

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12

ИПСИЛОН-ЧАСТИЦА*)

Л. Ледерман

Неожиданное открытие этой самой массивной из всех известных сейчас частиц побудило физиков принять гипотезу о существовании нового, более тяжелого кварка, и считать, что в природе должно существовать по меньшей мере пять таких ненаблюдаемых субэлементарных частиц.

Вот уже около 2400 лет, начиная с досократовых натурфилософов-атомистов, люди стремятся найти мельчайшие неделимые частицы, из которых состоит материя. В течение нескольких последних десятилетий число известных нам субатомных частиц перевалило за сотню. Это явилось результатом создания новых мощных ускорителей, позволивших сталкивать частицы материи со все возрастающей энергией и изучать свойства частиц, рождающихся в ходе таких реакций. Сначала физики полагали, что эти частицы уже нельзя разбить на еще более мелкие составляющие. Однако с течением времени они убедились, что только четыре лептона — электрон, мюон и нейтрино двух сортов — ведут себя как истинно элементарные частицы: во всех известных сейчас процессах они выступают как точечные и не включающие в себя каких-либо конститuentов (составляющих). Что же касается остальных частиц — адронов, к которым относятся, в частности, протоны, нейтроны и пионы, то все они оказались сложными объектами, проявляющими явные признаки внутренней структуры. Для описания этой структуры в 1964 г. была выдвинута гипотеза о существовании кварков, которая с тех пор стала краеугольным камнем всей физики элементарных частиц. Она гласила, что все адроны представляют собой соединения, образованные всего тремя элементарными компонентами, которые были названы кварками. Вскоре, однако, как теоретические соображения, так и экспериментальные результаты привели к необходимости постулировать существование еще одного, четвертого кварка. И хотя, несмотря на многочисленные попытки, до сих пор еще не удалось наблюдать ни один из упомянутых кварков по отдельности, есть весьма весомые основания считать, что они существуют.

В прошлом году группой исследователей (в числе которых был и я) из Колумбийского и Нью-Йоркского университетов и из Национальной лаборатории им. Ферми (FNAL) была открыта новая частица, масса которой, будучи выражена в энергетических единицах, равна 9,4 ГэВ, что более,

*) L e d e r m a n L. M. The Upsilon Particle. — Scientific American, October 1978, v. 239, No. 4, pp. 60—68. — Перевод И. И. Ройзена.

Леон М. Ледерман — профессор физики Колумбийского университета и директор Колумбийского ускорителя (Nevis), США.

чем в три раза превышает массу самых тяжелых известных ранее субатомных объектов. Эта частица, названная ипсилон (Υ), указывает на существование пятого кварка, более массивного, чем все остальные. В то время как предыдущие четыре кварка были необходимы для описания всего многообразия известных свойств адронов, пятая субэлементарная частица казалась излишней. Ее открытие в одно и то же время благословляет, но также и подтачивает кварковую гипотезу в целом. С одной стороны, оно должно помочь физикам понять природу пока что загадочных сил, посредством которых взаимодействуют кварки, а с другой — сам факт «размножения» кварков грозит опрокинуть основное положение этой гипотезы, согласно которому кварки претендуют на роль самых фундаментальных составляющих всей материи. Таким образом, будучи вначале предложены для систематизации и описания свойств все возрастающего числа адронов, кварки сами стали «размножаться», и не видно теоретических оснований, почему бы их масса должна была быть ограниченной сверху каким-то пределом.

Исследования, которые в конечном счете привели к открытию ипсилон-частицы, были начаты в 1967 г. в Брукхейвенской Национальной лаборатории. Ускорив протоны (p) до энергии 30 ГэВ на брукхейвенском синхротроне, мы направляли их на свинцовую мишень, состоящую из нейтронов и протонов, которые совместно обычно называют нуклонами (N). Нашей целью было изучить такие события, когда в результате этого столкновения образуются два противоположно заряженных лептона (l^- и l^+). Соответствующую реакцию обычно записывают формулой

$$p + N \rightarrow l^- + l^+ + \text{все остальное},$$

где слова «все остальное» означают, что сюда включены все реакции, в которых рождаются два указанных лептона, безотносительно к тому, какие еще частицы им сопутствуют. Но прежде, чем перейти к описанию наших экспериментов, я хотел бы сначала познакомить читателя с некоторыми основными сведениями о лептонах, чтобы он мог лучше понять, почему мы в течение 10 лет так интенсивно проводили в жизнь нашу программу.

Лептоны отличаются от всех остальных субатомных частиц тем, что они не принимают участия в сильных взаимодействиях, которыми обусловлено, в частности, объединение протонов и нейтронов в атомные ядра. Поэтому лептоны высокой энергии обладают высокой проникающей способностью, т. е. они могут сравнительно легко проходить сквозь толщу вещества. К примеру, электронейтральная частица нейтрино способна пройти сквозь миллионы миль свинца, не испытав никакого взаимодействия. Мюон (μ), который отличается от электрона (e) только тем, что его масса в 200 раз больше, проходя через вещество, замедляется значительно сильнее из-за взаимодействия его электрического заряда с заряженными частицами вещества. Тем не менее, поскольку электромагнитные силы в 100 раз слабее ядерных, мюоны могут все же пройти сквозь многометровую толщу железа. Что касается электронов, то, будучи много легче мюонов, они тормозятся значительно быстрее и, в отличие от более тяжелых лептонов, практически не могут пробиться через железо.

□

Квантовые состояния лептонных пар ($l^- + l^+$), рождавшихся в упомянутых выше реакциях на брукхейвенском ускорителе, были теми же самыми, что и у квантов электромагнитного поля — фотонов (γ). Это вполне естественно в силу той легкости, с которой (виртуальный) фотон может превратиться в пару мюонов ($\mu^- + \mu^+$) или электронно-позитронную пару ($e^- + e^+$), что иллюстрируется реакциями $\gamma \rightarrow \mu^- + \mu^+$ и $\gamma \rightarrow e^- + e^+$.

Основное различие между фотонами и соответствующими лептонными парами состоит в массе. Последние, будучи рассмотрены как одна «частица», импульс которой равен сумме импульсов двух ее составляющих, обязательно обладают положительной массой покоя, в то время как масса покоя фотона всегда равна нулю. Это расхождение в свойствах можно затупшевать, если трактовать лептонную пару как две вторичные частицы, возникшие от распада фотоподобного объекта, называемого обычно виртуальным фотоном (рис. 1). Представление о виртуальном фотоне используется также и при описании других реакций, в которых изучаются электромагнитные

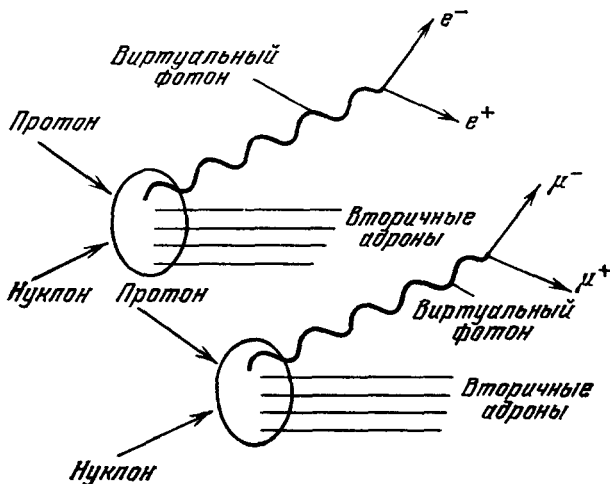


Рис. 1. При столкновении протонов с нуклонами (протонами или электронами) иногда рождаются виртуальные фотоны, которые сразу же распадаются на электронно-позитронные пары или на пары противоположно заряженных мюонов.

