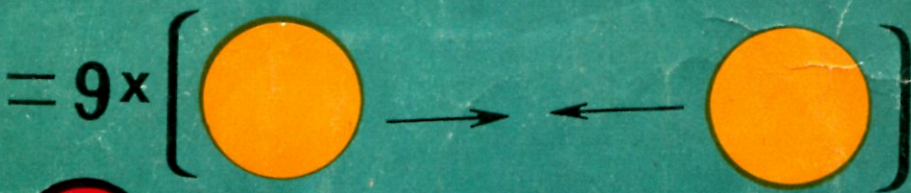
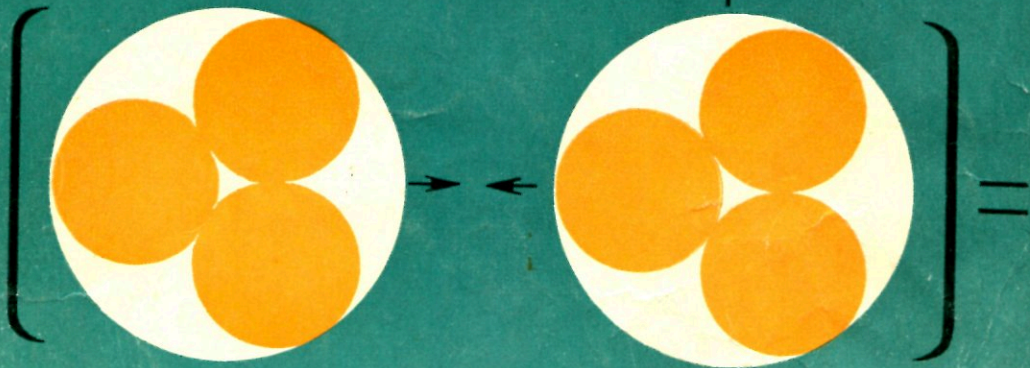
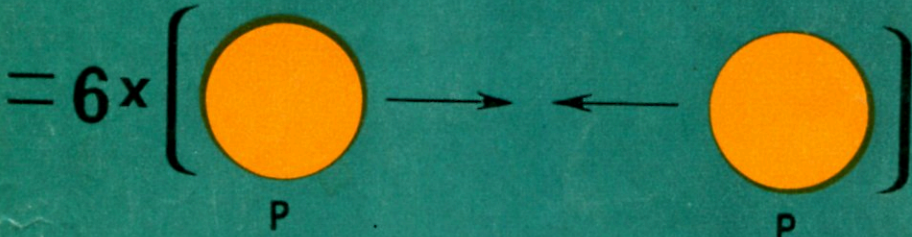
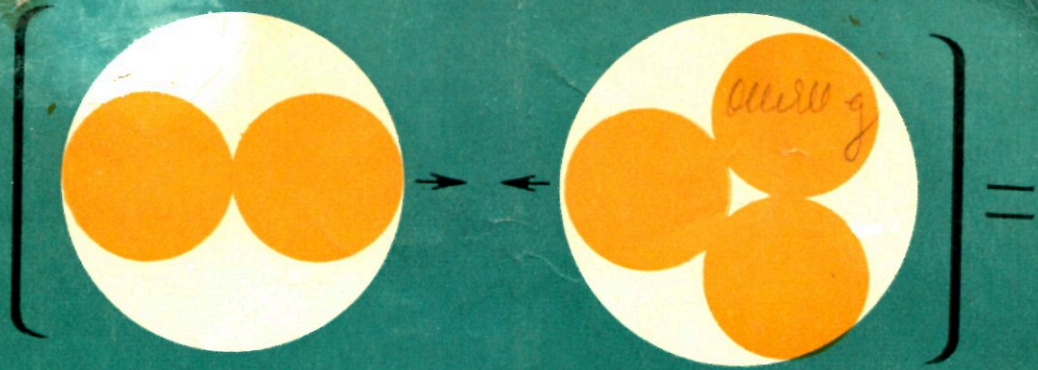


НАД ЧЕМ ДУМАЮТ ФИЗИКИ

π^+



ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ



00
НАД ЧЕМ ДУМАЮТ ФИЗИКИ

ВЫПУСК 9

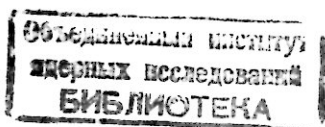
C 346
Э-456

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Перевод с английского
В. П. ПАВЛОВА и А. А. СЛАВНОВА

Под редакцией
А. Д. СУХАНОВА

99062



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1973

Книга является сборником переводов статей из американского научно-популярного журнала «Scientific American», посвященных новейшим теоретическим идеям и экспериментальным открытиям в физике элементарных частиц.

Физика элементарных частиц — чрезвычайно бурно развивающаяся область. Цель сборника — не просто сообщить читателю какие-то новые сведения об элементарных частицах, но и показать на конкретных и ярких примерах, как делаются научные открытия, как работают и над чем думают физики в наши дни.

Все статьи написаны на уровне, доступном для читателя со средним образованием, составлены в живой, увлекательной форме и богато иллюстрированы. Цель сборника — показать оमित широкие круги советских читателей с рядом самых интересных проблем, волнующих сейчас физиков.

В. Д. Баргер, Д. Б. Клайн

РАССЕЯНИЕ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

(ДЕКАБРЬ 1967 г.)

Большинство сведений о свойствах элементарных частиц материи физики черпают из экспериментов, в которых они сталкивают две такие частицы, а затем изучают продукты рассеяния.

Из всех структурных элементов материи, известных современной физике, лишь наиболее крупные молекулы удается «рассмотреть» более или менее непосредственно, получив их изображения с помощью электронного микроскопа. Размер и свойства менее крупных «сущностей» (атомов, ядер и элементарных частиц) приходится определять косвенными экспериментальными методами. Исследование всех элементарных частиц основано в известном смысле всего на одном-единственном типе эксперимента, хотя он и встречается в почти бесчисленном числе модификаций. Это эксперимент по рассеянию, в котором сначала сталкивают две частицы, а затем изучают результаты столкновения. Иногда частицы рассеиваются друг на друге, почти как два бильiardных шара, т. е. выходят из столкновения неизменными. В других случаях с ними происходят сложные превращения, в результате которых исчезают сталкивающиеся и одновременно появляются другие элементарные частицы.

Изучение подобных явлений вдохновляется двумя целями. Первая — открыть еще более фундаментальные составляющие тех частиц, которые ныне считаются элементарными. Вторая — лучше понять силы, которые управляют поведением и взаимодействиями элементарных частиц. Такое понимание не просто помогло бы завершить физическую картину природы Вселенной. Оно также дало бы ответ на вопрос о пределе делимости материи.

В течение последних десяти лет была разработана изысканная технология рождения и исследования субъядерных составляющих материи. Типичная цепочка событий, приводящая к рождению большого числа элементарных частиц, изображена на рис. 1.1. Прежде всего получают множество протонов, нагревая газообразный водород до температуры, при которой ядра водорода, т. е. просто отдельные протоны, освобождаются от электронов. Поскольку протоны заряжены положительно, электрическое поле будет разгонять их по прямой линии, в то время как магнитное поле изгибает пути протонов, превращая их в окружности. Комбинируя электрическое и магнитное поля, можно ускорять протоны, движущиеся по окружностям, до очень высоких энергий. Современные ускорители, основанные на этом принципе, могут сообщать протонам энергию, которая в

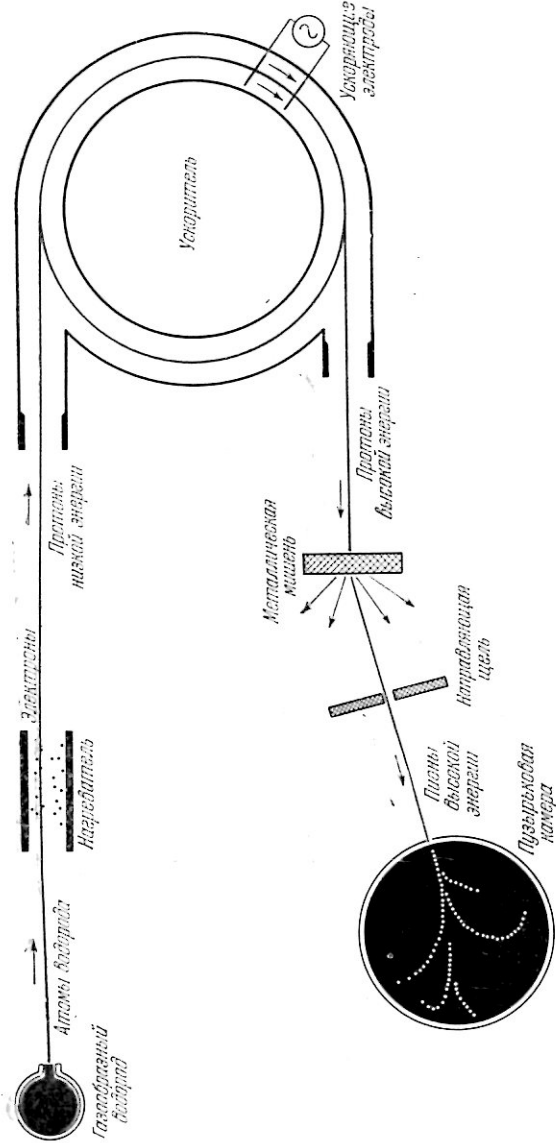


Рис. 1.1. На этом рисунке представлена типичная последовательность событий в эксперименте по рассеянию при высоких энергиях. Протоны низкой энергии (порядка мегавольт электрон-вольт) получают путем нагревания газообразного водорода, в процессе которого из него удаляются электроны. Затем протоны попадают в ускоритель, где они оказываются под действием комбинации магнитного поля, заставляющего их двигаться по окружности, и электрического поля, обеспечивающего увеличение скорости. После того, как они ускоряются до энергии порядка 30 Гэв, триактывают на металлическую мишень, где в результате взаимодействия протонов с ядрами мишени порождается множество новых частиц. После вылета из мишени производится отбор некоторых типов частиц и они направляются в пузырьковую камеру. В ней удается наблюдать взаимодействие этих частиц с помощью линий из пузырьков, образующихся в жидком водороде при прохождении заряженных частиц.

30 раз превышает их энергию покоя*). (Энергия покоя и масса покоя частицы связаны соотношением Эйнштейна $E = mc^2$. Энергия покоя протона составляет около 1 Гэв .)

Когда протоны приобретают в ускорителе очень высокую энергию, скажем 30 Гэв , они направляются на мишень, роль которой может играть пластинка из какого-нибудь обычного металла. Как только протонный пучок ударяет по поверхности мишени, рождаются все известные элементарные частицы, которые и вылетают с ее другой стороны, обладая энергиями в широком интервале значений. Одной из наиболее часто рождающихся частиц является пион или π -мезон.

Каждый падающий протон в среднем выбивает из металлической мишени четыре-пять пионов. Часть пионов заряжена положительно, часть — отрицательно, и есть электрически нейтральные пионы. За исключением заряда физические свойства положительных, отрицательных и нейтральных пионов почти одинаковы. Положительные или отрицательные пионы отклоняются дополнительным полем и попадают на другую мишень. Именно в этой второй мишени можно изучать рассеяние пионов другими элементарными частицами.

Вторая мишень представляет собой чаще всего цилиндр диаметром около 1 м и немного меньшей высоты, заполненный жидким водородом при температуре кипения (27° по абсолютной шкале температур). Можно считать, что жидкий водород состоит из свободных протонов. Пока заряженный пион пересекает такую камеру, теплота, выделяемая при движении частицы, заставляет жидкий водород закипеть, приводя к появлению цепочки пузырьков. Такая мишень называется пузырьковой камерой. Итак, хотя сам пион чрезвычайно мал и абсолютно невидим, пузырьки в камере дают нам средство косвенного наблюдения его траектории.

Когда движущийся пион сталкивается в камере с каким-то протоном, рассеянные заряженные частицы тоже проявляют себя тонкими «спунктирами» пузырьков. Вскоре после столкновения фотокамера фиксирует интересующее нас «событие», фотографируя образовавшийся узор из пузырьков (рис. 1.2). Заряженные частицы, возникающие при столкновении, движутся по криволинейным путям, поскольку вся пузырьковая камера помещена в магнитное поле. Кривизна траектории служит мерой импульса частицы. В ходе типичного эксперимента приходится делать многие сотни тысяч снимков, чтобы набрать несколько тысяч событий интересующего нас типа. Получив в руки такие фотографии, физик может начать исследование конкретного вида взаимодействия частиц.

В физике элементарных частиц используются некоторые общие законы сохранения, известные из других областей физики. Анализ столкновения частиц производится в предположении, что энергия, импульс и электрический заряд сохраняются. Например, закон сохранения энергии означает, что полная энергия падающих частиц равна полной энергии вылетающих частиц. Кроме электрического заряда элементарные частицы обладают зарядом другого типа. Это так называемый барионный заряд, который также абсолютно сохраняется: сумма барионных зарядов падающих частиц равна сумме барионных зарядов вылетающих частиц. Барионный заряд протона (или нейтрона) равен $+1$, а для пиона он равен нулю.

Уверенность физиков в сохранении барионного заряда основана на том, что ни разу еще не наблюдалась реакция, в которой суммарные

*) В настоящее время мощнейший в мире Серпуховский ускоритель протонов сообщает им энергию в 76 Гэв (1 Гэв (гигаэлектрон-вольт) = 1 миллиарду электрон-вольт), что в 80 раз превышает их энергию покоя. (Прим. ред.)

бариионные заряды падающих и вылетающих частиц отличались бы друг от друга. Вооруженные такими эмпирическими законами сохранения, экспериментаторы оказываются в состоянии классифицировать и изучать

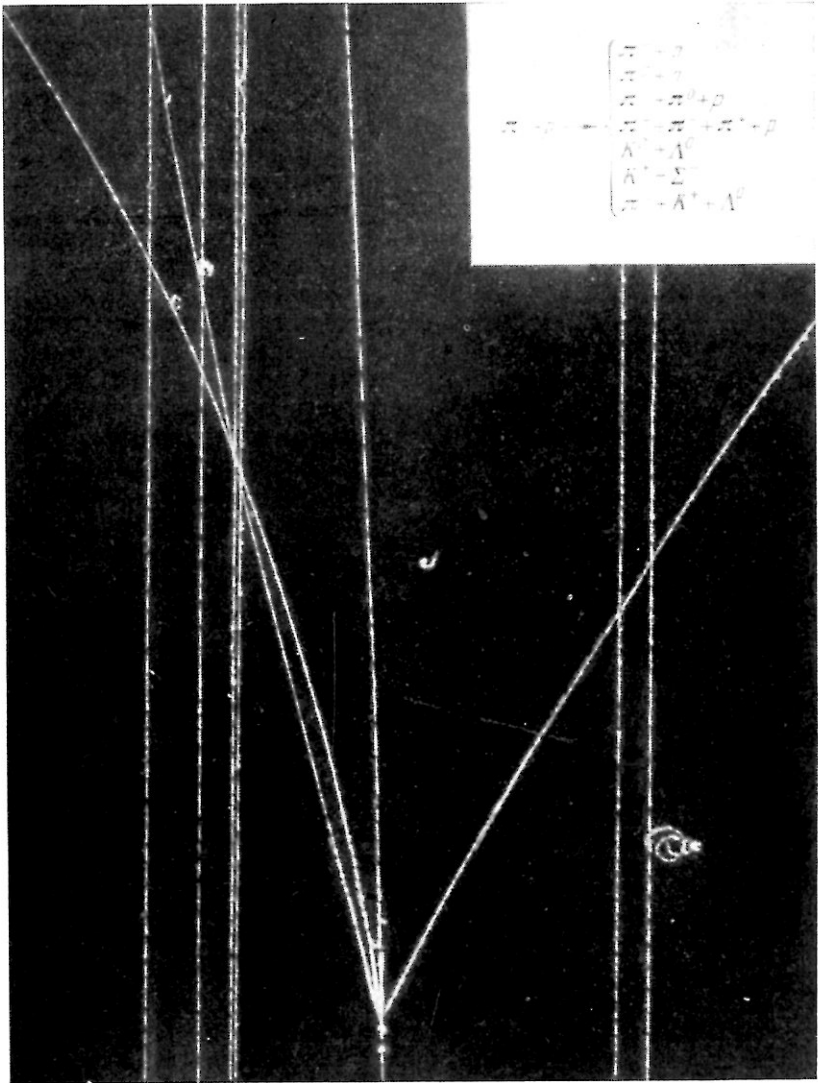


Рис. 1.2. В нижней части фотографии показано столкновение при высокой энергии быстро движущегося отрицательного пиона или π^- -мезона с неподвижным протоном. Снимок был сделан на большой пузырьковой камере Бруксгейвской национальной лаборатории. Возможные продукты такого столкновения указаны на приведенной диаграмме. Кроме пионов (π) и протонов (p) в числе этих продуктов могут быть различные комбинации нейтронов (n), K -мезонов (K), лямбда-частиц (Λ) или сигма-частиц (Σ). На диаграмме первым приведено единственно возможное упругое столкновение (в ходе которого падающие частицы остаются неизменными). Остальные реакции — неупругие столкновения. Индексы у символов частиц отмечают тот факт, являются ли они заряженными или нейтральными. Нейтральные частицы не оставляют треков в пузырьковой камере.

множество процессов, происходящих в результате столкновений пионов высокой энергии с протонами в пузырьковой камере.

Коль скоро установлено, что общие законы сохранения, известные в физике, справедливы и для столкновений элементарных частиц при высо-

ких энергиях, физики могут увереннее перейти к выяснению вопроса о механизме, управляющем подобными реакциями. Какие же силы вступают в шире в ходе этих бурных столкновений и что служит причиной тех перестроек, которые имеют место как между частицами, так и внутри их? Наводящие соображения, позволяющие ответить на эти вопросы, существенным образом связаны с внутренней структурой элементарных частиц. Чтобы обсуждать эти проблемы дальше, обратимся к ряду основополагающих теоретических идей, создающих канву, следуя которой физики исследуют столкновения и структуру элементарных частиц.

Из общепризнанных принципов, лежащих в основе современной теоретической физики, следует, что взаимодействия элементарных частиц можно трактовать так, как если бы они были составлены из других элементарных частиц. Например, протон можно рассматривать как связанное состояние нейтрона и положительного пиона. Спонтанная диссоциация протона на положительный пион и нейтрон никогда не наблюдалась как реальное событие, происходящее в пузырьковой камере. Такое событие противоречило бы законам сохранения энергии и импульса. (Чтобы убедиться в том, что подобная диссоциация нарушила бы закон сохранения энергии, предположим, что первоначально протон покоился. Энергия покоящейся частицы определяется ее массой покоя. Поскольку сумма масс покоя нейтрона и пиона больше массы покоя протона, при такой диссоциации энергия не может сохраняться.)

Почти во всех мыслимых теориях предполагается, что пионы могут существовать и в «виртуальных» состояниях, когда их масса отлична от массы покоя «реального» пиона, наблюдаемого в лаборатории*). Эти виртуальные пионы могут быть испущены протоном без нарушения законов сохранения энергии и импульса. Однако, в отличие от реальных пионов, они не в состоянии удалиться сколько-нибудь далеко от протона и оставить следы в пузырьковой камере. При таком подходе масса пиона становится непрерывным параметром.

Предположение о существовании виртуальных пионов необходимо для объяснения некоторых характерных свойств элементарных частиц. Элементарные частицы, подобно молекулам, атомам и ядрам, имеют конечные размеры. В случае протона существование такого конечного размера следует отчасти отнести за счет облака виртуальных пионов, которые им постоянно испускаются и поглощаются. Тем самым, наблюдаемые размеры и детальная структура протона оказываются связанными с существованием виртуальных пионов.

Поскольку виртуальные пионы нельзя наблюдать непосредственно, всю информацию о них приходится извлекать из изучения процессов рассеяния. Столкновение между протоном и нейтроном может быть описано как двухстадийный процесс с участием виртуального пиона (рис. 1.3).

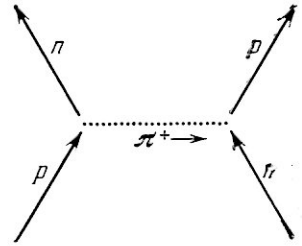


Рис. 1.3. Рассеяние протона на нейтроне может быть интерпретировано как двухстадийный процесс, включающий обмен «виртуальным» π -мезоном, который может считаться переносчиком энергии и импульса. Сначала падающий протон диссоциирует на уходящий нейтрон и виртуальный пион. Затем виртуальный пион поглощается падающим нейтроном и образует уходящий протон. Для простоты считается, что перед столкновением обе частицы движутся навстречу друг другу, хотя на практике одна из частиц первоначально покоится.

*) Более обстоятельное изложение концепции виртуальных частиц можно найти в этом сборнике в статье Г. В. Кендалла и В. К. Г. Пановского «Структура протона и нейтрона». (Прим. ред.)

Падающий пион диссоциирует на уходящий нейтрон и виртуальный пион. Прежде чем последний будет вновь поглощен испустившим его протоном, он успевает поглотиться падающим нейтроном, в результате чего образуется уходящий протон. При таком понимании столкновения протона и нейтрона энергия и импульс сохраняются на каждой стадии. Виртуальный пион может рассматриваться в качестве переносчика энергии и импульса. Помимо законов сохранения энергии и импульса на каждой стадии справедливы и все другие законы сохранения.

В настоящее время предполагается, что не только пионы, но и все другие элементарные частицы существуют как в виртуальных, так и в реальных состояниях. Концепция виртуальных частиц представляет собой

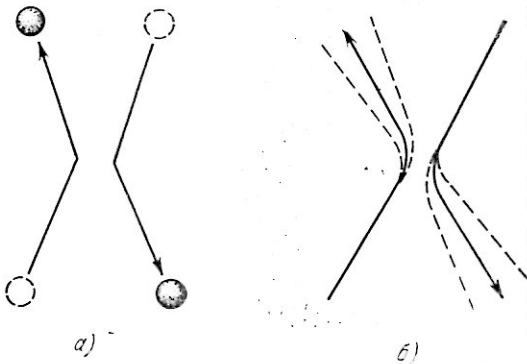


Рис. 1.4. Биллиардные шары и субатомные частицы рассеиваются по-разному. В случае рассеяния биллиардных шаров (а) направления движения и скорости шаров можно предсказать, зная их первоначальные направления движения и скорости. В случае одного акта рассеяния субатомных частиц (б) нельзя предсказать направления движения и скорости уходящих частиц, исключая тот факт, что конечная конфигурация должна всегда сохранять энергию и импульс.

ядро нашего понимания взаимодействия элементарных частиц.

Хотя всякий процесс рассеяния должен удовлетворять основным законам сохранения энергии и импульса, между случаями рассеяния макроскопических объектов и субатомных частиц имеет место фундаментальное различие. В случае рассеяния биллиардных шаров их конечная конфигурация полностью определяется заданием начальных направлений движения и скоростей шаров (рис. 1.4). В то же время в случае рассеяния субатомных частиц конкретная конфигурация частиц после столкновения никогда не может быть предсказана с полной определенностью. Такая неопределенность является

следствием волновой природы субатомных частиц и описывается современной квантовой механикой. В области субатомных масштабов теория позволяет предсказать лишь вероятность появления каждой конкретной конфигурации частиц после столкновения. Поэтому теории, описывающие рассеяние элементарных частиц, не могут быть проверены путем наблюдения одного столкновения (например, путем изучения одной фотографии в пузырьковой камере). В их справедливости можно убедиться, лишь наблюдая большое число столкновений.

В процессах рассеяния элементарных частиц падающие частицы могут сохранить свое первоначальное естество и после столкновения (такой процесс называется упругим рассеянием), или же в результате столкновения они могут превратиться в две другие уходящие частицы (неупругое рассеяние). Простейшими примерами этих двух основных типов столкновений в случае рассеяния пионов (π) на протонах (p) являются реакции $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + p$ (упругий случай) и $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ (неупругий случай). (Мы пока отложим обсуждение тех неупругих столкновений, когда в конечном состоянии оказывается более двух частиц.) Истинная теория элементарных частиц должна правильно предсказывать вероятность упругого или неупругого столкновения. Эти предсказания, вообще говоря, будут зависеть от энергий элементарных частиц и направлений, в которых будут рассеиваться эти частицы. Качественные предсказания относительно ха-

рактера столкновений иногда можно сделать, исходя из знания сортов тех виртуальных частиц, которые могут появиться на промежуточной стадии данного процесса рассеяния.

Фактически рассеяние элементарных частиц можно использовать для выяснения характеристик процесса обмена виртуальными частицами. При взаимодействии двух частиц различают два крайних случая — рассеяние вперед и рассеяние назад. При рассеянии вперед импульсы и направление движения каждой частицы после столкновения близки к тем значениям, которые были у них до столкновения. При рассеянии назад направления движения каждой падающей частицы после столкновения близки к тем значениям, которые были у них до столкновения. При рассеянии назад направление движения каждой падающей частицы в результате столкновения меняется почти на противоположное. Одним из главных достижений в теории рассеяния элементарных частиц была интерпретация рассеяния вперед как обмена виртуальным мезоном (например, виртуальным пионом) и рассеяния назад как обменом виртуальным барионом (например, виртуальным протоном или виртуальным нейтроном).

Если на промежуточной стадии реакции происходит обмен виртуальным пионом, то частицы рассеиваются, как бы едва касаясь друг друга (рис. 1.5). В этом случае реакция $p + n \rightarrow p + n$ может происходить за счет обмена виртуальным нейтральным пионом. Поскольку сталкивающиеся протон и нейтрон гораздо массивнее сравнительно легкого виртуального пиона, их столкновение можно сравнить со следующей картинкой. Представим, будто два грузовичка двигались навстречу друг другу и в тот момент, когда один проезжал мимо другого, с него перебросили мешок с песком. Поэтому с подавляющей вероятностью можно утверждать, что падающий протон (или нейтрон) лишь слегка отклонится от первоначального направления движения. Угол, образуемый направлениями движения уходящего и падающего протонов (называемый углом рассеяния), в процессе с обменом виртуальным пионом в силу сказанного будет мал. Если вероятность рассеяния как функцию угла рассеяния для типичного процесса с обменом виртуальным мезоном нанести на график, то становится очевидным, что вероятность такого процесса имеет заметное значение только при малых углах рассеяния или для рассеяния вперед (рис. 1.6).

Рассеяние назад представляет собой более интригующий процесс, когда имеет место обмен либо виртуальным нейтроном, либо виртуальным протоном. В качестве простейшего примера рассмотрим реакцию $\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$, которая может идти посредством обмена виртуальным нейтроном. В этой реакции уходящий протон движется в том же направлении,

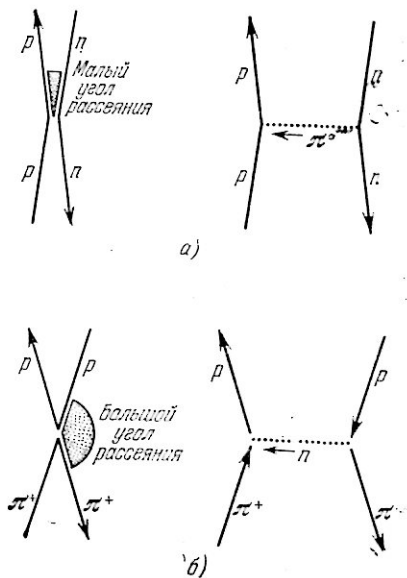


Рис. 1.5. Величина угла рассеяния обусловлена типом виртуальной частицы, которой обмениваются две взаимодействующие реальные частицы. В случае столкновения протона и нейтрона (случай а), когда происходит обмен виртуальным π⁰-мезоном, угол рассеяния стремится уменьшиться (рассеяние вперед). В случае столкновения между π⁺-мезоном и протоном (случай б), когда происходит обмен виртуальным нейтроном, угол рассеяния стремится увеличиться (рассеяние назад).

что и падающий пион. Иными словами, угол рассеяния между направлениями падающего и уходящего протонов очень велик. В случае процесса, происходящего с обменом виртуальным нейтроном, вероятность того, что

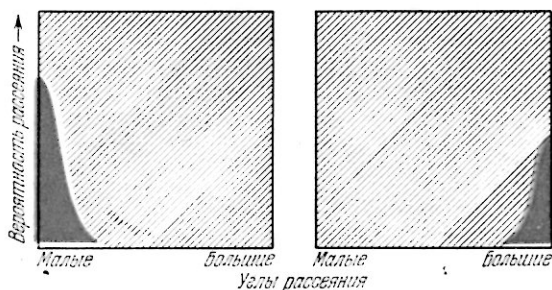


Рис. 1.6. Вероятность рассеяния зависит, вообще говоря, от того, является ли участвующая в обмене виртуальная частица мезоном (например, пионом) или барионом (например, нейтроном или протоном). Обмен виртуальным мезоном происходит с большей вероятностью только при малых углах рассеяния (левый график), тогда как обмен виртуальным барионом происходит с большей вероятностью только при больших углах рассеяния (правый график). В некоторых процессах рассеяния (например, в реакции $\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$) на графиках наблюдаются пики как при рассеянии вперед, так и при рассеянии назад, что может служить указанием на участие в обмене и виртуальных мезонов, и виртуальных барионов.

угла рассеяния. Сравнивая эти экспериментальные графики с предсказываемыми вероятностями процессов рассеяния, можно установить, связан

падающие пион и протон рассеяется друг на друге, будет отлична от нуля только для больших углов рассеяния, т.е. для рассеяния назад. Фотография пузырьковой камеры, на которой запечатлен такой случай рассеяния назад, приведена на рис. 1.7.

