

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ПРОТОНА *)**М. Жакоб, П. Ландшофф**

Внутри протона есть какие-то маленькие и твердые объекты. Эти объекты, которые по-видимому, являются частичками, называемыми «кварки», наиболее четко обнаруживают себя при катастрофически сильных соударениях частиц, приводящих к рождению «струи» из многих новых частиц.

В процессе изучения атома и его составных частей один из наиболее заметных по своим последствиям экспериментов был проведен около семи-десяти лет назад в лаборатории Эрнеста Резерфорда в университете Манчестера. Двое учеников Резерфорда, Ганс Гейгер и Эрнест Марсден, использовали пучок α -частиц, т. е. быстро движущихся ядер гелия, направив его на тонкую золотую фольгу. На экране, покрытом флуоресцирующим материалом, который светится при попадании на него α -частицы, они подсчитали число частиц, рассеянных под различными углами в процессах их соударений с атомами золота. Большинство частиц прошло прямо через фольгу или было отклонено под незначительным углом. Среднее отклонение составляло менее одного градуса. Однако, к их удивлению, некоторые частицы отклонялись весьма заметным образом. Например, приблизительно одна из двадцати тысяч частиц рассеивалась на угол 90° .

Резерфорд сумел объяснить эти результаты. Поскольку пластинка была достаточно толстой, так что на пути частицы находилось много атомов, и поскольку большинство α -частиц проходило ее, почти не замечая атомы, он решил, что α -частица может проходить сквозь атом, практически не искривляя траектории своего полета. Следовательно, атом в целом должен быть весьма диффузным образованием с множеством пустых областей. Однако редкие рассеяния на большой угол свидетельствовали о том, что в атоме есть нечто твердое с малыми размерами, так как только немногие α -частицы замечали это. Как резкий характер таких процессов рассеяния, так и их редкое появление могли быть объяснены с помощью предположения о том, что внутри атома имеется непроницаемое, плотное ядро, где в малом объеме сосредоточен весь положительный электрический заряд. Проходя через фольгу, большинство α -частиц даже и не подходило ни к одному из этих малых ядер достаточно близко для того, чтобы те смогли оказать на них какое бы то ни было влияние. Однако в тех случаях, когда происходило прямое столкновение, α -частица могла отлететь в любую сторону, вплоть до прямо противоположной направлению первоначального движения.

То, что открыл Резерфорд, было, конечно, атомным ядром. Он также предложил метод исследования строения вещества, метод, значение которо-

*) J a c o b M., L a n d s h o f f P. The Inner Structure of the Proton.—Scientific American, March 1980, v. 242, pp. 46—55.— Перевод И. М. Дремина.

Морис Жакоб — сотрудник Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН); Питер Ландшофф — лектор по математической физике в Кембриджском университете.

© Scientific American, Inc., 1980.

© Перевод на русский язык.

издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1981.

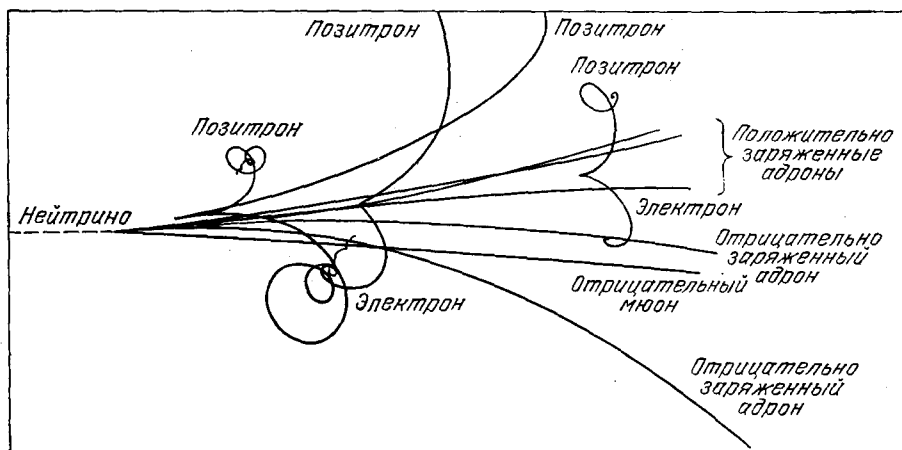
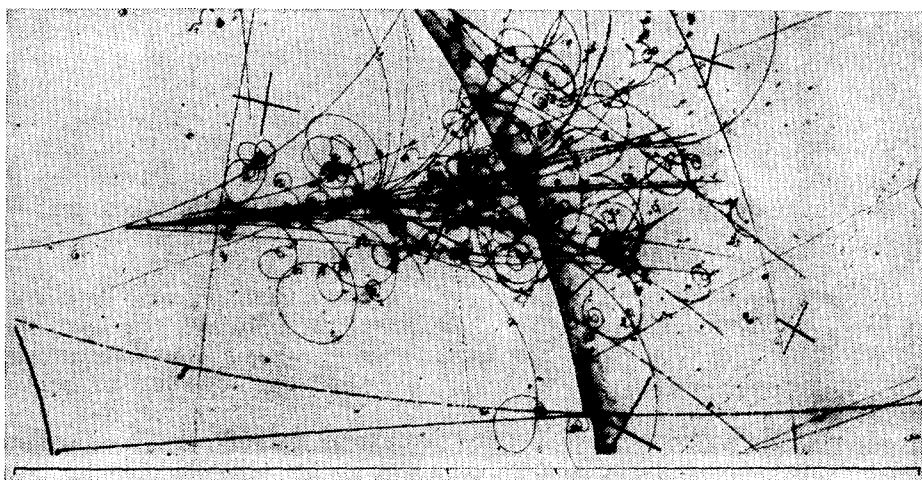


Рис. 1. Струя частиц испускается протоном в процессе соударения с нейтрино высокой энергии.

Это событие регистрируется в виде следов, составленных из пузырьков, образованных вдоль пути заряженной частицы при прохождении ее через перегретый водород. Нейтрино, которое не оставляет никаких следов, так как не несет электрического заряда, превращается в процессе соударения в отрицательно заряженный мюон, который уже наблюдаем. В то же время образуется целый поток частиц. Это адроны — класс частиц (например, протоны и пионы), которые, как считают, состоят из более фундаментальных компонент, называемых кварками. По кривизне треков в магнитном поле, которое создается в пузырьковой камере, можно заключить, что три адрона обладают положительным электрическим зарядом, а два — отрицательным. Вдобавок, испускается по крайней мере еще один нейтральный пион. Его нельзя увидеть непосредственно, но в результате его распада появляются пары электронов и антиэлектронов, или позитронов, которые оставляют характерные закрученные следы. В системе координат, в которой нейтрино и протон-мишень сталкиваются с равными по величине, но противоположно направленными импульсами, рассеянный мюон и струя адронов оказались бы испущенными практически в противоположных направлениях. Такое рассеяние на большие углы свидетельствует о катастрофическом процессе. Это событие можно объяснить, предположив, что нейтрино сталкивается с твердой составляющей протона, например, с кварком. Этот кварк отбрасывается в сторону, что приводит к рождению других кварков и антикварков, порождающих в конце концов струю адронов. Приведенная фотография была сделана на Большой Европейской пузырьковой камере в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) вблизи Женевы. Некоторые треки частицы идентифицированы на прилагаемой ниже схеме.

го несколько не уменьшилось и по сей день. В последующие десятилетия стало очевидным, что и само ядро обладает структурой: оно состоит из протонов и нейтронов. Теперь уже есть убедительные свидетельства в пользу того, что составляющие его нейтроны и протоны не являются элементарными объектами. Подобно атомам Резерфорда они пусты в большей части своего объема, но в них имеются маленькие твердые составляющие. В разных случаях эти составляющие называют по-разному: их можно называть или партонами, или кварками.

Внутреннее строение протона изучается в наши дни с помощью экспериментов, которые почти идентичны по форме опыту Резерфорда. Производятся соударения разных сортов частиц, и с помощью приборов измеряется угловое распределение рассеянных фрагментов. И вновь информация о тончайших деталях внутренней структуры поступает от частиц, вылетающих под большими углами к направлению первичного пучка.

Современные эксперименты отличаются от опытов Резерфорда в основном своими масштабами.

Используемые пучки частиц состоят не из α -частиц, испускаемых при радиоактивном распаде ядер, а из электронов или протонов, разгоняемых до высоких энергий в современных ускорителях. Можно также получать вторичные пучки других частиц, таких, как нейтрино или пионы. Наиболее энергичные соударения происходят, когда два пучка ускоренных частиц сталкиваются друг с другом «лоб в лоб».

При высоких энергиях частицы не просто отклоняются от первоначального направления полета в результате соударения. Большая доля их первичной энергии уходит на рождение новых частиц и античастиц, возникающих иногда десятками. Эти вновь рожденные частицы разлетаются от точки соударения подобно осколкам от взрыва (рис. 1). Приборы, регистрирующие такие частицы, — это уже не простые флуоресцирующие экраны (хотя и этот принцип тоже еще используется), а сложные электронные «счетчики», которые не только регистрируют направление вылета частицы, но и измеряют ее энергию, импульс и электрический заряд. Однако различие в масштабах экспериментов проявляется не только в этом. Поскольку доступные энергии сейчас стали в несколько тысяч раз больше, современные эксперименты позволяют обнаруживать характеристики строения в несколько тысяч раз более мелкие. Действительно, разрешающая способность в экспериментах при наивысшей доступной сейчас энергии достигает примерно 10^{-16} см, т. е. приблизительно около одной тысячной доли диаметра протона.

Столь мелкая структура обнаруживает себя лишь в тех соударениях, где некоторые фрагменты с высокой энергией вылетают под большим углом к направлению первичного пучка (рис. 2). Как и в ранних опытах с атома-

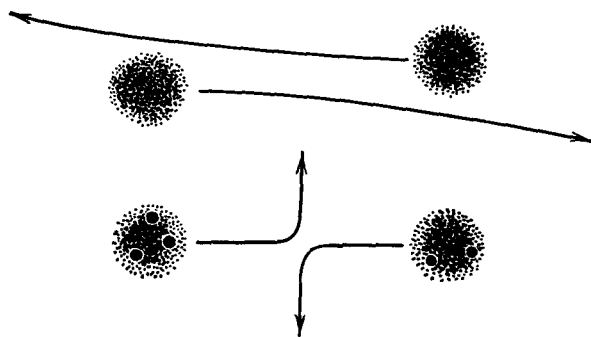


Рис. 2. Рассеяние на большие углы интерпретируется как свидетельство в пользу того, что частицы обладают гранулированной структурой, т. е. содержат твердые составляющие.

Когда сталкиваются большие диффузные частицы, они слабо отклоняются от первичного направления движения. Такие скользкие соударения наиболее вероятны и для частиц, внутри которых есть твердые составляющие, но в тех редких случаях, когда эти твердые объекты сталкиваются «лоб в лоб», они рикошетом резко уходят вбок.

ми, такие процессы «жесткого рассеяния» случаются довольно редко. Когда, например, два протона сталкиваются «лоб в лоб», вновь рожденные частицы почти всегда летят внутри двух узких конусов вдоль оси, определяемой направлением столкновения двух встречных пучков. Однако иногда частицы вылетают из точки столкновения примерно перпендикулярно к оси соударения. Если детектируется одна из таких частиц, то по крайней мере несколько других частиц сопровождают ее (рис. 3). Наиболее впечатляющим фактом является то, что остальные частицы не рассеиваются случайно во всех направлениях в процессах, где удалось зарегистрировать фрагменты, отлетевшие резко в сторону. Вместо этого, как оказывается, они обычно скапливаются в хорошо коллимированные группы, которые были названы струями. Струи, испускаемые под большими углами, столь же важны для получения сведений о структуре протона, как и рассеяние α -частиц на большие углы для изучения строения атома. Они позволяют обнаружить нечто маленькое и жесткое внутри протона (рис. 4).

□

Уже сравнительно давно известно, что протон не является точечной частицей. Он имеет конечный размер, диаметр порядка 10^{-13} см. Хотя это очень малая величина, — действительно, это меньше размера атома примерно в 100 000 раз, — она все же вполне измерима. Но этого нельзя сказать о всех остальных частицах, например об электроне. Даже если электрон и обладает какой-то протяженностью, его размер пока не удалось измерить, и потому сейчас можно рассматривать электрон как математическую точку.

В 1970 г. в Стэнфордском центре линейного ускорителя (СЛАК) впервые удалось в эксперименте получить первое прямое свидетельство в пользу того, что протон обладает не только конечными размерами, но и внутренней структурой. В линейном ускорителе СЛАКа длиной в две мили электроны разгоняются до энергии около 20 млрд. электрон-вольт. (Один электрон-вольт равен энергии, приобретаемой электроном или любой другой частицей с единичным электрическим зарядом, когда он ускоряется при прохождении разности потенциалов в один вольт. Миллиард электрон-вольт сокращенно обозначается как ГэВ, где буква Г обозначает приставку гига-.) Ускоренные электроны сталкивались с протонами и нейтронами в неподвижной мишени. Приборы фиксировали угловое распределение рассеянных электронов и других частиц, рождавшихся в процессе соударения. Хотя большинство электронов проходило через мишень, лишь слабо меняя направление своего движения, число частиц, рассеянных на большие углы, оказалось больше ожидавшегося. Оно превышало значения, предсказываемые для случая диффузной и однородной структуры протона. Избыток сильно рассеянных частиц указывал на то, что внутри протона содержались какие-то объекты, диаметр которых составлял не более одной пятидесятой от размера протона. Ричард П. Фейнман из Калифорнийского технологического института назвал эти объекты, составляющие протон, партонами.

Итак, в экспериментах, проведенных в СЛАКе, была обнаружена внутренняя структура протона, проявляющаяся при взаимодействии с электронами. Затем подобные исследования были проведены при облучении мишени пучком мюонов (которые во многом похожи на электроны, но обладают в 200 раз большей массой) или пучком нейтрино (которые, в некотором смысле, связаны с электронами и мюонами, но не имеют ни массы *), ни электрического заряда). Электроны, мюоны и нейтрино

*) Сейчас появились первые указания на возможное наличие очень малой массы у нейтрино. (Прим. перев.)

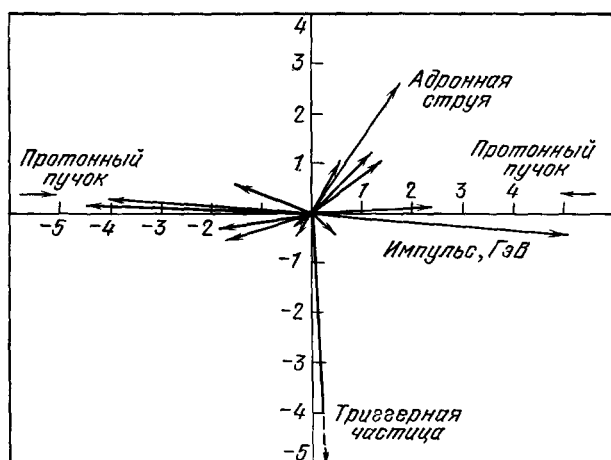


Рис. 3. Центральное столкновение двух протонов приводит к рождению нескольких сильно рассеянных адронов.

Протоны летят навстречу друг другу с равными скоростями вдоль горизонтальной оси и встречаются в центре. Некоторые испущенные частицы слабо отклоняются от оси пучка, но одна из частиц вылетает с большим импульсом под углом, близким к 90° . Наблюдение этой частицы запустило всю установку, зафиксировавшую данное событие. Большой поперечный импульс триггерной частицы компенсируется в значительной степени струей адронов. Однако не все частицы в струе удалось детектировать, так как установка не позволяет регистрировать нейтральные частицы, уносящие обычно около трети импульса струи. Считается, что только поперечные струи возникают за счет жесткого рассеяния кварков. Это событие было наблюдеено на пересекающихся накопительных кольцах (ISR) в ЦЕРНе. Длина каждой стрелки на рисунке пропорциональна импульсу частицы.

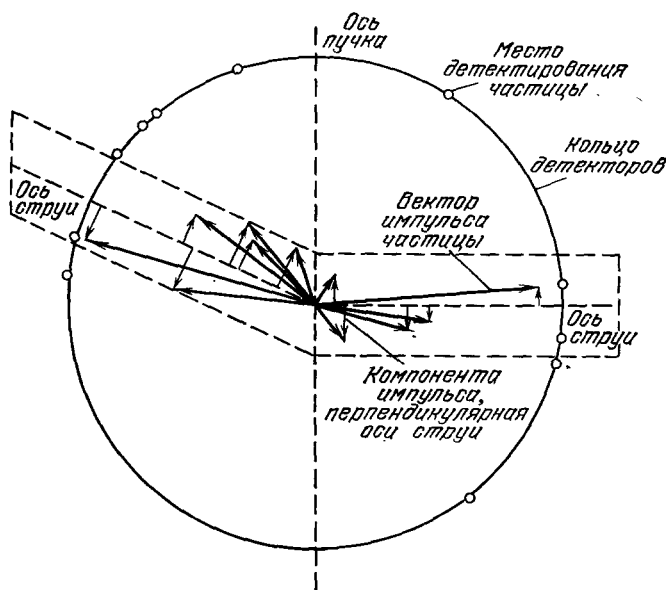


Рис. 4. Струя определяется импульсами образующих ее адронов.

Если бы регистрировались только направления вылета частиц (отмечалось место, где они проходили через детекторы), то распределение частиц было бы весьма широким. Однако струя становится более компактной, если заметить, что компонента импульса частицы, перпендикулярная к оси струи, редко превышает некоторое фиксированное значение. Поэтому частицы с большим импульсом всегда тесно прижаты к оси струи.

вместе называют лептонами. Они являются прекрасными «пробниками» в физических экспериментах, потому что сами по себе они представляются нам сейчас точечными и не обладающими внутренней структурой. Глубоко неупругие процессы рассеяния всех трех сортов лептонов привели к согласующимся результатам: редкие процессы с большими углами вылета

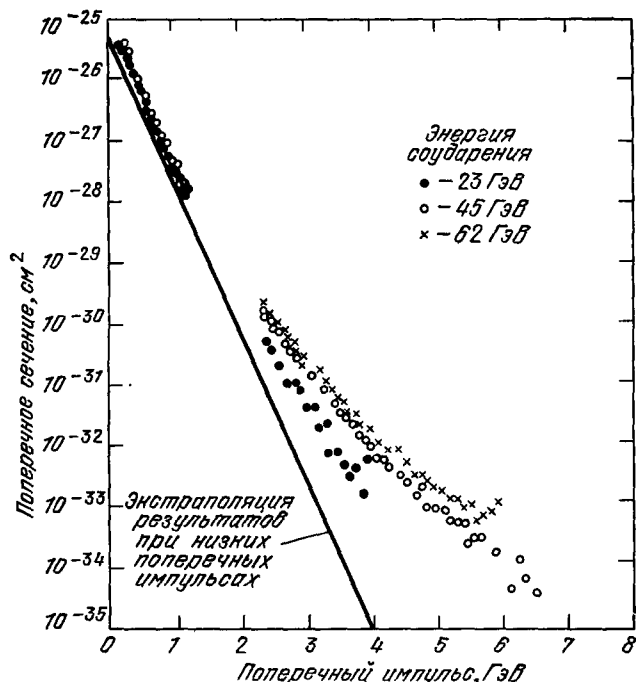


Рис. 5. Частицы с большим поперечным импульсом редко выпускаются в протон-протонных соударениях, но при больших значениях поперечного импульса их число оказывается превышающим ожидавшееся.

Вероятность рождения частицы задается в терминах поперечного сечения, или эффективной площади, определяющей вероятность взаимодействия. При поперечных импульсах меньше примерно 1 ГэВ (миллиард электрон-вольт) вероятность испускания частицы резко падает по мере возрастания ее поперечного импульса. При более высоких значениях поперечных импульсов эта вероятность продолжает падать, но не столь быстро, как это получилось бы при непосредственной экстраполяции результатов, полученных с меньшими поперечными импульсами. Например, вероятность наблюдения частицы с поперечным импульсом 4 ГэВ примерно в 1000 раз больше того, что можно было бы ожидать из такой экстраполяции. Более того, при малых поперечных импульсах вероятность практически не зависит от первичной энергии, тогда как в области больших поперечных импульсов энергия соударения играет заметную роль. Аномально большое число частиц с большими поперечными импульсами явилось первым свидетельством в пользу жесткого рассеяния кварков на кварках. Этот результат одновременно был доложен тремя группами экспериментаторов, работавших на ISR в ЦЕРНе.

частиц удавалось объяснить за счет столкновений налетающих лептонов с какими-то жесткими составляющими частями протона.

Рассеяние лептонов протонами привело к первому экспериментальному указанию на определенные структурные составляющие внутри протона. Взаимодействия этих составляющих между собой удалось впервые четко наблюдать в другой серии экспериментов, начатой в 1972 г., при взаимодействии протонов с протонами. Эксперименты были поставлены тремя группами, работавшими на пересекающихся накопительных кольцах (ISR) Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН), расположенной вблизи Женевы. Соударения протонов с протонами приводили изредка к событиям, в которых высокоэнергичные частицы вылетали под большими углами к осям первичных пучков (рис. 5). Эти результаты

были интерпретированы как доказательство рассеяния некоторого составляющего объекта в одном из протонов составляющей другого протона.

За несколько лет до открытия партонов и начала экспериментов на ISR было предположено, исходя из чисто теоретических аргументов, что протон обладает внутренней структурой. Протон и нейтрон являются членами большого семейства частиц, носящего название «адроны», которые отличаются от лептонов тем, что они подвержены воздействию сильных, или ядерных, сил. Именно сильные взаимодействия ответственны за связь нейтронов и протонов в атомных ядрах. Однако они не имеют никакого отношения к лептонам, т. е. попросту не «чувствуют» их, так же как, например, электрически нейтральная частица не откликается на электрическое поле. Протон и нейтрон были первыми среди обнаруженных адронов. В 40-е годы был открыт еще один тип адронов — пионы.

В 50-е годы вошли в строй несколько мощных ускорителей, и нашему взору открылось неожиданное многообразие новых адронов. Наличие столь многочисленного семейства адронов требовало своего объяснения. Казалось невероятным, чтобы все эти частицы могли быть в равной степени элементарными.

□

Объяснение было предложено в 1963 г. Мюрреем Гелл-Манном и Джорджем Цвейгом, работавшими в Калифорнийском технологическом институте, которые независимо друг от друга пришли примерно в одно и то же время к одинаковым выводам. Они указали, что все известные адроны могли быть объяснены как комбинации, составленные только из трех сортов более фундаментальных частиц, названных Гелл-Манном кварками. Некоторые адроны, включая протон и нейтрон, надо было составлять из трех кварков, тогда как другие (например, пион) состояли из одного кварка и одного антикварка. Свойства, которыми в целом обладает адрон, получаются просто путем суммирования соответствующих свойств его кварковых компонент. Таким способом все известные адроны можно было описать как те или иные комбинации кварков. Более того, все известные комбинации кварков, за одним исключением, соответствовали известным адронам. Исключительная комбинация описывала частицу, названную омега-минус-гипероном, которая и была открыта затем в 1964 г.

Кварковая модель была предложена для объяснения многообразия адронов. Она ничего не говорит явным образом о внутреннем строении какой-либо из этих частиц. Тем не менее когда были обнаружены партоны, появилось естественное желание идентифицировать их с гипотетическими кварками. Некоторые свойства партонов, такие, как их внутренний угловой момент — спин, были измерены и оказались согласующимися с предсказаниями кварковой модели. Более того, сама кварковая модель приобрела заметную поддержку.

Трех «ароматов», или сортов кварков, предложенных в 1963 г., оказалось достаточно для построения всех известных в то время адронов. Вскоре, однако, было предположено, что должен существовать четвертый аромат, характеризующийся новым свойством вещества, названным чармом, или очарованием. Открытие в 1974 г. адрона, обозначаемого как J или пси (J/ψ), явилось сильным свидетельством в пользу очарованного кварка. Вскоре был открыт богатый спектр других адронов с очарованными кварками.

С тех пор были обнаружены частицы с еще одним типом аромата. Считается, что в них содержится кварк с пятым ароматом. Поскольку остальные четыре аромата кварков появляются парами, предполагают, что существует и шестой аромат. Все эти новые адроны хорошо вписываются

ся в схему, задаваемую кварковой моделью. Каждый адрон считается состоящим либо из трех кварков, либо из одного кварка и одного антикварка, выбранных из набора пяти или шести возможных ароматов. Не наблюдалось никаких частиц, которые потребовали бы каких-то других комбинаций.

Вдобавок к аромату, каждый кварк обладает еще одним отличительным свойством, которое в духе оригинальности названий, характеризующей всю номенклатуру кварков, было названо цветом. Именно цвета кварков ответственны за их связь при образовании адронов. Всего имеется три цвета кварков, причем лишь определенные сочетания их оказываются допустимыми.

Роль цвета в связывании кварков внутри адронов аналогична той роли, которую играет электрический заряд для удержания вместе частиц, образующих атом. Это последнее взаимодействие описывается точной и хорошо проверенной теорией — квантовой электродинамикой. Она объясняет притяжение или отталкивание двух заряженных частиц за счет обмена фотонами, или квантами электромагнитного излучения. По образу и подобию квантовой электродинамики была построена и теория, описывающая взаимодействие между цветными кварками. Она называется квантовой хромодинамикой. В ней силы между кварками действуют за счет обмена глюонами, гипотетическими частицами, которые «склеивают» (по англ. — glue — клей. — *Прим. перев.*) кварки вместе. Отличие электромагнетизма от сильных взаимодействий кварков возникает в основном из-за разницы между фотонами и глюонами. Прежде всего, имеется только один сорт фотонов, тогда как существуют глюоны восьми сортов. Более того, фотон обеспечивает действие электромагнитных сил между заряженными частицами, но сам он не несет электрического заряда. В результате частица может испустить или поглотить фотон, не меняя своего заряда. В отличие от этого, глюоны являются цветными частицами, и потому они подвержены воздействию тех сил, переносчиками которых они сами являются. Квантовая хромодинамика привела к ряду успешных предсказаний. Однако эта теория не простая и получить в ней точные результаты не так-то легко. Поэтому она еще не подтверждена с точностью, которая хотя бы отдаленно напоминала прецизионные проверки квантовой электродинамики.

Наличие нескольких сотен адронов, успешно описываемых разрешенными комбинациями кварков, и неудачи поисков хотя бы одного адрона, не объяснимого в терминах таких комбинаций, являются мощным свидетельством в пользу кварковой модели. Тем не менее до сих пор в нашем распоряжении нет того, что могло бы послужить наиболее прямым и наиболее убедительным подтверждением теории — никому еще не удалось выделить кварк в свободном состоянии. Эта задача тем более обескураживает, что в экспериментах по глубоко неупругому рассеянию кварки внутри адронов проявляются как свободно движущиеся частицы, как будто они лишь слабо связаны друг с другом. Кажется, что очень легко выбить один из них наружу. Однако когда это попытались сделать, бомбардируя адрон частицами высоких энергий, испускаемые фрагменты оказались не кварками, а обычными адронами, составленными из обычных комбинаций кварков.

Возможное объяснение этого парадоксального поведения было предложено в рамках квантовой хромодинамики. Предполагается, что эффективная сила взаимодействий между кварками мала на небольших расстояниях и заметно возрастает, когда кварки оказываются раздвинутыми на расстояния, превышающие диаметр протона. Такой закон действия сил как раз обратен законам, управляющим более известными силами

электромагнетизма и гравитации, когда с удалением объектов друг от друга силы становятся все меньше. Из-за столь необычного поведения цветных сил кварки слабо связаны в глубине адрона, тогда как энергия, необходимая для их извлечения оттуда, неограниченно растет по мере разделения кварков.

□

Пока в рамках квантовой хромодинамики не удалось доказать, что кварки внутри адрона навечно связаны. Все еще остается открытой возможность получения свободных кварков в экспериментах при более высоких энергиях. Однако сейчас физикам приходится считаться с последствиями наблюдаемого очевидного удержания кварков. Одно из них состоит в том, что кварки нельзя исследовать обособленно, их приходится изучать в связанном состоянии. Следовательно, наилучший подход к их изучению состоит в исследовании событий рассеяния на большие углы, в которых происходит жесткое столкновение кварка с пробной частицей (которой может быть также другой кварк или глюон), приводящее к рождению струи адронов. Столкновения между частицами легче всего рассматривать в системе координат, в которой центр масс сталкивающихся частиц покоится. В такой системе координат сталкивающиеся частицы приближаются друг к другу с равными, но противоположно направленными импульсами. Если их массы одинаковы, то они сталкиваются с равными скоростями, направленными в разные стороны. Подобно автомобилям, которые столкнулись «лоб в лоб» и остановились, обе частицы отдадут в таком процессе всю свою кинетическую энергию.

В тех экспериментах, где ускоренная частица ударяет по неподвижной мишени, событие в этой лабораторной системе координат выглядит совсем по-другому. Центр масс теперь уже не покоится, а движется вдоль направления падения первичного пучка даже после соударения. В результате характер события заметно меняется. Например, струя частиц, испущенных под углом 90° к направлению пучка в системе центра масс, сносится вдоль направления движения пучка, так что она оказывается отклоняющейся от него всего лишь на несколько градусов. Для того чтобы разглядеть событие в наиболее простой форме, пришлось бы нестись параллельно пучку со скоростью системы центра масс. Хотя это практически неосуществимо, есть математические преобразования, которые фактически совершают это: они преобразуют направления и энергии частиц, наблюдаемых в лабораторных условиях, к эквивалентным им значениям в системе центра масс. Мы будем обсуждать эксперименты с неподвижной мишенью так, как если бы такие преобразования уже были проделаны.

Существует один вид экспериментов в физике высоких энергий, в которых центр масс действительно покоится, а события представляются в простейшей форме, хотя они и наблюдаются в лабораторной системе координат. Это — события, в которых две частицы ускорены так, что их импульсы равны по величине и направлены навстречу друг другу. Такие соударения происходят в накопительных кольцах частиц, где пучки частиц движутся по кругу в противоположных направлениях и проходят друг сквозь друга при каждом обороте. Энергия, высвобождаемая в процессе соударения, попросту равна сумме энергий этих двух пучков.

Столкновения электронов с их античастицами, позитронами, изучаются на накопительных кольцах в ряде лабораторий, включая СЛАК и Немецкий электронный синхротрон (ДЭЗИ) вблизи Гамбурга. В обоих исследовательских центрах электрон-позитронные накопительные кольца действуют с начала 70-х годов при максимальной энергии соударений примерно около 10 ГэВ. Оба центра предприняли постройку еще больших

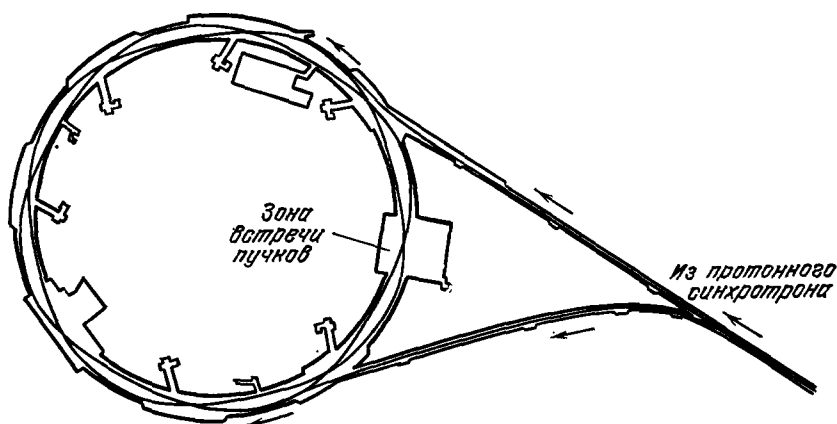


Рис. 6. Пересекающиеся накопительные кольца в ЦЕРНе позволяют изучать соударения движущихся навстречу друг другу по окружности пучков протонов.

Протоны, ускоренные в синхротроне, инжектируются в одно из колец по направлению часовой стрелки, а в другое — в обратном направлении. Они могут вращаться там на устойчивой орбите в течение многих часов. Максимальная энергия каждого из пучков равна 31,5 ГэВ, так что полная энергия соударения равняется 63 ГэВ. Соударения происходят в восьми областях, где кольца пересекаются.

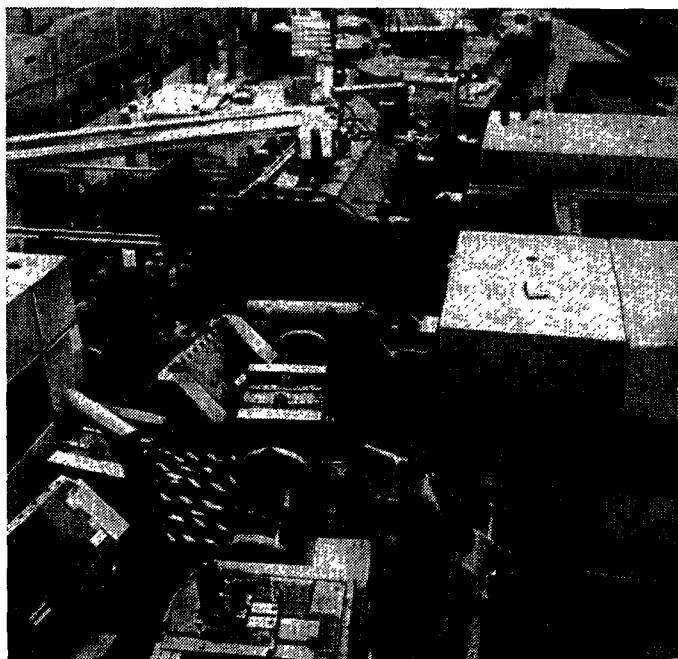


Рис. 7. Зона пересечения пучков на ISR окружена большой системой детекторов частиц с большими поперечными импульсами.

Два пучка протонов циркулируют в трубах, окруженных магнитами, заворачивающими и фокусирующими пучки. Зона пересечения находится внутри более сильного магнита, служащего частью детектирующей системы. Этот магнит искривляет траекторию вновь рожденных частиц, что позволяет измерить их импульсы. Электронные детекторы находятся с боков магнита, а расположенные на еще большем расстоянии две большие стопки стекла, обернутого в черную материю, служат в качестве детекторов запуска. Бетонные и свинцовые кирпичи обеспечивают защиту от радиации во время работы ускорителя. Эксперимент проводится физиками из ЦЕРНа и трех университетов.

колец, в которых энергия соударения превышает указанную выше по крайней мере втрое. Такое кольцо, названное ПЕТРА, уже работает в ДЭЗИ с весны прошлого года. Но еще более высокие энергии достигнуты в соударениях протонов с протонами. Уникальная возможность работы с такими процессами предоставляется на ISR в ЦЕРНе при максимальной энергии, равной 63 ГэВ (рис. 6, 7). Это — наивысшая энергия в системе центра масс, которая получена в настоящее время на ускорителях частиц.

□

Результаты лобового соударения частиц, видимо, легче всего интерпретируются в случае электрон-позитронных взаимодействий. Так как электрон и позитрон являются соответственно частицей и античастицей, они аннигилируют в процессе соударения, образуя состояние чисто электромагнитной природы. Это состояние можно представить себе в виде фотона высокой энергии, но со странными и парадоксальными свойствами. Фундаментальный закон природы требует, чтобы энергия и импульс сохранялись во всех физических процессах. Для того чтобы энергия сохранялась в электрон-позитронных столкновениях, фотон должен уносить энергию в несколько миллиардов электрон-вольт, сообщенную аннигилирующим частицам. Реальный фотон мог бы сделать это, но, двигаясь со скоростью света, он обладал бы большим импульсом. В то же время суммарный импульс электрона и позитрона равен нулю, так как они сталкиваются с равными скоростями, двигаясь в противоположных направлениях. Значит, образующийся фотон должен иметь нулевой импульс и потому вообще не может двигаться.

Разрешение этой дилеммы дается принципом неопределенности в квантовой механике, который допускает временные флуктуации энергии и импульса частицы при условии, что они длятся не чересчур долго или же не распространяются на слишком большие расстояния. Следовательно, фотон может существовать короткие промежутки времени даже в том случае, если его энергия и импульс не сбалансированы, но он обязан вскоре же распасться на некую совокупность частиц, которая сохранила бы полную энергию и импульс. Такой фотон называется виртуальным, чтобы отличить его от реального фотона, время жизни которого неограниченно велико (рис. 8).

Виртуальный фотон может распадаться, вообще говоря, на любой набор частиц, сохраняющий энергию, импульс и разные другие свойства, которые также должны сохраняться (например, такие, как полный электрический заряд). Наиболее просто этим требованиям можно удовлетворить, если виртуальный фотон распадается всего лишь на две компоненты — частицу и античастицу. Энергия сохраняется, если суммарная масса пары совпадает с полной энергией электрона и позитрона. Импульс сохраняется, если частица и античастица удаляются друг от друга с равными скоростями в противоположных направлениях (которые тем не менее не обязаны совпадать с осью соударения электрон-позитронных пучков, а могут быть по-разному ориентированы в пространстве). Электрический заряд и другие свойства также сохраняются при этом.

Наиболее привычной схемой распада виртуального фотона в области низких энергий является рождение новой электрон-позитронной пары с энергией, равной энергии первичной пары. Другой возможный исход реакции — образование двух мюонов, один из которых несет положительный электрический заряд, а другой — отрицательный. Если вокруг области взаимодействия поставить соответствующие детекторы, то можно зарегистрировать электрон-позитронные или мюонные пары по характерным свойствам этих противоположно заряженных частиц, разлетающихся

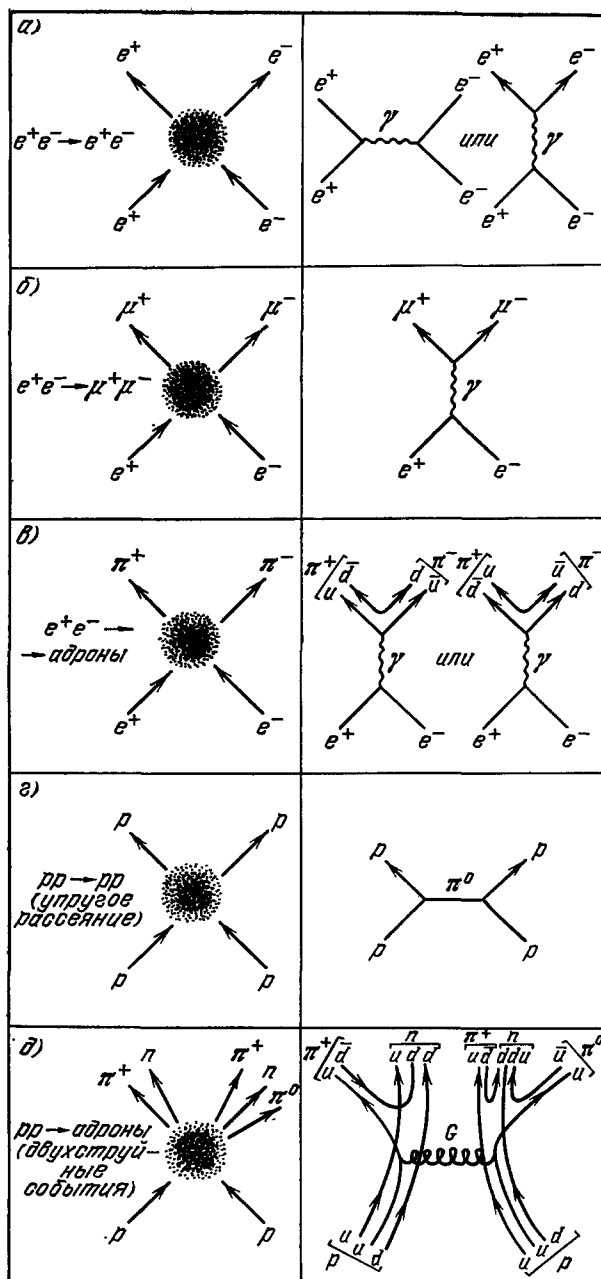


Рис. 8. Виртуальные частицы служат переносчиками взаимодействий между рассеянными кварками и другими частицами.

Поскольку виртуальные частицы не могут жить достаточно долго или проходить заметный путь, а потому не могут быть зарегистрированы, их роль может быть понята из анализа продуктов взаимодействия, наблюдаемых на больших расстояниях. Когда сталкиваются электрон и позитрон (а), они могут попросту скользнуть друг по другу, обменявшись виртуальным фотоном. В то же время электрон и позитрон могут аннигилировать, образовав виртуальный фотон, который может потом распасться на новую электрон-позитронную пару или на положительно и отрицательно заряженные мюоны (б). Виртуальный фотон может также перейти в кварк и антикварк (в), но, в отличие от электронов и мюонов, кварки никогда не удавалось наблюдать на больших расстояниях. Вместо них наблюдали пионы или другие адроны. Каким-то образом кварк «одевается» другими кварк-антикварковыми парами. Столкновения протонов также описываются с помощью обмена виртуальными частицами. Если происходит соударение скользящего типа (г), то взаимодействуют, скорее, сами кварки, чем протон как целое, и обмениваемый квант называется глюоном. Вновь рождаются пары кварков и антикварков и образуются адронные струи (д). Обозначения частиц: e^- — электрон, e^+ — позитрон, μ^+ , μ^- — мюоны, π^+ , π^- , π^0 — пионы, p — протон, n — нейтрон, γ — фотон, u , d — кварки, \bar{u} , \bar{d} — антикварки, G — глюон.

в разные стороны. Однако наибольший интерес для нас представляет третий возможный канал распада. В случае, когда первичная энергия достаточно высока, виртуальный фотон может распадаться на кварк и антикварк. При этом важно, что сами кварк и антикварк не попадают в свободном состоянии в детекторы. Вместо этого мы наблюдаем две струи адронов, испускаемых из точки соударения в противоположных направлениях.

□

В струе могут содержаться разные адроны, но наиболее типично появление в них пионов. При доступных сегодня энергиях может быть испущено более дюжины частиц. Среди них есть как положительно, так и отрицательно заряженные частицы, а также и нейтральные. Поскольку большинство детекторов частиц использует свойство ионизации, вызываемой в среде при прохождении через нее электрически заряженной частицы, в некоторых экспериментах не удается зарегистрировать нейтральные частицы. Однако если нейтральные частицы все же регистрируются, то всегда обнаруживается, что все законы сохранения удовлетворяются полным набором испущенных адронов. Например, суммарный заряд адронов равен нулю и их полный импульс также обращается в нуль.

Процесс превращения одной кварк-антикварковой пары в расходящиеся пучки адронов является наиболее загадочным этапом рождения струй. Возможно, его не удастся полностью описать до тех пор, пока не будет понята природа цветных зарядов. Очевидно, «голые» кварк и антикварк каким-то образом «одеваются» другими кварк-антикварковыми парами, перед тем как удалиться друг от друга на макроскопические расстояния, где их можно было бы зарегистрировать. Поскольку среди рожденных в этом процессе частиц количество вещества и антивещества одинаково, все законы сохранения выполняются. Конечно, имеется еще ограничение на полную энергию: суммарная масса всех образованных в реакции частиц не может превышать энергию, привнесенную в процесс соударения аннигилирующими электроном и позитроном.

Два типа кварков, из которых построены все адронные компоненты обычного вещества, обозначаются как u - и d -кварки. Предположим, что первоначальная пара, рожденная при распаде виртуального фотона, состоит из u -кварка и из соответствующего ему антикварка, который обозначается \bar{u} . Прежде чем эти частицы разойдутся на заметное расстояние друг от друга, должна родиться, по крайней мере, еще одна кварк-антикварковая пара. Пусть она состоит из d -кварка и \bar{d} -антикварка. После этого u -кварк может связаться с \bar{d} -антикварком, и в результате такой комбинации образуется положительно заряженный пион. Оставшиеся d -кварк и \bar{u} -антикварк объединяются в отрицательно заряженный пион. В рассмотренном случае конечное состояние характеризуется наличием только двух частиц, но в более общем случае может происходить рождение дополнительных пар, в результате чего получается более сложный набор адронов.

Пары кварков и пары мюонов, рождающиеся в электрон-позитронной аннигиляции, оказывается, возникают за счет одного и того же процесса (именно, путем распада виртуального фотона). Поэтому кажется весьма разумным принять, что их усредненное по многим событиям угловое распределение должно быть одинаковым. Однако при проверке этой гипотезы на опыте нам приходится нелегко, потому что мы не можем непосредственно указать направление, в котором вылетели кварки. Тем не менее известно, что совокупность всех адронов, в которые превратился первичный

кварк, должна сохранить импульс этого кварка. Поэтому можно, сложив импульсы всех адронов в струе, определить вектор импульса струи в целом. Направление, задаваемое этим вектором, называется осью струи. Оно должно совпадать с направлением движения первоначального кварка. Эксперименты в СЛАК и ДЭЗИ позволили провести сравнение угловых распределений осей струй с распределением мюонов. Как оказалось, согласие этих распределений довольно хорошее.

Полное число событий с рождением мюонов и число событий, в которых образуются адроны, также должны быть связаны. Их соотношение не должно меняться при росте энергии соударения. Точнее, отношение числа адронных событий к числу мюонных событий должно приближаться к константе по мере возрастания энергии. Ожидаемое значение этого отношения зависит только от полного числа типов разных кварков и от их электрических зарядов. Поэтому его можно вычислить непосредственно с помощью кварковой модели. Предположив, что имеются только три кварка изначальной модели Гелл-Манна и каждый из них появляется в трех цветах, получим значение этого отношения, равное двум. При энергиях ниже примерно 3 ГэВ это предсказание хорошо оправдывается на опыте. Выше 3 ГэВ рождается заметное число очарованных частиц. Поэтому в расчетах надо учесть также четвертый, очарованный, кварк. Добавление очарованного кварка (также с тремя цветами) повышает предсказанное отношение до $10/3$, что тоже подтверждается экспериментом. Прекрасное согласие теории с наблюдениями проявляется вновь на очередном энергетическом плато, где вводится новая пара кварков.

Струя частиц не всегда напоминает, на первый взгляд, струю в обычном понимании. Если точку столкновения окружить со всех сторон детекторами, то можно просто указать положение каждого адрона, пересекающего сферу вокруг точки соударения. Частицы, образующие каждую из струй, в принципе могли бы быть разбросаны по большой площади. Конфигурация струи становится, однако, более определенной, если известно не только направление вылета частицы, но и измерен ее импульс. В целом, оказывается, что частицы с наибольшим импульсом тесно прилегают к оси струи. Частицы, рассеянные на большие углы, обычно обладают меньшим импульсом. Итак, струя может быть определена следующим образом: частица считается включенной в струю, если величина компоненты ее импульса, перпендикулярной к оси струи, оказывается ниже определенного значения. В соответствии с этим правилом быстро движущиеся частицы с большим импульсом должны практически лететь вдоль оси струи, чтобы удовлетворить правилу отбора частиц струи, тогда как для медленно движущихся частиц направление их вылета играет не столь заметную роль.

По мере роста полного импульса струи становится все более ощутимой тенденция к концентрации векторов импульсов частиц вблизи оси струи. Эта связь может быть легко прослежена, если заметить, что число частиц в струе растет медленнее, чем ее полный импульс. Скажем, если суммарный импульс удваивается, то число частиц, хотя и возрастет, но менее чем вдвое. Значит, средний импульс, приходящийся на одну частицу, должен увеличиться. Если при этом перпендикулярная компонента импульса все еще не превышает предельного значения, то векторы импульсов частиц должны плотнее выстраиваться вдоль единого направления, т. е. они должны подходить все ближе и ближе к оси струи.

Оказывается, что средний перпендикулярный импульс частиц в струе остается ограниченной величиной, примерно равной 0,3 ГэВ, независимо от полного импульса струи. Хотя такое ограничение может показаться неоправданно произвольным, для него есть разумное объяснение: перпен-

дикулярная компонента импульса и его параллельная оси струи компонента соответствуют разным подпроцессам, которые во многом независимы друг от друга. Малая поперечная компонента, очевидно, получается в процессах, в которых характерный масштаб длины сравним с размером адрона как целого. Большая параллельная компонента связана с прямым взаимодействием точечных кварков. Это различие становится еще более очевидным в струях, рожденных в протон-протонных соударениях, где как кварки, так и адроны имеются уже на изначальном этапе.

До сих пор мы рассматривали в основном лишь эксперименты, в которых адроны бомбардируются лептонами или в которых адроны рождаются при аннигиляции лептонов. Стоит подчеркнуть, что кварковая структура адронов должна проявляться также и в тех случаях, когда сами сталкивающиеся частицы являются адронами. Струя частиц, испускаемых в таких соударениях с большим поперечным (относительно направления первичных пучков) импульсом, будет свидетельствовать тогда в пользу процесса прямого взаимодействия кварков на малых расстояниях. Наиболее очевидным объяснением таких событий служит гипотеза о том, что оба сталкивающиеся протона выделяют по одной из своих составляющих, каждая из которых в процессе взаимодействия порождает по струе адронов.

В то же время, поскольку адроны обладают внутренней структурой, результаты протон-протонных экспериментов более трудно интерпретировать, чем результаты лептонных экспериментов. Когда мы используем электрон в качестве пробника строения протона, то хотя бы налетающая частица является простой, явно точечной и хорошо понятной. Ее взаимодействия описываются точной теорией, квантовой электродинамикой. В протон-протонных соударениях как налетающая частица, так и частица-мишень являются сложными объектами, и теория, описывающая их взаимодействия, квантовая хромодинамика, сама еще проходит проверку. Несмотря на все эти трудности, адронные струи в протон-протонных столкновениях исследовались во многих экспериментах, поставленных в последние несколько лет. В частности, они изучались на большом протонном синхротроне в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми вблизи Чикаго в экспериментах с покоящейся мишенью. Наиболее катастрофические процессы наблюдались на накопительных кольцах ISR в ЦЕРНе (рис. 9).

При идеальной аппаратуре эксперимент с лобовыми соударениями протонов поставить нетрудно. Можно сделать детекторы, которые окружают полностью всю зону взаимодействия, так что удастся зафиксировать любую частицу, вылетающую из этой области. При этом каждую частицу можно будет идентифицировать (включая и заряженные и нейтральные), а их энергии и импульсы будут измерены. Более того, каждое событие, независимо от его характеристик, будет строго зафиксировано, так что в последующем можно отбирать интересующие нас события для детального анализа.

Реальная аппаратура требует идти на ряд компромиссов. Детекторы не могут окружить зону взаимодействия со всех сторон и не смогут идентифицировать каждую частицу. Поэтому реконструкция события зачастую бывает неполной. Более того, не очень-то практично регистрировать и обрабатывать все события для того, чтобы потом выбрать из них те, которые являются интересными для нас.

Даже если бы детектор и электронные вычислительные машины, на которые он передает информацию, справились с записью данных с необходимой для этого скоростью, потребовались бы годы напряженного труда, чтобы выделить несколько событий жесткого рассеяния на большие углы из миллионов или миллиардов «скользящих» соударений с малыми углами.

Вместо этого необходимо положить какие-то критерии, чтобы идентифицировать событие жесткого типа, как только оно происходит. Тогда детектор будет запускаться лишь только для таких событий, которые удовлетворяют выбранным критериям, и будет игнорировать все остальные события. В большинстве проведенных к настоящему времени экспериментов запуск детекторов производился при появлении по крайней мере

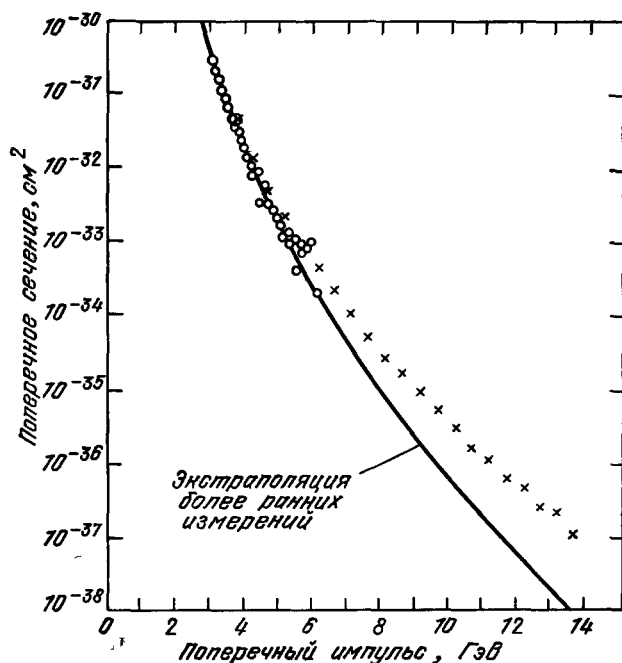


Рис. 9. В проведенных недавно экспериментах на ISR было замечено, что повышенная доля рождающихся частиц с большими поперечными импульсами еще более возрастает при все больших значениях поперечного импульса.

Более ранние результаты показаны черными кружками. Новые данные, изображенные крестиками, заметно отклоняются от той вероятности рождения частиц, которая получалась путем простой экстраполяции результатов измерений при меньших поперечных импульсах. Дальнейшая аномалия могла бы служить указанием на то, что жесткое рассеяние кварков и глюонов становится доминирующей компонентой взаимодействия протонов. Данные были получены с помощью детекторов, показанных на рис. 7. Такой же эффект был отмечен двумя другими группами, работающими на ISR.

пределенным среди нескольких частиц (например, три адрона могут иметь по 2 ГэВ каждый). Однако ни одна из этих частиц не будет достаточно энергичной, чтобы запустить установку. В результате возникает специфический отбор данных с уклоном в сторону необычных событий, в которых одна-единственная частица забирает основную долю полного импульса.

Поэтому была развита другая форма запуска (сначала это было сделано в Лаборатории им. Ферми, затем в ЦЕРНе). При этом используется другой тип детектора, называемый калориметром, который дает сигнал о запуске не тогда, когда импульс отдельной частицы превышает некий порог, а когда полная энергия, выделенная в калориметре, превышает некую наперед заданную величину. Таким способом скорость появления искомых событий увеличивается на два или три порядка по величине.

одной частицы с большим импульсом, перпендикулярным к оси соударения первичных частиц. При выборе величины порогового импульса, равной 3,5 ГэВ, отбирается несколько событий из полного их числа порядка миллиона. Рост порогового импульса до 6 ГэВ снижает долю таких событий до нескольких штук на миллиард.

Одним из недостатков такого механизма запуска является то, что в результате отбрасываются не только скользящие периферические взаимодействия, но и заметное число лобовых. Если установлен порог в 6 ГэВ, то почти невероятно зарегистрировать струю с полным импульсом 6 ГэВ, так как для осуществления этого надо иметь дело с маловероятной ситуацией, когда весь импульс вложен в одну частицу. Конечно, более часто будет реализоваться такая возможность, когда импульс окажется рас-

Хотя изучение струй более непосредственно ведется в электрон-позитронных взаимодействиях, чем в адронных соударениях, важно проводить эксперименты обоих типов. Прежде всего представляет большой интерес исследовать подобие и различие струй, рожденных в столь разных реакциях. Соударения адронов вызывают особый интерес, потому что они дают возможность непосредственно взглянуть на взаимодействия кварков и глюонов. Сейчас в электрон-позитронных накопительных кольцах рождаются струи с наивысшими энергиями, но вскоре лидерство перейдет к экспериментам, в которых будут сталкиваться протоны с антипротонами при энергиях примерно в 10 раз более высоких, чем доступные ныне в протон-протонных соударениях в ISR.

□

Даже после того как струя с большим поперечным импульсом была выбрана среди огромного множества событий протон-протонных соударений, нелегко полностью реконструировать характер события, в котором родилась такая струя. Само взаимодействие является значительно более сложным, чем аннигиляция электрона и позитрона. Обычно испускается больше частиц: в среднем около шестнадцати при наивысших энергиях, достигнутых на ISR. Две струи не обязательно летят строго в противоположные стороны относительно друг друга даже в системе центра масс двух сталкивающихся протонов. Причина кроется в том, что кварки могут двигаться внутри протонов практически независимо, а потому некоторый данный кварк не обязательно несет фиксированную, или хотя бы предсказуемую, долю импульса протона.

Наиболее сильно влияет на однозначность интерпретации протон-протонных данных тот факт, что рождение струи в поперечном направлении отнюдь не является единственным процессом, идущим в реакции, вызванной соударением протонов. Когда электрон и позитрон сближаются, то соударение может быть либо скользящим, периферическим, либо жестким. Когда же сталкиваются оба протона, оно может быть обоих типов одновременно! Конечно, наиболее обычны скользящие соударения. Они обусловлены взаимодействиями, охватывающими только диффузную крупномасштабную структуру протона, и приводят к рождению частиц, слабо отклоняющихся от направления движения начальных сталкивающихся частиц. Другими словами, они порождают продольные струи, которые довольно близко следуют оси пучка. События жесткого рассеяния, как считают, происходят от прямых соударений кварка в одном из протонов с кварком в другом протоне. Глюон также может сталкиваться с другим глюоном или с кварком. Однако когда кварки или глюоны сталкиваются, одновременно идет взаимодействие и диффузных областей протонов. В результате поперечные струи появляются вдобавок к продольным, а отнюдь не вместо них. Оказывается, не всегда легко определить, какой процесс привел к рождению той или иной частицы.

При более низких начальных энергиях и меньших поперечных импульсах, которые были доступны ранее, удавалось продемонстрировать существование струй лишь с помощью статистической обработки, анализируя корреляции адронов, появляющихся на противоположных сторонах от оси пучков. При больших энергиях и более высоком пороге детектора по поперечному импульсу анализ стал намного проще. Теперь можно увидеть струю, глядя лишь на диаграмму события. Совершенно определенно уже нет никаких сомнений в том, что поперечные струи появляются как в электрон-позитронной аннигиляции, так и в протон-протонных соударениях.

Анализ поперечных струй, наблюдаемых в ISR, показывает, что столкновения кварков во многом похожи на соударения лептонов. Для частиц, образующих поперечную струю (но не для тех, что входят в продольные струи), распределение импульса по компонентам, параллельным и перпендикулярным к оси струи, похоже в лептонных и протонных процессах. Этот результат показывает, что процесс одевания удаляющихся друг от друга кварков новыми кварк-антикварковыми парами может идти одинаковым образом в экспериментах столь разных типов. Однако нужна еще дополнительная работа, чтобы подтвердить это предположение.

Результаты, полученные разными экспериментальными группами на ISR, уже дали сильное свидетельство в пользу выдвинутой ранее Ричардом Фейнманом гипотезы о так называемом фейнмановском скейлинге. Гипотеза о скейлинге предполагает, что в среднем каждый адрон в поперечной струе должен нести заданную долю полного импульса струи (а не заданное значение импульса), даже если сам полный импульс растет. Поэтому основная форма струи и способ ее распада на фрагменты не должны меняться с изменением импульса.

□

Теперь, когда наличие адронных струй твердо установлено, в центре внимания и детального исследования оказалась природа тех составляющих, которые приводят к появлению струй, и разработка теории, описывающей поведение этих составляющих. Среди теоретиков еще имеются разногласия по поводу того, находятся ли результаты протон-протонных экспериментов в соответствии с предсказаниями квантовой хромодинамики.

Надо честно признать, что наблюдаемые до сих пор события пока не полностью согласуются с теми детальными вычислениями, которые могут быть проведены сейчас в рамках квантовой хромодинамики. Однако это расхождение может быть вызвано не дефектом теории, а ограничениями, вытекающими из доступных математических процедур. Сильные взаимодействия кварков затрудняют точные вычисления поведения этих кварков при разных обстоятельствах, несмотря на то, что в принципе это поведение определено теорией. Подробные расчеты возможны, практически, только для специальных случаев, когда кварки подходят близко друг к другу и цветные силы, действующие между ними, становятся слабыми. В соударениях, в которых испускаются струи с большим поперечным импульсом, исследуется кварковая структура на малых расстояниях, но все еще предстоит понять, достаточно ли мала достигнутая сейчас область взаимодействия для того, чтобы ее можно было описывать теоретически.

В основном, полученные до сих пор экспериментальные результаты представляются более сложными, чем ожидавшиеся из простейших возможных взаимодействий точечных составляющих. Тем не менее некоторые теоретики считают, что эти события вызваны столкновением индивидуальных кварков и глюонов, а форма струй станет проще, когда будут наблюдаемы события с большими поперечными импульсами. Другие полагают, что отклонения от предсказаний теории вызваны более фундаментальной причиной, а наблюдаемые сейчас струи обусловлены взаимодействием более протяженных объектов внутри протона, таких, как связанные системы из кварка и антикварка.

Однако все согласны с тем, что при больших поперечных импульсах форма струй станет проще. Первые проявления такого упрощения уже были наблюдаемы в недавних протон-протонных экспериментах на ISR, в которых были изучены события с максимальным поперечным импуль-

сом вплоть до 14 ГэВ (см. рис. 9). Скорость рождения пионов с наивысшим поперечным импульсом (больше 6 ГэВ) оказалась слегка превышающей то, что можно было бы ожидать из простой экстраполяции данных при меньших поперечных импульсах. Этот результат согласуется с теоретической моделью, в которой рассеяние отдельных кварков и глюонов описывается квантовой хромодинамикой в простейшем приближении.

□

Для окончательной проверки квантовой хромодинамики надо будет поставить эксперименты со струями с еще большими поперечными импульсами. Родить такие струи можно будет лишь пучками частиц с еще более высокими энергиями. Такие более энергичные пучки будут получены на новых накопительных кольцах, которые планируются или уже строятся сейчас. Как в ЦЕРНе, так и в Лаборатории им. Ферми разработаны планы создания накопительных систем с большими синхротронами, которые позволят сталкивать в противоположные стороны пучки протонов и антипротонов с энергиями от 250 до 1000 ГэВ. Несколько пересекающихся колец для протон-протонных соударений, подобных по виду ISR, но больших по размерам, строятся сейчас в Брукхейвенской национальной лаборатории. Максимальная энергия в системе центра масс будет равна здесь 800 ГэВ, т. е. будет более чем в 10 раз превышать энергии ISR. Еще более грандиозный проект, рассматриваемый в Европе, предполагает постройку электрон-позитронного накопительного кольца, названного ЛЕП, с длиной окружности около 30 километров и максимальной энергией в системе центра масс около 200 ГэВ.

Тем временем накопительные кольца ПЕТРА, введенные в строй действующих летом прошлого года в ДЭЗИ, дали указания на появление нового типа адронных струй. Четыре группы экспериментаторов, работающих на ПЕТРА, независимо друг от друга и с помощью совершенно разных детекторов, наблюдали процессы электрон-позитронной аннигиляции, в которых образуется не две струи, как обычно, а три *) (рис. 10).

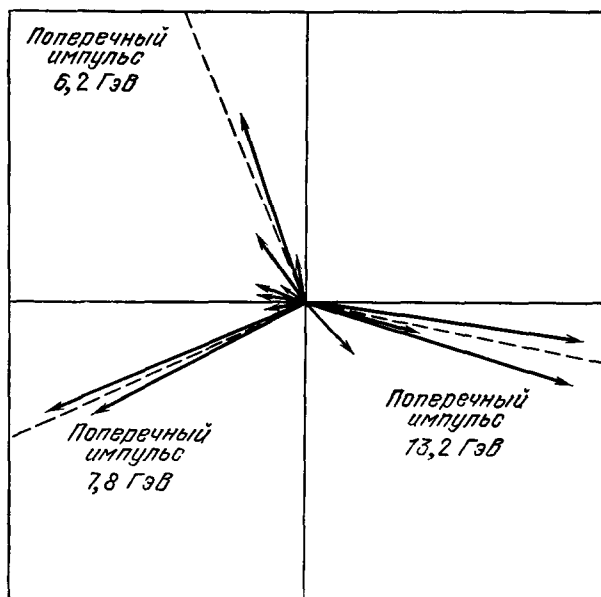


Рис. 10. Трехструйное событие наблюдалось в электрон-позитронной аннигиляции на накопительных кольцах ПЕТРА вблизи Гамбурга.

Две струи образованы пятью детектированными частицами, в третьей — шесть треков. Штриховые линии указывают оси струй, определенные по среднему импульсу зарегистрированных частиц. Подобно двухструйным событиям, трехструйные случаи считаются возникающими за счет рождения кварка и антикварка. Затем одна из этих частиц испускает глюон, который распадается на новую кварк-антикварковую пару, приводящую к новой струе адронов. Это событие было зарегистрировано физиками, работающими с детектором ТАССО. Другие группы также наблюдали трехструйные события на ПЕТРА.

*) См. УФН, 1980, т. 131, с. 715. (Прим. перев.)

Квантовая хромодинамика предлагает возможное объяснение таких трех-струйных событий. Как и в обычных событиях, виртуальный фотон в результате распада дает кварк и антикварк, но одна из этих частиц спонтанно испускает глюон, уменьшая тем самым свою энергию. Получившиеся три частицы продолжают расходиться, причем каждая приобретает свой собственный эскорт кварков и антикварков, затем превращающийся в наблюдаемую струю адронов.

В 50-е годы была надежда на то, что при более высоких энергиях физика сильных взаимодействий станет простой. Все осложняющие картину эффекты, которые теперь могут быть приписаны конечности размеров адронов, как надеялись, исчезнут, и сильные взаимодействия станут столь же легко познаваемы, как электромагнетизм. С точки зрения 50-х годов мы уже достигли нужных энергий, но не получили столь простой картины, которую ожидали увидеть. Простота обнаружена лишь в тех соударениях, где от одной частицы к другой передается большой импульс. Именно в этих соударениях структура вещества проверяется на самых малых расстояниях. Для дальнейшего продвижения потребуются все более высокие энергии.

Однако в погоне за этим все удаляющимся горизонтом мы уже многому научились, познав взаимодействия (как бы сложны они ни были), наблюдаемые при доступных сейчас энергиях. Был открыт новый уровень строения вещества. В экспериментальной области мы обогатились знанием адронных струй, а также ряда других явлений. Квантовая хромодинамика, несмотря на то, что она находится еще в периоде построения, уже дала ряд проверяемых предсказаний. Перспектива соединения этих двух направлений деятельности физиков воспринимается сейчас с большим энтузиазмом.

ЛИТЕРАТУРА

- Politzer H. D.— Phys. Rept. Ser. C, 1974, v. 14, p. 129.
Sivers D., Brodsky S. J.— Ibid., 1976, v. 23, p. 1.
Feldman G. J., Perl M. L.— Ibid., 1977, v. 33, p. 285.