Последняя реакция требует значительно большей энергии, чем первая, так как мюон в 200 раз массивнее электрона. Однако в силу своей массивности мюоны значительно лучше проходят сквозь вещество. В то же время сопутствующие им адроны поглощаются очень быстро.

свойства материи. Законы сохранения энергии и импульса позволяют стандартными методами рассчитать массу, энергию и импульс этой виртуальной частицы, не обращая внимания на ее мимолетную сущность. Чтобы определить ее массу (M), достаточно измерить энергии вторичных лептонов l^- и l^+ и воспользоваться формулой $M^2 = 4E^-E^+ \sin^2 \vartheta$, из которой видно, что они возникли от распада массивного объекта, если только произведение их энергий (E^-E^+) и угол их разлета ϑ достаточно велики.

Примерно в 1967 г. мы начали смутно и скорее интуитивно догадываться, что испускание виртуального фотона может пролить свет на еще не изученные области внутри провазимодействовавших ядерных частиц. Мы исходили из того, что при столкновении очень энергичного протона с нуклоном-мишенью образуется сложное сильно возбужденное состояние, которое затем распадается, расходуя свою энергию возбуждения в основном на образование таких сильно взаимодействующих частиц как пионы и каоны. Однако иногда может случиться и так, что часть этой энергии высветится в виде излучения виртуальных фотонов, которые немедленно распадутся на лептонные пары.

Ожидалось, что спектр масс виртуальных фотонов, вычисленный на основе измерения импульсов частиц в соответствующих лептонных парах, должен быть плавным (рис. 2, а). Мы знали также, что родить виртуальный фотон тем труднее, чем больше его масса, и поэтому думали, что сечение

образования таких фотонов должно быстро падать по мере увеличения их массы. Однако хотя мы и не ожидали, что вычисленные по данным эксперимента массы виртуальных фотонов будут с повышенной вероятностью группироваться вблизи какого-то определенного значения, была надежда,

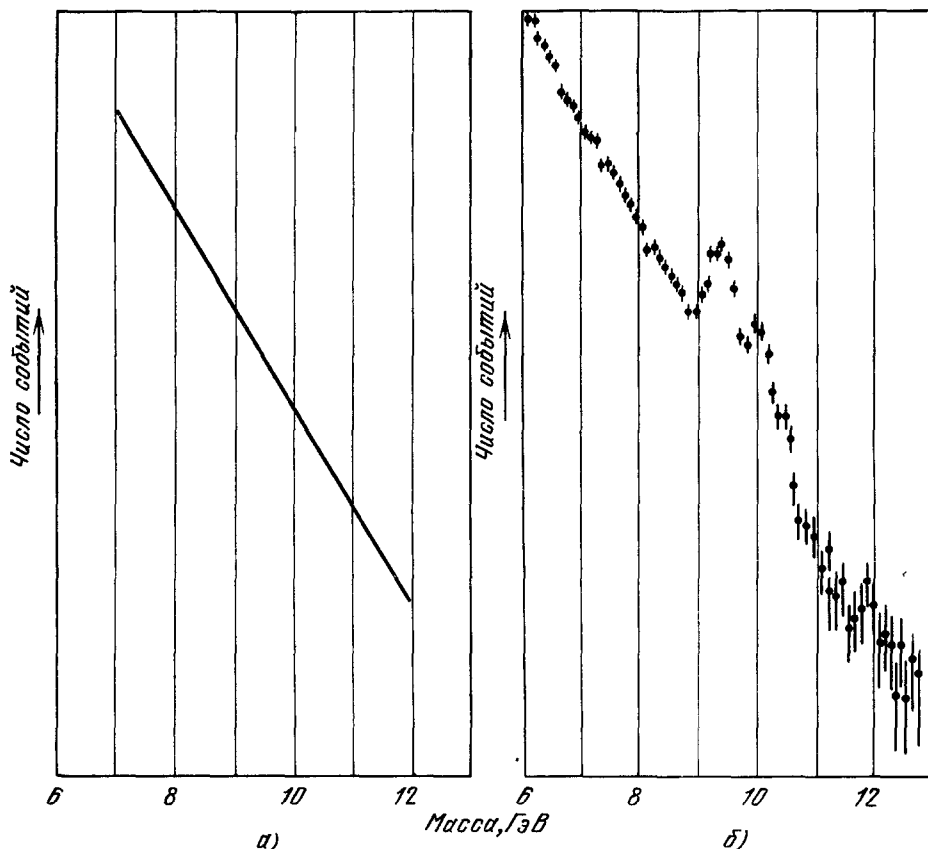


Рис. 2. Ожидалось, что распределение масс виртуальных фотонов, распадающихся на мюонные пары, должно быть монотонным (а); таковым оно и оказалось, пока масса не достигла величины около 9,4 ГэВ, вблизи которой был обнаружен неожиданный пик (б); он сигнализировал о присутствии резонанса, который был назван «ипсilon». Вертикальными отрезками указаны возможные ошибки в положении экспериментальных точек. Они тем больше, чем меньше число событий.

что такое все же может случиться. Этот эффект, — если он имеет место, — называется резонансом и свидетельствует о том, что лептонные пары, зарегистрированные в этой области масс, образовались не из какого-то виртуального состояния, а из реальной частицы (см. рис. 2, б). Принцип неопределенности В. Гейзенберга позволяет в этом случае оценить размер той области внутри столкнувшихся нуклонов, которая послужила источником упомянутой частицы. Согласно этому принципу, чем больше масса этой частицы, тем меньше область, в которой она зародилась. Последнее означает, что, изучая достаточно массивные резонансы, мы фактически прощупываем чрезвычайно мелкомасштабную структуру вещества внутри нуклонов.

□

В 1967 г., вопреки широко распространенному тогда мнению, что сильно возбужденная материя является однородной и бесструктурной, мы предприняли наши первые попытки поискать, нет ли внутри столкнувшихся нуклонов областей, способных послужить источником лептонных пар с большой массой. Помимо прочего, трудность состояла еще и в том, что наша аппаратура могла оказаться недостаточно чувствительной для регистрации таких малых массивных особенностей, если даже они и встречаются. В то время уже было экспериментально установлено, что подобные

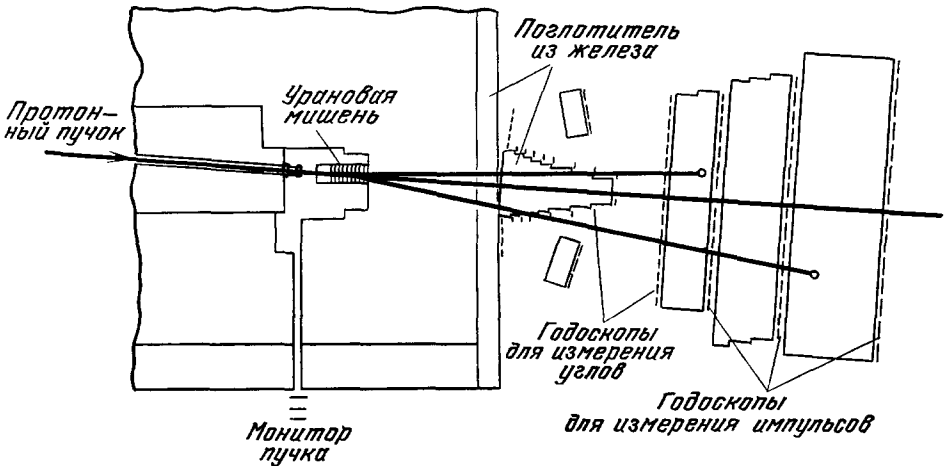


Рис. 3. Аппаратура, которая была установлена на ускорителе на 30 ГэВ в Брукхейвенской Национальной лаборатории, использованном для генерации мюонных пар при столкновении протонов с ядрами урана.

Мюоны проходили сквозь слой железа, поглощавший нежелательную адронную компоненту. Импульсы и углы разлета мюонов измерялись с помощью годоскопической системы.

резонансы со сравнительно малой массой рождаются с очень малым сечением. К примеру, на брукхейвенском ускорителе лептонная пара с массой порядка массы протона появлялась лишь в одном столкновении из миллиона. Следовало ожидать, что пары с большими массами рождаются еще реже и, кроме того, на каждую из них приходится миллионы сильно взаимодействующих вторичных частиц. Поэтому нам нужен был детектор, способный распознать редкие лептонные пары среди гигантского количества сопутствующих им адронов.

После длительных дебатов мы пришли к выводу, что сможем создать необходимую детектирующую систему, основываясь на том фундаментальном факте, что лептоны, в отличие от адронов, способны проходить через вещество (рис. 3). Так как мюоны в этом отношении обладают большим преимуществом перед электронами, мы решили сконцентрировать свое внимание только на них, исключив из игры электронно-позитронную компоненту. Это означало, что между урановой мишенью и детектором лептонных пар нам придется воздвигнуть железную преграду толщиной не менее десяти футов, которая поглотит сильно взаимодействующие частицы, но пропустит мюоны к расположенным за ней сцинтилляционным счетчикам. Недостаток описанной только что детектирующей системы состоит в том, что она может исказить первоначальные траектории мюонных пар, так как атомы могут не только замедлить мюоны, отнимая у них энергию, но и отклонить их, воздействуя на их электрический заряд. Таким образом, мы оказались перед неприятной альтернативой. Если вычислять мас-

су виртуального «родителя» мюонной пары, измеряя для этой цели энергию и угловой разлет мюонов, прошедших железный поглотитель, то результат может оказаться неточным. В то же время мы не можем повысить точность, поставив детектирующую аппаратуру раньше поглотителей, так как она будет забита фоном от огромного потока адронов. Поэтому на ранней стадии нашей работы мы не слишком заботились о прецизионности наших результатов. Мы сконцентрировали свои усилия на том, чтобы обнаружить дотоле неизвестные резонансы с большой массой, полагая, что наша аппаратура в состоянии это сделать, хотя их характеристики могут исказиться под ее воздействием. Это можно было бы считать дешевой платой за открытие новой частицы, если бы таковое произошло.

□

Мы начали набирать статистику в конце 1968 г. Полученная информация обрабатывалась на компьютере, который вычерчивал график выхода мюонных пар в зависимости от их массы. Встретившись в совершенно неизученную область, мы не знали заранее, как будет выглядеть это распределение. Тем не менее мы были озадачены тем, что падающее распределение

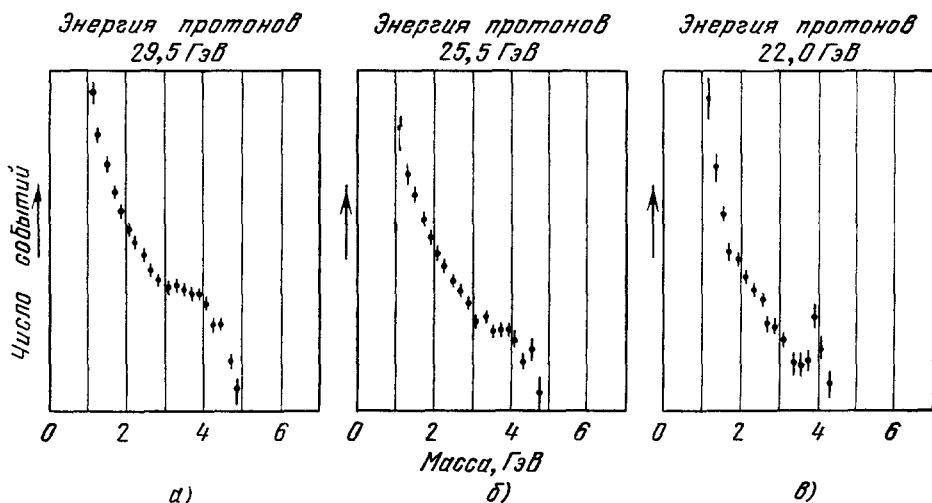


Рис. 4. Неожиданное «плечо» в распределении по массам виртуальных фотонов, рождавшихся в Брукхейвене, не исчезло при понижении энергии налетающих протонов с 29,5 ГэВ (а) до 25,5 ГэВ (б) и затем до 22,0 ГэВ (в).

Это предвещало, что «плечо» не обусловлено аппаратными искажениями, а отражает какой-то реальный эффект, возможно, — плохо разрешенный резонанс, оставленный новой частицей.

по массам, которое началось при массах порядка 1,5 ГэВ, стало «выползаяться», как только массы превысили 3 ГэВ, а затем стремительно провалилось на верхнем пределе нашей детектирующей системы, когда мы уже не смогли набрать достаточного числа событий (рис. 4, а). Это «плечо» нас очень заинтриговало. Мы заподозрили, что оно, быть может, указывает на присутствие в этой области острого резонанса, «размазанного» нашей грубой аппаратурой, но тем не менее свидетельствующего о существовании какой-то новой частицы. Когда мы понизили энергию налетающих протонов, плечо не исчезло (рис. 4, б, в). Это был хороший признак, так как он означал, что замеченная нами удивительная нерегулярность в распределении по массам, по всей вероятности, не является случайной и не связана с неучтенным аппаратным эффектом. Все же неопределен-

ность повисла на нас тяжким грузом. Мы не могли полностью исключить возможность таких серьезных аппаратурных эффектов, которые исказили бы и низкоэнергетическое распределение по массам. Помимо того, мы должны были считаться с тем, что обнаруженное плечо может оказаться специфической особенностью плавного распределения виртуальных фотонов, а не размазанным резонансом, отвечающим новой частице.

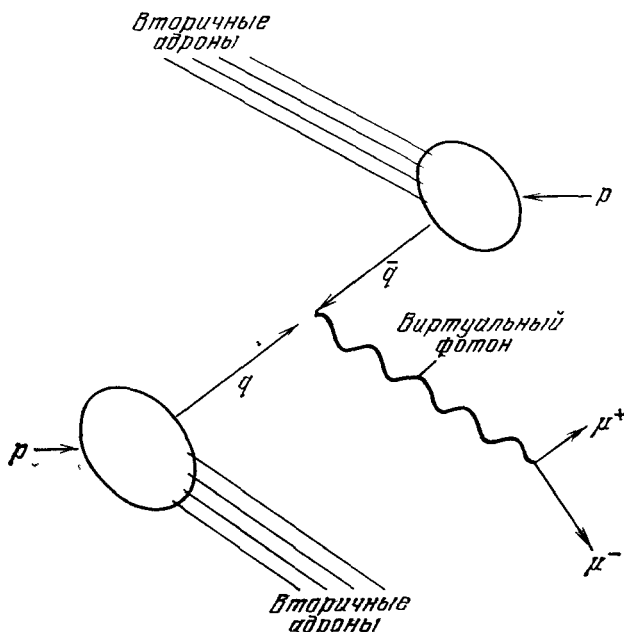


Рис. 5. Предложенная первоначально для объяснения статических свойств частиц кварковая модель смогла, однако, описать и такие динамические процессы, как рождение мюонных пар.

С. Д. Дрелл и Т. М. Ян предположили, что распадающийся на мюонные пары виртуальный фотон образуется в результате аннигиляции кварка (q), входящего в состав налетающего протона, с антикварком ($\bar{q}$) «моря» из нуклона-мишени. На основе этих представлений они попытались предсказать наши брукхейвенские результаты и преуспели в этом в области масс виртуального фотона вблизи 2 Гэв, однако при подходе к 3 Гэв потерпели неудачу.

Теоретики сразу же активно заинтересовались нашими неясными результатами, так как забрезжила их непосредственная связь с кварковой гипотезой. В ее первоначальной формулировке, данной в 1964 г., утверждалось, что все известные адроны сконструированы из трех кварков, обозначаемых обычно буквами u , d и s (от английских слов up, down и strange) и соответствующих им антикварков $\bar{u}$, $\bar{d}$ и $\bar{s}$. И, хотя эта кварковая модель преуспела в систематизации статических характеристик более, чем 100 адронов, все же оставалось чувство неудовлетворенности: она не объясняла их динамические свойства. Однако в 1968 г. появились первые работы, в которых делались попытки использовать эту модель для описания упругого рассеяния и неупругих столкновений частиц. Главная трудность тут была в неоднозначности: наряду с кварковым существовали и разумные альтернативные подходы, не апеллировавшие к представлениям о кварках и так же хорошо описывавшие динамику взаимодействия адронов.

Наши данные послужили причиной заметного сдвига в сторону кварковой концепции в адронной физике. В 1970 г. два сотрудника Стэнфордского университета — С. Д. Дрелл и Т. М. Ян — попытались дать на ее основе теоретическую интерпретацию наших результатов по генерации лептонных пар (рис. 5). Их предсказания прекрасно совпали с данными опы-

та вблизи масс порядка 2 ГэВ, однако к 3 ГэВ оказались весьма заниженными. Обнадеженные этой хотя бы частичной корреляцией, равно как и заманчивой перспективой увидеть резонанс, а также необычайным интересом к нашим результатам со стороны теоретиков, мы решили повторить

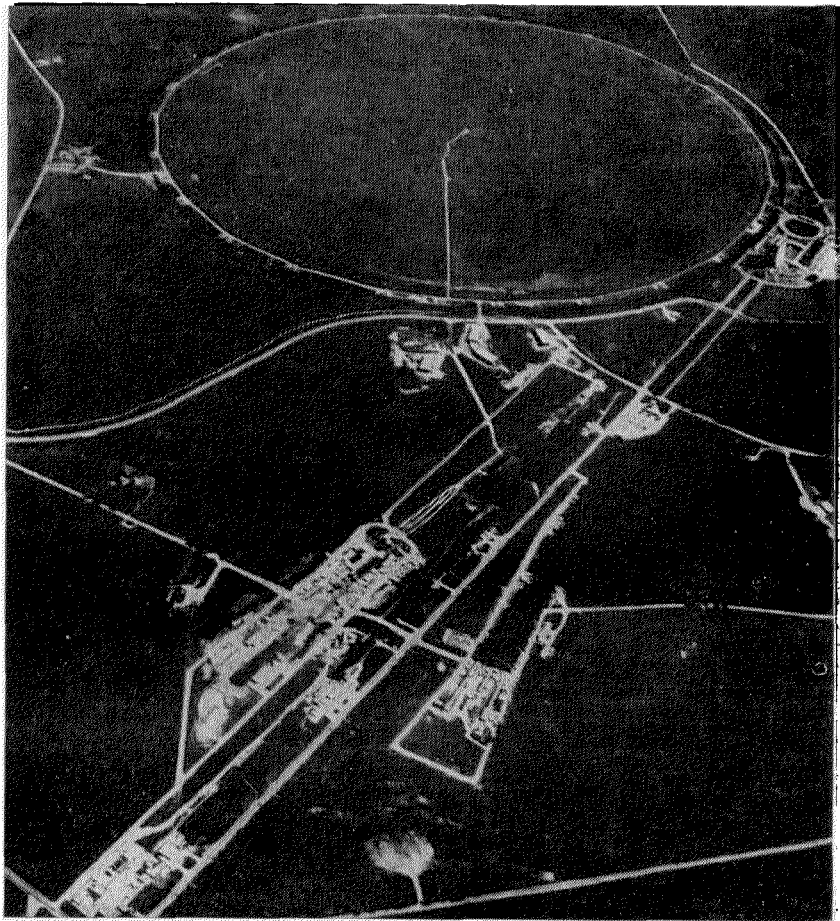


Рис. 6. Протонный синхротрон Национальной лаборатории им. Ферми (FNAL), который был использован для получения мюонных пар в экспериментах, послуживших основанием для открытия ипсилон-частицы.

Ускоритель протонов до энергии 400 ГэВ представляет собой огромное кольцо протяженностью около четырех миль. По касательной к этому кольцу от него отходят длинные туннели, по которым ускоренные частицы выводятся к экспериментальным установкам. Ипсилон-частица была открыта в протонной лаборатории, которая расположена в большом помещении, показанном в левой нижней части рисунка (оно выглядит как еще недостроенное). Национальная лаборатория им. Ферми расположена в Батавии в 30 милях к юго-западу от Чикаго. Она построена по решению Комиссии по атомной энергии в сотрудничестве с 53 университетами и используется группами физиков из всех стран мира. Ускоритель, постройку которого возглавлял Р. Р. Вильсон, был запущен в эксплуатацию в 1972 г., когда он ускорял протоны до энергии 200 ГэВ; затем в 1973 г. их энергия была повышена до 300 ГэВ, и, наконец, в 1974 г. до 400 ГэВ.

наш эксперимент в усовершенствованном варианте на более мощном ускорителе в Национальной лаборатории им. Ферми (рис. 6). Этот мощнейший ускоритель способен был в то время ускорять протоны по энергии 300 ГэВ. При этой энергии лептонные пары с массой около 3 ГэВ должны были рождаться с большей вероятностью, и мы надеялись, что сумеем разгадать тайну загадочного «плеча.»

Но в 1974 г. прежде чем мы начали получать результаты, произошло событие, известное теперь как «Ноябрьская революция» и опрокинувшее модель трех кварков. Новая частица была открыта независимо Тингом

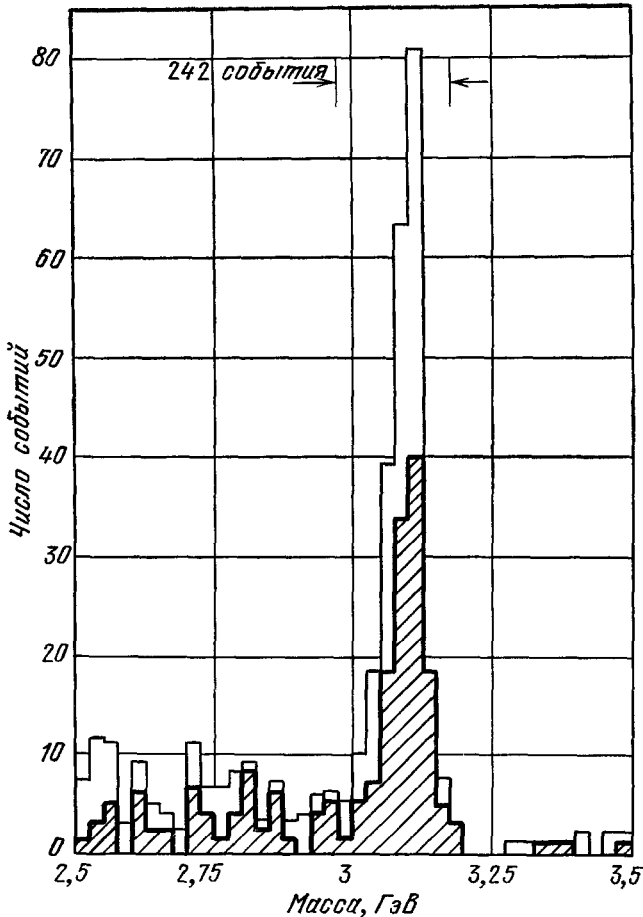


Рис. 7. J/ψ -частица была открыта в 1974 г. как узкий резонанс в распределении по массам виртуальных фотонов, распадавшихся на электронно-позитронные пары.

Заштриховано распределение по массам, полученное, когда детектирующий спектрометр облучался частицами с нормальной интенсивностью; незаштриховано аналогичное распределение при понижении интенсивности на 10%. В обоих случаях ясно виден резонанс при массе 3,1 ГэВ, который был интерпретирован как промеренное с высоким разрешением «плечо», замеченное нами в Брукхейвене в 1968 г. Открытие J/ψ -частицы ознаменовало существование четвертого кварка с (charm) и соответствующего антикварка $\bar{c}$.

в Брукхейвене и Рихтером в Стэнфорде. Первый назвал ее J -, а второй ψ -частицей. В Брукхейвене эта J/ψ -частица заявила о себе посредством всплеска в массовом распределении виртуальных фотонов, которые распадались на электронно-позитронные пары (рис. 7).

Открытие J/ψ -частицы решило ряд важных проблем в физике элементарных частиц. Оно объяснило наши результаты по рождению лептонных пар и указало на существование четвертого кварка с новыми квантовомеханическими свойствами, который обозначили буквой c (от слова charm). Плечо, которое мы обнаружили в 1968 г., было теперь интерпретировано как очень сильно аппаратно размытый узкий J/ψ -резонанс при массе 3,1 ГэВ. Самым замечательным и важным свойством этого резонанса явля-

ется именно его узость, так как согласно соотношению неопределенности Гейзенберга ширина резонанса непосредственно связана с временем его жизни: узкий резонанс живет (до своего распада) значительно дольше большинства других субатомных частиц. Это может быть только в том случае, если есть какая-то причина, препятствующая его распаду на такие частицы, как пионы и каоны. Существование четвертого кварка объясняет, в чем тут дело. Коль скоро кварки являются истинно фундаментальными частицами, они не должны легко превращаться друг в друга. Поэтому если частицы J/ψ образованы только чармированными кварками, им не так-то просто распасться на пионы и каоны, состоящие только из трех других кварков. Последующие исследования подтвердили правильность интерпретации J/ψ -частицы как связанного состояния четвертого кварка и соответствующего антикварка. Эта точка зрения получила и дальнейшее подтверждение после того как были открыты частицы, которые можно рассматривать как различные сочетания всех четырех кварков.

Сравнение плеча в нашем распределении 1968 г. с данными по рождению J/ψ -частицы укрепило нашу уверенность в том, что, повышая чувствительность аппаратуры, мы столько же теряем в ее разрешающей способности. Действительно, мы, используя высокочувствительную аппаратуру, зарегистрировали свыше десяти тысяч мюонных пар, но получили лишь размазанное распределение, которое не смогли правильно интерпретировать. В то же время в Брукхейвене, где использовались детекторы нового типа и где была открыта J/ψ -частица, наблюдалось всего 242 пары. Но поскольку эта аппаратура обеспечивала значительно лучшее разрешение по их массе, нашим брукхейвенским коллегам удалось увидеть четкий узкий пик.

□

Теперь, после того как загадка «плеча» стала понятной, мы решили использовать ускоритель Фермиевской Национальной лаборатории для поиска резонансов при массах свыше 5 ГэВ. В 1975—1976 гг. мы наблюдали несколько сотен событий с образованием лептонных пар. К тому времени энергия протонов в ускорителе была повышена до 400 ГэВ, что могло бы сыграть решающую роль в наших дальнейших экспериментах. В это же время мы научились контролировать искажающие эффекты нашей аппаратуры, посмотрев, как они влияют на J/ψ -резонанс. Ясно, что в 1968 г. мы этого сделать не могли. За плечами у нас были также годы опыта работы с мюонными парами и прогресс в технике детектирования частиц, которым мы не преминули воспользоваться.

В феврале прошлого года наша группа приступила к подготовке нового эксперимента по рождению лептонных пар, взяв на вооружение все, чему мы научились в течение двух предшествующих лет. Мы понимали, что для извлечения надежной информации о редких событиях с большими массами пар нам придется просмотреть значительно большее число событий. В то же время мы должны были улучшить разрешающую способность аппаратуры, чтобы не оказаться перед лицом тех же самых интерпретационных трудностей, с которыми мы уже столкнулись в 1968 г.

Дж. Иох, — сотрудник Колумбийского университета, — заметил в наших результатах 1976 г. небольшое число событий с массами вблизи 9,5 ГэВ и поставил в наш служебный холодильник бутылку шампанского с надписью «9,5» за то, что они предвещают открытие. Это, конечно, никого не убедило в том, что мы напали на след новой частицы. Тем не менее нас вдохновляло в работе то обстоятельство, что наши результаты были совершенно уникальными: еще никто никогда не наблюдал 350 лептонных пар с массами свыше 5 ГэВ. Что-то интересное в них, конечно, могло быть.

Опыт показал, что мы можем приблизить детекторы к мишени и таким образом увеличить число попадающих в него мюонных пар. Наш сотрудник из Колумбийского университета С. Герб правильно прогнозировал, что это не повлечет за собой катастрофического увеличения потока адронов, достигающих детектирующей системы. Для поглощения нежелательных частиц мы использовали в 1968 г. железо, атомы которого содержат 26 протонов и 26 электронов и оказывают сильное электромагнитное

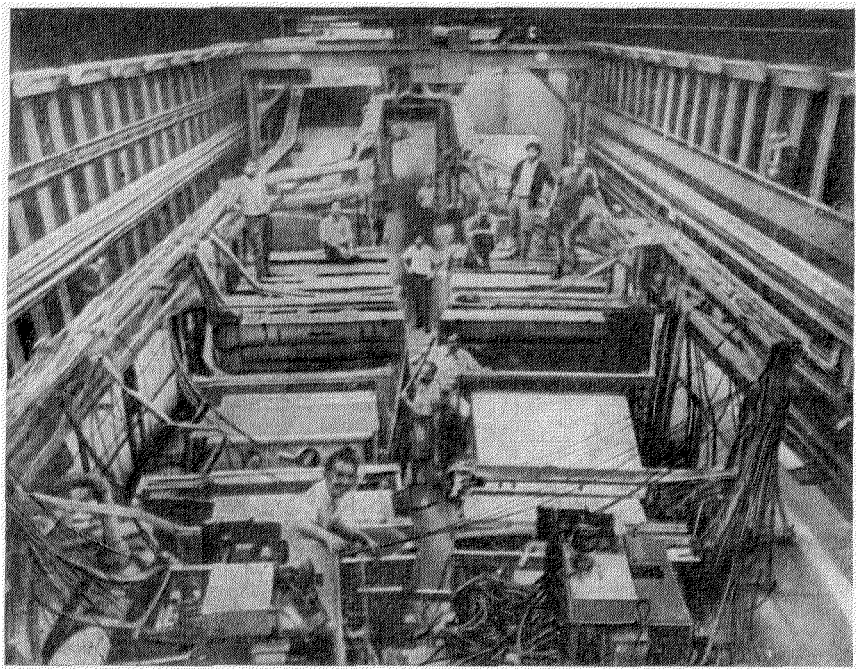


Рис. 8. Общий вид экспериментальной установки, использованной для открытия Υ -частицы.

Мишень расположена вне поля зрения на переднем плане чуть ближе к нам. Электромагниты, расположенные слева и справа перед фигурой человека на первом плане, отклоняют мюонные пары таким образом, что можно измерить энергии мюонов и углы их разлета. Каждый мюонный пар проходит через свою систему детекторов. Два плеча детекторов, каждое из которых имеет по шесть футов в ширину и высоту и 100 футов в длину, начинаются от электромагнитов и оканчиваются там, где стоит человек, на заднем плане.

воздействие на мюоны, отклоняя их от первоначального направления. Это сильно снижало точность вычисления массы пар. Теперь мы взяли для этой цели легкий металл бериллий. Имея всего четыре протона и четыре электрона, атомы бериллия вряд ли могли заметно влиять на траектории мюонов, хотя для адронов они все еще представляли надежную преграду (рис. 8, 9).

Все же значительное препятствие еще оставалось на нашем пути. Мюоны — очень коварные частицы. Я уже говорил о том, что они легко могут проходить сквозь многометровую толщу железа. Мы же должны были быть совершенно уверенными в том, что наши мюонные пары являются подлинными, т. е. в том, что они возникли действительно в мишени и затем, не рассеявшись и не изменив направления, прошли через большой отклоняющий магнит в наши счетчики. Чтобы быть более уверенными во всем этом, было желательно поместить детектор в центр магнита. Трудности, которые тут возникали, можно сравнить разве что с теми,

которые встают перед человеком, пытающимся заставить деликатный и прецизионный часовой механизм работать внутри бушующего горна. Однако сотрудник Национальной лаборатории им. Ферми У. Иннес сумел их преодолеть. И все-таки положение дел нас не вполне удовлетворяло. Дело в том, что наиболее интересные для нас события были в то же время и самыми редкими. Когда эксперимент с более чем десятью миллиардами ядерных столкновений ежесекундно длится в течение многих дней, нельзя не принимать во внимание экстремально редкого стечения многих

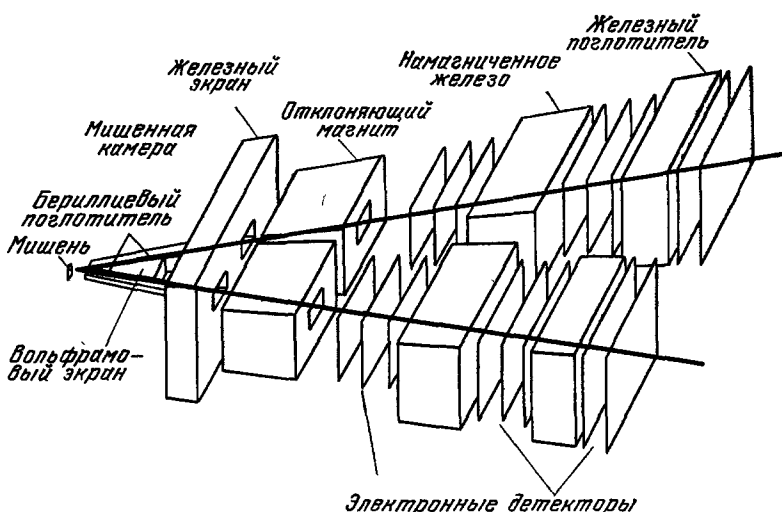


Рис. 9. Для того чтобы отсеять адронную компоненту вторичных частиц, в нашем эксперименте на ускорителе Национальной лаборатории им. Ферми был использован бериллиевый поглотитель, так как бериллий значительно меньше, чем железо, изменяет траектории мюонов.

Вольфрамовый экран задерживает налетающие протоны, которые прошли мимо нуклонов мишени. Эта схематическая диаграмма представляет собой вид сбоку на экспериментальную установку, фронтальный снимок которой показан на рис. 8.

маловероятных обстоятельств, способных его фальсифицировать. Чтобы застраховаться от подобных случайностей, наш коллега из Национальной лаборатории им. Ферми сконструировал простую магнитную систему, которая вторично измеряла энергию каждого мюона после его вылета из главного детектора.

Первого мая 1977 г. мы получили наши первые результаты. Нас окрылило то, что наша усовершенствованная аппаратура теперь регистрировала в 90 раз больше мюонных пар, чем годом раньше. Поднявший мощность ускоритель работал превосходно, поставляя практически неограниченное число протонов с фантастической точностью. В первую же неделю мы зарегистрировали 3000 мюонных пар с массами свыше 5 ГэВ. Это более, чем в десять раз превышало всю мировую коллекцию подобных событий, и качество наших данных было значительно выше. Мы нанесли наши результаты на график и убедились в том, что они совершенно свободны от интерференционных эффектов, связанных с адронами. Отчетливо был виден J/ψ -резонанс, что означало для нас полный успех в увеличении разрешающей способности нашей аппаратуры. Наше волнение достигло предела, когда мы увидели, что крутое падение спектра мюонных пар по мере возрастания их массы прерывается вблизи массы 10 ГэВ любопытным всплеском (см. рис. 2, а).

На следующей неделе мы удвоили статистику, но всплеск остался. Больше уже нельзя было списать его за счет какого-то неудачного стечения обстоятельств, но мы все еще допускали, что, быть может, этот эффект обусловлен каким-то хитрым и еще не распознанным капризом нашей аппаратуры. Можно было опасаться, не нарушается ли вдруг правильность работы отклоняющих магнитов или счетчиков. К счастью, у нас была возможность исключить это подозрение. Мы осмотрели шаг за шагом каждый сантиметр поверхности детекторов, чтобы увидеть, как были распределены мюоны на каждой стадии своего пролета. Повсюду распределение было плавным. Это указывало на то, что резонанс не мог быть обусловлен аппаратурными эффектами. Более того, искусственно смешав μ^+ -мезоны, зарегистрированные в понедельник, с μ^- -мезонами, зарегистрированными во вторник, мы получили совершенно плавную картину, что полностью соответствовало всем нашим представлениям о работе аппаратуры. После ее дальнейших испытаний и накопления большей статистики мы пришли к убеждению, что обнаруженный нами резонанс отражает объективную реальность — существование новой частицы с массой около 10 ГэВ. Хотя мы старались держать этот результат в секрете, пока не сможем окончательно с ним разобраться, слухи о нашем открытии быстро просочились наружу, и оно стало достоянием физической общественности. Затем 20 июня наши данные были опубликованы в печати: 26 000 мюонных пар, почти в 100 раз больше, чем во всех предыдущих экспериментах, взятых вместе. Мы назвали новую частицу «ипсилон».

□

Затем мы приступили к определению ширины этого резонанса, пользуясь тем же методом, которым была вычислена ширина J/ψ -частицы. Шириной называют степень размытости массы резонанса. Согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга узкий пик (малая размытость) отвечает долгоживущему, а широкий пик (большая размытость) — короткоживущему резонансу. Увеличив статистику, мы обнаружили, что в действительности наш резонанс состоит из двух близко расположенных пиков (с признаками третьего пика), раздвинутых друг от друга примерно на 600 МэВ, с шириной порядка 500 МэВ каждый (рис. 10). Это указывало на то, что ипсилон-частица может существовать в двух, а быть может, и в трех различных состояниях. Истинная ширина Υ -резонанса, конечно, меньше значения, указанного выше, но для того, чтобы получить представление о ней, нам необходимо было учесть искажающие эффекты, обусловленные неизбежным несовершенством аппаратуры. Аппаратура с низкой разрешающей способностью размывает реальные пики точно так же, как фотоаппарат с низкогокачественным объективом смазывает мелкие детали на фотографии (рис. 11). Так, например, в нашем брукхейвенском эксперименте 1968 г. плохое разрешение исказило результаты до такой степени, что в них уже нельзя было разглядеть самого главного.

Чтобы выяснить, как видоизменяет форму резонанса наша новая аппаратура, мы обратились к теории игр. «Игра» состояла в том, что весь наш эксперимент был искусственно смоделирован на компьютере. Такой подход, называемый методом Монте-Карло, повсеместно используется в физике высоких энергий. В нашем случае компьютеру сообщалось положение и функции каждой части нашей аппаратуры, а он, выбрав конфигурацию, состоящую из пары мюонов, прослеживал их траектории вплоть до конечного детектора. Если по программе компьютера мюоны проходили через поглотитель, состоящий, скажем, из бериллия, то это отражалось на искусственном событии, которое генерировал компьютер, так же, как если бы мюоны и бериллий были реальными. В нашем распоря-

жении был мощный компьютер, который смоделировал взаимодействие с нашей аппаратурой десятков тысяч мюонных пар.

Построив затем график распределения масс в искусственных событиях, мы обнаружили, что истинная ширина Υ -резонанса значительно меньше измеряемой. Это указывало на то, что последняя обусловлена в основном аппаратурными эффектами. Правда, приходилось считаться и с тем, что в задававшуюся компьютеру сложную программу могли закрасться какие-то дефекты. Все ли, таким образом, мы учли правильно? Может быть, наша «игра» с компьютером не имеет отношения к делу, и измеренная нами ширина резонанса является истинной? К счастью, мы могли исключить такую возможность путем прямой проверки, повторив описанную выше

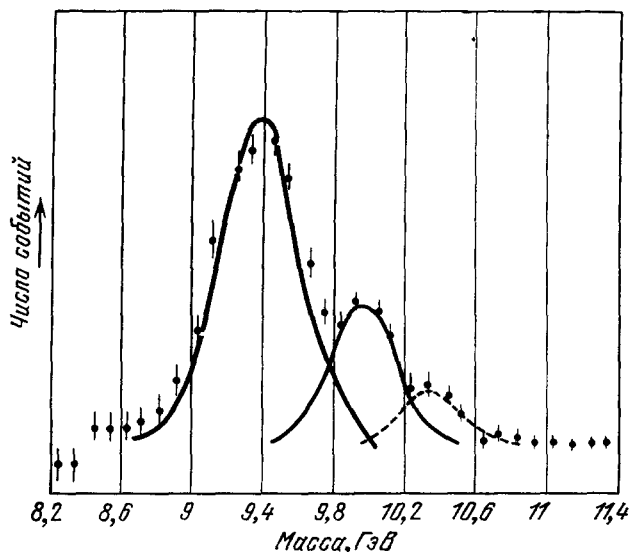


Рис. 10. Ипсилон-частица проявляется в виде трех близко расположенных резонансов при 9,4 ГэВ (нижнее состояние) и при 10,0 и 10,4 ГэВ (возбужденные состояния) и интерпретируется как связанное состояние пятого массивного кварка и соответствующего ему антикварка.

Окончательную ясность в спектроскопии Υ -резонансов должны внести эксперименты на ускорителях со встречными электронно-позитронными пучками. Уже начались поиски шестого кварка.

игру применительно к J/ψ -частице, о которой к тому времени уже все было известно. Фактически мы сделали это заранее и убедились, что наша программа Монте-Карло правильно воспроизводит искажения, вносимые аппаратурой. Поэтому мы с полной уверенностью заключили, что истинная ширина Υ -резонанса меньше 100 МэВ. Такая чрезвычайная узость свидетельствовала о большом времени жизни новой частицы.

Между тем, на первый взгляд естественно было бы ожидать совсем другого. Для частицы, которая в 10 раз массивнее протона, должно существовать огромное число состояний, в которые она может распадаться, причем каждый из этих каналов распада должен вносить свою лепту в уменьшение времени ее жизни. И тем не менее, вопреки таким очевидным соображениям, оказалось, что ипсилон — самая массивная из всех известных нам теперь частиц, живет долго. Это могло означать только одно; по каким-то причинам ей «трудно» распасться на более легкие адроны, которые все построены из u -, d -, s - и c -кварков. Но в прошлом году, когда мы открыли эту частицу, ни один из известных нам физических законов не мог объяснить, в чем тут дело. Сам собой напрашивался очевид-

ный и многозначительный вывод: какой-то новый закон физики запрещает или, точнее сказать, замедляет распад ипсилон-частицы на обычные адроны. В поисках такового мы решили посмотреть, не предсказывалось ли в каких-нибудь теоретических построениях существование частицы, подобной ипсилон, и сразу же убедились, что уже в течение нескольких

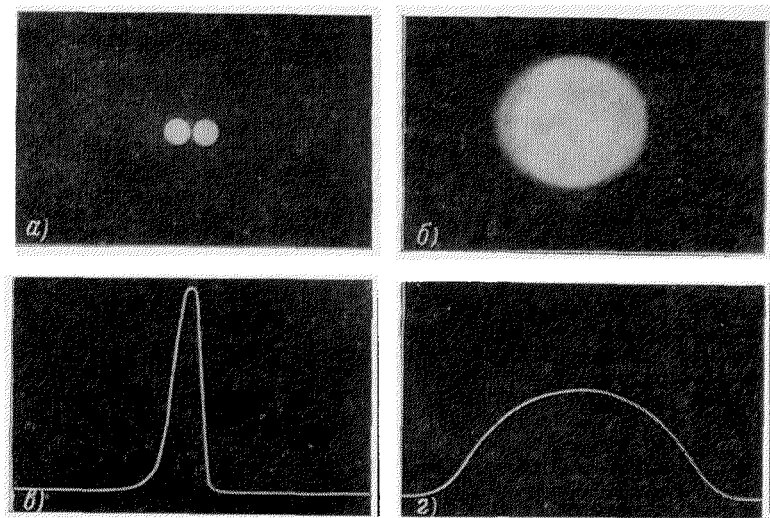


Рис. 11. Этими фотографиями иллюстрируется проблема разрешающей способности в экспериментах при высокой энергии.

Расфокусированная фотокамера может «превратить» два источника света (а) в один (б). Точно так же аппаратура, использованная нами в Национальной лаборатории им. Ферми, «делала» из узкого J/ψ -резонанса (в) широкий (г).

лет многие теоретики ожидают новых частиц для объяснения ряда загадочных эффектов, и, быть может, ипсилон-частица является одной из них.

□

Единственный разумный способ интерпретировать свойства Υ -частицы состоял в том, чтобы рассматривать ее как связанное состояние двух новых массивных кварков. Теоретические высказывания на этот счет уже имели место ранее, но все они не выходили за рамки прошупывания различных возможностей и сводились в основном к аргументам эстетического порядка. К примеру, в некоторых работах высказывалась надежда на то, что существование нового кварка могло бы объяснить некоторые странные результаты, полученные в ряде нейтринных экспериментов. Наши улучшенные вычисления, выполненные в начале этого года, показали, что Υ -частица проявляется в виде трех резонансов — при 9,4, 10,0 и 10,4 ГэВ (см. рис. 10). В этом не было ничего удивительного. Частица, состоящая из пятого кварка и соответствующего антикварка, могла характеризоваться основным состоянием с массой 9,4 ГэВ и иметь два возбужденных состояния с массами 10 и 10,4 ГэВ. Кроме того, существование пятого кварка пролиvalo свет на причину долгоживучести этого резонанса, подобно тому как наличие четвертого кварка объяснило длительное время жизни J/ψ -частицы. Действительно, коль скоро Υ -частица состоит только из кварков нового типа, ей трудно распасться на обычные адроны, состоящие только из других четырех кварков. Совокупность всех этих доводов убедила большинство физиков, что ипсилон-частица дей-

ствительно представляет собой связанную систему, включающую пятый кварк и соответствующий ему антикварк.

Небезынтересно заметить, что причины, послужившие в ряде теоретических работ основанием для предположения о существовании пятого кварка, впоследствии оказались всего лишь видимостью, так как новый кварк был призван в них для объяснения некоторых загадочных экспериментальных результатов, которые, однако, при ближайшем рассмотрении вообще перестали быть таковыми. Реальное положение дел таково, что, в отличие от четвертого кварка, который действительно дал ключ к загадке целого круга удивительных наблюдений, пятый кварк был нужен только для объяснения нашего эксперимента. И, тем не менее, ошибочная интерпретация других экспериментов сослужила полезную с эвристической точки зрения службу, стимулируя интерес к свойствам частиц, состоящих из более тяжелых кварков, — тем самым свойствам, которые присущи Υ -резонансу. То обстоятельство, что первые четыре кварка группировались по своим свойствам в дублеты — u и d (up и down), s и c (strange и charm) — послужило теоретикам основанием для предсказания, что из открытия пятого кварка должно следовать существование также и шестого. Для этих двух кварков уже заготовлены эксцентричные названия — top и bottom («вершина» и «дно») или truth и beauty («правда» и «красота»).

Открытие Υ -резонанса поставило физиков перед несколько обескураживающей перспективой неожиданного появления нового семейства частиц, включающих пятый кварк. Уже сейчас открытие ипсилон-частицы наметило далеко идущие последствия. Оно побудило начать поиски других тяжелых частиц в доселе неисследованной области масс и пролило свет на таинственную природу сильных взаимодействий, связывающих кварки в адроны и адроны друг с другом в атомные ядра. Они настолько мощны, что их исследование не по плечу обычной ускорительной технике. Любая модель сильных взаимодействий должна адекватно описывать взаимодействие между кварками и антикварками и, следовательно, правильно предсказывать энергетические уровни (или массы) семейства Υ -частиц. Оценки в этом случае проще, чем для обычных более легких адронов, поскольку скорости массивных кварков сравнительно невелики и расчет не требует учета сложных релятивистских эффектов. Это сразу же позволило исключить из рассмотрения ряд теоретических построений, предсказания которых оказались явно ошибочными. Все «выжившие» модели предсказывают, что электрический заряд пятого кварка равен $-1/3$ (заряд электрона равен -1), и что сила взаимодействия между кварками возрастает по мере их удаления друг от друга. Последнее отражает тот экспериментальный факт, что, несмотря на все старания, пока еще никому не удалось наблюдать свободные кварки: для их «растаскивания» нужно настолько увеличить энергию, что она начинает расходоваться на рождение новых кварковых пар, а не на разрыв уже существующих. Согласно современным воззрениям кварки, быть может, всегда связаны в какие-то более сложные структуры.

Однако подтверждение этой точки зрения, равно как и более глубокое понимание природы сильных взаимодействий, не может придти из опытов по изучению рождения ипсилон-частиц на протонных ускорителях типа тех, на которых мы работали в Брукхейвене и Национальной лаборатории им. Ферми. Процесс их рождения здесь очень сложен, так как первоначально в столкновении участвуют три кварка налетающего протона и три кварка нуклона мишени. Следующий шаг на пути распознавания сил, действующих между кварками, будет сделан тогда, когда появится возможность всесторонне изучать Υ -частицы посредством их рождения

при столкновении встречных пучков электронов и позитронов высокой энергии из электронно-позитронных накопителей. На этих машинах можно будет получить более качественные результаты с лучшим разрешением. Фактически первые такие результаты уже есть. В апреле группа немецких физиков из Гамбургской лаборатории (Немецкий электронный синхротрон, DESY), модифицировав несколько свой ускоритель, смогла наблюдать Υ -резонанс с массой 9,46 ГэВ и установила, что его ширина не может превышать 7 МэВ, что значительно улучшает нашу оценку, согласно которой эта ширина не больше 100 МэВ. Их данные тоже показывают, что электрический заряд нового кварка равен $-1/3$. В ближайшие годы с помощью более мощных накопительных колец, строительство которых завершается в Гамбурге, Стэнфорде, и Корнеллском университете, конечно, будет полностью изучена спектроскопия Υ -резонансов. Кроме того, на этих машинах физики будут искать шестой кварк, — ожидаемый напарник пятого, — и частицы, составленные из различных сочетаний всех шести кварков.

□

С развитием ускорительной техники физики, несомненно, продолжают изучение субатомных объектов. На этом пути им предстоит столкнуться с глубокими и нерешенными вопросами. Ограничено ли вообще число кварков? Если да, то почему их шесть, а, скажем, не 12 или 24? Если же число кварков окажется большим, то останется ли какой-нибудь смысл в том, чтобы считать их элементарными. Вспомним, что химики девятнадцатого века сводили все бесконечное многообразие химических веществ к 36 элементам, но с течением времени это число перевалило за сотню. Этого количества разновидностей атомов казалось многовато для того, чтобы считать их элементарными. В 1930 г. было установлено, что все элементы построены из электронов, протонов и нейтронов. После второй мировой войны семейство этих «элементарных» частиц пополнилось еще дюжиной новых — были открыты пионы, каоны, Λ -частицы и т. п. Их снова стало слишком много (см. таблицу). Затем одно время казалось, что

Массы частиц в порядке их возрастания Ипсилон-частица, которая в основном состоянии имеет массу 9,4 ГэВ, является самой тяжелой из известных в настоящее время. Она в три раза массивнее ближайшего соседа — J/ψ -частицы — и в 19 000 раз массивнее электрона. Следует ожидать, что частицы, содержащие шестой кварк, будут еще тяжелее.

Частица	Обозначение	Масса, ГэВ	Частица	Обозначение	Масса ГэВ
Фотон	γ	0	Ламбда-частица	Λ	1,116
Нейтрино	ν	0	Чармированные мезоны	D^0	1,863
Электрон	e	0,0005		D	1,868
Мюоны	μ	0,105	Чармированная ламбда-частица	Λ_c	2,260
Пионы	π^0	0,135	Семейство J/ψ -частиц	J/ψ	3,098
	$\pi^\pm$	0,140		ψ'	3,684
Каоны	$K^\pm$	0,494	Семейство ипсилон-частиц	Υ	9,4
Протон	p	0,938		Υ'	10,0
Нейтрон	n	0,940		Υ''	10,4
Фи-мезон	ϕ	1,020			

все их многообразие можно свести к всего лишь трем кваркам. Теперь же эксперимент показал, что должны существовать также четвертый и пятый кварки. Не слишком ли их становится много? Не придется ли вскоре обращаться к еще более элементарным структурам, из которых составле-

ны кварки? Не исключено, что истинно элементарных частиц не существует вообще, т. е. что любой объект в природе составлен из каких-то частей? Или, быть может, предельная простота, в существование которой верит большинство физиков, не сводится к истинно элементарным объектам, а заложена в математических группах, упорядочивающих частицы?

Отложив пока обсуждение этих весьма и весьма умозрительных размышлений, большинство физиков постепенно отчаиваются ставить подобные вопросы из-за трудности, а быть может, и невозможности изучать кварки в свободном состоянии. Все же опыт, приобретенный в связи с ипсилон-частицей, указывает на то, что, несмотря на трудности, можно извлекать из эксперимента детальную информацию о движении и взаимодействии кварков. Кажущаяся неразъединимость этих объектов сама по себе еще не закрывает путей их изучения. Подумаем, чему нас учит опыт работы с электронами. Развитие электронной теории могло бы только замедлиться, но не могло бы приостановиться, если бы даже оказалось, что электроны всегда связаны внутри атомов и не могут находиться в свободном состоянии. Этим примером экспериментаторы отвечают на пророчества пессимистов, которые считают неразъединимость кварков непреодолимой преградой на пути дальнейшего познания — той глухой стеной, за которой природа навсегда скрыла от нас свои сокровенные тайны. И кто сейчас возьмет на себя смелость утверждать, что физикам никогда не удастся построить сверхмощный ускоритель, который позволит преодолеть притяжение между кварками и освободить их?

ЛИТЕРАТУРА

- Christenson J. H., Hicks G. S., Lederman L. M., Limon P. J.,
 Pope B. G.— Phys. Rev. Ser. D, 1973, v. 8, p. 2016.
 Jaffe R. L.— Nature, 1977, v. 268, p. 201.
 Herb S. W. et al.— Phys. Rev. Lett., 1977, v. 39, p. 522.
 Schwitters R. F.— Scientific American, October 1977, v. 237, No. 4, p. 56.
 Innes H. R.— Phys. Rev. Lett., 1977, v. 39, p. 1240.