Концепция виртуальных частиц оказалась объектом прямой экспериментальной проверки. Измеряя траектории частиц на фотографиях пузырьковой камеры, содержащих соответствующие процессы рассеяния, физики могут построить график, отражающий число событий, наблюдаемых при разных значениях

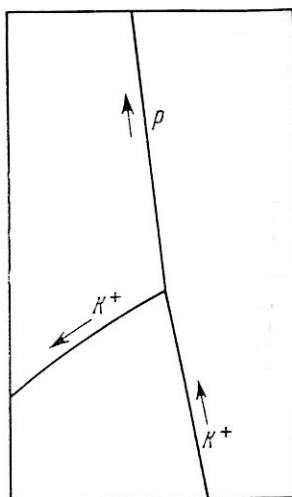
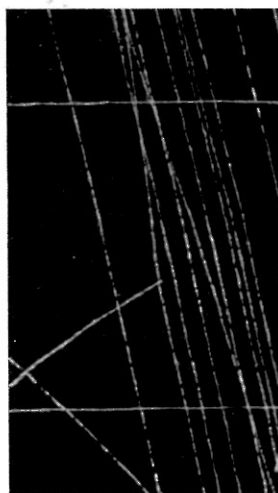


Рис. 1.7. Здесь представлен случай рассеяния назад на фотографии пузырьковой камеры слева и соответствующем чертеже справа. Рассматриваемая реакция: $K^+ + p \rightarrow p + K^+$. Первоначально протон в пузырьковой камере покоился, а падающий K^+ -мезон имел энергию 3,5 Гэв. Рассеянный назад K^+ -мезон можно узнать по большей плотности его трека в пузырьковой камере, что говорит о его более медленном движении по сравнению с другими частицами. Чтобы проанализировать это столкновение, необходимо данные об углах и импульсах сначала преобразовать к такой системе отсчета, в которой импульсы K^+ -мезона и протона равны друг другу.

ли данный процесс с обменом виртуальным мезоном или же с обменом виртуальным барионом. В некоторых процессах наблюдаемые события

концентрируются на графике и при малых и при больших углах рассеяния, что указывает на присутствие в области взаимодействия между рассеиваемыми частицами как виртуальных мезонов, так и виртуальных барионов. В некоторых других реакциях на графиках наблюдаются пики либо только для рассеяния вперед, либо только для рассеяния назад. Наличие или отсутствие таких пиков можно непосредственно интерпретировать в смысле существования или несуществования виртуальных частиц, которые могли бы участвовать в обмене. Но поскольку в свою очередь каждая реальная частица ассоциируется с соответствующей виртуальной, то наблюдение пиков, отвечающих рассеянию вперед или назад, служит источником непосредственной информации о существовании или несуществовании реальных частиц. Такое качественное теоретическое отождествление наблюдаемых на графиках пиков, отвечающих рассеянию вперед и назад, с частицами, которые можно обнаружить в природе, оказалось в чрезвычайно хорошем согласии с экспериментом.

К числу наиболее интересных ранних открытий относительно природы экспериментальных частиц принадлежит необходимость приписать каждой частице врожденный собственный момент количества движения (импульса). В весьма поверхностном изложении элементарные частицы ведут себя подобно вращающимся волчкам. Точнее, общим фундаментальным физическим свойством вращающихся волчков и элементарных частиц является наличие у них момента импульса. В случае вращающегося волчка момент импульса просто связан с его размерами и числом оборотов вокруг оси в секунду.

Хотя элементарные частицы нельзя себе представлять просто в виде объектов, вращающихся вокруг оси, каждой частице все же необходимо приписать собственный момент импульса (спин). Экспериментально наличие спина у частиц было установлено давно, и измерение спинов на опыте сейчас не представляет никаких затруднений. В то же время никакой наглядной картины, отражающей внутреннюю природу спина элементарных частиц, пока не придумали.

Наблюдаемый на опыте спин каждой элементарной частицы имеет всегда одно и то же значение. Кроме того, спины различных частиц всегда кратны основной единице спина, подобно тому, как заряды частиц всегда кратны основной единице заряда (а именно, заряду протона). Если измерять спины с помощью этой основной единицы, то нейтрон и протон будут иметь спин, равный $1/2$, а пион — спин, равный нулю. Оказывается, что все элементарные частицы можно разделить на два класса: фермионы, частицы с полуцелым спином $1/2, 3/2, 5/2, 7/2$ и т. д., и бозоны, частицы с целым спином $0, 1, 2, 3$ и т. д.

Возникает естественный вопрос. Не может ли спин виртуальной частицы принимать непрерывные значения подобно тому, как это имеет место для массы этой частицы. Эта гипотеза была предметом интенсивных исследований в течение последних нескольких лет и привела к серьезному прояснению проблемы взаимодействия элементарных частиц при высоких энергиях.

Создание теории, базирующейся на представлении о непрерывности значений массы и спина для виртуальной частицы, революционизировало наше понимание природы элементарных частиц. В этой новой теории исходят из наличия глубокой связи между спином и массой частицы независимо от того, является ли она реальной или виртуальной. Макроскопическую аналогию такой связи между спином и массой частицы можно найти,

изучая вращение волчка. Когда вращение волчка ускоряется, он приобретает энергию (и, тем самым, в силу формулы Эйнштейна и массу). В то же время волчок приобретает и момент импульса. Таким образом, эффективная масса волчка возрастает вместе с возрастанием спина. Аналогичная связь, хотя и гораздо более хитрой природы, существует между эффективной массой и спином реальных и виртуальных частиц. Она показана графически на рис. 1.8. Из-за громадного объема информации, содержащейся в этой иллюстрации (ее обычно называют диаграммой Чу — Фраучи), она стала играть

центральную роль в исследовании элементарных частиц.

Подобные диаграммы представляют собой обобщение ранее обсуждавшейся нами связи между реальными и виртуальными частицами. В качестве конкретного примера рассмотрим диаграмму, которая отражает в себе реальное и виртуальное состояние протона. Каждая точка на диагональной прямой (которая называется траекторией Редже для протона) представляет собой протон в определенном состоянии. То состояние протона, которое наблюдается на фотографиях пузырьковой камеры, имеет спин $1/2$ и массу, эквивалентную энергии примерно в 1 Гэв . Поэтому его можно найти на этой диаграмме в виде точки траектории Редже с указанными координатами.

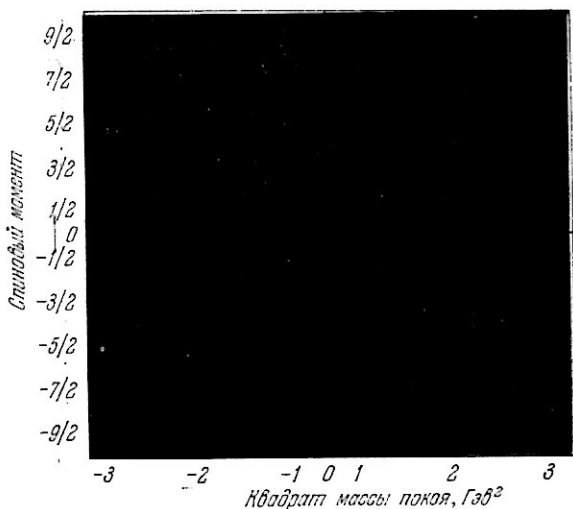


Рис. 1.8. Диаграмма Чу-Фраучи для членов протонного семейства показывает связь между значениями спина и массами реальных и виртуальных частиц. Реальные частицы, наблюдаемые в пузырьковой камере, отмечены черными точками. Протон (А) имеет спин $1/2$ и массу покоя, эквивалентную энергии в 1 Гэв . Наблюдаемые частицы с большими массами (В, В) называются рекурренциями (повторениями) и имеют спины $5/2, 9/2$ и т. д. Каждая точка на диагонали (которая называется траекторией Редже) представляет собой возможное состояние протонного семейства. Точки на траектории Редже в нижнем левом квадранте диаграммы представляют собой виртуальные состояния протонного семейства, которые участвуют на промежуточных стадиях в процессах рассеяния в качестве объектов обмена, переносящих энергию и импульс.

Интригующая сторона этой графической зависимости спина от массы связана с точками траектории, лежащими справа от точки, отвечающей наблюдаемому протону. По мере дальнейшего роста траектории она пересекает точки, отвечающие другим положительным полуцелым значениям спина (например, $3/2, 5/2, 7/2, 9/2$ и т. д.), которые также являются допустимыми значениями спинов для наблюдаемых фермионов. Действительно, согласно теоретическим предсказаниям в качестве членов протонного семейства могли бы существовать только частицы со спинами $1/2, 5/2, 9/2$ и т. д. Таким образом, в дополнение к протону со спином $1/2$ предсказывается существование цепочки частиц со все возрастающими значениями масс и спинов. Удивительным подтверждением этих предсказаний явилось недавнее экспериментальное обнаружение нескольких первых членов подобных семейств элементарных частиц.

Количество элементарных частиц, открываемых каждый год, увеличивается во все возрастающем темпе. Значительное большинство этих частиц уже удалось расклассифицировать по семействам указанного выше

типа. В действительности, если траекторию Редже продолжить до бесконечности, то обнаружится интересная возможность, согласно которой число частиц, входящих в данное семейство, может оказаться даже бесконечным! Насколько нам известно, каждый член любого из семейств частиц в равной мере фундаментален. Следовательно, протон в нем ничем не выделен, за исключением того, что он обладает наименьшими значениями массы и спина во всей протонной цепочке. Точно так же, как несколько столетий назад была отброшена идея о Земле как о центре Вселенной, теперь следует пересмотреть представление о том, что протон занимает сколь угодно выделенное положение среди элементарных частиц.

Аналогичным образом теория предсказывает существование семейств мезонов. Таким образом, следует ожидать, что пион со спином 0 является наименьшим членом пионного семейства со спинами 0, 2, 4 и т. д. Несколько недавно открытых мезонов оказались членами таких семейств.

В каждое отдельное семейство входит большое число элементарных частиц. В соответствии с проведенным выше обсуждением процессов рассеяния, каждая из этих фундаментальных частиц может существовать в виртуальном состоянии и, тем самым, может служить переносчиком взаимодействия в процессах рассеяния. Очевидно, что распространение концепции виртуальных частиц на все их характеристики и, в частности, введение понятия виртуального спина приводят к тому, что в обмене при рассеянии должны участвовать все индивидуальные члены семейств частиц. По существу все частицы одного семейства следует рассматривать как единую сущность, обладающую виртуальным спином и виртуальной массой, и именно эта сущность должна участвовать в обмене в процессах рассеяния. На диаграмме Чу-Фраучи для протонного семейства любая точка на траектории слева от нулевой виртуальной массы представляет собой все протонное семейство в некотором состоянии, которое может быть промежуточным в процессе рассеяния.

Вера в представление о виртуальном спине частиц значительно окрепла благодаря успехам этой теории в классификации множества элементарных частиц по указанным семействам. Еще более непосредственное подтверждение справедливости идеи виртуального спина получено из экспериментов по рассеянию элементарных частиц при высоких энергиях.

Вероятность рассеяния двух частиц зависит от угла рассеяния и от полной энергии падающих частиц. Как уже говорилось, зависимость может быть связана с типом элементарной частицы, участвующей в обмене. Обмен виртуальным мезоном приводит преимущественно к рассеянию вперед, а обмен виртуальным барионом — к рассеянию назад.

Из анализа данных по рассеянию можно извлечь и другую важную информацию. Так, например, можно использовать зависимость вероятности рассеяния от полной энергии падающих частиц. Теория предсказывает, что при фиксированном значении квадрата массы виртуальной частицы, участвующей в обмене, виртуальный спин этой частицы определяет скорость, с которой убывает вероятность рассеяния с ростом энергии. Чем ниже значение виртуального спина, тем меньше зависимость вероятности рассеяния падающих частиц от энергии при ее увеличении. Поэтому если взять значение виртуального спина из траектории Редже, то теория делает определенные предсказания относительно зависимости вероятности рассеяния от энергии. Эти предсказания явились предметом прямой экспериментальной проверки и были удивительным образом подтверждены данными по рассеянию элементарных частиц при высоких энергиях.

В теории частиц с виртуальной массой и виртуальным спином описание процессов рассеяния и классификация наблюдаемых частиц по

семействам рассматриваются на равном основании. Общим звеном, связывающим, казалось бы, два столь различных аспекта теории элементарных частиц, являются траектории Редже. Полная самосогласованность теоретической связи между рассеянием и классификацией элементарных частиц по семействам подтверждает ту гипотезу, что все элементарные частицы состоят друг из друга, что материя в природе не делима ни на какие части более мелкие, чем элементарные частицы. Однако следует вместе с тем подчеркнуть, что такая интерпретация не разделяется всеми физиками. Мы изложим ниже и другую точку зрения, согласно которой существуют

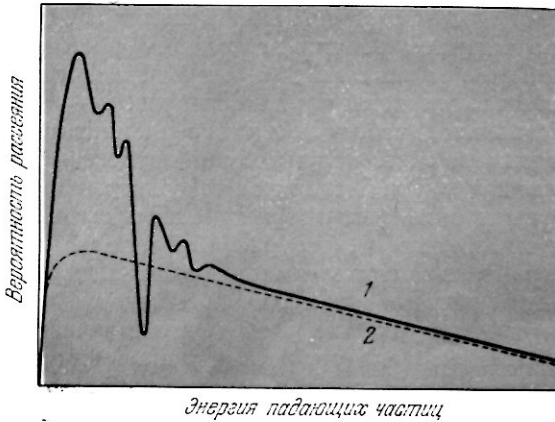


Рис. 1.9. При рассеянии элементарных частиц низких энергий недавно были открыты интерференционные явления. Эти явления имеют вид флюктуаций в вероятности рассеяния (кривая 1), когда энергия падающих частиц убывает. Кривая 2 соответствует вероятности рассеяния, полученной на основе представлений об обмене виртуальными частицами; при высоких энергиях этот процесс явно отвечает за все рассеяние. Флюктуации при низких энергиях, по мнению авторов, объясняются взаимодействием двух факторов: обмена виртуальными частицами и образования и последующего распада «резонансных» частиц.

Эти интерференционные явления проявляются как флюктуации в вероятности рассеяния по мере уменьшения энергии падающих частиц. Подобные интерференционные явления хорошо известны из атомной и ядерной физики. Пример такого эффекта в рассеянии элементарных частиц приведен на рис. 1.9. Кривая 2 на нем — это вероятность рассеяния, которая следует из представления об обмене виртуальными частицами. При высоких энергиях обмен виртуальными частицами полностью отвечает за рассеяние. Однако если энергия падающих частиц убывает, то возникает новое явление и наблюдаемая вероятность рассеяния не может более объясняться только вкладом обмена виртуальной частицей.

Мы интерпретируем эти интерференционные явления как результат взаимодействия двух различных физических механизмов процесса рассеяния. Один из них — это обмен виртуальной частицей, а другой, который становится существенным только при низких энергиях, имеет дело с образованием новых «состояний» частиц. Простая наглядная модель второго механизма получится, если представить себе частицы как шарики из смолы. Когда частицы сталкиваются, они как бы слипаются на очень короткий срок, в течение которого всю систему можно рассматривать в качестве «резонансной» частицы*). Затем резонансная частица распадается на

*) См. статью Р. Д. Хилла «Резонансные частицы» в третьем выпуске этой серии. (Прим. ред.)

«элементы» мироздания еще более фундаментальные, чем сами элементарные частицы.

Перспектива систематического объяснения всех экспериментальных данных по двухчастичному рассеянию при высоких энергиях на основе предположения об ограниченном числе обменов виртуальными частицами вызвала исключительный интерес у физиков. Неменьший интерес привлекло объяснение интерференционных явлений, которые были недавно обнаружены в процессах рассеяния элементарных частиц при энергиях более низких, чем те, что обсуждались нами выше. Эти интерференционные

уходящие частицы. Диаграмма, иллюстрирующая образование и распад такого резонансного состояния, приведена на рис. 1.10. Вообще говоря, в ролях промежуточных резонансных частиц в процессах рассеяния должны выступать все частицы в той мере, в какой это разрешают основные законы сохранения.

Как видно из графика вероятности рассеяния, в результате сложения этих двух различных механизмов рассеяния может возникнуть усиливающая или гасящая интерференция. Расположение максимумов и минимумов на графике непосредственно связано с массами резонансных частиц, участвующих в рассеянии. Эти резонансные частицы являются членами семейств того же типа, что приведены на диаграмме Чу — Фраучи.

Изучение этих интерференционных явлений породило большие надежды на выяснение спектров масс элементарных частиц и «паспортизацию» детальных характеристик резонансных частиц. Кроме того, успешное объяснение сложных интерференционных явлений подобного рода создает уверенность в том, что можно установить тесные связи между явлениями рассеяния и характером спектра масс частиц.

Когда падающий пион сталкивается с протоном в пузырьковой камере, число частиц, которые могут при этом родиться, ограничено только полной энергией падающего пиона и покоящегося протона. Таким образом, при достаточно высокой начальной энергии может появиться большое количество конечных состояний различных типов.

В качестве примера на диаграмме рис. 1.2 приведено несколько из многочисленных энергетически дозволенных реакций в случае π^-p -столкновения.

Когда π -мезон пролетает через пузырьковую камеру, существует вероятность того, что он пересечет ее, ни с чем не взаимодействовав, и вероятность того, что он столкнется с протоном, породив одно из многих возможных конечных состояний. Очевидно, что сумма этих двух вероятностей равна единице. Вероятность того, что π -мезон с чем-либо взаимодействует, называется полной вероятностью рассеяния.

Вследствие большой сложности реакций с тремя частицами в конечном состоянии существующая сейчас теория не способна сделать определенные предсказания о каждой из этих реакций. Однако довольно значительная информация о совокупности процессов со многими частицами в конечном состоянии содержится в полной вероятности рассеяния. Основная теорема теории рассеяния, известная под названием оптической теоремы, связывает полную вероятность рассеяния с вероятностью упругого рассеяния вперед. Тем самым, теоретические предсказания об упругом рассеянии вперед, которые делаются на основе представлений об обмене виртуальным мезоном, определяют также и полную вероятность рассеяния. Когда происходит обмен семейством мезонов, отвечающим одной траектории Редже, значение виртуального спина на этой траектории, соответствующее нулевой виртуальной массе, ответственно за характер поведения вероятности упругого рассеяния вперед и, в силу оптической теоремы, за полную вероятность рассеяния. В результате оказывается, что виртуальный спин

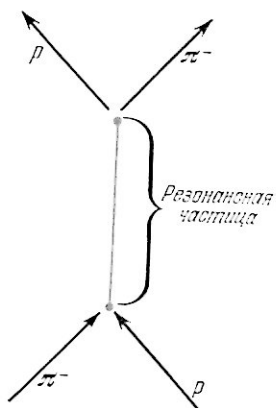


Рис. 1.10. Резонансная частица — это временное соединение двух сталкивающихся частиц. В этом примере упругого π^-p -рассеяния падающие пион и протон объединяются и образуют резонансную частицу (цветная линия), которая через короткий промежуток времени (около 10^{-23} сек) распадается на уходящие пион и протон.

траектории Редже, участвующей в обмене, фиксирует энергетическую зависимость полной вероятности рассеяния.

Недавно в Брукхейвенской национальной лаборатории были проделаны весьма точные измерения полной вероятности рассеяния в случае π^-p - и π^+p -столкновений вплоть до максимально достижимых на ускорителях энергий (26 Гэв). Энергетическую зависимость полученных результатов удается успешно описать с помощью гипотезы обмена виртуальным мезоном. При этом в экспериментальных данных были обнаружены две замечательные тенденции.

Первая из этих тенденций состоит в том, что полная вероятность рассеяния при сверхвысоких энергиях стремится к постоянному значению. С точки зрения наличия чрезвычайно большого числа многочастичных конечных состояний, которые энергетически допустимы при возрастании энергии, интуитивно следовало бы ожидать, что полная вероятность рассеяния должна была бы в действительности возрастать. Если полная вероятность рассеяния действительно постоянна при высоких энергиях, то это означает, что обмен производится мезоном с виртуальным спином, равным единице. Хотя и есть возможность приписать недавно открытые мезоны к траектории Редже, на которой лежит виртуальная частица со спином, равным единице, и массой, равной нулю, сколько-нибудь определенного отождествления до сих пор сделано не было.

Вторая интересная тенденция, обнаруженная в результатах экспериментов в Брукхейвене, состоит в том, что при возрастании энергии полные вероятности рассеяния π^-p и π^+p стремятся к одной и той же величине. Вновь, как и выше, интуитивно мы не смогли бы прийти к такому выводу, поскольку для этих двух процессов реализуются разные конечные состояния. В то же время предположение об обмене одной траекторией Редже с виртуальным спином 1 и виртуальной массой 0 приводит сразу к предсказанию равенства полных вероятностей рассеяния для процессов π^-p и π^+p при сверхвысоких энергиях.

Произведенные эксперименты и развитие теории показывают, что мы, возможно, находимся в преддверии полного объяснения процессов рассеяния элементарных частиц. Чтобы получить дальнейшее подтверждение высказанных выше идей, необходимо изучить поведение полной вероятности рассеяния при более высоких энергиях*). Последнее, по всей вероятности, окажется осуществимым с пуском гигантских ускорителей на 200 Гэв в США и на 300 Гэв в Европе, строительство которых сейчас планируется. Через десятилетие или около того в нашем распоряжении будет изобилие экспериментальных данных, полученных на этих машинах.

Историческое развитие науки критическим образом зависело от открытия все более и более фундаментальных составляющих материи. На каждой стадии исследования известные частицы (молекулы, атомы, ядра, протоны и т. п.) представлялись в качестве последних и окончательных кирпичиков мироздания. Сейчас физики вновь столкнулись с этой вечной проблемой и, как и следовало ожидать, относительно делимости элементарных частиц на неоткрытые еще составные части возникли две противоположные системы взглядов.

Одна из самых новейших теоретических идей была высказана Мюрреем Гелл-Манном и Георгом Цвайгом из Калифорнийского технологического института, которые предложили строить все элементарные частицы из

*) Проведенные за последние годы эксперименты по рассеянию на протонном ускорителе в г. Серпухове в основном подтвердили (при более высоких энергиях) данные, приведенные в этой статье (см. УФН 104, № 4, 687 (1971)). (Прим. перев.)

шести субчастиц, трех «кварков» и трех «антикварков». В отличие от всех частиц, открытых до сих пор, кварки и антикварки должны были бы нести электрический и барионный заряды, равные трети либо двум третям соответствующих зарядов протона. В этой схеме протон строится из трех кварков, а пион — из кварка и антикварка. Физики-экспериментаторы предприняли активные поиски кварков среди продуктов столкновения частиц при высоких энергиях, но никаких позитивных указаний на их существование получено не было. Если бы протон действительно был слабо связанной системой из трех кварков, то масса кварка равнялась бы трети массы

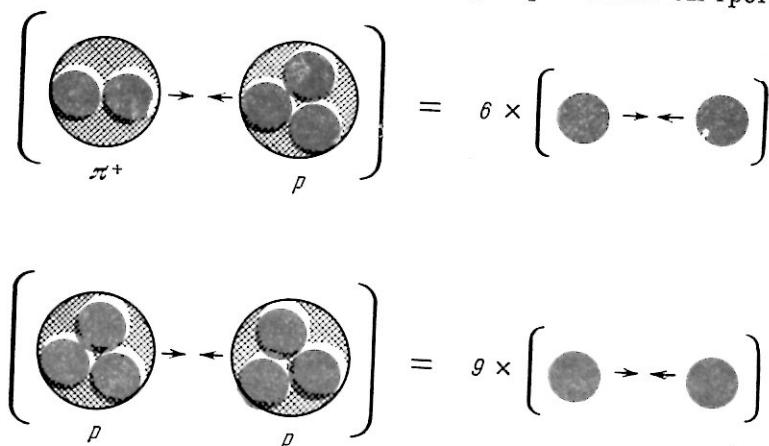


Рис. 1.11. На этом рисунке в высшей степени схематично приведена кварковая модель упругого рассеяния вперед элементарных частиц. В этой модели предполагается, что π^+ -мезон состоит из кварка и антикварка, а протон состоит из трех кварков. Это позволяет свести упругое рассеяние двух частиц к сумме отдельных столкновений составляющих их кварков. Полные вероятности рассеяния кварка на кварке и кварка на антикварке предполагаются равными друг другу. Согласно модели кварков отношение полных вероятностей рассеяния пиона на протоне и протона на протоне при сверхвысоких энергиях приближается к двум третям.

протона. Однако частицы с такими малыми массами должны были бы, по всей вероятности, в изобилии рождаться при уже достигнутых на ускорителях энергиях. Поэтому накопленный экспериментальный опыт указывает на возможный нижний предел массы кварка, и он в три раза превосходит массу протона!*) Тем самым, для образования протона из трех столь массивных кварков требуется чудовищная энергия связи. Такая ситуация порывает с исторической непрерывностью открытий, в которых энергия связи сложных состояний всегда оказывалась много меньше массы самого состояния.

Одно из самых интересных теоретических предсказаний модели кварков относится к полной вероятности рассеяния элементарных частиц при высоких энергиях. Упругое рассеяние вперед в моделях кварков схематически представлено на рис. 1.11. На этом рисунке столкновения фундаментальных частиц представляются в виде суммы всевозможных упругих столкновений пар кварков и антикварков. (Предполагается, что вероятности рассеяния кварков и антикварков при высоких энергиях одинаковы.) Данная модель позволяет сделать очень интересное предсказание: отношение полной вероятности π^+p -рассеяния к полной вероятности pp -рассеяния

*) После проведения экспериментов на самом мощном в мире ускорителе протонов в г. Сергухове нижняя граница массы кварков повысилась до семи протонных масс. (Прим. перев.)

при сверхвысоких энергиях приближается к двум третям. Существующие экспериментальные данные по рассеянию при высоких энергиях дают для этого отношения число, близкое к двум третям. Это прославленное отношение рассматривается в некоторых кругах как подтверждение представлений о кварковой структуре элементарных частиц.

Согласно другой точке зрения историческое исследование все более фундаментальных составляющих материи закончилось на уровне существующих разновидностей элементарных частиц. Полная самосогласованность описания элементарных частиц, состоящих друг из друга, рассматривается в качестве подтверждения того факта, что эти частицы действительно состоят друг из друга. Эта основная философская концепция, впервые высказанная Джеффри Чу из Калифорнийского университета в Беркли, основана на предположении, что все элементарные частицы в равной мере фундаментальны — в мире элементарных частиц царит полная демократия. Существующие основания в пользу этой точки зрения исходят из двух источников. Во-первых, тот факт, что протон лежит на траектории Редже, населенной многими другими частицами, означает, что протон не более фундаментален, чем другие члены протонного семейства. Аналогичное утверждение можно, вероятно, высказать и о мезонных системах. Во-вторых, успешное описание рассеяния при высоких энергиях в терминах наблюдаемых частиц делает весьма правдоподобным предположение, что обмен такими частицами создает как раз те силы, которые приводят к существованию наблюдаемых частиц.

Наши надежды на успешный выбор между этими двумя точками зрения связаны с дальнейшим изучением рассеяния элементарных частиц при сверхвысоких энергиях. Величайшим результатом последующих нескольких десятилетий будет открытие того, какой именно путь выбрала природа: кварки или демократию?

Г. В. Кендалл, В. К. Г. Пановский

СТРУКТУРА ПРОТОНА И НЕЙТРОНА

(ИЮНЬ 1971 г.)

Исследования протона и нейтрона путем «просвечивания» их пучком электронов сверхвысокой энергии показали, что эти «элементарные» частицы имеют сложную внутреннюю структуру, включающую в себя некие точечноподобные образования.

Шестьдесят пять лет назад Эрнест Резерфорд, наблюдая рассеяние α -частиц тонкими металлическими фольгами, пришел к выводу, что атом не является однородным по структуре телом, а содержит отрицательно заряженные электроны, вращающиеся вокруг маленького, но массивного, положительно заряженного ядра. С того времени физики в различных лабораториях неоднократно ставили эксперименты по рассеянию частиц все возрастающей энергии для того, чтобы установить структуру сначала атома, затем ядра и, наконец, основных составляющих ядро частиц: протона и нейтрона. Однородны ли по структуре эти «элементарные» ядерные частицы? Недавние исследования, осуществленные с электронами, обладавшими энергией в 21 Гэв, на двухмиллионном ускорителе Стэнфордского центра линейных ускорителей (SLAC, СЛАК) (рис. 2.1) дают сильные основания думать, что история вновь повторяется в областях пространства, которые в 100 000 раз меньше размеров атома. Оказалось, что характер рассеяния электронов сверхвысокой энергии на протонах и нейтронах отличается от того, что предсказывалось теоретиками до сих пор. Предварительные выводы говорят о том, что эти ядерные частицы обладают сложной внутренней структурой, включающей в себя точечноподобные образования, названные партонами*). Имеются признаки того, что партоны обладают рядом свойств, которые ранее приписывались другим гипотетическим частицам — кваркам.

Знание внутренней структуры протона и нейтрона может явиться ключом к пониманию природы «сильных» взаимодействий, которые не позволяют развалиться атомным ядрам и обеспечивают стабильность вещества во Вселенной. Сильные взаимодействия проявляют себя в ядерных реакциях, которые идут на звездах, или, на более современном языке, обеспечивают работу атомных электростанций и мощь ядерных взрывов. Хотя использование сильных взаимодействий в промышленности стало уже привычным делом, природа и источник этих сил все еще недостаточно ясны.

Кроме проявления сильных взаимодействий протоны и нейтроны реагируют на электромагнитные взаимодействия, которые по интенсивности в сто раз слабее сильных. Обе ядерные частицы ведут себя подобно крошеч-

*) От английского слова «part» — часть, доля. (Прим. ред.)

ным магнитикам, и обе они содержат как-то распределенные электрические заряды (хотя заряд нейтрона в целом равен нулю). Сильные взаимодействия проявляют себя только при очень тесном сближении взаимодействующих частиц (это расстояние должно быть сравнимым с их собственным диаметром, т. е. составлять около 10^{-13} см). В то же время электромагнитные взаимодействия обладают бесконечным радиусом действия, причем их

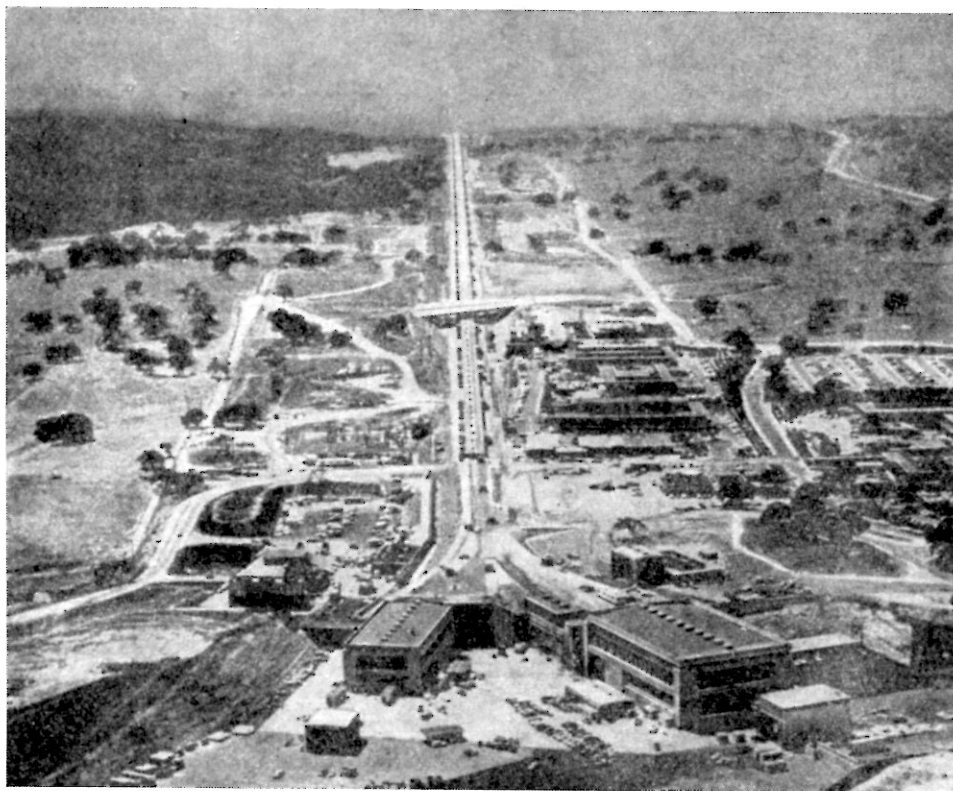


Рис. 2.1. Для получения экспериментальных результатов, изложенных в этой статье, был использован двухмиллиный электронный ускоритель из Стэнфордского центра линейных ускорителей. Электронный пучок, достигнув максимальной энергии в 21 Гэв, направляется в вакуумную трубку, окруженную клистроном и фокусирующими магнитами. В конце своего пути электронный пучок попадает в камеру «распределения пучков», после чего направляется на мишени, помещенные внутри двух больших зданий на переднем плане рисунка.

интенсивность убывает с расстоянием по закону обратных квадратов. Поскольку и нейтрон, и протон реагируют на электромагнитные взаимодействия, они рассеивают направленные на них электроны. Процессы рассеяния такого типа оказались ключом к познанию их структуры.

Поскольку эксперименты в Стэнфорде по существу дела подобны экспериментам Резерфорда, будет весьма полезно дать краткий обзор применявшейся им методики и полученных результатов. Резерфорд имел дело с природным источником α -частиц (частицы с зарядом $+2$, оказавшиеся впоследствии ядрами гелия), помещенным в ящик с высоким вакуумом, снабженный коллиматором. Последнее обстоятельство позволяло выделить пучок частиц, который ударял в мишень, представлявшую собой металлическую фольгу (рис. 2.2). Указанный ящик был также снабжен экраном

из сернистого цинка, который мог сцинтиллировать под ударами α -частиц. Экран можно было передвигать, чтобы иметь возможность перехватывать частицы, рассеянные под любым углом. Возникающие сцинтилляции подсчитывались с помощью микроскопа с малым увеличением. Два сотрудника Резерфорда, Ганс Гейгер и Эрнест Мерсен, вскоре заметили, что α -частицы рассеивались на большие углы гораздо чаще, чем это следовало бы из существовавших в то время представлений о строении атома. Тогда считали, что электрический заряд в атомах распределен равномерно и поэтому не было никаких оснований для концентрации электрического поля, которую приходилось допустить, чтобы объяснить столь большие отклонения рассеиваемых α -частиц.

Резерфорд пришел к выводу, что «положительный заряд, ассоциированный с атомом, сконцентрирован в чрезвычайно малом центре или ядре, а компенсирующий его отрицательный заряд распределен по поверхности сферы, имеющей радиус, сравнимый с радиусом атома». Он также вывел математическую формулу, описывающую рассеяние одного точечного электрического заряда другим точечным зарядом (рис. 2.3). При этом предполагалось, что сила, действующая между двумя заряженными частицами, подчиняется закону Кулона. Зная заряды и массы взаимодействующих частиц, Резерфорд объединил закон Кулона с законами движения Ньютона и нашел зависимость вероятности рассеяния на заданный угол от

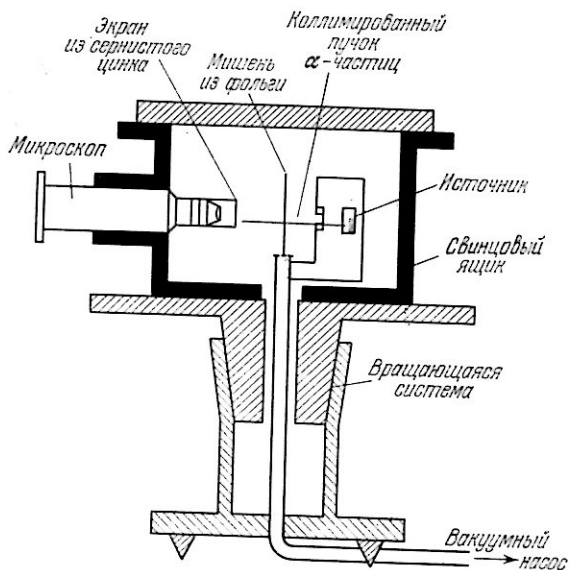


Рис. 2.2. Схема аппаратуры, использованная Эрнестом Резерфордом и его коллегами, для изучения рассеяния α -частиц тонкими металлическими фольгами. Схема взята из статьи, опубликованной в журнале «Философический магазин» в 1913 г. Природный источник α -частиц помещался в ящик с высоким вакуумом, снабженный коллиматором, так что на мишень из фольги направлялся только выделенный в определенном направлении пучок частиц. Экран из сернистого цинка, который сцинтиллировал под ударами α -частиц, можно было передвигать, чтобы иметь возможность фиксировать частицы, рассеиваемые на любые углы. Именно на основе наблюдений, выполненных таким способом, Резерфорд пришел к выводу, что атом состоит из массивного положительно заряженного ядра, окруженного отрицательно заряженными электронами. Все последующие эксперименты по рассеянию — в основном вариации этого фундаментального опыта.

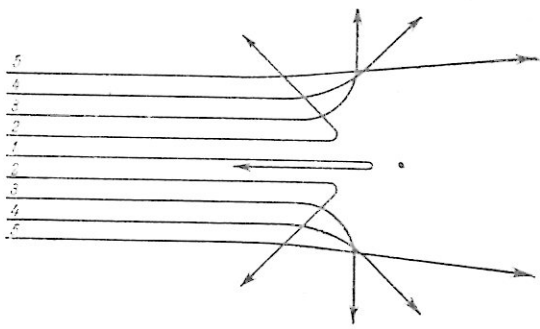


Рис. 2.3. Согласно Резерфорду рассеяние одного точечного электрического заряда другим точечным зарядом можно описать с помощью математической формулы, объединяющей закон Кулона (для силы притяжения или отталкивания между двумя зарядами) и законы движения Ньютона. Эта формула дает зависимость вероятности рассеяния на данный угол от энергии падающих частиц. Как видно из этой диаграммы, поясняющей процесс резерфордовского рассеяния, характер рассеяния зависит также от положения траектории падающей частицы относительно мишени.

энергии падающей частицы. Вероятность рассеяния одним атомом мишени характеризуется «сечением рассеяния». Оно определяется как такая часть площади сечения падающего пучка, в пределах которой влияние атома мишени вызывает наблюдаемый процесс, в данном случае — рассеяние.

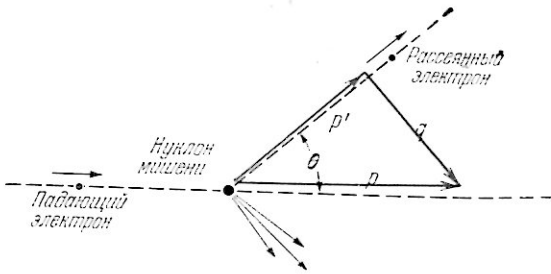


Рис. 2.4. Переданный импульс, важная характеристика, вводимая при теоретическом описании процесса рассеяния, определяется как модуль разности (q) векторов начального (p) и конечного (p') импульсов рассеянной частицы. В случае упругого рассеяния нуклон мишени просто испытывает отдачу. При неупругом рассеянии он либо распадается и превращается в другие частицы, либо оказывается в возбужденном состоянии.

оретическими предсказаниями. Формула Резерфорда содержит зависимость сечения рассеяния от массы m и заряда падающей частицы, массы и заряда частицы мишени, скорости v падающей частицы и угла рассеяния θ . В эту формулу непосредственно входит зависимость от некоторой комбинации указанных параметров, а именно от модуля разности q между векторами начального и конечного импульсов рассеиваемой частицы: $q = 2mv \sin(\theta/2)$. Другой принятый термин для q — «переданный импульс» (рис. 2.4). В формуле Резерфорда предполагается, что взаимодействующие частицы суть геометрические точки, не имеющие ни размера, ни формы. Между тем, на самом деле сечение рассеяния будет зависеть не только от деталей закона взаимодействия (например, от того, как его интенсивность меняется с расстоянием) или законов движения частиц (которые, в частности, могут быть не ньютоновскими, а релятивистскими), но также и от того, какова внутренняя структура взаимодействующих частиц.

В процессах рассеяния, описываемых квантовой механикой, передача импульса играет центральную роль, поскольку она определяет масштаб изучаемых процессов. В квантовой механике с частицей, обладающей определенным импульсом p , ассоциируется определенная волна, имеющая длину λ . Формула, связывающая эти две величины, имеет вид $\lambda = h/p$, где h — чрезвычайно малое число ($6,6 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек), называемое постоянной Планка. Точность, с которой может быть локализована частица, ограничена ас-

Сечение рассеяния необязательно связано с «истинными» физическими размерами частицы мишени. Оно представляет собой удобную меру воздействия, испытываемого падающей частицей со стороны частицы мишени.

Экспериментально можно определить сечение рассеяния в зависимости от угла рассеяния (измеряемого от оси, совпадающей с направлением пучка падающих частиц), а затем сравнить результаты с те-

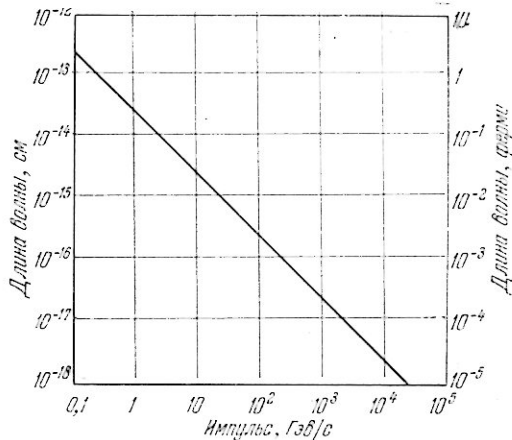


Рис. 2.5. Возможность локализации частицы, имеющей импульс p , определяется длиной волны λ , связанной с частицей, согласно формуле $\lambda = h/p$.

соцированной с ней волной (рис. 2.5). Вероятность обнаружения частицы в заданной точке определяется характером поведения «волнового пакета», описывающего движение частицы. Чтобы локализовать одну частицу возле другой, эти частицы должны провзаимодействовать, т. е. экспериментатор должен рассеять одну из них на другой, а это значит, что часть импульса будет передана от одной из них другой. Таким образом, естественно, что точность Δx , с которой можно выяснить детали неизвестной структуры, определяется передачей импульса q , имевшей место при столкновении. Эти две величины связаны формулой $\Delta x = h/q$ *), которая в свою очередь означает, что возможность различить тонкие детали в частице мишени увеличивается с возрастанием q , поскольку при этом длина волны делается сколь угодно малой. (Импульс — это произведение массы на скорость. При энергиях, представляющих интерес для физиков, занимающихся рассеянием электронов высокой энергии, масса возрастает с ростом энергии, тогда как скорость остается практически постоянной, близкой к скорости света.)

В экспериментах типа тех, что были выполнены в Стэнфорде, импульс измерялся в единицах $\hbar\omega/c$ (c — скорость света). Электрон, имеющий энергию в 20 Гэв , движется со скоростью, отличающейся от скорости света только на одну трехмиллиардную часть. В этом случае энергия частицы, выраженная в $\hbar\omega$, и ассоциированный с ней импульс, выраженный в $\hbar\omega/c$, практически равны.

Два вида рассеяния. Рассеяние электронов может быть «упругим» и «неупругим». При упругом рассеянии частица мишени отскакивает так же, как бильярдный шар, оставаясь при этом в том же самом внутреннем состоянии, в каком она была до столкновения. При упругом рассеянии частица мишени либо распадается, либо остается в возбужденном состоянии, отличном от первоначального состояния. Между этими двумя процессами идет конкуренция: один может протекать лишь за счет другого. Оба эти процесса служат хорошим источником информации о структуре частиц мишени. Обсудим сначала упругое рассеяние. Формула Резерфорда

$$\sigma_R = (2e^2 m)^2 / q^4 \quad (q = 2\sqrt{pp'} \sin \frac{\theta}{2})$$

не годится для описания упругого рассеяния электронов высокой энергии по двум причинам. Во-первых, скорости электронов столь велики, что для описания волновой природы и поведения падающей частицы мишени следует использовать релятивистскую квантовую теорию. Во-вторых, электроны обладают «спином», т. е. у них есть собственный момент импульса, как если бы они вращались вокруг некоей внутренней оси.

Более точная формула, которую следует здесь использовать, называется сечением рассеяния Мотта

$$\sigma_M = \frac{(2e^2 \cdot E'/c^2)^2}{q^4} \frac{E'}{E} \left(\cos^2 \frac{\theta}{2} \right),$$

где E и E' — начальная и конечная энергии электрона, c — скорость света, θ — угол рассеяния электронов. В тех случаях, когда скорость падающей частицы намного меньше скорости света, как это было в опытах самого Резерфорда, формула Мотта переходит непосредственно в форму-

*) Здесь в одном и том же смысле использованы два разных соотношения. Формула де Бройля $\lambda = h/p$ относится к плоской волне. Вторая формула следует из соотношения неопределенностей Гейзенберга и должна записываться так: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$, где $\Delta p = q$. (Прим. перев.)

лу Резерфорда, за исключением члена, учитывающего вклад спина электрона (рис. 2.6). Поскольку Резерфорду не было известно, что его опы

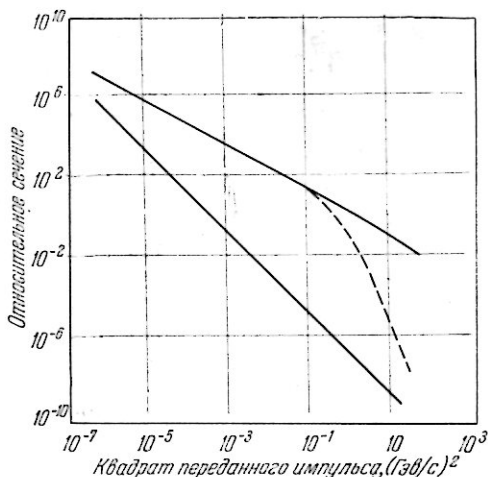


Рис. 2.6. Сечение рассеяния определяется как площадь поперечного геометрического сечения падающего пучка, в пределах которой влияние атомов мишени вызывает взаимодействия определенного типа. Оно приводится здесь для процесса рассеяния электронов на нуклонах мишени согласно формуле Резерфорда (нижняя прямая) и формуле Мотта (верхняя кривая). Когда энергия и скорость падающих электронов мала, формула Мотта переходит непосредственно в формулу Резерфорда, за исключением члена, описывающего вклад спина электрона. Штриховая кривая показывает моттовское рассеяние на протоне конечных размеров. Все кривые приведены для угла рассеяния 20° .

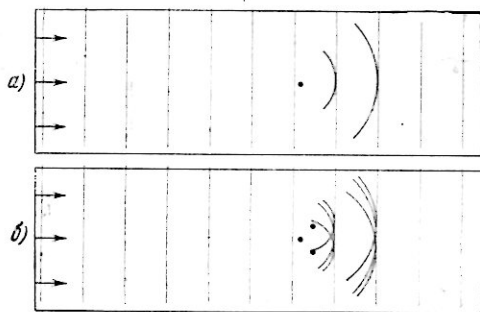


Рис. 2.7. Если электрон рассеивается не на точечном заряде (а), а на объекте конечных размеров (б), то необходима модификация формулы, описывающей такой процесс. Здесь объект представлен в виде совокупности трех точечных составляющих. В этом случае каждый участок фронта волны, ассоциированный с электроном, дифрагирует независимо на каждой части заряда. Затем эти отдельные рассеянные волны объединяются и образуют выходящую волну, ассоциируемую с рассеянным электроном. Величина отношения сечений рассеяния на заряженной частице конечных размеров и на точечном заряде, называемая форм-фактором (F), показывает, насколько уменьшилось это рассеяние.

волны, рассеянной частями заряда внутри частицы мишени. Она зависит только от величины переданного импульса q , т. е. от модуля раз-

ты по рассеянию следует описывать законами квантовой механики, тот факт, что его формула правильно описывает рассеяние при низких энергиях, следует отнести к числу счастливых случайностей. Как мы теперь знаем, «классические» законы движения Ньютона можно успешно применять к рассеянию микрочастиц только тогда, когда рассеяние происходит под действием силы, величина которой убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, как это и имеет место для силы по закону Кулона.

Формулу Мотта в свою очередь приходится модифицировать, если электроны рассеиваются не на точечных зарядах, а на объектах конечных размеров (рис. 2.7). В этом случае каждый участок фронта электронной волны дифрагирует отдельно на каждой части заряда, распределенного по частице мишени. Затем отдельные волны, рассеянные этими частями заряда, объединяются и образуют выходящую волну, которая описывает рассеянный электрон. Как и следовало ожидать, некоторые отдельные волны складываются и усиливают друг друга, тогда как другие гасят друг друга из-за интерференции. В силу этого обстоятельства сечение упругого рассеяния на заряженной частице конечных размеров, вообще говоря, меньше аналогичного сечения рассеяния на точечном заряде. Множитель, характеризующий такое уменьшение сечения рассеяния по сравнению со случаем рассеяния на точечном заряде, можно представить в виде квадрата числа, называемого форм-фактором и обозначаемого буквой F .

Формулу для форм-фактора можно получить, проследив за перемещением каждой отдельной

ности импульсов падающего и уходящего электронов. При достаточно большом значении q форм-фактор чувствителен к деталям структуры мишени. Если же q слишком мала, то такой эксперимент мало что даст.

Если частицей мишени является нуклон (протон или нейтрон), то было бы интересно изучить его структуру на расстояниях, малых по сравнению с его собственным радиусом, составляющим около $0,8$ ферми (1 ферми = 10^{-13} см). Чтобы добиться разрешения деталей, скажем в $0,1$ ферми, требуется, чтобы передача импульса при рассеянии составляла 2 Гэв/с. В поставленных экспериментах практически достигнуты значения передачи импульса 5 Гэв/с, что уже достаточно для получения надежной информации о структуре протона. Если зависимость форм-фактора от передачи импульса известна в широких пределах, то можно восстановить распределение заряда в частице мишени.

Задача расчета распределения заряда внутри протяженной частицы типа протон по данным рассеяния электронов близка к задаче выяснения структуры кристалла по данным сложной дифракционной картины, возникающей при облучении его рентгеновскими лучами. Однако в случае рассеяния электронов эта задача много труднее, особенно если скорость протона отдачи приближается к скорости света. Учет эффектов теории относительности в движении протона приводит к двусмысленностям, которые усложняют задачу восстановления пространственного распределения заряда

Дальнейшее усложнение вносится учетом спина протона, порождающего магнитный момент. Оказывается, что падающий электрон может взаимодействовать с магнитным моментом протона так же, как и с его электрическим зарядом. Поскольку намагниченность также может быть как-то распределена внутри протона, то в итоге приходится ввести второй, магнитный, форм-фактор, обозначаемый F_m в отличие от электрического форм-фактора F_e . Учет всех этих усложнений приводит к дальнейшей модификации первоначальной формулы Резерфорда, полученной Розенблютом:

$$\sigma = \sigma_M \left(\frac{F_e^2 + \tau F_m^2}{1 + \tau} + 2\tau F_m^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} \right),$$

где $\tau = q^2/4M^2c^2$, M — масса нуклона. По мере перехода от формулы Резерфорда к формулам Мотта и Розенблюта сложность формулы, описывающей рассеяние, все возрастает. Новая формула учитывает следующие обстоятельства: и падающая частица, и частица мишени имеют спин; частица мишени не точечная, а протяженная; скорости частиц столь велики, что необходимо учитывать релятивистские эффекты и, наконец, движение обеих частиц подчиняется законам квантовой, а не классической механики.

Это несколько детализированное обсуждение не должно умалить фундаментальной простоты процесса рассеяния электронов. Этот процесс позволяет нам исследовать неизвестную структуру субъядерных частиц с помощью известных электромагнитных сил. Этим он отличается от других процессов (интересных совсем с иной точки зрения), в которых сталкиваются две частицы неизвестной природы, например, от протон-протонного или пион-протонного рассеяния. Насколько это сейчас известно, электроны ведут себя подобно точечным зарядам и взаимодействуют с другими частицами в процессах рассеяния только с помощью электромагнитных сил. Конечно, надо помнить, что электроны также участвуют в «слабых» взаимодействиях, которые играют основную роль в процессах радиоактивного распада. Однако, поскольку слабые взаимодействия по интенсивности примерно в 10^{10} раз меньше электромагнитных, ими вполне можно пренебречь в опытах по рассеянию электронов.) Законы электричества и магнетизма в

той форме, которую они приняли в настоящее время в формулах квантовой электродинамики, представляют собой единственный раздел физики, в котором одно и то же количественное описание оказалось справедливым во всей области, доступной до сих пор эксперименту, от космических расстояний до расстояний порядка 10^{-15} см. Таким образом, можно надежно считать, что законы электромагнетизма известны достаточно хорошо.

Двухмиллиный ускоритель. Прежде чем перейти к обсуждению результатов экспериментов по упругому и неупругому рассеянию электронов, полученных на Стэнфордском электронном ускорителе, мы кратко обсудим вопрос об устройстве и оборудовании этого сооружения. Электронный пучок достигает максимальной энергии в 21 Гэв, пролетев в высоком вакууме внутри двухмиллионной трубы (3,2 км), окруженной 245 килостронами, служащими для сообщения пучку электромагнитной энергии. В течение всего двухмиллионного пути поддерживается строгая фокусировка, для чего служат магнитные «линзы», расположенные через каждые 100 м. В конце своего пути пучок проходит через последнее «чистилище» из магнитов и щелей, что позволяет точно определить ширину пучка и величину энергии в пучке перед тем, как он достигнет мишени. Для проведения типичного эксперимента по рассеянию необходимы мишень, состоящая из водорода или дейтерия, и средства для выделения и отождествления электронов, рассеянных на различные углы, а также для измерения их импульсов в присутствии многих других частиц, рожденных при столкновениях электронов с ядрами.

В качестве протонной мишени следует выбрать сосуд с жидким водородом. Ядро обычного водорода состоит из одного-единственного протона. Для получения мишени, содержащей свободные нейтроны, наилучшим является использование жидкого дейтерия или тяжелого водорода. Дело в том, что ядро дейтерия состоит из протона и нейтрона. С хорошей точностью можно считать, что рассеяние на ядре дейтерия представляет собой просто сумму отдельных актов рассеяния на протоне и нейтроне. Поскольку пучок электронов, ударяющий в эти сжиженные газы, весьма интенсивен, последние должны непрерывно охлаждаться посредством теплообмена, с целью не только предохранить закипание, но и уменьшить изменения плотности жидкости, которые сказываются на результатах.

Чтобы выделить и классифицировать электроны, вылетающие из мишени, установка в Стэнфорде снабжена тремя магнитными спектрометрами, которые направляют электроны в систему детекторов. Они были разработаны и сконструированы совместными усилиями группы физиков из Калифорнийского и Массачусетского технологических институтов и из СЛАКа. Требуется очень высокое разрешение как по энергии, так и по углам, поскольку нам необходимо уметь различать электроны, рассеянные упруго и неупруго, а также анализировать подробную структуру спектра энергии электронов, возникающих при неупругом рассеянии.

При неупругом рассеянии в процессе столкновения может родиться один или несколько пионов. Поскольку для рождения пиона требуется энергия в 139 Мэв (мегаэлектрон-вольт, т. е. миллион электрон-вольт), то разрешение по энергиям должно быть лучше, чем отношение 139 Мэв к энергии падающих электронов, которая может расти до 20 Гэв, иначе говоря, разрешение по энергии должно быть лучше, чем 0,7%. Аналогичным образом анализ кинематики столкновения показывает, что разрешение по углам должно составлять доли миллиардиана, т. е. около трех дуговых минут. Данные расчета характеризуют точность измерения относительного угла и относительной энергии между падающим и рассеянным

электронами. Поэтому указанные требования к разрешению по углу и энергии относятся в равной мере к падающему пучку и к спектрометрам, анализирующим рассеянный пучок.

Магнитные спектрометры — это большие и сложные приборы (рис. 2.8). Они состоят из магнитных линз и направляющих магнитов, которые отклоняют рассеянные электроны в вертикальном направлении, а затем их фокусируют. Величина вертикального отклонения служит мерой импульса

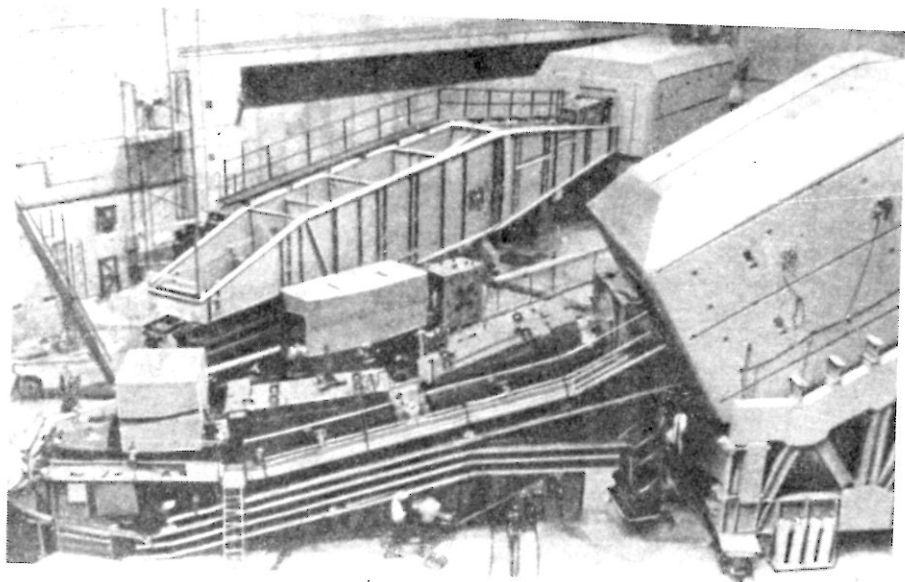


Рис. 2.8. Большие магнитные спектрометры на одной из экспериментальных площадок СЛАКа используются для выделения и классификации рассеянных электронов, вылетающих из мишени, и последующего направления их в систему детекторов. Имеются три спектрометра, каждый из которых состоит из сложной системы магнитных линз и направляющих магнитов. Они установлены вокруг общей оси. Два из них видны на этом снимке. Размеры установок можно представить по фигурам двух мужчин, стоящих вблизи средней части одного из спектрометров.

электрона. Горизонтальное отклонение служит мерой угла рассеяния. Сотни счетчиков — эквивалент сцинтиллирующего экрана из сернистого цинка, применяемого в экспериментах Резерфорда, используются для отождествления импульса и угла рассеяния для каждого электрона. Счетчиками служат узкие бруски специально приготовленного прозрачного пластика, которые начинают ярко сцинтиллировать, когда в них попадает частица высокой энергии. Каждый брусок снабжен фотоумножителем, способным зафиксировать любую слабую вспышку света.

Сигналы, поступающие от счетчиков и других приборов, позволяющих отождествить частицу, обрабатываются на большой электронной вычислительной машине. Электронные вычислительные машины включены «в линию», они запоминают данные для последующего подробного анализа и в то же время осуществляют упрощенный анализ отдельных параметров. Помимо обработки этих данных вычислительная машина обеспечивает поступление постоянной информации о состоянии оборудования и выполняет много другой будничной работы: юстировка токов в магнитах спектрометра, запись токов в пучках и других интересующих нас величин.

Нуклонные форм-факторы. В результате экспериментов по упругому рассеянию, выполненных группой физиков из Калифорнийского и Массачусетского технологического институтов,

чусетского технологического институтов и СЛАКа, удалось измерить четыре упругих форм-фактора, описывающих структуру протона и нейтрона. Однако количество и качество этих данных для разных форм-факторов неравноценно. Наиболее точные данные получены для магнитного форм-фактора протона (рис. 2.9). Магнитный форм-фактор нейтрона, полученный в результате учета вклада рассеяния на протоне в рассеяние на дейтроне, описывается аналогичной кривой, но ошибки в этом случае больше.

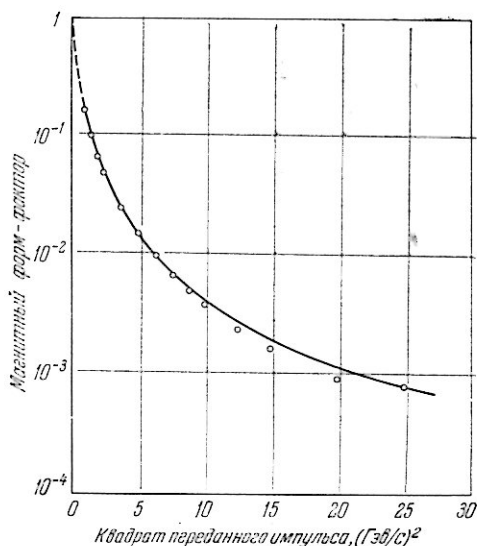


Рис. 2.9. Группа сотрудников Калифорнийского и Массачусетского технологического институтов и СЛАКа установила, что магнитный форм-фактор протона сверх всяких ожиданий плавно изменяется в пределах огромной области изменения экспериментальных значений. (Квадрат магнитного форм-фактора — это величина, которая показывает, во сколько раз намагниченность заряженной частицы конечного размера меньше намагниченности точечной заряженной частицы.) Тот факт, что этот форм-фактор убывает обратно пропорционально четвертой степени передачи импульса (что гораздо быстрее, чем это следует из зависимости, предсказанной теоретиками) является одной из серьезных трудностей в современной физике высоких энергий.

Электрический форм-фактор протона походит на его магнитный форм-фактор, но в этом случае кривая известна для гораздо меньшей области изменения переменных. Электрический форм-фактор нейтрона практически равен нулю. Однако ошибки в проведенных экспериментах еще слишком велики.

Может возникнуть вопрос: почему электроны вообще рассеиваются нейтронами, если у нейтрона нет электрического заряда? Ответ состоит из двух частей. Во-первых, спин нейтрона порождает магнитный момент. Это обстоятельство должно проявиться в рассеянии, описываемом магнитным форм-фактором. Во-вторых, электрический ток, порождающий магнитный момент нейтрона, может приводить к локальной концентрации заряда внутри частицы, несмотря на то, что заряд всей частицы равен нулю. Такая концентрация заряда может привести к рассеянию, описываемому электрическим форм-фактором, когда значения передачи импульса отличны от нуля. Таким образом, в упругом рассеянии электронов не

только проявляется полный заряд и магнитный момент нейтрона, но также и его внутренняя структура.

Эксперименты указывают на то, что магнитная структура нейтрона и протона почти одинакова, а интенсивность рассеяния на каждой из частиц пропорциональна их магнитным свойствам, найденным в статических экспериментах. Иными словами, насколько это следует из эксперимента, кривые магнитных форм-факторов этих двух частиц совпадают по форме. Вероятно, также существен тот факт, что в пределах тех значений параметров, которые получены в экспериментах по рассеянию для электрического форм-фактора протона, рассеяние электрического типа пропорционально рассеянию магнитного типа. Этот результат можно интерпретировать так, что распределение электрического заряда протона непосредственно связано с его магнитной структурой.

Отдельные рассеянные волны образуют дифракционную картину, аналогичную той картине, что возникает при освещении параллельными

лучами света края какого-либо объекта. Если объект имеет острый край, то дифракционная картина имеет вид чередующихся темных и светлых полос. Аналогично, если протон был бы объектом с резко определенной границей, то в кривой для форм-фактора проявилась бы более сложная структура, чем это есть на самом деле. Поэтому очевидно, что протон имеет размытую границу. Подробное изучение кривой дает для среднего радиуса протона значение около $0,8$ ферми или $0,8 \cdot 10^{-13}$ см.

Реальные и виртуальные частицы. Одно из наиболее удивительных открытий в физике связано с тем, что кривая, характеризующая магнитный форм-фактор протона (см. рис. 2.9), является плавной во всей огромной области изменения экспериментальных значений параметров. Наблюдаемое сечение рассеяния, которое изменяется как квадрат форм-фактора, умноженного на формулу сечения Мотта для точечного рассеяния, в пределах изменения переменных в той области, в которой были поставлены эксперименты, уменьшается в 10^{12} раз. Сечения рассеяния, относящиеся к самой низкой части кривой, чрезвычайно малы. Например, наименьшее значение сечения рассеяния, измеренное на опыте, составляет около $2 \cdot 10^{-39}$ см²·стерад. Это при данных условиях эксперимента означает, что только один из каждых 10^{18} падающих электронов рассеивался в детектор. Сечение рассеяния убывает обратно пропорционально четвертой степени передачи импульса. Объяснение быстрого убывания является сейчас одной из главных нерешенных проблем физики высоких энергий. Чтобы понять, как эта трудность возникает и как ее можно было бы объяснить, необходимо кратко остановиться на концепции «виртуальных частиц».

Концепция виртуальных частиц связана с принципом неопределенности, выдвинутым Вернером Гейзенбергом более 40 лет назад. Когда частицы подчиняются законам квантовой механики, невозможно одновременно определить координату частицы и ее импульс. Принцип Гейзенберга связывает неопределенность Δx в измерении координаты частицы с неопределенностью Δp в измерении импульса. Произведение этих двух неопределенностей пропорционально постоянной Планка: $\Delta p \cdot \Delta x \sim h$. Аналогичным образом можно связать неопределенность ΔE в измерении энергии частицы с неопределенностью Δt в значении момента времени, в который это измерение энергии было сделано, в данном случае $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$.

Напомним, что в теории относительности понятия массы и энергии эквивалентны, что отражено в соотношении Эйнштейна $E = mc^2$. Поэтому можно представить себе, что на очень короткий промежуток времени Δt любое наперед заданное количество энергии ΔE можно превратить в массу покоя некоторой частицы при условии, что произведение ΔE на Δt не превосходит h . Иными словами, не нарушая принципа неопределенности, одна или несколько частиц могут появиться в системе и существовать неизмеримо короткий промежуток времени. В каком-то смысле их существование «скрыто» в принципиальной неопределенности наших знаний о системе. Частицы, вводимые таким образом, называются виртуальными частицами. Их нельзя наблюдать непосредственно так, как наблюдают реальные частицы.

В большинстве моделей, описывающих взаимодействия между электроном и протоном в качестве носителя электромагнитных сил, вводится фотон (квант света). Он также может быть как реальным, так и виртуальным. Реальные фотоны — это пакеты электромагнитных волн, которые переносят энергию от излучающего источника (например, звезды) к поглостителю (например, к пигменту глаза). В квантовой электродинамике электромагнитные силы, действующие между двумя (или более) движущимися

зарядами, считаются обусловленными испусканием и поглощением виртуальных фотонов. Поэтому при рассеянии электронов виртуальный фотон, испущенный электроном, поглощается электрическим зарядом и магнитным моментом протона. Для виртуальных фотонов соотношение между энергией и импульсом может быть любым, тогда как у реальных фотонов энергия и импульс всегда связаны однозначно.

Хотя может показаться, что виртуальные частицы нарушают фундаментальные законы сохранения, эти нарушения всегда имеют место лишь в тех пределах, в которых применим принцип неопределенности. Он не применим, например, к закону сохранения электрического заряда. Это значит, что один виртуальный электрон в вакууме появиться не может. Одновременно с ним всегда должна появляться частица с противоположным зарядом, т. е. позитрон.

Существует группа нестабильных частиц — нейтральные векторные мезоны, члены которой во многих отношениях похожи на фотоны, кроме двух важных особенностей: у них есть масса покоя и они ответственны за сильные взаимодействия. Наибольший интерес вызывает так называемый ρ -мезон, масса которого эквивалентна энергии 750 Мэв (для сравнения укажем, что масса покоя протона эквивалентна энергии 939 Мэв). ρ -мезоны удается создать в лаборатории как реальные частицы, и продукты их распада также можно обнаружить. Нейтральные векторные мезоны могут быть также порождены в качестве одиночных виртуальных частиц фотонами, распространяющимися в вакууме. Сами порождающие их фотоны могут быть и реальными и виртуальными. В некотором смысле можно считать, что на кратчайшие промежутки времени фотон как бы превращается в векторный мезон типа ρ -мезона *).

Поскольку векторные мезоны имеют значительную массу, они играют ведущую роль в модификации фотонных процессов только в экспериментах при сверхвысоких энергиях, подобных тем, что были описаны выше. Кроме того, как носители сильных взаимодействий, векторные мезоны оказываются существенными для описания взаимодействия реальных фотонов с нуклонами.

До осуществления последних экспериментов по рассеянию электронов теоретики считали, что они могут предсказать, какую роль играют векторные мезоны в описании упругого и неупругого рассеяния при высоких энергиях. В частности, они утверждали, что если на промежуточном этапе в упругом рассеянии основной вклад дает векторный мезон, то кривая для форм-фактора должна убывать обратно пропорционально квадрату передачи импульса. Между тем, на опыте эта кривая убывает обратно пропорционально четвертой степени переданного импульса. Это означает, что столь простая гипотеза несправедлива.

Упругое и неупругое рассеяние. В ходе осуществления программы совместных исследований сотрудниками Массачусетского технологического института и СЛАКа было установлено, что неупругому рассеянию отвечает очень большое сечение. Если взглянуть на типичный спектр рассеяния, порожденный электронами с энергией 10 Гэв , сталкивающимися с протонами, то прежде всего бросается в глаза широкий пик с асимметричным хвостом (рис. 2.10). Сам пик отвечает упругому рассеянию. Асимметрия его хвоста связана с тем, что электроны могут испускать «мягкие» фотоны (рентгеновские лучи), которые уносят некоторое количество энергии, что приводит к уменьшению пика в области низких энергий.

*) Подробности см. в статье Фр. В. Мэрфи и Д. Е. Панта «Фотоны как адроны» в настоящем сборнике. (Прим. ред.)

Помимо этого, спектр рассеянных электронов обладает еще двумя специфическими особенностями, вызванными процессами неупругого рассеяния. Во-первых, на нем имеется ряд «выбросов», соответствующих возбужденным состояниям протона. Их часто называют резонансными возбуждениями или просто резонансами. Положение этих выбросов на кривой соответствует ныне хорошо известным возбужденным состояниям протона, которые удается отождествить во многих экспериментах при высоких

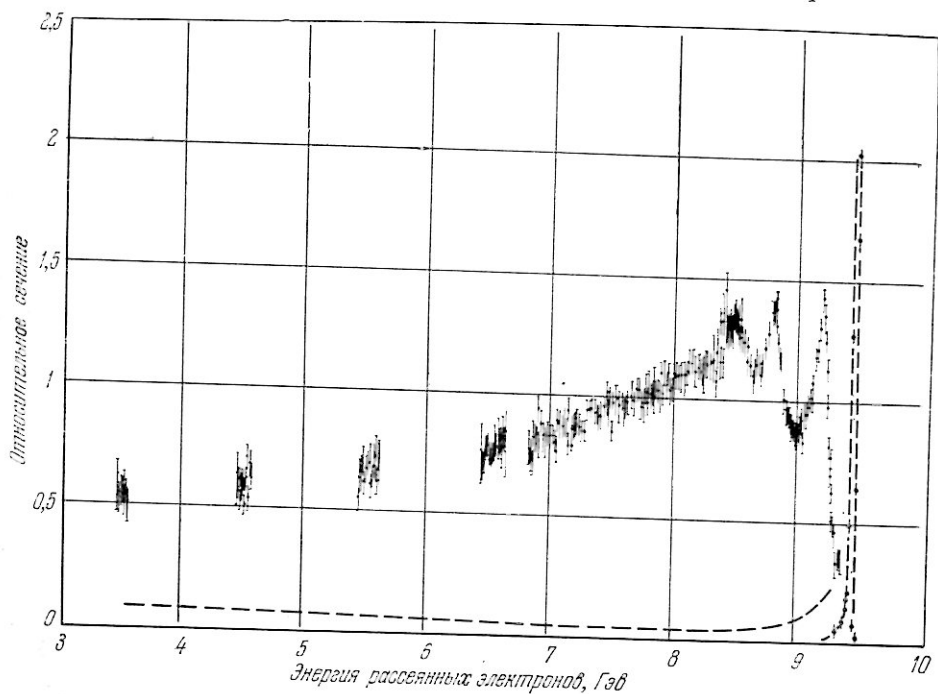


Рис. 2.10. Типичный спектр рассеяния, полученный при изучении столкновений пучка электронов с энергией в 10 ГэВ с покоящимися протонами. Отмечены случаи упругого (цветная кривая) и неупругого (черная кривая) рассеяния. Высота пика на кривой упругого рассеяния справа уменьшена в пять раз. Асимметрия этой кривой связана с тем, что электроны могут испускать «мягкие» фотоны, что приводит к потере некоторого количества энергии и к уменьшению высоты кривой упругого рассеяния при низких энергиях. Небольшие пики или выбросы на кривой неупругого рассеяния соответствуют возбужденным состояниям протона. Их называют резонансными возбуждениями или просто резонансами. Слева от этих выбросов на кривой расположен гладкий непрерывный участок, называемый непрерывным спектром или континуумом. По мере повышения энергии падающих электронов резонансы постепенно исчезают, но континуум остается.

энергиях. В неупругом рассеянии электронов удалось идентифицировать четыре специфических резонанса. Размеры отвечающих им выбросов сильно зависят от величины передачи импульса от электрона к протону. По мере возрастания величины передачи импульса размер выбросов быстро уменьшается. Подобное сжатие выбросов происходит почти столь же быстро, как и сжатие самого пика, отвечающего упругому рассеянию. Поэтому можно сделать вывод, что радиальные размеры возбужденных состояний, представленных на графике выбросами, сравнимы по величине с размерами протона в невозбужденном состоянии. Это означает, что в каком-то смысле в резонансе, т. е. в возбужденном состоянии, проявляет себя значительная часть структуры нуклона.

Вторая особенность спектра рассеянных электронов, проявляющаяся в неупругом рассеянии, относится к так называемому континууму, или непрерывному спектру. Под ним подразумевают гладкое распределение

по энергиям тех из рассеянных электронов, которые не связаны с резонансными состояниями. Физики восприняли этот факт как наиболее интригующий и труднообъяснимый из всех результатов, полученных недавно в Стэнфорде. Когда мы переходим в область больших углов рассеяния или к более высоким значениям энергии падающих частиц, то резонансы постепенно исчезают, а континуум остается.

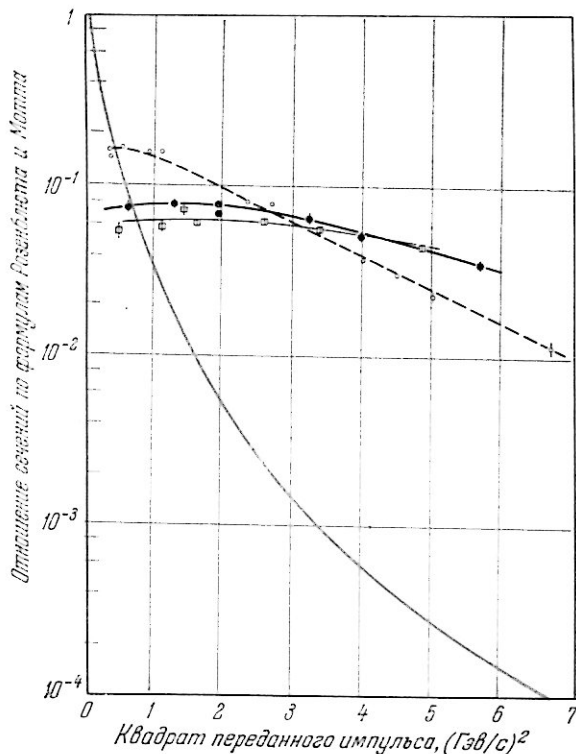


Рис. 2.11. Приведены отношения сечений рассеяния по формулам Мотта и Розенблюта для упругого рассеяния электронов (цветная кривая), и для трех различных результатов по неупругому рассеянию электронов (черные кривые). Ранее предполагалось, что вклад континуума в сечение неупругого рассеяния должен убывать так же быстро, как сечение упругого рассеяния, по мере роста передачи импульса. Однако на опыте это оказалось не так.

еще выше. На основании экспериментальных данных приходится сделать вывод, что неупругое рассеяние происходит на внутренних структурах, размер которых гораздо меньше размера нуклона как в основном, так и в возбужденном состоянии.

Партонная модель. Ричард Фейнман из Калифорнийского технологического института разработал теоретическую модель нуклона, которая позволяет объяснить результаты по неупругому рассеянию электронов. Незвестные составляющие протона и нейтрона, на которых происходит неупругое рассеяние электронов при больших энергиях, он назвал «партонами». Фейнман предположил, что партоны — точечные частицы. Он и другие ученые исследовали возможность того, что в роли партонов могли бы выступить те или иные из ранее открытых субъядерных частиц. Мезоны, дающие вклад в «облако» ядерного заряда, были первыми кандидатами на эту роль. Однако имеется много экспериментальных данных в пользу

лют, а континуум остается.

Когда программа исследований неупругих процессов еще только формулировалась, теоретики были убеждены в том, что часть сечения рассеяния, относящаяся к континууму, будет убывать с увеличением передачи импульса столь же быстро, как и сечение упругого рассеяния. На самом деле из полученных результатов следует, что при изменении энергии электронов в области от 4,5 до 19 Гэв сечение неупругого рассеяния более всего сходно с сечением, которое должно было бы возникнуть при рассеянии точечными мишенями (рис. 2.11). В частности, в одном случае сравнение с наилучшими предсказаниями, дававшимися до выполнения экспериментов, показывает, что они занижены по отношению к действительности примерно раз в 40 (рис. 2.12). Это отличие для других спектров оказывает-

того, что партоны, если они вообще существуют, не проявляют известных свойств мезонов.

Было высказано также предположение, что партоны могут быть отождествлены с другими гипотетическими частичками, так называемыми кварками. Эти удивительные частички были предложены в 1964 г. независимо Мюрреем Гелл-Манном и Георгом Цвайгом из Калифорнийского технологического института. В отличие от всех известных частиц, кварки должны иметь дробный электрический заряд либо $+2/3$, либо $-1/3$ ($-2/3$ и $+1/3$ для антикварков). Гелл-Манн и Цвайг предположили, что мезоны могут состоять из кварка и антикварка. Нуклоны и другие частицы с аналогичными свойствами (т. е. барионы) должны состоять из трех кварков. До сих пор, несмотря на долгие и упорные поиски, никаких реальных частиц с дробными зарядами обнаружить не удалось. Тем не менее, довольно подробное описание свойств нуклона, проявляемых при неупругом рассеянии электронов, можно получить теоретически, если сделать произвольное допущение, что гипотетические партоны обладают теми же свойствами, которые прежде приписывались столь же гипотетическим кваркам.

Модели, подобные партонной, иллюстрируют усилия теоретиков дать описание внутренней структуры нуклонов в согласии с наиболее современной информацией, полученной в экспериментах при высоких энергиях. Теоретики стремятся решить математические проблемы, которые возникают при попытках использовать модели для объяснения характерных свойств, наблюдавшихся в осуществленных до сих пор опытах. Теоретики также предлагают другие эксперименты с целью подтверждения справедливости своих моделей. Модели терпят крах либо ввиду непреодолимости математических трудностей, либо из-за того, что их предсказания не согласуются с экспериментом. Экспериментальная проверка модели, например ядерной модели атома, предложенной Резерфордом, может в принципе сильно расширить сферу понимания законов физики. Именно таким путем, когда первоначальное наблюдение, предсказание и последующее сравнение с опытом находятся в непрерывном взаимодействии, происходит постепенное выяснение законов природы.

Другим неожиданным результатом оказалось то, что неупругое рассеяние на протоне существенно отличается от неупругого рассеяния на

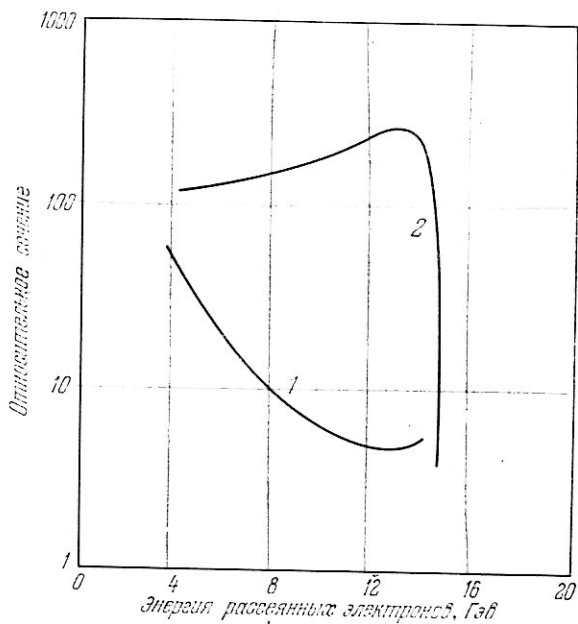


Рис. 2.12. Представлена часть спектра, полученного группой сотрудников Массачусетского технологического института и СЛАКА, из которого следует, что размер внутренних структур протона и нейтрона, на которых имеет место неупругое рассеяние, гораздо меньше размеров нуклона как в основном, так и в возбужденном состояниях. Экспериментально установлено, что предсказываемое сечение рассеяния (кривая 1) меньше наблюдаемого сечения рассеяния (кривая 2) более чем в 40 раз. Эти данные были получены при значении угла рассеяния 6° и при энергии падающих электронов 15 ГэВ.

нейтроне (рис. 2.13). Однако оказалось, что результаты опытов по рассеянию электронов можно сильно упростить, если ввести новую переменную, представляющую собой отношение квадрата передачи импульса к разности энергий электронов до и после рассеяния. Если различные экспериментальные значения откладывать на графике в зависимости от этой переменной, то наблюдается совпадение кривых, начерченных отдельно для протонов и нейтронов. Это совпадение сохраняется в случае изменения в широких пределах углов рассеяния и значений энергии падающих и уходящих электронов (рис. 2.14).

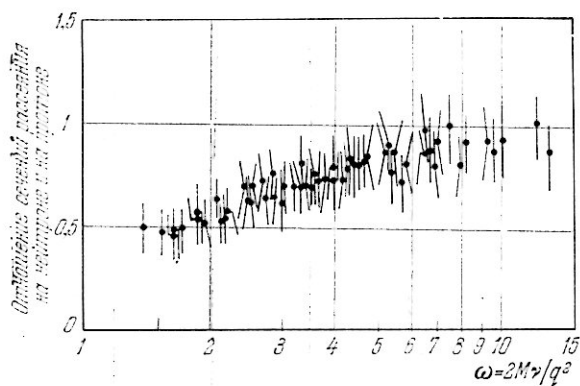


Рис. 2.13. Представлено отношение сечений рассеяния на нейтроне и на протоне в зависимости от новой переменной ω , в качестве которой выбрано отношение разности энергии электрона до и после рассеяния к квадрату переданного импульса (q).

Этому неожиданному совпадению можно дать простое объяснение, если предположить, что рассеяние происходит на отдельных партонах. Дело в том, что при рассмотрении кинематики рассеяния на точечных частицах естественно возникает «масштабная» инвариантность, содержащая квадрат переданного импульса. (Её принято называть «скейлинг».) Помимо этого, различие в рассеянии на нейтронах и протонах можно качественно объяснить различием

в конфигурациях трех кварков, из которых состоят протоны и нейтроны.

Поскольку партоны, какими бы они ни были, так переплетаются друг с другом, их индивидуальные свойства выявить трудно. Парадоксально то, что проблема становится более простой, если представить себе облако партонов движущимся в системе отсчета, имеющей скорость, близкую к скорости света. В этом случае нуклон как целое, согласно теории относительности, сжимается в плоский диск. Тогда виртуальный фотон, переносящий электромагнитное взаимодействие от рассеянного электрона, взаимодействует только с одним из партонов. Этот партон (благодаря релятивистскому «замедлению» времени) существует как свободный объект достаточно долго, так что его индивидуальный характер сохраняется. Следовательно, с некоторой степенью уверенности можно провести теоретический анализ событий в быстродвижущейся системе отсчета, а затем преобразовать результаты обратно к лабораторной системе отсчета. Таким способом можно сравнить теоретические расчеты с экспериментом. Хотя партонная модель с качественной точки зрения привела к определенным успехам в объяснении экспериментов по рассеянию, ее количественные предсказания пока недостаточно надежны. Тем самым, существует потребность как в получении дополнительной экспериментальной информации, так и в дальнейших теоретических разработках.

Несмотря на то, что партонная модель далека от совершенства, она уже используется для интерпретации экспериментальных результатов в столкновениях других частиц. В частности она послужила дополнительным обоснованием для ряда экспериментов, проведение которых планируется. В Итальянском центре ядерных исследований во Фраскати, интенсивный пучок электронов высокой энергии, циркулирующий в накопительном кольце, направлялся навстречу движущемуся в противоположном направ-

лении пучку позитронов. Некоторая доля позитронов и электронов взаимодействовала и аннигилировала друг с другом, часто порождая два или более пионов. Сечения аннигиляции и рождения пионов оказались намного больше, чем ожидалось. Такая аннигиляция электронов и позитронов и

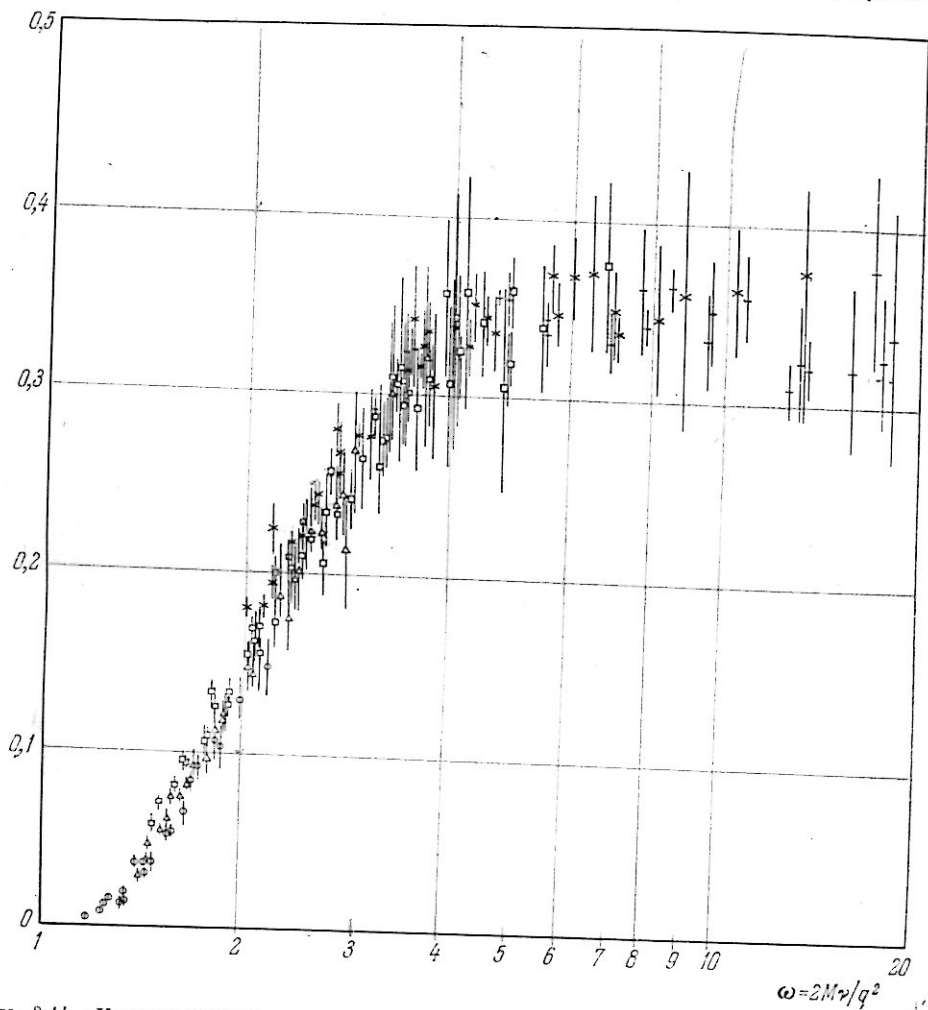


Рис. 2.14. «Универсальная кривая» — данные по неупругому рассеянию, получаемые при изменении в широких пределах углов рассеяния и начальной и конечной энергий, откладываемые на одном графике в зависимости от новой переменной ω , введенной на рис. 2.13. Это объединение в одну единую кривую двух кривых (для протона и для нейтрона соответственно) совместимо с предположением, что рассеяние электронов высоких энергий происходит на неких точечноподобных частицах, входящих в состав отдельных нуклонов. Физическая природа этих объектов, названных «партонами», пока неясна. Эффект совпадения указанных кривых получил название «масштабной инвариантности». Подобная зависимость от квадрата переданного импульса, оказывается естественной для кинематики рассеяния на точечноподобных частицах.

«глубоко» неупругое рассеяние электронов, наблюдавшееся в Стэнфорде, — это непосредственно связанные явления. С общей точки зрения их можно рассматривать как взаимно обратные реакции. Иначе говоря, большие значения сечений, наблюдавшиеся во Фраскати, подтверждают большие значения сечений рассеяния, полученные в Стэнфорде. Другим относящимся сюда результатом может считаться тот факт, что нейтринные пучки, получаемые на огромном ускорителе в ЦЕРНе (Европейский центр

ядерных исследований), приводили к неупругим реакциям, сечения которых оказались неожиданно велики. Как и в других случаях, партонная модель обеспечивает наилучшее возможное объяснение этим экспериментальным фактам.

В настоящее время запланирован ряд связанных друг с другом экспериментов. В одном из них собираются сравнивать рассеяние нейтрино и антинейтрино (ожидается, что соответствующие сечения будут равны). В другом ставится целью исследовать аннигиляцию электронов и позитронов при высоких энергиях с последующим рождением, помимо пионов, протона и антипротона (эта реакция также может подтвердить, что рассеяние имеет место на точечноподобных структурах). Третий эксперимент нацелен на измерение «глубоко» неупругого рассеяния реальных фотонов (ожидается, что соответствующее сечение будет аномально велико, как это имеет место для рассеяния электронов).

Неожиданные результаты по рассеянию электронов, полученные на двухмиллионном линейном ускорителе в Стэнфорде, породили высокую волну теоретических и экспериментальных исследований. Пока еще рано утверждать, приведет ли партонная модель к пониманию структуры нуклонов, или здесь потребуются совершенно новые идеи. Во всяком случае, весьма вероятно, что полное объяснение экспериментов по рассеянию электронов прояснит не только природу структуры нуклона, но также и природу сильных взаимодействий и того семейства частиц, между которыми они наблюдаются.

Фр. В. Мэрфи, Д. Е. Йант

ФОТОНЫ КАК АДРОНЫ

(ИЮЛЬ 1971 г.)

Фотоны с энергией, в миллиарды раз превышающей энергию фотонов видимого света, обнаруживают свойства, присущие, как считалось раньше, исключительно адронам — частицам, к семейству которых принадлежат протон и нейтрон.

Вопрос о природе и свойствах света в течение столетий занимал умы ученых и давал пищу для многочисленных диспутов. Природа преподнесла исследователям, изучавшим свет на самом фундаментальном уровне, парадокс. Оказалось, что свет обладает свойствами, присущими как волнам, так и частицам. Именно этот парадокс дал непосредственный толчок развитию квантовой механики. За последующие три десятилетия ученые так хорошо изучили свойства квантов света, или фотонов, и научились так хорошо предсказывать их поведение, что казалось очень маловероятным ожидать здесь каких-либо новых сюрпризов.

Однако сюрпризы не заставили себя долго ждать. Эксперименты, выполненные за последние пять лет на ускорителях высоких энергий, показали, что фотон обнаруживает свойства, присущие, как принято было думать, лишь относительно тяжелым и устойчивым частицам, образующим атомные ядра. Примером таких частиц могут служить протон или нейтрон. Эти частицы принимают участие в сильных взаимодействиях, связывающих атомное ядро в единое целое, и называются адронами. Оказалось, что фотон с энергией, в миллиарды раз превышающей энергию видимого света, при взаимодействии с адронами сам ведет себя подобно адрону. Хотя это открытие явилось неожиданностью для физиков, оно вскоре получило теоретическое объяснение. В настоящее время построены теоретические модели, благодаря которым «адронные» фотоны получили права гражданства.

До семнадцатого столетия господствовало мнение, что свет представляет собой поток частиц. Считалось, что источники света, как, например, Солнце или свеча, испускают эти частицы по всем направлениям. Некоторые вещества прозрачны для этих частиц, другие — полностью или частично непрозрачны, и в той или иной мере отражают или поглощают их. В 1678 г. Кристиан Гюйгенс показал, что законы отражения и преломления света получают более простое объяснение, если предположить, что свет представляет собой не поток независимых корпускул, а последовательность волн. В начале девятнадцатого века Томас Юнг и Августин Жан Френель независимо выполнили эксперименты по интерференции и дифракции света. Эти эксперименты свидетельствовали в пользу волновой природы света. С их помощью удалось даже измерить длину световой волны.

Во второй половине девятнадцатого века Джеймс Клерк Максвелл подвел итог исследованиям электрических и магнитных явлений. Ему удалось написать четыре уравнения, которые до сих пор составляют основу для описания всех крупномасштабных электромагнитных устройств — от электромоторов, электромагнитов и электронных счетных машин до ускорителей элементарных частиц. Из уравнений Максвелла следует, что электрический колебательный контур должен излучать электромагнитные волны. Скорость этих волн можно определить путем чисто электрических и магнитных измерений. Вычисленная таким образом скорость в точности совпадает с экспериментально найденной скоростью света. Это убедило физиков в том, что свет представляет собой специальный вид электромагнитных волн, предсказываемых уравнениями теории электромагнетизма. Так, уравнения Максвелла привели к представлению о широком электромагнитном спектре, простирающемся от видимого света, с одной стороны, до радиоволн, открытых в 1886 г. Генрихом Герцем, с другой.

Представление о корпускулярной природе света было вновь введено в 1905 г. Альбертом Эйнштейном для того, чтобы объяснить, каким образом свет, падающий на металл, выбивает с его поверхности электроны. Энергия света, вместо того чтобы непрерывно распределяться в волне, концентрируется в крошечных пакетах, называемых фотонами. Когда отдельный фотон ударяет электрон, находящийся на поверхности металла, он полностью поглощается и передает всю свою энергию электрону. Любопытно, что, как предсказал Эйнштейн и экспериментально доказал Роберт Э. Милликен, энергия фотона, а, следовательно, и выбитого электрона зависит только от частоты света — как будто каждый фотон одновременно представляет собой и волну. Другой пример корпускулярного поведения света был найден в 1924 г. Артуром Г. Комптоном. Он установил, что при столкновении с электронами фотоны рассеиваются так же, как рассеивались бы тела, энергия и импульс которых сохраняются при столкновениях. Двойственная корпускулярно-волновая природа света находит естественное объяснение в квантовой электродинамике — быть может, самой элегантной и успешной физической теории. Благодаря тому, что квантовая электродинамика предсказывает электромагнитные явления с чрезвычайно высокой точностью и в очень широком интервале энергий (на протяжении которого энергия меняется более чем в 10^{18} раз), существуют богатые возможности для ее строгой экспериментальной проверки. Развитие физики часто приводит к крушению старых теорий. Поэтому непрекращающиеся успехи квантовой электродинамики вызывают удивление, граничащее с ужасом.

До последнего времени считалось, что взаимодействие фотонов с веществом является чисто электромагнитным. Казалось, что оно обусловлено исключительно электрическими зарядами и магнитными полями частиц мишени и никак не связано с их возможными адронными, или сильными взаимодействиями. Кроме того, фотоны выступают как единственный переносчик всех электромагнитных взаимодействий. Два электрона отталкиваются друг от друга за счет того, что они обстреливают друг друга фотонами. Фотоны, которыми обмениваются электроны, существуют очень короткое время и не могут быть непосредственно обнаружены. По этой причине их называют «виртуальными» *) (рис. 3.1, а).

Когда электрон рассеивается другим электроном или какой-либо еще заряженной частицей, он резко ускоряется и может испустить дополни-

*) Более подробно концепция «виртуальных» частиц обсуждается в первой и во второй статьях настоящего сборника. (Прим. ред.)

тельные фотоны, которые уже не поглощаются. Этот эффект, называемый «тормозным излучением», аналогичен излучению радиоволн электрическим колебательным контуром. Подобно радиоволнам, фотоны тормозного излучения могут быть обнаружены, и поэтому их называют «реальными» (рис. 3.1. б). Знание свойств электромагнитных взаимодействий позволяет физикам получать в большом количестве реальные или виртуальные фотоны определенной энергии и при заданных условиях, т. е. получать фотонные

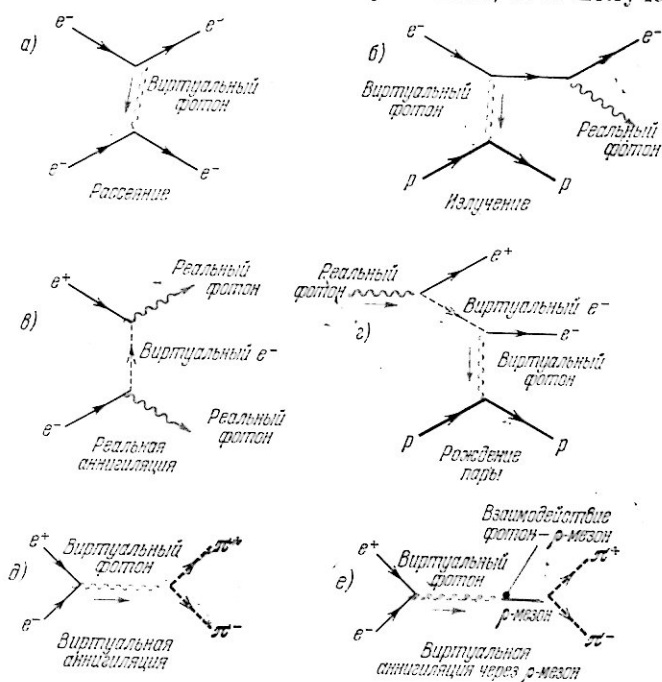


Рис. 3.1. Процессы взаимодействия частиц принято изображать с помощью диаграмм Фейнмана. Для того чтобы объяснить, как происходит передача энергии и импульса в реакции, вводят представление о ненаблюдаемых «виртуальных» частицах. Согласно принципу неопределенности виртуальные фотоны, в отличие от реальных фотонов, всегда обладающих нулевой массой, могут иметь отличную от нуля массу. При рассеянии электрона на электроне (а) происходит обмен виртуальным фотоном. При рассеянии электрона на протоне может излучаться реальный фотон (б). В дальнейшем эти фотоны можно использовать в экспериментах, в которых требуются фотонные пучки. Подобные пучки можно получить также с помощью процесса аннигиляции (в) электрона e^- и позитрона e^+ . Обратным к аннигиляции является процесс рождения электрон-позитронной пары (г). В результате электрон-позитронной аннигиляции может также образоваться пара пионов (π^+, π^-). Вероятность этого превращения значительно увеличивается в результате двухступенчатого процесса, при котором вначале виртуальный фотон превращается в ρ -мезон, а затем ρ -мезон быстро распадается на два пиона (е).

пучки. Создание контролируемых пучков фотонов высокой энергии дало в руки физиков ключ к открытию адронных свойств фотонов.

При столкновении с тяжелым атомным ядром электрон может испустить реальный фотон высокой энергии. При этом энергия, передаваемая виртуальным фотонам, обычно мала, и ядро практически остается в покое. В таком случае энергия реального фотона просто равна разности энергий электрона до и после столкновения. Эти энергии легко измерить, пропуская падающий и рассеянный электрон через сильное магнитное поле. Таким путем можно получить пучок «меченых» реальных фотонов, в котором каждый фотон обладает определенной известной энергией.

Физиков интересуют также процессы, в которых участвуют виртуальные фотоны и ядра. Если при столкновении электрона с ядром не испускаются реальные фотоны, то так же, как и в предыдущем случае, энергия

виртуального фотона равна разности энергий электрона до и после рассеяния. Если часть энергии виртуального фотона расходуется на разрушение ядра или образование новых частиц, например пионов, то такой процесс называется неупругим. Неупругое рассеяние электронов позволяет получать «меченые» недетектируемые виртуальные фотоны и проводить с ними эксперименты, аналогичные экспериментам с реальными фотонами.

Другой метод получения пучков реальных фотонов высокой энергии состоит в следующем. Фотоны видимого света рассеиваются пучком электронов высокой энергии, подобно тому как брошенный бейсбольный мяч «рассеивается» на 180° движущейся битой. Этот процесс представляет собой не что иное, как уже упоминавшееся комптоновское рассеяние. В данном случае происходит лобовое столкновение фотонов с пучком электронов, движущихся со скоростью, близкой к скорости света. Так же, как и в оригинальном эксперименте Комптона, рассеянные фотоны ведут себя подобно материальным телам с определенной кинетической энергией и импульсом, которые легко вычислить, зная экспериментальные условия. Удар биты может десятикратно увеличить энергию бейсбольного мяча. Точно так же энергия рассеянного фотона в результате столкновения с электроном может увеличиться в десятки миллиардов раз. В качестве первичного источника для получения таких пучков используют мощный импульсный лазер. Описанный процесс наглядно демонстрирует непосредственную связь между фотонами, принадлежащими к самым различным областям электромагнитного спектра. Не может быть никаких сомнений в том, что радиоволны, видимый свет, рентгеновские лучи и гамма-лучи представляют собой различные проявления одних и тех же фундаментальных электромагнитных явлений.

Для получения реальных и виртуальных фотонов используют также процессы аннигиляции, происходящие при столкновении электрона со своей античастицей, позитроном. Когда пучок позитронов падает на мишень, позитроны взаимодействуют с электронами. В результате этого могут образоваться два реальных фотона — две порции электромагнитной энергии с нулевой массой (рис. 3.1, в). Баланс энергии и импульса требует образования именно двух фотонов, а не одного. (Описанный процесс является обратным процессу рождения пары, когда один реальный фотон «материализуется», рождая электрон-позитронную пару (рис. 3.1, г). Для рождения пары также необходим второй фотон — в этом случае баланс поддерживается за счет виртуального фотона, передающего энергию и импульс соседнему ядру.) В результате электрон-позитронной аннигиляции может также образоваться один виртуальный фотон, который в свою очередь может (если его энергия достаточно велика) превратиться в другую пару частиц — античастица, например в протон и антипротон, или в положительный и отрицательный пионы (рис. 3.1, д).

На первый взгляд здесь имеется противоречие. Один реальный фотон не может обеспечить баланс энергии при электрон-позитронной аннигиляции. Почему же тогда разрешена аннигиляция с образованием одного виртуального фотона? Этот процесс возможен потому, что виртуальный фотон, в отличие от реального, не является окончательным продуктом и не может быть обнаружен. Поэтому он не обязан обладать нулевой массой. Виртуальный фотон существует чрезвычайно короткое время. Согласно принципу неопределенности Вернера Гейзенберга это приводит к невозможности точно определить его энергию. В пределах этой неопределенности энергия и импульс в течение короткого времени взаимодействия могут быть несбалансированы. При этом, однако, энергия и импульс начальных и конечных частиц, существующих достаточно долго для того, чтобы их

можно было зарегистрировать, сохраняются. Слова «энергия и импульс несбалансированы» означают, что виртуальный фотон имеет ненулевую массу. Чем меньше время жизни, тем больший интервал значений может пробегать масса виртуальной частицы. В течение короткого времени взаимодействия реальный фотон также может обладать ненулевой массой, но это мгновенное отклонение от нормы невозможно непосредственно измерить. Фотоны, которые излучаются при аннигиляции электрона и позитрона, могут быть зарегистрированы, и поэтому всегда рождаются парами. Если же продуктом аннигиляции является виртуальный фотон, то нет необходимости в одновременном рождении второй частицы, поскольку, прежде чем удастся заменить отклонение массы фотона от нормы, он уже успеет превратиться во что-нибудь еще.

Еще большую роль играет принцип неопределенности в рассуждениях, демонстрирующих связь между фотонами и адронами. Как мы уже говорили, масса взаимодействующего фотона высокой энергии может пробегать широкий интервал значений. Благодаря этому фотон может приобретать массу и другие атрибуты адронов, называемых векторными мезонами. Элементарные частицы можно классифицировать, приписывая каждой из них совокупность значков, называемых квантовыми числами. (Примерами таких чисел могут служить электрический заряд и спиновый момент, или спин.) Если известны квантовые числа частиц, то можно предсказать, какие взаимодействия возможны между ними. Это сильно упрощает ориентировку в лабиринте возможных взаимодействий.

Незаряженные векторные мезоны с нулевой «страшностью» (так называется некоторое специальное внутреннее свойство частицы) имеют те же самые квантовые числа, что и фотон. Однако даже в свободном, реальном состоянии векторные мезоны обладают ненулевой массой. Поскольку они сильно взаимодействуют с другими мезонами и нуклонами, их следует отнести к адронам. Квантовая механика учит, что если две частицы имеют одинаковые квантовые числа, то в тех случаях, когда их эффективные массы совпадают, они могут участвовать в одних и тех же взаимодействиях. Это обстоятельство сильно облегчает взаимодействие фотонов с адронами. Можно считать, что это взаимодействие осуществляется в два этапа. Сначала фотон в окрестности взаимодействующего адрона превращается в векторный мезон, а затем векторный мезон сильно взаимодействует с этим адроном (рис. 3.1, е). При высоких энергиях этот двухступенчатый процесс более вероятен, чем прямое взаимодействие. С ростом неопределенности в энергии и массе виртуального фотона его превращение в векторный мезон все более облегчается, а последующее мезон-адронное взаимодействие происходит с вероятностью, примерно в 200 раз большей, чем прямое фотон-адронное взаимодействие.

Особенно полезная модель фотон-адронного взаимодействия была предложена в 1960 г. Дж. Дж. Сакураи. Впоследствии эта модель, получившая название модели векторной доминантности, развивалась многими исследователями. В основе этой модели лежат три положения. Во-первых, считается, что в процессе фотон-адронного взаимодействия падающий фотон эквивалентен некоторой комбинации векторных мезонов. Во-вторых, любой фотон, провзаимодействовавший с адроном, представляет собой некоторую комбинацию векторных мезонов. Третье положение представляет собой весьма старый принцип, впервые открытый в обычной оптике. Этот принцип связывает поглощение света с его дифракционным рассеянием. Соотношение, связывающее дифракцию и поглощение, называется «оптической теоремой». Модели, в которых эта теорема играет важную роль, называются «эйкональными». Термин «эйкональный» означает

«имеющий отношение к картине или к изображению». В данном случае он кажется особенно уместным, поскольку дифрагировавшие фотоны образуют изображение мишени (будь то часть скульптуры или атомное ядро), а поглощенные фотоны ответственны за образование тени. Сущность оптической теоремы состоит в том, что она связывает изображение с тенью.

Хорошей иллюстрацией применения оптической теоремы к описанию фотонов высокой энергии могут служить недавние эксперименты по упругому рассеянию (дифракции) фотонов высокой энергии на протонах (рис. 3.2). Термин «упругое» означает, что в этом процессе не образуется никаких дополнительных частиц. В начальном и конечном состоянии присутствуют одни и те же протон и фотон. С уменьшением угла рассеяния вероятность рассеяния приближается к значению, предсказываемому оптической теоремой. Эти предсказания основываются в свою очередь на известной из независимых измерений вероятности поглощения фотонов протонами. В результате поглощения исчезают обе первоначальные частицы — как фотон, так и протон. Таким образом, рассеяние связано с поглощением, изображение связано с тенью.

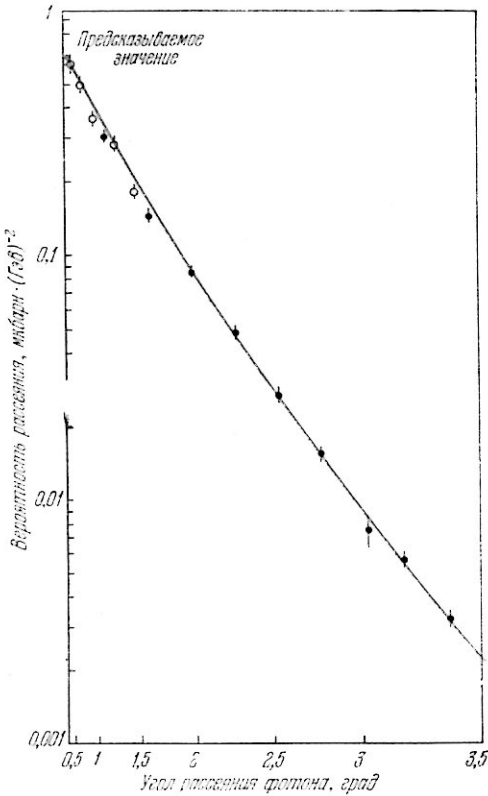


Рис. 3.2. Вероятность упругого рассеяния фотонов протонами меняется в зависимости от угла рассеяния. Сплошная кривая соединяет экспериментальные точки, полученные в СЛАКе для фотонов с энергией от 16 до 17 Гэв. С уменьшением угла вероятность рассеяния приближается к значению, предсказываемому «оптической» теоремой. При стремлении угла рассеяния к нулю число рассеянных фотонов все увеличивается, и вероятность рассеяния стремится к значению, связанному, согласно оптической теореме, с вероятностью поглощения фотона.

Моделю векторной доминантности описывает целый ряд процессов с участием реальных и виртуальных фотонов и векторных мезонов. Однако ее наиболее важные предсказания следующие. Предсказываются: во-первых, величины констант, характеризующих силу взаимодействия фотона с каждым из векторных мезонов; во-вторых, вероятность рождения того или иного векторного мезона в результате соударения фотона с нуклоном (т. е. с протоном или нейтроном); в-третьих, вероятность того, что векторный мезон, сталкивающийся с нуклоном, будет взаимодействовать с ним; в-четвертых, полная вероятность поглощения фотона адроном, другими словами, полная вероятность того, что сталкивающийся с адроном фотон будет сильно взаимодействовать с ним. Предсказания модели можно проверить, измеряя на опыте вышеупомянутые вероятности и константы связи.

В настоящее время известны три сорта векторных мезонов с нулевой странностью: ρ -, ω - и ϕ -мезоны. Заряд ρ -мезона может быть положительным, отрицательным или нулевым. ω - и ϕ -мезоны всегда обладают нулевым зарядом. Поскольку фотоны имеют нулевой заряд, они сильно взаи-

могут служить недавние эксперименты по упругому рассеянию (дифракции) фотонов высокой энергии на протонах (рис. 3.2). Термин «упругое» означает, что в этом процессе не образуется никаких дополнительных частиц. В начальном и конечном состоянии присутствуют одни и те же протон и фотон. С уменьшением угла рассеяния вероятность рассеяния приближается к значению, предсказываемому оптической теоремой. Эти предсказания основываются в свою очередь на известной из независимых измерений вероятности поглощения фотонов протонами. В результате поглощения исчезают обе первоначальные частицы — как фотон, так и протон. Таким образом, рассеяние связано с поглощением, изображение связано с тенью.

Моделю векторной доминантности описывает целый ряд процессов с участием реальных и виртуальных фотонов и векторных мезонов. Однако ее наиболее важные предсказания следующие. Предсказываются: во-первых, величины констант, характеризующих силу взаимодействия фотона с каждым из векторных мезонов; во-вторых, вероятность рождения того или иного векторного мезона в результате соударения фотона с нуклоном (т. е. с протоном или нейтроном); в-третьих, вероятность того, что векторный мезон, сталкивающийся с нуклоном, будет взаимодействовать с ним; в-четвертых, полная вероятность поглощения фотона адроном, другими словами, полная вероятность того, что сталкивающийся с адроном фотон будет сильно взаимодействовать с ним. Предсказания модели можно проверить, измеряя на опыте вышеупомянутые вероятности и константы связи.

В настоящее время известны три сорта векторных мезонов с нулевой странностью: ρ -, ω - и ϕ -мезоны. Заряд ρ -мезона может быть положительным, отрицательным или нулевым. ω - и ϕ -мезоны всегда обладают нулевым зарядом. Поскольку фотоны имеют нулевой заряд, они сильно взаи-

действуют только с нейтральными векторными мезонами. Наблюдаемые закономерности в классификации элементарных частиц породили многочисленные попытки объяснить и предсказать их. Одной из таких попыток является кварковая модель, предложенная независимо Мюрреем Гелл-Манном и Георгом Цвайгом из Калифорнийского технологического института. Они предположили, что элементарные частицы представляют собой комбинации некоторых «сущностей» (возможно чисто математических), называемых кварками. Кварковая модель предсказывает, что фотон должен вести себя так, как если бы он состоял на 75% из ρ -мезонов, на 8% из ω -мезонов и на 17% из φ -мезонов. В действительности это означает, что если рассмотреть большое число взаимодействий, то в 75% случаев фотон будет вести себя, как ρ -мезон, в 8% случаев, как ω -мезон и в 17% случаев, как φ -мезон. Таким образом, из всех векторных мезонов ρ -мезон играет наиболее важную роль как переносчик фотон-адронного взаимодействия. Поэтому иногда вместо векторной доминантности говорят о ρ -доминантности. Векторные мезоны могут рождаться как фотонами, так и адронами. Это позволяет сравнить различные механизмы их рождения. Время жизни векторных мезонов, хотя и превышает во много раз время жизни виртуальных фотонов, все же очень мало. Ни один из векторных мезонов не существует достаточно долго для того, чтобы образовать след в пузырьковой или искровой камере. Поэтому сведения о них получают косвенным путем, наблюдая долгоживущие частицы, на которые они распадаются. Наиболее типичными являются распады ρ -мезона на два пиона, ω -мезона на три пиона и φ -мезона на два каона.

Массу векторного мезона можно вычислить, зная массы, энергии и импульсы его продуктов распада. Однако значения масс, вычисленные на основании результатов большого числа идентичных экспериментов, не совпадают между собой, даже если экспериментальные ошибки пренебрежимо малы. Вместо этого они образуют «резонансное» распределение, которое описывается кривой в виде колокола, имеющей определенную ширину и расположенной симметрично относительно некоторого среднего значения массы (рис. 3.3). Такое поведение следует из принципа неопределенности, согласно которому масса данной частицы не обязана иметь постоянное значение. Постоянным должно быть лишь произведение среднего времени жизни на ширину кривой резонансного распределения масс. Чем шире кривая распределения масс, тем меньше время жизни; чем уже кривая, тем больше время жизни.

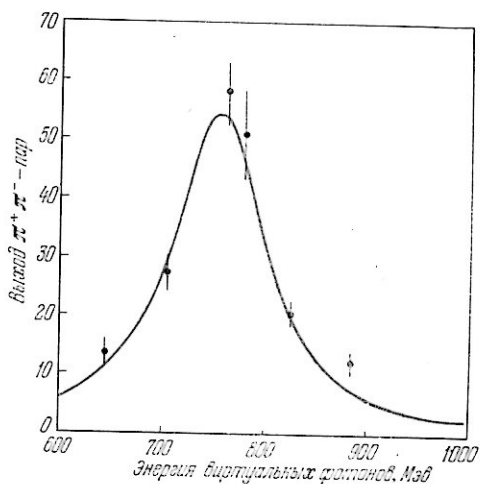


Рис. 3.3. Массу ρ -мезона можно найти, определив, какой энергии виртуального фотона соответствует максимальный выход пар $\pi^+\pi^-$ -частиц, рождающихся в результате распада ρ -мезона. Энергия виртуального фотона в свою очередь равна сумме энергий электрона и позитрона, при аннигиляции которых он образовался. Приведенные здесь данные были получены в Орсе (Франция) в экспериментах на встречных электрон-позитронных пучках. Кривая, изображенная на рисунке, соответствует массе ρ -мезона, равной (770 ± 4) Мэв, и резонансной ширине (111 ± 6) Мэв. Чем шире резонансная кривая для таких частиц (которые сами называются резонансами), тем меньше их время жизни. Большая часть ρ -мезонов распадается прежде, чем они успевают пройти расстояние в несколько радиусов ядра. Аналогичные, но гораздо меньшие пики наблюдаются на кривой в точках, соответствующих массам ω - и φ -мезонов.

Существование векторных мезонов было предсказано впервые в 1957 г. Йоширо Намбу и двумя годами позже Вильямом Р. Фрезером и Джозом Р. Фулко для объяснения диффузной структуры нейтронов и протонов, обнаруженной в экспериментах, выполненных в Стэнфордском университете Робертом Хофштадтером и его коллегами. Название «векторный мезон» обусловлено наличием у этих частиц спина, равного единице, который преобразуется при переходе от одной пространственной системы координат к другой, как вектор. Другое квантовое число, характеризующее эти частицы, внутренняя четность, равно минус единице. Спин и четность векторных мезонов и фотонов, равно как и все остальные внутренние квантовые числа, одинаковы.

Наиболее чистым методом исследования векторно-мезонной структуры фотона являются эксперименты на встречных электрон-позитронных пучках. В этих экспериментах процесс рождения векторных мезонов выступает в чистом виде, изолированно от всех прочих взаимодействий. Подобные эксперименты в настоящее время уже выполнены во Франции в Орсе и в Советском Союзе в Новосибирске. При аннигиляции электрона и позитрона часто рождается один виртуальный фотон, который может немедленно превратиться в одну из векторных мезонных компонент фотона. Обычно факт рождения того или иного векторного мезона устанавливаются, вычисляя его массу по измеренным энергиям и импульсам его продуктов распада. На практике эти продукты детектируются искровыми камерами и счетчиками, установленными вокруг области взаимодействия.

Аннигиляция электрона и позитрона в один виртуальный фотон является чисто электромагнитным процессом. Вероятность этого процесса может быть вычислена очень точно и с высокой степенью надежности. Все векторные мезоны, порождаемые виртуальными фотонами, немедленно распадаются. Поэтому, чтобы определить полную вероятность «материализации» виртуального фотона, необходимо лишь измерить, какая часть этих распадов регистрируется, и вычислить эффективный измерительной аппаратуры. Из результатов экспериментов на встречных пучках, выполненных в Орсе, следует, что фотон «состоит» на $(75 \pm 2)\%$ из ρ -мезонов $(10 \pm \pm 2)\%$ из ω -мезонов и $(15 \pm 2)\%$ из φ -мезонов. Эти данные хорошо согласуются с предсказаниями кварковой модели. В этих экспериментах были также непосредственно измерены средние значения масс и ширины резонансных распределений. (Ранее значения этих параметров вычислялись по результатам других экспериментов, в которых невозможно было полностью исключить влияние адронов мишени.) Эксперименты на встречных пучках, выполненные в Орсе и в Новосибирске, не только являются блестящим техническим достижением, но и обладают тем несомненным преимуществом, что в них вообще не используются адронные мишени.

Изучению процесса рождения векторных мезонов реальными фотонами было посвящено множество разнообразных экспериментов. С этой целью успешно использовались все описанные выше методы получения пучков фотонов высокой энергии: тормозное излучение, электрон-позитронная аннигиляция, комптоновское рассеяние назад лазерных фотонов электронами высокой энергии. В качестве детекторов использовались самые разнообразные приборы — от визуальных устройств (пузырьковые, искровые и стримерные камеры) до 2000-тонных магнитных спектрометров, способных зарегистрировать одиночную частицу отдачи, например протон мишени. Из полученных таким образом данных можно извлечь достаточно полную информацию о рождении резонансов.

Как правило, визуальные устройства позволяют детально проанализировать как процессы рождения, так и процессы распада, даже в тех случаях, когда в конечном состоянии присутствует много частиц. Электронная аппаратура, как, например, магнитные спектрометры, снабженные различного рода счетчиками, дает менее детальную информацию о конкретном событии и не может достаточно эффективно использоваться в сложных случаях, когда в результате взаимодействия образуется много частиц. Эти приборы имеют, однако, одно важное преимущество. Их можно использовать в экспериментах с пучками высокой интенсивности, когда нужно накопить большое число событий, или исследовать очень редкие процессы, при которых большая часть фотонов пролетает мимо мишени вхолостую. Целью упомянутых выше экспериментов было не только получение новых данных о свойствах векторных мезонов и о процессах их рождения, но и поиски новых векторных мезонов. Однако до сих пор такие мезоны обнаружить не удалось.

Анализируя продукты распада, нетрудно определить, какой именно из трех векторных мезонов родился. Однако интересно было бы также знать, что произойдет, когда родившийся ρ -мезон (или какой-нибудь другой векторный мезон) столкнется с нуклоном. Но как можно надеяться изучить ρ -нуклонное рассеяние, когда весь путь, проходимый ρ -мезоном за его короткую жизнь, настолько мал, что его даже нельзя увидеть? В действительности расстояние, которое успевает пройти ρ -мезон от точки рождения до того, как он распадается на два пиона, обычно не превышает нескольких ядерных радиусов. Выход из этого положения был предложен Марком Х. Россом и Лео Стодольским и независимо Сиднеем и Д. Дреллом и Джеймсом Трефилом. Они предложили изучать рассеяние ρ -мезона на нуклонах того же самого ядра, внутри которого он родился. Рождение ρ -мезона, не сопровождаемое последующим ρ -нуклонным рассеянием, можно изучать на простейших ядрах, таких как ядро обыкновенного водорода, состоящего всего из одного нуклона. Результаты, полученные на водороде, можно сравнить с результатами, полученными, например, на ядрах бериллия, углерода, алюминия, меди, серебра и свинца. Эти ядра перечислены здесь в порядке возрастания диаметра. С ростом диаметра соответственно увеличивается роль, которую играют эффекты ρ -нуклонного рассеяния и поглощения.

В экспериментах по фоторождению ρ -мезонов, выполненных в Гамбурге на Немецком электронном синхротроне (ДЭЗИ), в Корнельском университете и на Стэнфордском линейном ускорителе (СЛАК), были получены данные для более чем дюжины различных ядер-мишеней в широком интервале энергий фотонов и углов рождения ρ -мезонов (рис. 3.4). С помощью счетчиков и искровых камер, использовавшихся совместно с магнитными спектрометрами, было собрано большое количество данных. Были зарегистрированы сотни тысяч ρ -мезонов. Качественно результаты этих экспериментов выглядят следующим образом. При малых углах фоторождения число ρ -мезонов, приходящихся на один нуклон мишени, увеличивается с увеличением числа нуклонов в ядрах мишени вплоть до ядра, состоящего из 64 нуклонов (медь). В дальнейшем число родившихся ρ -мезонов остается постоянным и даже уменьшается. Увеличение числа родившихся мезонов в пересчете на один нуклон указывает на то, что при согласованной совместной работе нуклоны мишени рожают ρ -мезоны более эффективно, чем такое же число независимых нуклонов. Этот эффект аналогичен явлению конструктивной интерференции света, испускаемого когерентным источником, например лазером. В более тяжелых ядрах в результате ρ -нуклонного рассеяния все большее число ρ -мезонов поглощается до того,

как им удается вылететь за пределы ядра. Поглощение сводит на нет те преимущества, которые дает когерентное рождение ρ -мезонов, и поэтому

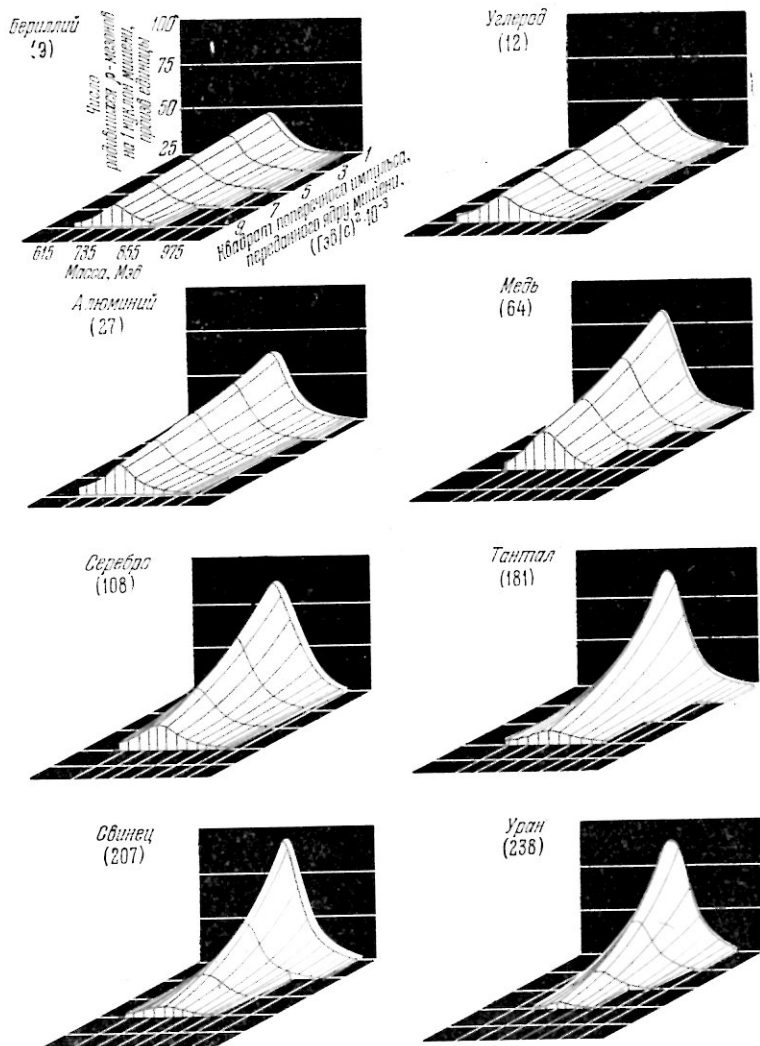


Рис. 3.4. Процессы рождения и рассеяния ρ -мезонов изучают, бомбардируя мишени, состоящие из ядер различной массы, фотонами высокой энергии. Время жизни ρ -мезона так мало (около 10^{-23} сек), что обычно он распадается на два пиона прежде, чем он смог бы достичь другого нуклона и рассеяться на нем. На рисунках приведены данные по рождению ρ -мезонов, полученные путем изучения продуктов распада ρ -частиц. Диаграммы построены для мишеней, состоящих из восьми различных материалов, начиная с бериллия, ядро которого состоит всего из 9 нуклонов (протонов или нейтронов), и кончая ураном, ядро которого содержит 238 нуклонов. При данном значении поперечного импульса площадь, ограниченная колоколообразной кривой, представляющей распределение масс ρ -мезонов, сначала увеличивается с увеличением числа нуклонов в ядрах мишени. Начиная приблизительно с меди (64 нуклона), число ρ -мезонов, приходящихся на один нуклон, становится примерно постоянным или даже уменьшается с увеличением числа нуклонов. Чем тяжелее ядро, тем больше рождается ρ -мезонов, но одновременно возрастает и поглощение ρ -мезонов.

выход ρ -мезонов на один нуклон мишени для элементов, ядра которых содержат более 64 нуклонов, не увеличиваются.

Из результатов этих экспериментов следует, что характерные расстояния, которые проходит ρ -мезон в ядерном веществе до взаимодействия с нуклоном (так называемая средняя длина свободного пробега), составляют

примерно 3 ферми (1 ферми = 10^{-13} см). Приблизительно такую длину имеет радиус ядра углерода. Радиус протона в 4 раза меньше. Аналогичный результат получается и в том случае, когда ядра мишени бомбардируются пучком обычных адронов, таких как протоны или пионы, а не «р-пучками», созданными внутри данного ядра. Следовательно, при взаимодействии с адронами р-мезон ведет себя, как типичный адрон.

Наиболее важное предсказание, следующее из модели векторной доминантности, касается вероятности сильного взаимодействия фотона высокой энергии с нуклоном. В таком процессе вся электромагнитная энергия фотона «материализуется» в адроны. В экспериментах по полному поглощению высокоэнергетических фотонов использовались все описанные

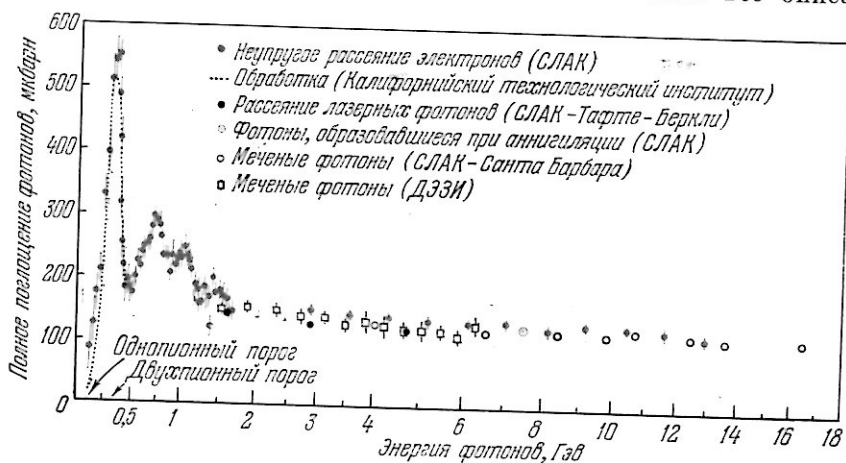


Рис. 3.5. «Адроподобное» поведение фотонов демонстрируется приведенными здесь данными, показывающими полную вероятность поглощения фотонов протонами в адронных событиях. Результаты, относящиеся к виртуальным фотонам, полученные в экспериментах по неупругому рассеянию в СЛАКе (цветные точки), хорошо согласуются с результатами многочисленных экспериментов, в которых использовались реальные фотоны. При энергиях, меньших 2 Гэв, хорошо видны острые пики, а в дальнейшем экспериментальные точки ложатся на плавную кривую. Почти точно такую же форму имеет кривая, характеризующая поглощение пионов (настоящих адронов). Таким образом, данные, относящиеся к фотонам, показывают, что фотоны могут вести себя подобно адронам.

выше методы получения фотонов с заданной энергией. В частности, в СЛАКе для бомбардировки нуклонов, находящихся в метровой пузырьковой камере, использовались фотоны, рожденные в результате электрон-позитронной аннигиляции. Аналогичные реакции изучались в двухметровой пузырьковой камере с помощью лазерных фотонов, испытавших комптоновское рассеяние на электронах. Пучки «меченых» фотонов использовались в ДЭЗИ в экспериментах как с пузырьковыми камерами, так и со счетчиками. Такие же пучки использовались в СЛАКе в экспериментах со счетчиками. Наконец, в СЛАКе с помощью спектрометров изучалось неупругое рассеяние электронов с целью определения степени поглощения виртуальных фотонов протонами.

Результаты этих экспериментов при энергиях вплоть до 18 Гэв превосходно согласуются между собой (рис. 3.5). Из них следуют два основных вывода. Во-первых, реальные и виртуальные фотоны поглощаются протонами в одинаковой степени. Во-вторых, хотя протоны поглощают адроны примерно в 200 раз сильнее, чем фотоны, характер зависимости поглощения от энергии в обоих случаях одинаков. Короче говоря, независимо от того, являются ли фотоны реальными или виртуальными, степень их поглощения протонами согласуется с представлением об их

адронной природе. Это еще раз подтверждает важность двухступенчатого процесса, при котором в начале фотон превращается в векторный мезон, а затем векторный мезон взаимодействует с адроном.

Из модели векторной доминантности следует еще одно предсказание такого же сорта — при высоких энергиях поглощение фотонов протонами и нейтронами должно быть одинаково. Сравнение соответствующих данных при энергиях вплоть до 18 Гэв было проведено в СЛАКе объединенной группой Калифорнийского университета в Санта Барбара и СЛАКа (рис. 3.6). В этих экспериментах пучок фотонов направлялся на водород,

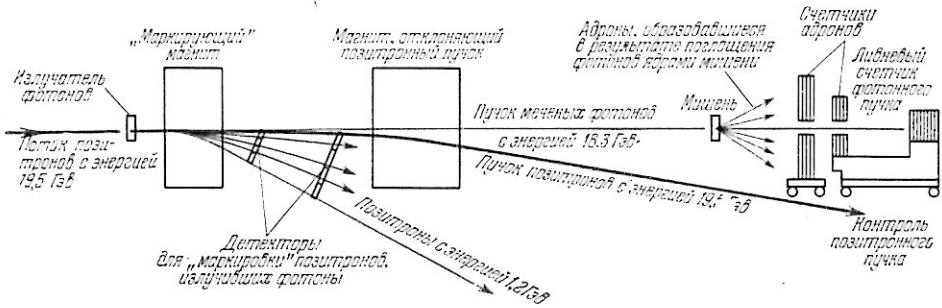


Рис. 3.6. Здесь изображено экспериментальное оборудование, использовавшееся для изучения поглощения фотонов. Это оборудование было сконструировано группой сотрудников Калифорнийского университета в Санта Барбара и СЛАКа. Пучок вторичных позитронов с энергией $19,5 \text{ Гэв}$ входит слева и ударяется о вольфрамовую мишень, являющуюся излучателем фотонов. Позитроны отклоняются «маркирующим» магнитом на различные углы, в зависимости от того, какую энергию они потеряли, излучая фотоны. Далее расположен еще более сильный магнит, который отклоняет все позитроны, сохранившие свою первоначальную энергию. Меченые фотоны (т. е. фотоны с известной энергией, равной энергии, потерянной родившими их позитронами) распространяются прямолинейно до тех пор, пока не попадут на предназначенную для них мишень. В результате поглощения фотона образуются пионы, которые регистрируются счетчиком адронов. Непоглотившие фотоны попадают в ливневый счетчик фотонного пучка. Пионы и другие частицы, принимающие участие в сильных взаимодействиях, согласно принятой классификации называются адронами. Этот эксперимент демонстрирует, что иногда фотоны ведут себя подобно адронам. Фотоны, образующие электрон-позитронные пары или рассеянные электроны, не детектируются как «адронные события». Они свободно проходят через отверстия в адронных счетчиках.

дейтерий и другие мишени. В то время как ядро обычного водорода состоит из одного протона, ядро дейтерия содержит один протон и один нейтрон. Оказывается, что поглощение фотонов нейтронами почти равно разнице в поглощении фотонов ядрами дейтерия и водорода. (Необходимо сделать лишь поправку порядка 5%, чтобы учесть эффект «затенения» одного нуклона другим в дейтерии.) Если экстраполировать результаты, полученные группой Санта Барбара — СЛАК, к бесконечной энергии фотона, то, как и ожидалось, поглощение фотонов нейтронами и протонами оказывается одинаковым (рис. 3.7). При более низких энергиях фотоны поглощаются протонами примерно на 10% сильнее, чем нейтронами. Этот эффект возможно обусловлен тем, что в рассматриваемом процессе принимают участие другие, не векторные мезоны.

Однако наиболее ярко адронный характер света проявляется в процессе полного поглощения фотонов высокой энергии большими ядрами. Здесь, более чем где-либо еще, природа самого света зависит от того, наблюдаются ли его электромагнитные, или адронные взаимодействия. Как мы уже объясняли, степень поглощения фотонов протонами примерно в 200 раз меньше, чем степень поглощения ρ -мезонов или пионов протонами. Это неудивительно, поскольку в двухступенчатом процессе взаимодействия первая ступень — превращение фотона в векторный мезон — является довольно маловероятным процессом. С другой стороны, средняя длина свободного пробега фотонов, соответствующая наблюдаемой степени пог-

лощения, составляет около 700 ферми, т. е. в 200 с лишним раз больше, чем длина пробега ρ -мезона (равная примерно 3 ферми). Наглядно можно представить себе, что для поглощения света в его первоначальной, электромагнитной форме требуется 700 слоев ядерного вещества. В то же время для полной остановки адронов достаточно трех слоев того же самого материала. Следовательно, фотоны легко проходят через большие ядра, в то время как адроны лишь едва проникают за поверхность и очень редко взаимодействуют с протонами внутри ядра.

Поскольку пучок фотонов проходит, почти не ослабевая, через такой большой слой ядерного вещества, можно было бы наивно предполагать, что он будет «освещать» все нуклоны в данном ядре. В этом случае поглощение

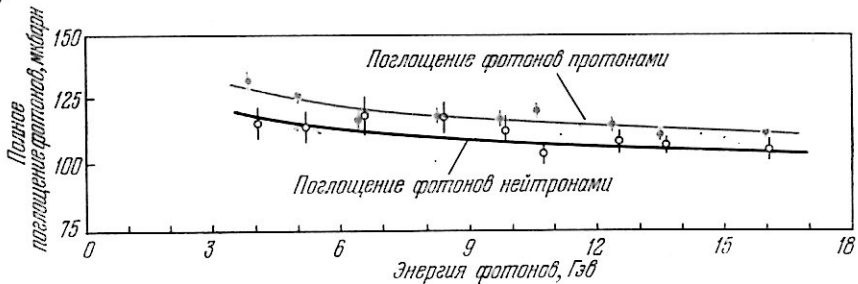


Рис. 3.7. Сходное поведение протонов и нейтронов демонстрируется экспериментами, выполненными объединенной группой Санта Барбара — СЛАК. В этих экспериментах измерялась способность обоих типов нуклонов поглощать фотоны. Теория предсказывает, что если фотоны ведут себя подобно адронам, то обе частицы должны поглощать фотоны очень высокой энергии в одинаковой степени. Экспериментальные данные подтверждают это предсказание, если экстраполировать обе кривые к бесконечности. Небольшое различие между кривыми, которое наблюдается при умеренных энергиях фотонов, возможно, указывает на то, что в поглощение дают вклад помимо известных векторных мезонов и другие мезоны.

фотонов было бы пропорционально полному числу нуклонов в каждом ядре и, тем самым, объему ядра. В противоположность этому поглощение адронов пропорционально, как известно, числу нуклонов, находящихся на поверхности, и, следовательно, пропорционально площади поверхности ядра. Дело обстоит так, как если бы каждое ядро представляло собой черный диск. Парадоксальным образом модель векторной доминантности и оптическая теорема предсказывают, что отношение поглощения фотонов ядрами к поглощению адронов теми же ядрами должно зависеть только от вероятности превращения фотона в адрон и должно быть одинаковым для всех ядер. При этом вероятности обоих процессов меняются одинаковым образом пропорционально площади поверхности, а не объему ядра. Таким образом, нам приходится принять, что хотя ядра почти прозрачны для фотонов высокой энергии, поверхностные нуклоны могут полностью экранировать внутренние.

Это один из тех парадоксов, которые природа постоянно преподносит тем, кто слишком уверен в своем здравом смысле. Например, в 1819 г. французский математик Симон Денис Пуассон вдребезги разбил волновую теорию света путем «приведения» к абсурду. Он безукоризненно, с точки зрения математики, показал, что волновая теория Френеля предсказывает существование яркого пятна в центре тени, которую отбрасывает диск, освещенный точечным источником света. Такой вывод казался, очевидно, абсурдным. Увы, мсье Пуассон, тень, отбрасываемая таким диском, например монеткой, освещаемой светом, проходящим через булавочное отверстие, действительно имеет в центре яркую точку.

Чтобы понять парадоксальное поведение сильно взаимодействующих фотонов, мы должны снова привлечь принцип неопределенности. Дело в том,

что положение точки на пути фотона, в которой он превращается в векторный мезон, точно не определено, причем степень неопределенности пропорциональна энергии фотона. Когда эта неопределенность велика по сравнению со средней длиной свободного пробега адрона в ядерном веществе (как это имеет место в случае фотонов высокой энергии), фотон должен превратиться в адрон задолго до того, как он достигнет поверхности ядра. В результате происходит поглощение фотона и образование тени. Приведенные рассуждения можно обратить.

Предположим, что эффект затенения отсутствует. Тогда превращение фотона в ρ -мезон должно происходить непосредственно перед точкой поглощения. Это, однако, противоречит неопределенности положения точки перехода. Следовательно, эффект затенения должен иметь место!

Означает ли это, что большие ядра поглощают большую часть падающих на них фотонов? Совсем нет. Почти все фотоны беспрепятственно проходят через ядро. Вероятность того, что фотон будет вести себя подобно адрону и сильно взаимодействовать с нуклонами, имеет заметную величину лишь для поверхностных нуклонов, а для нуклонов, расположенных внутри, практически близка к нулю. Фотон, проникший через поверхность ядра, очень быстро становится «голым» и лишается своих адронных свойств. Предположим, что фотон последовательно прохо-

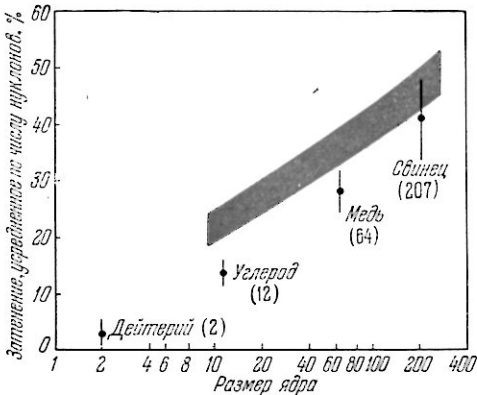


Рис. 3.8. При бомбардировке фотонами атомных ядер различного размера наблюдается эффект затенения одних нуклонов другими. Если бы взаимодействие фотонов было чисто электромагнитным, то затенение отсутствовало бы. Закрашенная полоса показывает предсказываемый моделью «векторной доминантности» процент затенения, усредненный по числу нуклонов. Эксперименты, выполненные в СЛАК группой из Университета в Санта Барбара, дают для дейтерия, углерода, меди и свинца несколько меньшие значения (черные точки). Здесь приведены средние данные для фотонов с энергией от 7 до 18 Гэв.

дит через два расположенных достаточно далеко друг от друга ядра. Будет ли при этом первое ядро затенять второе? Нет. При тех энергиях, с которыми мы обычно имеем дело, расстояние, на протяжении которого фотон, согласно принципу неопределенности, остается «голым», гораздо меньше, чем расстояния между ядрами. Поэтому затенение одного атомного ядра другим происходит очень редко.

Вывод об образовании тени поверхностными нуклонами следует непосредственно из принципа неопределенности и из адронного характера света и не зависит ни от каких деталей модели векторной доминантности. Поэтому для проверки гипотезы об адронном характере света достаточно исследовать процессы полного поглощения фотонов ядрами возрастающего размера. Фотоны могут считаться чисто электромагнитными только в том случае, если ядра остаются прозрачными, освещаются все нуклоны и поглощение пропорционально полному числу нуклонов.

Результаты, полученные группой Санта Барбара — СЛАК в экспериментах с мишенями из обыкновенного водорода, дейтерия, углерода, меди и свинца, показывают, что поглощение фотонов не пропорционально ни полному числу нуклонов, ни числу нуклонов, находившихся на поверхности. Экспериментальные данные ложатся несколько ниже (рис. 3.8). Некоторый эффект затенения несомненно имеет место. Тем самым, в основном подтверждается представление об адронном характере света. Сле-

довательно, качественно результаты экспериментов согласуются с моделью векторной доминантности. Однако количественно степень затенения меньше, чем это следует из модели векторной доминантности и результатов других экспериментов. Означает ли это, что помимо ρ -, ω - и ϕ -мезонов существуют еще другие взаимодействующие с фотонами векторные мезоны? Быть может, фотоны превращаются в векторные мезоны с меньшей вероятностью, чем принято думать сейчас. Возможно также, что векторные мезоны поглощаются в ядерном веществе не так сильно, как это кажется по результатам современных экспериментов. Ответы на все эти вопросы, равно как и окончательная судьба модели векторной доминантности, могут зависеть от экспериментов, которые уже планируются на ускорителе с энергией 70 Гэв, действующем в настоящее время в Серпухове под Москвой, и на ускорителе с энергией 500 Гэв, который вскоре будет введен в строй в Национальной лаборатории в Батавии.

АТОМ МЮОНИЯ

(АПРЕЛЬ 1966 г.)

Этот недавно открытый атом состоит всего из двух элементарных частиц: положительного мюона и электрона. Изучение его энергетических уровней позволило получить новую точную информацию относительно всех электромагнитных взаимодействий.

Эта статья посвящена необычному новому атому, получившему название мюоний. Он был впервые обнаружен в 1960 г. в результате экспериментов, выполненных моими коллегами и мной. Атом мюония состоит только из двух элементарных частиц материи: положительного мюона (сокращенно μ^+) и электрона (e^-). Во многих отношениях атом мюония напоминает простейший обычный атом — атом водорода, состоящий из

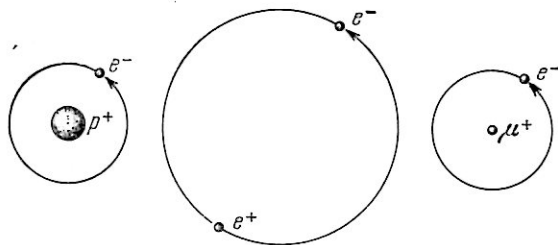


Рис. 4.1. Здесь изображены три простейших атома, каждый из которых состоит только из двух элементарных частиц. Простейший обычный атом, атом водорода состоит из протона (p^+) и электрона (e^-). Атом позитрония, открытый в 1953 г., состоит из электрона и его античастицы, позитрона, или положительно заряженного электрона (e^+). Атом мюония, открытый автором и его коллегами в 1960 г., состоит из электрона (e^-) и положительного мюона (μ^+). Относительные размеры орбит этих трех атомов показаны в масштабе. Частицы изображены не в масштабе.

протона (p^+) и электрона (e^-) (рис. 4.1). И действительно, мюоний можно рассматривать как более легкий изотоп водорода. В обоих атомах ядром является сравнительно тяжелая положительно заряженная частица (протон или мюон), вокруг которой вращается гораздо более легкая отрицательно заряженная частица (электрон). Массы электрона, мюона и протона относятся соответственно как 1 : 207 : 1836. Атом мюония имеет также определенное сходство с атомом позитрония, который был открыт сотрудниками Массачусетского технологического института в 1953 г. Атом позитрония состоит из электрона и позитрона, т. е. положительно заряженного электрона (e^+). Основное различие между мюонием и позитронием состоит в том, что положительный мюон обладает гораздо большей массой, чем электрон, в то время как масса позитрона равна массе электрона. Вдобавок электрон и позитрон являются частицей и античастицей и, следовательно, могут аннигилировать, образуя электромагнитное излучение в виде гамма-лучей. Напротив, электрон и положительный мюон не являются частицей и античастицей и не аннигилируют.

электрона (e^-). Массы электрона, мюона и протона относятся соответственно как 1 : 207 : 1836.

Атом мюония имеет также определенное сходство с атомом позитрония, кото-

Одна из основных причин того большого внимания, которое привлек атом мюония с самого момента своего открытия, состоит в том, что мюон сам по себе является весьма таинственной частицей. Открытый в 1936 г. мюон в течение некоторого времени ошибочно считался мезоном. Такое название было дано частице среднего веса, являющейся переносчиком сильного ядерного взаимодействия. Наиболее характерной особенностью мюона является то, что он взаимодействует со всеми прочими частицами и полями в точности, как тяжелый электрон. Это единственный четкий случай, когда разность масс двух частиц нельзя объяснить с помощью различных взаимодействий, в которых участвуют эти частицы. Поэтому мюон противоречит обычно весьма полезной гипотезе о том, как можно понять спектр масс элементарных частиц.

Поскольку мюоний является простейшей системой, включающей как мюон, так и электрон, его изучение может, по-видимому, дать нам ключ к пониманию уникальных взаимоотношений этих двух частиц. Наши исследования мюония, выполненные в течение последних нескольких лет, в целом подтвердили мнение о том, что во всех электромагнитных взаимодействиях мюон ведет себя в точности, как тяжелый электрон. Более того, в результате этих исследований была получена новая точная информация относительно всех электромагнитных взаимодействий.

Вторая причина особого интереса, вызываемого мюонием, связана с тем, что он является изотопом водорода. Существует широкое поле деятельности по изучению и сравнению с имеющимися данными для водорода атомных взаимодействий и химических реакций с участием мюония.

Следует ожидать, что уровни энергии мюония подобны уровням энергии водорода. Так, в основном, или низшем, энергетическом состоянии мюония электрон связан с положительным мюоном энергией около 13,5 эв, это очень близко к энергии основного состояния водорода. При более точном рассмотрении выясняется, что основное состояние мюония в действительности расщеплено на два близко лежащих состояния, называемых уровнями сверхтонкой структуры. Это расщепление возникает из-за магнитного взаимодействия электрона и положительного мюона. Подобно большинству элементарных частиц электрон и мюон можно представлять себе в виде крошечных магнитиков, которые вращаются и благодаря этому обладают как магнитным моментом, направленным вдоль оси вращения, так и внутренним моментом количества движения (спином). Энергия взаимодействия электронного вращательного (или спинового) магнитного момента с мюонным спиновым магнитным моментом различна в зависимо-

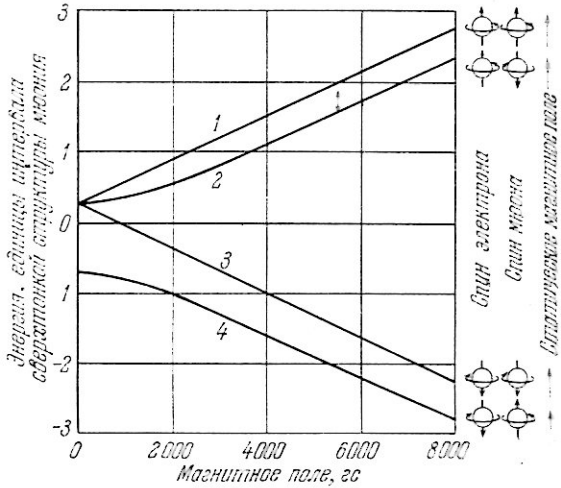


Рис. 4.2. Четыре сверхтонких энергетических уровня основного состояния мюония соответствуют четырем различным ориентациям спинов мюона и электрона относительно направления внешнего магнитного поля (справа). Вычисления дали для интервала между двумя первыми сверхтонкими энергетическими уровнями мюоний при нулевом магнитном поле величину около 4463 Мгц. Чтобы определить значение этого интервала с очень высокой степенью точности, группа под руководством автора измерила частоту перехода, указанного обводоострой цветной стрелкой.

сти от того, вращаются ли обе частицы в одинаковых направлениях или в противоположных. Именно эта зависимость обуславливает сверхтонкое расщепление энергетических уровней. В присутствии статического магнитного поля происходит дальнейшее расщепление двух уровней сверхтонкой структуры мюония на четыре уровня. Это расщепление обусловлено взаимодействием внешнего магнитного поля с магнитными моментами электрона и мюона (рис. 4.2).

Поскольку магнитный момент мюона равен 3,18 магнитного момента протона, интервал между сверхтонкими энергетическими уровнями мюония в отсутствие магнитного поля должен равняться приблизительно 4463 *Мгц*, в то время как соответствующий интервал для водорода равен 1420 *Мгц*. Одним из основных результатов наших экспериментов было чрезвычайно точное измерение этого интервала сверхтонкой структуры для мюония.

Мюоний представляет собой нестабильный атом со средним временем жизни около 2,2 *мксек* (миллионные доли секунды). Его нестабильность обусловлена нестабильностью самого мюона, который в результате процесса, известного под названием слабого взаимодействия, распадается (за 2,2 *мксек*) на позитрон и два нейтрино (ν). Образовавшиеся в результате этого процесса позитроны обладают различными энергиями, вплоть до 52 *Мэв*. Вследствие распада входящего в состав атома положительного мюона атом мюония превращается в четыре свободные, или несвязанные, частицы: электрон, позитрон и два нейтрино (см. рис. 4.4). Хотя способ распада мюония отличается от способа распада позитрония, краткость его времени жизни, а также энергетический спектр продуктов его распада во многом аналогичны соответствующим характеристикам позитрония. Поэтому экспериментальная техника, использовавшаяся для изучения мюония, отчасти напоминает технику, использовавшуюся в более ранних экспериментах по изучению позитрония.

Открытие мюония стало возможным только после того, как было обнаружено, что в процессах слабых взаимодействий, в том числе в процессах образования и распада мюона, «четность» не сохраняется*). Грубо говоря, принцип сохранения четности гласит, что для большинства физических систем не существует абсолютного различия между правым и левым — реальный объект или событие является точным двойником своего зеркального отображения. Оказалось, однако, что в слабых взаимодействиях существует выделенное направление. Потеря зеркальной симметрии наиболее характерно проявляется в наличии корреляции между импульсом, или направлением движения, частицы и ее внутренним моментом количества движения, или направлением спина.

Несохранение четности в процессе рождения мюона демонстрируется следующим фактом. Положительный пион (π^+) распадается на мюон и нейтрино. Направление вращения образовавшегося мюона (и направление связанного с ним магнитного момента) противоположно направлению импульса (рис. 4.3). Когда положительный мюон в свою очередь распадается на позитрон и два нейтрино, позитроны вылетают преимущественно в направлении спинового магнитного момента мюона. Возможность получения таких «поляризованных» мюонов, т. е. мюонов, спины которых направлены преимущественно в одном направлении, а также возможность определить это направление (по направлению испускания позитронов) были использованы при открытии мюония.

*) См. статью Ф. Моррисона «Ниспровержение четности» во втором выпуске этой серии. (Прим. ред.)

По замыслу поиски мюония были весьма просты. Предполагалось, что атом мюония будет образовываться при столкновении положительного мюона с химически инертным атомом, например с атомом аргона (Ar). В процессе столкновения мюон отбирает электрон у атома аргона, превращая его в положительный ион аргона (Ar^+). Поскольку мюоны поляризованы, число сверхтонких энергетических уровней, которые могут возникнуть в результате такого процесса, ограничено. Именно, могут возникнуть лишь уровни, соответствующие состояниям, в которых спиновый магнитный момент мюона имеет то же самое направление, что и у падающего мюона. В сильном статическом магнитном поле, направленном параллельно первоначальному спиновому магнитному моменту мюона, возникают только два сверхтонких энергетических уровня: один из них соответствует случаю, когда спины мюона и электрона имеют одно и то же направление, а другой — случаю, когда спины мюона и электрона направлены в противоположные стороны. В очень слабом магнитном поле возникают три сверхтонких энергетических состояния. Только в одном из этих состояний (в состоянии, в котором спины электрона и мюона имеют одно и то же направление) атом мюония имеет ненулевой полный магнитный момент.

Наш эксперимент по обнаружению мюония основывался на том обстоятельстве, что ось вращения атома (и связанный с ней магнитный момент) медленно прецессируют, т. е. вращаются вокруг силовых линий магнитного поля, направленного перпендикулярно оси вращения атома. При этом частота вращения пропорциональна напряженности поля. В случае мюония частота прецессии в принципе может быть измерена благодаря тому, что позитроны испускаются преимущественно в направлении спинового магнитного момента мюона. Характеристическую частоту прецессии можно легко вычислить, исходя из известных свойств электрона и мюона. Поэтому подобные наблюдения позволили бы проверить, существует ли мюоний в действительности.

Эксперимент был выполнен в Невисской лаборатории Колумбийского университета на синхроциклотроне, ускоряющем протоны до энергии

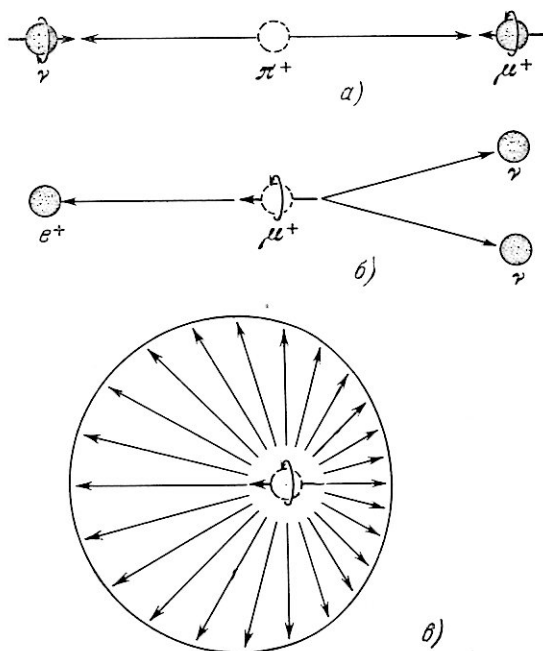


Рис. 4.3. Несохранение четности, или зеркальной симметрии, в слабых взаимодействиях, обуславливающих рождение и распад мюона, наиболее характерно проявляется в существовании корреляции между импульсом, или направлением движения, мюона и внутренним моментом количества движения, или направлением спина, мюона. Когда положительный пион (π^+) распадается с образованием положительного мюона и нейтрино (ν), вектор спина мюона (жирная стрелка) и связанный с ним магнитный момент направлены противоположно импульсу (рисунок наверху). Когда положительный мюон в свою очередь распадается на позитрон и два нейтрино, позитроны испускаются преимущественно в направлении спина мюона (средний рисунок). Вероятность испускания позитрона в данном направлении пропорциональна длине стрелок на нижнем рисунке.

380 Мэв. В этом эксперименте принимали участие Д. В. Мак-Кольм, К. Зиок, и я, все из Йельского университета, а также Р. Препост из Колумбийского университета.

При столкновении протонов с мишенью, помещенной внутри синхротрона, образуются положительные пионы, часть которых впоследствии распадается на положительные мюоны (рис. 4.4). Смешанный пучок пионов и мюонов проходит через блок с графитом, который поглощает пионы. В результате этого в расположенный далее бак с аргоном

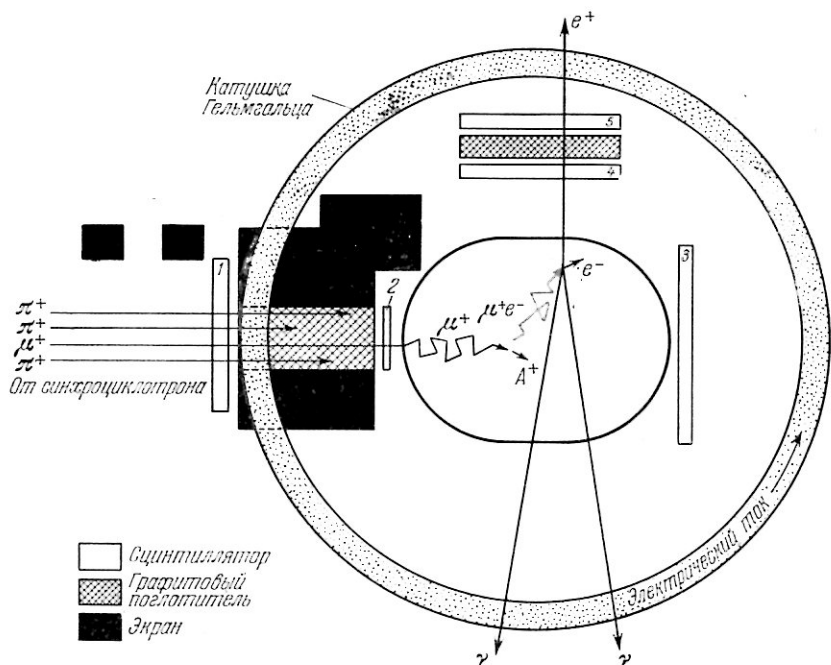


Рис. 4.4. Мюоний был открыт с помощью изображенной здесь экспериментальной аппаратуры. Пучок пионов и мюонов, выходящий из синхротрона Колумбийского университета (слева), падает на графитовый блок, поглощающий пионы. В результате в бак с аргоном (в центре) попадают только мюоны. Сталкиваясь с атомами аргона, атомы мюония быстро замедляются до «тепловых скоростей», после чего мюон распадается, испуская позитрон и две нейтрино. Момент входа мюона в газовую мишень и момент остановки регистрируется совпадающими импульсами сцинтилляционных счетчиков 1 и 2. При этом в счетчике 3 импульса нет. Счетчики 4 и 5 регистрируют позитроны распада. Они позволяют также определить промежуток времени между моментом обнаружения падающего мюона и моментом обнаружения позитрона распада. Катушки создают статическое магнитное поле, перпендикулярное плоскости рисунка.

попадают уже только мюоны. Мюоны, влетающие в бак с энергиями порядка 1 Мэв, теряют свою энергию в ионизирующих столкновениях с атомами аргона до тех пор, пока они не достигнут энергии порядка 100 эв. При такой энергии становится вероятным захват мюоном одного из электронов атома аргона с образованием стабильного атома мюония в основном состоянии. Образовавшийся атом мюония в результате столкновений с атомами аргона быстро замедляется до «тепловых скоростей» (около миллиона сантиметров в секунду, что соответствует энергии в одну двадцать пятую электрон-вольта). После этого он распадается, испуская позитрон, который позволяет восстановить весь ход событий.

В настоящее время благодаря результатам наших экспериментов описанный здесь механизм потери энергии положительными мюонами в аргоне, с образованием в результате атомов мюония, считается общепринятым. Однако в то время, когда мы начали наши опыты, обсуждались

многие другие возможные механизмы замедления мюонов, не приводящие к образованию стабильных атомов мюония.

В частности, можно было думать, что положительные мюоны будут просто терять энергию в столкновениях с атомами аргона до тех пор, пока она не станет меньше 2ϵ (минимальной энергии, необходимой для того, чтобы мюон мог захватить электрон у атома аргона и образовать мюоний). Существует и другая возможность — атомы мюония будут образовываться, но в результате столкновений с атомами аргона будут немедленно разваливаться. Мы обсуждали также возможность образования молекулярных ионов в результате соединения положительных мюонов с атомами аргона. Количественно оценить все эти процессы хотя бы с точностью до порядка очень трудно. К счастью для наших экспериментов, оказалось, что процесс, приводящий к образованию стабильного атома мюония, является преобладающим.

Нас интересовал также вопрос о химической стабильности мюония. Инертный газ аргон сам по себе не должен вступать в химические реакции, однако теоретические оценки свидетельствовали о том, что даже ничтожные примеси, как, например, кислород или водяной пар, в количестве всего нескольких частей на миллион частей аргона могут привести к атомным взаимодействиям или химическим реакциям, губительным для процесса образования стабильного мюония. Некоторые из наших ранних экспериментов и, вероятно, некоторые эксперименты других ученых окончились неудачей именно из-за этих химических эффектов, обусловленных присутствием примесей. Процесс очистки заключался в неоднократном пропускании аргона над горячим титаном, в результате чего из газа удалялась большая часть примесей. Такая система должна была обеспечить отсутствие примесей в аргоне, по крайней мере в концентрации, превышающей одну миллионную. В свете наших последующих исследований по химии мюония ясно, что такие предосторожности оказались решающими для успеха нашего первого эксперимента по обнаружению мюония.

В этих экспериментах сосуд с газом облучался мюонами, спины которых направлены противоположно направлению движения. В слабом магнитном поле только первое из трех возникших сверхтонких состояний будет обладать магнитным моментом. Величина магнитного момента в этом состоянии равна магнитному моменту электрона минус магнитный момент мюона и, следовательно, приблизительно равна магнитному моменту электрона, который в 207 раз больше мюонного. (В отличие от мюона, магнитный момент и момент количества движения электрона (спин) направлены в противоположные стороны.)

Катушки, изображенные на рис. 4.4, создают статическое магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости рисунка и первоначальному направлению спина мюона. В этом перпендикулярном поле спины электрона и мюона, которые в первом сверхтонком состоянии параллельны друг другу, будут прецессировать вместе в плоскости страницы (рис. 4.5). Направление спина мюона можно определить в любое время, поскольку, как я уже упоминал, позитрон, образующийся при распаде мюона, испускается преимущественно в направлении спина мюона.

В реальном эксперименте характеристическая частота прецессии мюония определяется путем регистрации импульсов пяти синцилляционных счетчиков, установленных так, чтобы отмечать прохождение падающих мюонов и продуктов распада атома мюония. Когда мюон входит в газовую мишень и останавливается, регистрируются одновременные импульсы в первом и втором счетчиках. В третьем счетчике при этом не возникает

импульса. Четвертый и пятый счетчики регистрируют позитроны распада. Они позволяют определить промежуток времени между моментом регистрации падающего мюона и моментом обнаружения позитрона. В отсутствие прецессии мюона количество зарегистрированных позитронов будет убывать со временем в соответствии с плавной кривой распределения. Однако если мюон прецессирует в магнитном поле, то эта кривая будет осциллировать с частотой, равной частоте прецессии, так как обнаружение позитрона наиболее вероятно в том случае, когда спин мюона ориентирован по направлению четвертого и пятого счетчика.

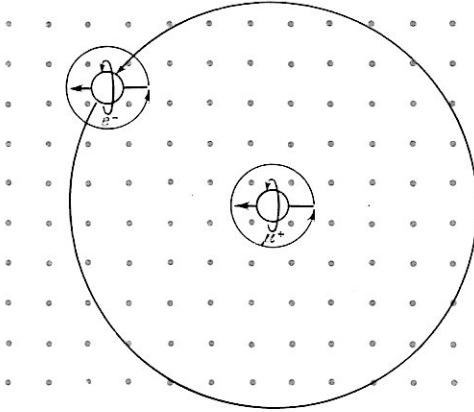


Рис. 4.5. Синхронная прецессия, или вращение спинов (и связанных с ними магнитных моментов) частиц, образующих атом мюония, возникает при наложении магнитного поля (цветные точки) под прямым углом к магнитным моментам (в этом случае магнитное поле перпендикулярно также плоскости рисунка). Частота прецессии пропорциональна напряженности поля. В случае мюония эту частоту можно определить благодаря тому, что позитроны испускаются преимущественно в направлении спинового магнитного момента мюона.

Некоторые типичные результаты экспериментов по исследованию прецессии мюония показаны на графиках (рис. 4.6). Сплошными кривыми показаны результаты анализа частотных компонент распределения позитронов во времени. Штриховыми кривыми показаны характеристические частоты прецессии мюония, ожидаемые на основании теоретических соображений. Очевидно, что эти две кривые хорошо согласуются друг с другом. Эти результаты дают недвусмысленное доказательство того, что мы действительно наблюдали поляризованные атомы мюония. Определение частоты прецессии мюония явилось

также первым недвусмысленным доказательством равенства спиновых моментов мюона и электрона, так как если бы спин мюона имел какую-либо другую величину, частота прецессии также была бы другой.

Чтобы оценить чрезвычайную чувствительность эксперимента, полезно заметить, что во время эксперимента в баке очень редко присутствовал более чем один атом мюония. В самом деле, в среднем один атом мюония находится в баке только в течение одной тысячной времени эксперимента. И это несмотря на то, что при доступных нам интенсивностях мюонного пучка мы могли создавать около тысячи атомов мюония в секунду! Все объясняется тем, что время жизни мюона составляет всего 2,2 мксек. К счастью, позитроны, испускаемые при распаде мюонов, обладают весьма значительными энергиями. Благодаря этому эксперимент можно осуществить с помощью сцинтилляционных счетчиков, способных регистрировать прохождение одной-единственной заряженной частицы.

Для проверки весьма тонких электромагнитных характеристик электрона и мюона необходимо точно знать интервалы сверхтонкой структуры. Открытие мюония проложило путь к измерению этого интервала с высокой степенью точности. Соответствующий эксперимент был выполнен в Невисской лаборатории в период с 1962 по 1965 г.

Этот эксперимент основан на классическом спектроскопическом подходе к исследованию разностей энергетических уровней. Переход атома

мюония из одного состояния сверхтонкой структуры в другое может быть индуцирован с помощью внешнего электромагнитного поля, меняющегося в резонансе с частотой перехода. Эти частоты лежат в микроволновой области электромагнитного спектра. Переход можно обнаружить, наблюдая изменения некоторых свойств атомов, сопровождающие изменения энергетического состояния. В случае мюония этим свойством является частота испускания позитронов в данном направлении.

По техническим причинам, отчасти обусловленным желанием получить максимальный сигнал, сопровождающий переход, в этом эксперименте использовалось сильное статическое магнитное поле напряженностью

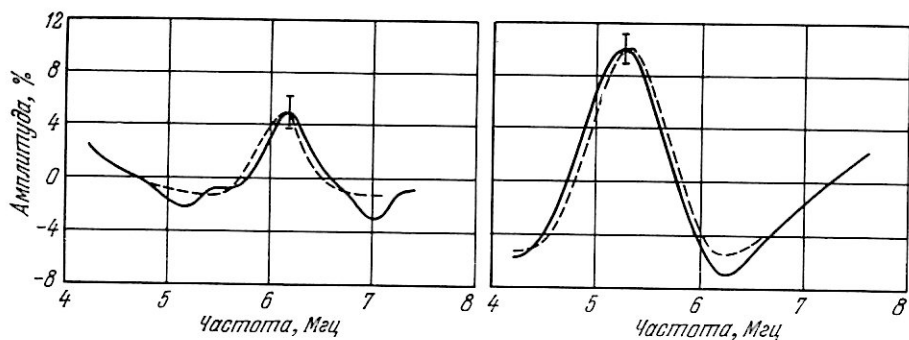


Рис. 4.6. Показаны типичные кривые, изображающие результаты первых успешных экспериментов с мюонием. Сплошные кривые изображают зависимости амплитуд частотных компонент распределения позитронов во времени от частоты. Штриховые кривые — кривые, ожидаемые на основании теоретических соображений. На графиках представлены данные, соответствующие двум различным напряженностям магнитного поля.

около 5000 гс. Мы имели дело с двумя состояниями, в одном из которых спин мюона имеет такое же направление, как спин электрона и статическое магнитное поле, в другом — спин мюона направлен в противоположную сторону.

Как мы уже видели, различие энергий в этих двух состояниях обусловлено как взаимодействием спинового магнитного момента мюона со спиновым магнитным моментом электрона, так и взаимодействием магнитных моментов электрона и мюона с внешним магнитным полем. Поскольку магнитные моменты мюона и электрона известны из других экспериментов и поскольку величину внешнего магнитного поля можно измерить, измерение разности энергии этих двух состояний позволило бы определить интервал сверхтонкой структуры.

Как и в первом случае, эксперимент основывается на возможности получить поляризованные мюоны и возможности определить направление их спина по направлению испускания позитронов (рис. 4.7). Поскольку падающие мюоны поляризованы, атомы мюония будут образовываться первоначально в первом состоянии, а не во втором. Если не индуцировать никаких переходов из этого состояния, то позитроны будут испускаться преимущественно в направлении счетчика 2 (рис. 4.8, а). С другой стороны, если поместить систему в микроволновый резонатор и приложить внешнее поле резонансной частоты, то между двумя энергетическими уровнями будут индуцироваться переходы. Поэтому направление спинов мюонов будет меняться на противоположное и позитроны распада будут испускаться в направлении счетчиков 3 и 4 (рис. 4.8, б).

Отношение числа позитронов распада к числу остановившихся в газе мюонов измеряется как функция магнитного поля при включенном и

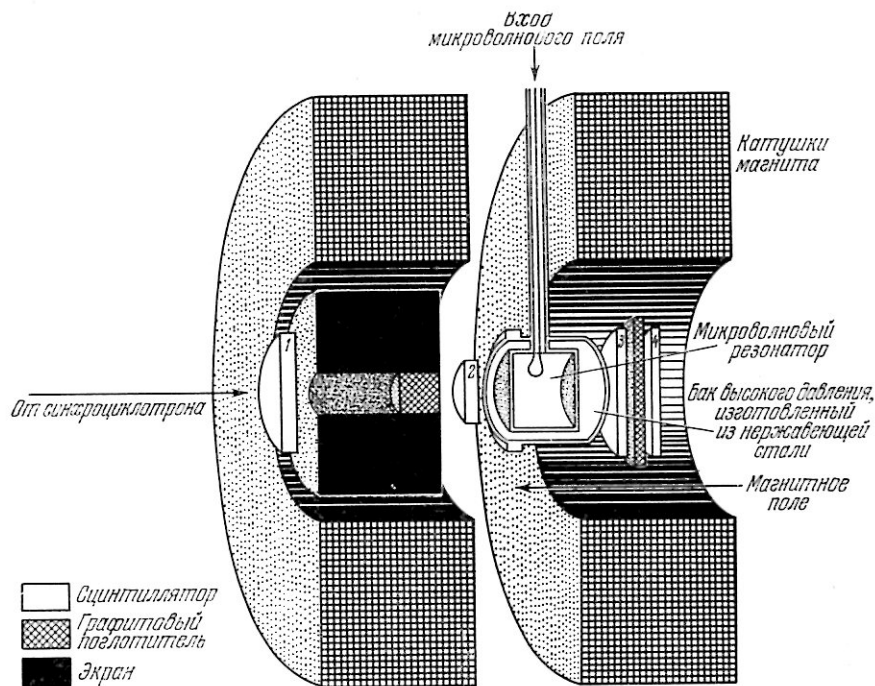


Рис. 4.7. Экспериментальная аппаратура для измерения интервала сверхтонкой структуры основного состояния мюона несколько напоминает аппаратуру, с помощью которой был открыт мюоний (см. рис. 4.4). Чтобы добиться максимального сигнала перехода, с помощью пары больших соленоидов было создано магнитное поле, напряженностью 5000 гс. Внутри микроволнового резонатора создано дополнительное переменное микроволновое поле, направленное под прямым углом к статическому полю. Переходы атомов мюония из одного сверхтонкого энергетического состояния в другое индуцировались, когда микроволновое поле попадало в резонанс с частотой перехода. Переходы наблюдались по изменению количества позитронов, испускаемых в данном направлении.

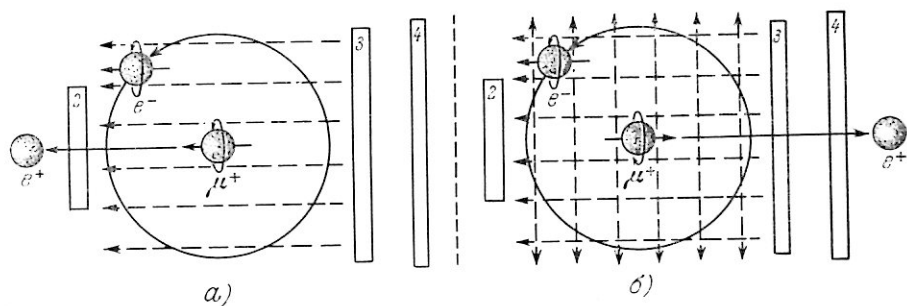


Рис. 4.8. На первой стадии эксперимента, описанного выше, позитроны распада испускаются преимущественно в направлении счетчика 2 (а). Единственное поле, существующее на этой стадии, — это сильное статическое магнитное поле, направленное параллельно векторам спина мюона и электрона. Если теперь приложить микроволновое поле под прямым углом к направлению статического поля (б) и если вследствие этого будет индуцирован переход между этими двумя состояниями, то направление спина мюона изменится на противоположное и позитроны распада будут испускаться преимущественно в направлении счетчиков 3 и 4. Размеры атома мюония на этих рисунках, разумеется, сильно преувеличены.

выключенном внешнем микроволновом поле. Отношение этих двух величин минус единица отложено по оси ординат на рис. 4.9. На этом графике показана характерная резонансная кривая. Поскольку целью эксперимента было определение постоянной сверхтонкой структуры с очень высокой степенью точности, особенно большое внимание было уделено получению постоянного и однородного статического магнитного поля, микроволнового поля с постоянной частотой и амплитудой, созданию электронной счетной системы с высокой стабильностью и, наконец, получению максимально возможного количества данных. Экспериментальные данные собирались в течение двух с половиной лет на Невисском синхроциклотроне.

При этом в общем понадобилось около трех месяцев машинного времени. Окончательное значение интервала сверхтонкой структуры для мюония, полученное на основе анализа всех этих данных, равно $(4463,15 \pm 0,06) \text{ Мгц}$. Неопределенность этого значения, составляющая примерно 12 миллионов, обусловлена использовавшимся методом счета, связанным с ограниченностью числа изученных атомов мюония (в этом эксперименте было изучено около миллиона атомов). При наличии более интенсивных источников мюонов, которые станут доступными после сооружения некоторых из спроектированных в настоящее время ускорителей, должна появиться возможность более точного определения интервала сверхтонкой структуры.

Допуская, что мюон является тяжелым электроном, можно, согласно современной квантовой теории электрона, сформулированной в 1928 г. П. А. М. Дираком, вычислить теоретически величину интервала сверхтонкой структуры. Теоретическое значение равно $(4463,15 \pm 0,10) \text{ Мгц}$. Неопределенность в примерно 20 миллионов возникает здесь из-за того, что недостаточно точно известна постоянная «тонкой структуры» — величина, характеризующая силу всех электромагнитных взаимодействий и появляющаяся в теоретических формулах для интервала сверхтонкой структуры мюония.

Теоретическое и экспериментальное значение интервала сверхтонкой структуры превосходно согласуются между собой. Это является подтверждением гипотезы о том, что во взаимодействии с электроном мюон ведет себя в точности, как тяжелый электрон. Более того, поскольку экспериментальное значение этого интервала известно с той же точностью, что и постоянная тонкой структуры, используя это экспериментальное значение, можно с помощью теоретических формул для интервала сверхтонкой структуры определить значение этой фундаментальной константы новым и независимым способом. Новое значение постоянной тонкой структуры, полученное таким образом, равно $1/137,0388 \pm 9$ миллионов, что согласуется с найденным ранее значением. Объединяя эти две величины, можно получить более точную оценку постоянной тонкой структуры.

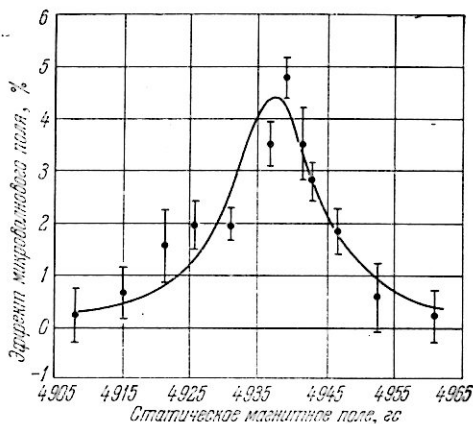


Рис. 4.9. Показана резонансная кривая индуцированных микроволновым полем переходов между двумя первыми сверхтонкими энергетическими уровнями мюония. Отношение числа позитронов распада к числу остановившихся в газе мюонов измерялось как функция магнитного поля при включенном и выключенном микроволновом поле. Вертикальные черточки указывают статистические ошибки.

Как я уже упомянул, можно ожидать, что мюоний, являющийся изотопом водорода, будет сильно взаимодействовать с другими атомами, образуя химические соединения. Чтобы исследовать взаимодействие мюония

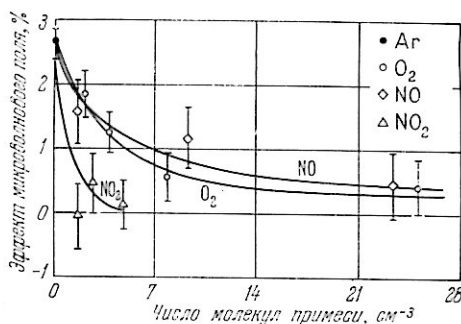


Рис. 4.10. Резонансный сигнал мюония подавляется, или уменьшается, при добавлении примесей в аргон. Подавление вызывается столкновениями, которые приводят к уменьшению числа атомов мюония в одном из состояний, участвующих в резонансном переходе. Здесь показано влияние трех примесей: молекулярного кислорода (O_2), окиси азота (NO) и двуокиси азота (NO_2).

родом (O_2), окисью азота (NO) и двуокисью азота (NO_2). Все эти молекулы являются парамагнитными. Это означает, что они обладают по крайней мере одним электроном, спин которого не «спарен», т. е. не скомпенсирован спином другого электрона.

Такой электрон легче, чем спаренный электрон, вступает во взаимодействие с неспаренным электроном другого атома или молекулы. (В случае молекулярного кислорода неспарены несколько электронов.) Мы считаем, что при столкновении атома мюония с одной из этих молекул происходит обмен электроном между мюонием и молекулой. Подобная реакция обмена приводит к уменьшению числа атомов мюония в одном из резонансных состояний, что приводит в свою очередь к уменьшению резонансного сигнала. Более слабая реакция мюония с этиленом (C_2H_4), не имеющим неспаренных электронов, является, по нашему мнению, настоящей химической реакцией, в результате которой образуется соединение этилена с мюонием.

Мюоний не взаимодействует с молекулярным водородом, который не является парамагнетиком, и поэтому не может обмениваться электроном с атомом мюония. Настоящая химическая реакция между мюонием и водо-

с атомами или молекулами, более активными, чем аргон, мы вводили подобные атомы и молекулы в аргон в качестве примесей. Было обнаружено, что эти примеси уменьшают величину резонансного сигнала мюония. Очевидно, что любая реакция, которая уменьшает число атомов мюония в одном из двух состояний, участвующих в резонансном переходе, будет приводить к уменьшению сигнала.

Данные, показывающие влияние различных примесей, показаны на рис. 4.10 и 4.11.

Как видно из этих графиков, мюоний наиболее сильно взаимодействует с молекулярным кислородом, что означает, что они обладают по край-

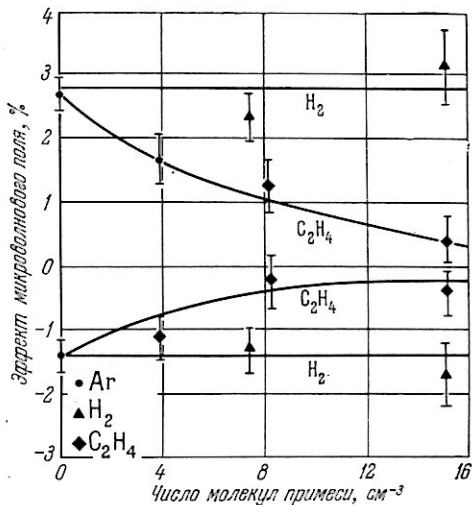


Рис. 4.11. Здесь сравниваются эффекты подавления резонансного сигнала мюония молекулярным водородом (H_2) и этиленом (C_2H_4). Мюоний не взаимодействует с водородом, поэтому в этом случае подавление отсутствует. Считается, что подавление сигнала этиленом обусловлено реальной химической реакцией мюония с этой молекулой. Позитронные сигналы регистрировались счетчиками 3 и 4 (верхние кривые) и счетчиком 2 (нижние кривые) (см. рис. 4.4).

родом с образованием гидрата мюония запрещена законом сохранения энергии, поскольку колебательная энергия, которой обладала бы молекула гидрата мюония, образовавшаяся в результате такой реакции, значительно больше, чем колебательная энергия молекулы водорода.

Стоит отметить, что в результате наших работ во многих случаях реакции мюония стали изучены лучше, чем соответствующие реакции для водорода. Это обусловлено большой эффективностью метода исследования, который позволяет наблюдать поведение отдельного атома мюония. Химия мюония представляет собой широкое поле деятельности, открытое теперь для новых исследований.

О. Е. Оверсет

ОБРАТИМО ЛИ ВРЕМЯ? ЧТО ГОВОРИТ ОПЫТ?

(ОКТАБРЬ 1969 г.)

Установлено, что предполагавшееся до сих пор сохранение комбинированной четности не имеет места. В связи с этим была проведена строгая проверка чувствительности законов природы по отношению к изменению направления хода времени. Хотя никаких доказательств, подтверждающих обратное, до сих пор не было получено, их поиск продолжается.

Стрела времени, если воспользоваться блестящим выражением сэра Артура Эддингтона, нацелена в очевидном направлении. Она нацелена в будущее, которое, как мы надеемся, можно хоть отчасти контролировать, и направлена прочь от непоправимого прошлого. Все мы хорошо представляем, в каком направлении идет время. Например, нам весьма удобно чувствовать себя уверенным в том, что тщательно составленная смесь джина и вермута не может вдруг исчезнуть в нашем бокале, превратившись в два слоя теплой жидкости и кусок льда. Однако примечателен тот факт, что законы, лежащие в основе нашего понимания фундаментальных физических процессов (и, вероятно, биологических процессов), не выделяют одно направление хода времени по сравнению с другим. Они описывают мир таким же образом, как если бы время шло не вперед, а назад, и смерть могла бы происходить раньше рождения.

Симметрия основных законов природы относительно направления хода времени давно считается одним из фундаментальных принципов физики. Эту проблему затрагивал еще Эддингтон много лет назад (в своих лекциях в 1927 г.). После обсуждения физических и философских оснований новых теорий, как-то, теория относительности, гравитация и квантовая механика, он пришел к выводу: «Законы природы не чувствительны к направлению хода времени. Между прошлым и будущим не больше различия, чем между левым и правым».

Сегодня мы отчетливо понимаем, что законы природы позволяют отличить правое от левого, и мы подозреваем, что они также в состоянии отличить прошлое от будущего. В результате последних открытий в физике элементарных частиц принцип симметрии законов природы относительно изменения знака времени оказался объектом серьезного обсуждения. Проводящиеся сейчас интенсивные исследования направлены на то, чтобы установить, можно ли нарушения этого принципа обнаружить на опыте. Специалисты по атомной и ядерной физике и физике элементарных частиц предприняли бесчисленные попытки решить эту проблему. Хотя ни одно из предсказывавшихся нарушений не подтвердилось, имеются веские основания верить в то, что такая асимметрия все-таки существует. Либо она слишком мала и труднообнаружима, либо мы все еще ищем ее не в том месте.

В этой статье я хотел бы рассказать, как физики проводят исследование нарушений того, что принято называть инвариантностью относительно обращения времени, и подвести итоги некоторых из самых серьезных попыток, предпринятых в этом направлении. Я также опишу один типичный эксперимент такого рода, в котором сам принимал участие. Прежде чем продолжать дальше, будет полезно выяснить, почему проблема нарушения инвариантности относительно обращения времени выдвинулась на ведущее место. Начнем с того, что рассмотрим принцип обращения времени и обсудим ту роль, которую этот и аналогичный ему принципы симметрии играют в физике.

В качестве примера того, каким образом физические законы не меняются при обращении времени, рассмотрим небесную механику. Мы можем применять закон всемирного тяготения в пределах Солнечной системы не только для предсказаний будущих затмений Луны, но также и для того, чтобы установить, когда такие затмения случались в прошлом. При «предсказаниях» прошедших затмений применяется обращение времени. Допустим, что направление орбитального движения и направление вращения вокруг оси (т. е. направление спина) всех тел в Солнечной системе вдруг меняются на противоположные. После этого предоставим им свободно двигаться под действием взаимного гравитационного притяжения. Требование инвариантности относительно обращения времени означает, что все тела в своем попятном по времени движении будут перемещаться в точности по тем же орбитам, по которым они только что двигались. Уравнения физики не оказывают никакого предпочтения одному возможному направлению движения планет по отношению к противоположному. Планеты движутся в некотором направлении вокруг Солнца только потому, что они каким-то образом начали движение в этом направлении.

Другим традиционным примером является столкновение бильiardных шаров. Допустим, что о серии упругих столкновений нескольких бильiardных шаров был снят фильм. Показывая его, механик напутал и запустил фильм в обратном направлении. Вследствие инвариантности упругих столкновений шаров относительно обращения времени и прямой, и обратный просмотр фильма демонстрирует ситуации, которые имеют физический смысл. Находясь в аудитории, мы не в состоянии определить, в какой временной последовательности был реально снят фильм. Подобная временная симметрия оказалась справедливой для всех известных законов физики как классических, ньютоновских, так и законов современной квантовой механики. В то же время почти все, с чем мы сталкиваемся ежедневно в окружающем нас мире, сильно асимметрично по времени. Было бы абсурдом представить, чтобы этот мир вдруг начал двигаться по времени назад. Не может случиться так, что выходящая при взлете самолета струя вдруг всосалась бы обратно в выхлопную трубу, что в свою очередь привело бы к приземлению самолета на стартовую площадку. Никогда выдавленный крем для бритья не может юркнуть обратно в тубик. Мир вокруг нас с подавляющей определенностью развивается в одном временном направлении.

Этот явный парадокс можно понять, если сосредоточить внимание на сложности рассматриваемых процессов. В достаточно сложном случае, например при изучении физической реакции между большим числом частиц, можно, вообще говоря, выявить определенную направленность течения процессов во времени. Напротив, когда мы исследуем элементарные взаимодействия между малым числом частиц, эта направленность исчезает. Здесь действует принцип, вытекающий из второго начала термодинамики, согласно которому упорядоченные системы развиваются таким обра-

зом, что в них возрастает степень неупорядоченности. Вот такое развитие ко все более возрастающей неупорядоченности и определяет направление течения времени.

Вернемся теперь к обсуждению фильма о столкновениях бильiardных шаров. Если бы мы увидели, что шестнадцать произвольно разлетевшихся по столу шаров вдруг образовали бы аккуратный треугольник, а один из них, белого цвета, отделился бы от остальных и устремился к концу бильiardного кия у края стола, то у нас возникло бы сильное подозрение, что кинемеханик не лишен чувства юмора. Следует, однако, подчеркнуть то обстоятельство, что подобная последовательность событий не нарушает ни одного физического закона, она только маловероятна. Второе начало термодинамики не запрещает нам достигнуть такого результата при любом ударе кием. Оно просто советует вам не задерживать дыхания, когда вы пытаетесь сделать это. Более того, если вы пребываете в спортивном настроении и хотите держать пари на такой результат, второе начало подсказывает вам, в каком соотношении можно предлагать ставки. Обращенный во времени макромир не невозможен, он просто очень маловероятен.

Предполагаемое безразличие законов физики элементарных частиц по отношению к направлению хода времени может служить примером фундаментального свойства симметрии природы. На самом деле оно является одним из трех фундаментальных принципов симметрии, которые оказались исключительно важными с точки зрения понимания основных сил природы. Эти три принципа в современной физике принято обозначать буквами P , C и T . Когда мы исследуем симметрию природы относительно операции, именуемой четностью (P), то мы тем самым выясняем, существует ли какое-либо различие между нашим миром и его зеркальным отображением. Это эквивалентно вопросу, отличает ли природа левое от правого, поскольку у изображения в зеркале понятия левого и правого меняются ролями. Мы можем также поставить вопрос о том, симметрична ли природа относительно операции, называемой зарядовым сопряжением (C), которая означает изменение на противоположный знак зарядов всех заряженных частиц. Иными словами, проблема состоит в том, сможем ли мы как-нибудь узнать об этом событии, если вдруг среди ночи знак зарядов всех частиц сместится на противоположный. Данный вопрос сводится к тому, отличает ли природа мир от антимира. Третий принцип симметрии — это как раз то, что интересует нас в этой статье: безразличны ли законы природы к изменению направления хода времени или нет (T)?

Наша уверенность в важности этих принципов симметрии в значительной мере была внушена нам двумя физиками Т. Д. Ли и Ч. Н. Янгом. Примерно двенадцать лет назад они обратили внимание на то, что парадоксы, возникающие при наблюдении распадов одной из элементарных частиц, K -мезона, удается разрешить, если предположить, что взаимодействие, ответственное за данный распад, нарушает четность. Они предложили серию экспериментов, в которых можно было бы обнаружить это нарушение. Когда вскоре удалось осуществить эти эксперименты, результаты подтвердили гипотезу нарушения четности. Смысл этих опытов состоит в том, что природа различает правое и левое. Однако в дальнейшем было установлено, что нарушение четности всегда сопровождается нарушением зарядового сопряжения. Тем самым, в природе реализуется комбинированная симметрия CP . Сохранение симметрии CP в физических процессах означает, что левое в нашем мире становится правым в антимире. Поскольку природа не различает левое и правое в абсолютном смысле, поэтому не существует никаких возможностей отличить мир от антимира. Природа оказалась совершенно симметричной с этой точки зрения.

Эта ситуация драматическим образом изменилась пять лет назад после открытия, сделанного Джеймсом Г. Кристенсоном, Джеймсом В. Кроинном, Вэлом Л. Фитчем и Рене Тюрле из Принстонского университета. Они наблюдали редкий тип распада нейтральных K -мезонов, который, как оказалось, можно интерпретировать только как результат нарушения CP -симметрии. Это открытие, в дальнейшем подтвержденное другими группами, означает, что природа различает левое и правое, а также мир и антимир в абсолютном смысле.

Дальнейшим следствием этого открытия является утверждение, что природа не безразлична к направлению хода времени. Это следствие базируется на одной из фундаментальных теорем физики. Под названием CPT -теоремы она была впервые сформулирована пятнадцать лет назад. Она утверждает, что законы физики остаются неизменными относительно комбинированного действия всех трех принципов симметрии, о которых шла речь выше. Иначе говоря, все уравнения физики должны оставаться справедливыми и в том случае, когда мы обращаем знаки всех пространственных координат, изменяем знаки всех зарядов и обращаем знак времени. Если только предположить, что имеет место сохранение CPT -симметрии, то отсюда немедленно следует, что наблюдение в Принстоне нарушения CP -симметрии означает и нарушение T -симметрии. Поэтому это наблюдение послужило толчком к поиску прямых подтверждений нарушения инвариантности относительно обращения времени.

Убежденность в том, что открытие нарушения CP -симметрии должно автоматически вести к наблюдению нарушений инвариантности относительно обращения времени, базируется на справедливости CPT -теоремы. Доказательство этой теоремы основано на самых общих принципах, и на современной стадии развития теоретической физики трудно сконструировать такую физическую теорию, которая бы не удовлетворяла CPT -теореме. «Если бы CPT -инвариантность погибла,— писал один видный теоретик,— я сказал бы, что сам ад разверзся». В то же время следует всегда помнить, что природа явно не чувствует себя обязанной соблюдать ограничения, накладываемые на нее представлениями физиков. Окончательное доказательство справедливости CPT -теоремы следует предоставить эксперименту.

Одним из предсказаний, вытекающих из CPT -теоремы, является утверждение, что все элементарные частицы имеют античастицы, у которых заряды противоположного знака, но массы и времена жизни совпадают. После открытия в Принстоне был выполнен ряд экспериментов с целью осуществления чрезвычайно строгой проверки этого предсказания CPT -теоремы.

Совпадение указанных свойств частиц и соответствующих им античастиц продемонстрировано с высокой точностью для шести пар частиц, помещенных в табл. 5.1. Каждая из цифр указывает верхний предел отклонений от единицы, наблюдаемых для каждой пары, соответственно для отношений их масс (колонка 1), времен жизни (2) и в двух случаях для магнитных моментов (3). Например, разница в массах между заряженным K -мезоном и его античастицей, анти K -мезоном, составляет не более одной тысячной от самой массы и то же самое справедливо для их времен жизни.

В пределах точности экспериментов не существует никаких причин сомневаться в справедливости CPT -теоремы. Тем самым, физикам приходится соглашаться с выводом, что в каких-то физических процессах должна нарушаться инвариантность относительно обращения времени. Однако для подтверждения этого вывода желательно поставить прямой опыт.

Таблица 5.1

Частицы	1	2	3
Электрон и антиэлектрон (позитрон)	10^{-5}	—	10^{-5}
Мюон и антимюон	10^{-4}	10^{-3}	10^{-6}
Пион и антипион	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	—
Заряженные K -мезоны и анти K -мезоны	10^{-3}	10^{-3}	—
Нейтральные K -мезоны и анти K -мезоны	10^{-14}	10^{-3}	—
Λ -частицы и анти Λ -частицы	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	—

Настойчивое желание обнаружить в природе ту или иную симметрию возвращает нас ко временам ранней молодости науки. Сохранившиеся с античных времен идеалы требовали, чтобы природа была проста, симметрична и прекрасна. Небесные тела, например, рассматривались как идеальные шары, движущиеся по идеальным окружностям, в идеальной гармонии друг с другом. Однако развитие науки сопровождалось медленным пониманием того, что природа не столь проста, хотя и не менее прекрасна. (Разве эллипс менее притягателен, чем окружность?) Сходное стремление к симметрии затронуло и наши представления о пространстве и времени. Предположение о том, что природа не различает правое и левое, знаки зарядов или направление хода времени, очень заманчиво, но мы здесь должны быть осторожны. Под красотой в природе, как и в искусстве, вряд ли следует понимать строгую симметрию. Так, лампа посреди нарисованного окна вряд ли может служить шедевром интерьера.

Принцип симметрии или закон сохранения всегда выступает как утверждение, что некое опытное знание навсегда закрыто для нас. Если бы инвариантность относительно операций четности и зарядового сопряжения не была нарушена, то мы никогда не смогли бы узнать, как различить левое и правое в абсолютном смысле. Таким образом, выяснение нарушений предполагаемых симметрий открывает путь к экспериментальному определению некоторых понятий, о которых прежде считалось, что определить их на опыте невозможно. В этом смысле следует приветствовать открытие нарушений симметрии, и каждое такое открытие составляет эпоху в развитии физики.

Вопрос о том, существуют ли фундаментальные физические процессы, в которых нарушается инвариантность относительно обращения времени и, тем самым, возникает возможность определить направление хода времени, может быть решен только опытом. Как следует проводить такое исследование и где следует искать ответ на данный вопрос? Если мы захотим сделать это на самом фундаментальном уровне, то наилучшим полем действия будут взаимодействия элементарных частиц. За них ответственны три фундаментальные силы природы. Это «сильные» или ядерные силы; электромагнитные силы, действующие между заряженными частицами, и «слабые» силы, ответственные за распад элементарных частиц. (Четвертая фундаментальная сила природы — тяготение — не будет нас здесь интересовать).

Экспериментальный путь исследования нарушений инвариантности относительно обращения времени, который особенно пригоден для исследования сильных и электромагнитных взаимодействий, состоит в измерении результатов некоторой реакции и в последующем сравнении их с результатами, которые получаются в той же реакции, но с обращенным

временем. Это означает сравнение реакции 1, в которой частицы a и b , столкнувшись, порождают частицы c и d , с реакцией 2, в которой частицы c и d сталкиваются и порождают частицы a и b . Когда обе эти реакции протекают в подходящих условиях, их можно рассматривать как две ситуации, отличающиеся лишь направлением хода времени. Тем самым, можно установить определенную связь между двумя наборами измерений.

Изучение в деталях одной из таких пар реакций включало использование ускоренных пучков частиц двух сортов, которыми бомбардировали магниевую мишень (рис. 5.1). В первой реакции мишень состояла из ядер

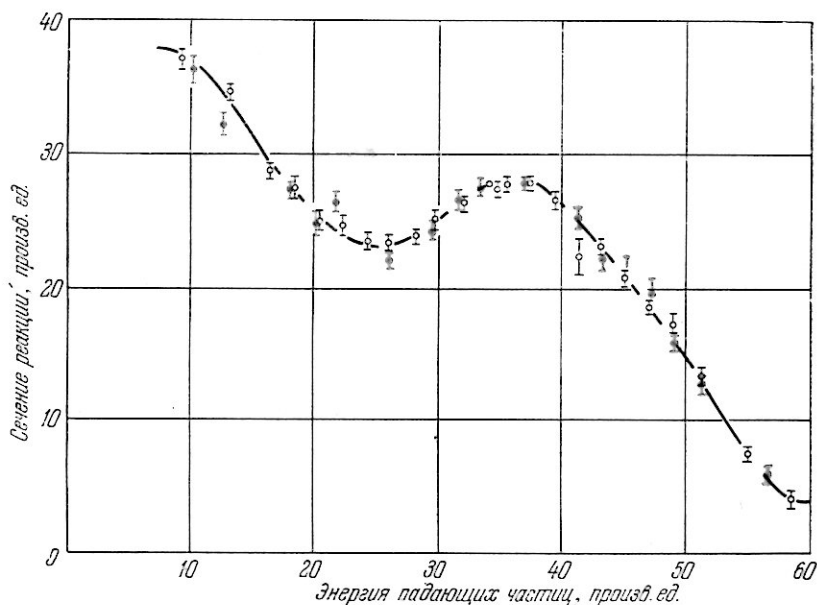


Рис. 5.1. Перекрывающиеся результаты измерений возникают при проверке инвариантности относительно обращения времени в «сильных» взаимодействиях. Первый набор результатов (черные точки) показывает зависимость сечения реакции от энергии падающих частиц, когда пучок дейтронов падает на магниевую мишень. Мишень состоит из ядер Mg^{24} . В результате бомбардировки некоторые из них превращаются в ядра Mg^{25} и наблюдается испускание протонов. Второй ряд результатов (цветные точки) демонстрирует данные по обратной реакции. В ней мишень, состоящая из ядер Mg^{25} , бомбардируется протонами, и некоторые из ядер мишени превращаются в ядра Mg^{24} , испуская дейтроны. В результате направление хода времени меняется на противоположное. Если в таких реакциях нарушается инвариантность относительно обращения времени, то измерения, проведенные с исходной и обращенной реакциями, должны отличаться друг от друга. Как следует из графика, имеет место исключительная согласованность результатов.

Mg^{24} , и она бомбардировалась пучком дейтронов. Некоторые из ядер мишени превращались в ядра Mg^{25} , что сопровождалось испусканием протонов. Эту ядерную реакцию можно записать как $Mg^{24} + d \rightarrow Mg^{25} + p$. Физики из лаборатории ядерной физики Вашингтонского университета, которые осуществили этот эксперимент, измеряли число протонов с данной энергией, вылетающих из мишени под заданным углом, и установили зависимость этих данных от энергии падающих дейтронов.

После этого они изучали обратную реакцию, в которой мишень состояла из ядер Mg^{25} , а в качестве снарядов использовались протоны. В результате происходили события в точности противоположного смысла: некоторые из ядер Mg^{25} мишени превращались в ядра Mg^{24} и при этом испускались дейтроны. Когда данные о вылетающих дейтронах сравнивали с аналогичными данными о вылетающих протонах в прямой реакции, результаты очень хорошо совпадали с теми значениями, которые предска-

вались теоретиками, исходя из предположения об инвариантности относительно обращения времени.

Несколько других пар взаимно обратных ядерных реакций также было исследовано с высокой степенью точности. Кроме того, в модификациях этого метода анализировалась поляризация рассеянных частиц. Был также поставлен ряд экспериментов такого типа. Во всех случаях наблюдалось прекрасное согласие между результатами, полученными в прямой и обратной реакциях. Этот метод применялся к исследованию сильных взаимодействий между ядерными частицами весьма тщательно. Лучшие экспериментальные результаты согласуются в пределах ошибки в 0,3%, что означает соблюдение инвариантности относительно обращения времени в сильных взаимодействиях с той же степенью точности.

Метод обратных реакций можно использовать также и для изучения электромагнитных взаимодействий. Особенно хорошим примером может служить расщепление дейтрона γ -квантом, в результате чего появляются нейтрон и протон. Данные по этой реакции можно сравнить с аналогичными данными по столкновениям нейтронов с протонами, в которых образуется дейтрон и γ -квант ($n + p \rightleftharpoons d + \gamma$). Наличие γ -кванта указывает, что в данной реакции имеет место электромагнитное взаимодействие. Такие эксперименты были выполнены, и в настоящее время производится анализ полученных результатов.

В качестве метода исследования слабых взаимодействий анализ обратных реакций практически не имеет перспектив. Поскольку известно, что в таких взаимодействиях нарушается CP -инвариантность, то логично предположить, что в них также нарушается и T -инвариантность. Это означает, что главное проявление слабых взаимодействий — распады нестабильных частиц — должны быть важным объектом исследования.

Примером такого процесса может служить распад Λ -частицы (которая всегда нейтральна) на протон и пион ($\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$) (рис. 5.2). Хотя в принципе этот распад можно сравнить с обратным процессом ($\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0$), данное взаимодействие столь слабо, что такая обратная реакция никогда не наблюдалась. Здесь следует воспользоваться другим способом действий.

Этот метод подразумевает поиск наблюдаемых величин — «физически наблюдаемых», как их принято называть, само существование которых должно было бы служить подтверждением нарушения инвариантности относительно обращения времени. Это единственный метод, который позволяет исследовать данную проблему в случае слабых взаимодействий, и, кроме того, он является ценным дополнением к методу взаимно обратных реакций в случае электромагнитных воздействий. Поскольку применение этого метода не столь очевидно, как использование метода взаимно обратных реакций, я проиллюстрирую его на примере изучения инвариантности относительно обращения времени в случае распада Λ -частицы, о котором упоминалось выше. Это исследование имеет ряд особенностей, которые характерны для опытов по проверке T -инвариантности вообще. Поскольку я сам участвовал в такой работе, мне кажется, я смогу создать у читателя представление о том, что он чувствовал бы на моем месте.

Проверка T -инвариантности Λ -частицы осуществляется путем изучения ориентации спина вылетающего при распаде протона. Рассмотрим распад Λ -частицы, вектор спина которой ориентирован вверх (рис. 5.3). Предположим, что распад приводит к испусканию протона под углом 90° к вектору спина Λ -частицы, скажем, для определенности, по направлению к читателю. Протон сам обладает спином, но ориентация вектора его спина

неизвестна. (Фактически цель эксперимента — определить направление этой ориентации.) Поскольку вектор спина протона неизвестен, мы произвольным образом предположим, что он имеет три компоненты α , β и γ вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений. Возможную составляющую спина, вдоль направления движения протона, Δ -частицы назовем

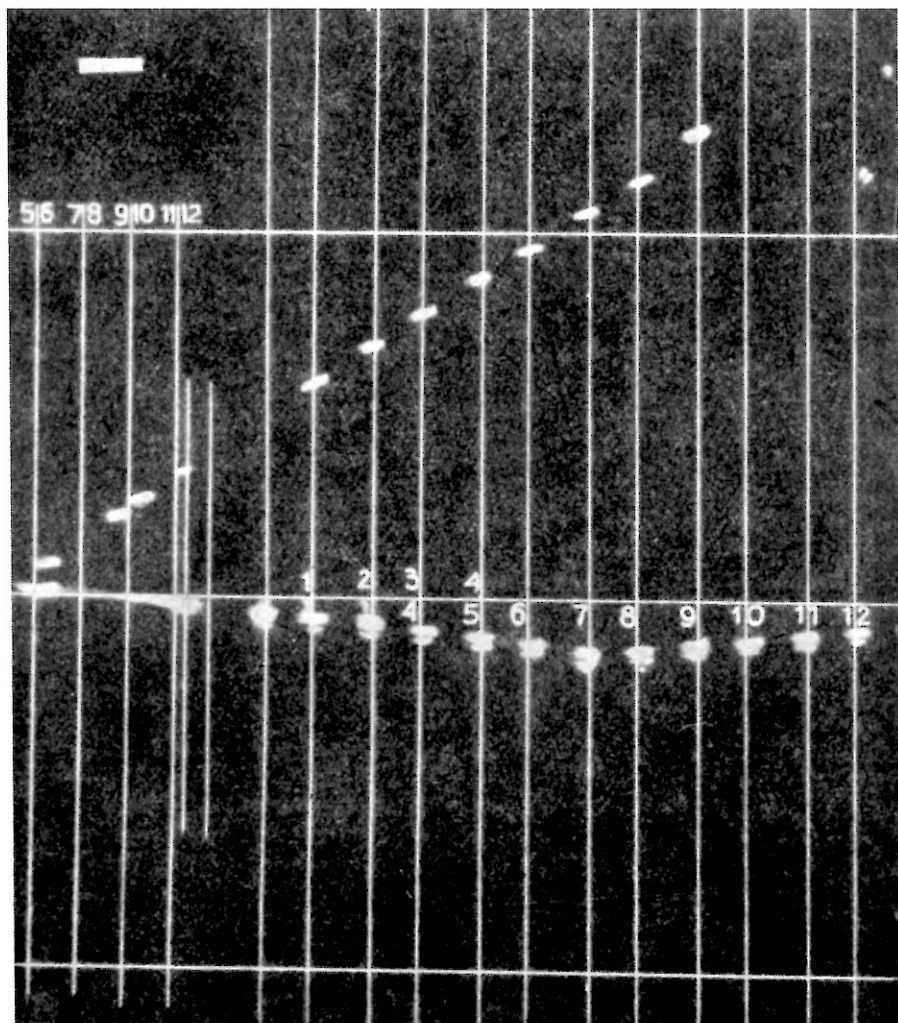


Рис. 5.2. Треки в искровой камере, имеющие вид ярких пунктиров на этой фотографии, отмечают траектории пиона (вверху) и протона (внизу), появившихся в результате распада нейтральной Λ -частицы. Инвариантность относительно обращения времени была бы нарушена, если бы числа протонов, рассеиваемых налево и направо, были бы неодинаковы.

α , вторую составляющую, параллельную вектору спина, назовем γ , третью, перпендикулярную этим двум, назовем β . Значения каждой компоненты спина можно определить экспериментально, исследуя рассеяние большого числа рождающихся в распаде протонов на углеродных мишенях. