорят, широким фронтом и были получены прямые экспериментальные ограничения на его массу, например, $M_t > 62 \text{ ГэВ}/c^2$ (из вероятностей распада промежуточного бозона W). Интервал (9) указывает на то, что не следует искать распад $W^+ \rightarrow t\bar{b}$, поскольку W оказывается легче t -кварка и, разумеется, не может по этому каналу распадаться. Значит, надо, во-первых, искать процесс парного рождения t -кварка и его антикварка при максимальной доступной энергии. Для протон-антипротонных соударений этот процесс схематически представлен на рисунке 3. Во-вторых, большая масса (9) определяет доминирующий канал распада t -кварка:

$$t \rightarrow W^+ b, \quad \bar{t} \rightarrow W^- \bar{b}. \quad (10)$$

Таким образом, для поиска t -кварка следует зарегистрировать характерные для W распады (7) и сопровождающий их b -кварк. Отличительной чертой частиц, содержащих b -кварк, является время

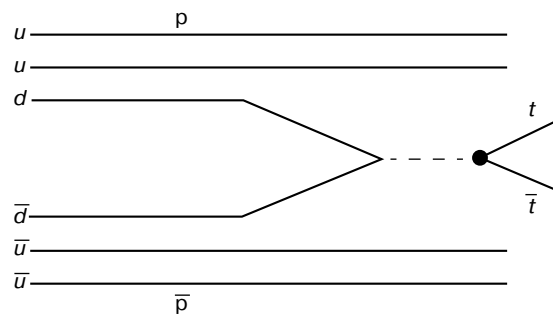


Рис. 3. Схематическое изображение процесса рождения пары кварков $t\bar{t}$. Штриховая линия соответствует обмену глюоном.

жизни, равное примерно $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ с}$. Нетрудно оценить длину пробега таких частиц до распада:

$$l \approx 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ с} \approx 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}. \quad (11)$$

Измерение таких расстояний в вершинных детекторах экспериментальных установок вполне возможно. Итак, после получения предсказания (9) поиски t -кварка сосредоточились на ускорительной установке с максимальной в настоящее время энергией 1800 ГэВ, расположенной в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США). Результатом этих поисков и явилось открытие t -кварка двумя большими группами физиков: CDF и D0 (порусски читается дэ-ноль). Каждая из этих групп объединяет более 400 физиков из нескольких десятков университетов и лабораторий, в основном американских. Однако существенный вклад в работу внесли также физики из других стран. В частности, в создании установки D0 и в экспериментальных исследованиях на ней значительная доля труда российских физиков из Института физики высоких энергий (Протвино) и из Московского университета.

Основная трудность поисков t -кварков заключалась в выделении искомого редкого процесса из огромного фона обычных процессов множественного рождения легких частиц. В результате напряженной работы, занявшей несколько лет, и были найдены первые твердо установленные события рождения и распада t - и \bar{t} -кварков. Число событий в каждом эксперименте не превышает двух десятков, однако сам эффект существования нового кварка является доказанным.

Достигнутая точность определения массы еще не очень высока и составляет

$$M_t = (176 \pm 13) \text{ ГэВ}/c^2 \quad (\text{CDF}); \quad (12)$$

$$M_t = (199 \pm 30) \text{ ГэВ}/c^2 \quad (\text{D0}).$$

Сравнивая эти результаты с предсказанием (9), мы убеждаемся в хорошем согласии, особенно с более точным результатом группы CDF.

Таким образом, открытие самой тяжелой из известных нам частиц состоялось в точном соответствии

с предсказанием ее массы. Это еще раз показывает, что мы правильно понимаем основные закономерности физики элементарных частиц, физики микромира.

Однако, как всегда бывает, новое открытие, новое достижение порождает и новые вопросы. Оказалось, что наблюдавшаяся вероятность рождения пары $t\bar{t}$ в процессе, представленном на рис. 3, несколько больше, чем расчетная. Точность измерения этой вероятности, или сечения рождения t -кварков в протон-антипротонных столкновениях в этих первых экспериментах еще не высока и поэтому факт расхождения опыта с теорией не является окончательно установленным. Превышение экспериментально измеренной величины над теоретической проявляется в обоих экспериментах и уже вызывает серьезные вопросы о причинах этого явления. Возможно, здесь проявляются новые, неизвестные пока свойства t -кварка, отличающие его от легких кварков.

И еще в одном явлении наблюдается расхождение теории с экспериментом, связанное, возможно, с необычными свойствами t -кварков. Речь идет о распаде промежуточного бозона $Z \rightarrow b\bar{b}$, одном из каналов (4). Как видно из (1), b -кварк входит в одну пару с t -кварком, поэтому взаимное влияние их друг на друга является максимально возможным. Разумеется, самым максимальным образом необычность t -кварка проявилась бы в распаде $Z \rightarrow t\bar{t}$, если бы он осуществлялся. Но удвоенная масса t -кварка намного превышает массу Z , и такой распад невозможен. Поэтому мы можем рассчитывать на проявления свойств t -кварка на другие процессы за счет поправок теории возмущений.

Итак, о распаде $Z \rightarrow b\bar{b}$. Отношение вероятности этого распада к суммарной вероятности распада Z по всем адронным каналам обозначается R_b и является величиной, которую, с одной стороны, можно с высокой точностью рассчитать теоретически, а, с другой стороны, с высокой точностью измерить экспериментально. Последнее обстоятельство наиболее важно и связано с тем, что регистрация пробегов b -частиц (11) в вершинных детекторах установок позволяет надежно отделять изучаемые события от фоновых, добиваясь существенного уменьшения экспериментальных погрешностей в измерении интенсивности этого процесса:

$$R_b(\text{эксп}) = 0,2219 \pm 0,0016 \quad (13)$$

при $R_b(\text{расч.}) = 0,2157$. Отличие экспериментального значения от теоретического намного превосходит возможные ошибки эксперимента (на языке математической статистики оно составляет почти четыре стандартных отклонения). Этот результат вызывает обоснованную обеспокоенность физиков.

Получается, что практически одновременно с открытием t -кварка обнаружены явления, возможно, свидетельствующие о новых, необычных его свойствах. Изучается вариант теории, в котором t -кварк, в

отличие от более легких кварков, имеет дополнительное взаимодействие с электромагнитным полем, которое связано с происхождением его большой массы, приводящее, с одной стороны, к дополнительному рождению t -кварков в процессе, соответствующем рис. 3, а, с другой стороны, увеличивающее значение R_b . Расчеты показывают, что уточнение теории учетом дополнительного взаимодействия ведет к сближению ее результатов с экспериментальными данными.

Предлагаются, естественно, и другие объяснения эффектов, которые мы только что обсудили. По-видимому, в ближайшие годы совокупные усилия физиков позволят найти правильное объяснение этим явлениям. Так или иначе, обстоятельства открытия t -кварка и одновременного возникновения новых проблем, которые, в свою очередь, разрешаются в результате дальнейших научных исследований, являются яркой иллюстрацией того, как живет и развивается наука.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье описано недавнее яркое открытие в физике элементарных частиц. Однако научная деятельность никоим образом не состоит из одних открытий. Развитие науки происходит за счет повседневной, кропотливой работы, которая, на первый взгляд, не имеет ничего общего с романтикой открытий. Одни стараются с максимальной точностью вычислить какой-нибудь эффект, другие — точнее его измерить. Чаще всего эти два метода дают согласующиеся результаты. Однако тем больший интерес вызывают небольшие, но твердо установленные отклонения вычислений от опыта. Так было в случае с возмущениями движения планеты Уран, что привело в 1846 году к открытию новой планеты Нептун. Так было с малыми поправками к распадам промежуточного бозона Z , изучение которых привело к предсказанию массы t -кварка, блестяще подтвердившемуся в 1995 году. Возможно, что-то подобное произойдет и с малыми отклонениями в распаде $Z \rightarrow b\bar{b}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Намбу Е. Кварки. М.: Мир, 1984.
2. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1982.

* * *

Борис Андреевич Арбузов, доктор физико-математических наук, профессор Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, главный научный сотрудник Института физики высоких энергий (Протвино Московской области). Специалист по теоретической физике элементарных частиц. Основные области научных исследований: квантовая теория поля, взаимодействия частиц и ядер при высоких энергиях. Автор более 120 научных работ и двух учебных пособий.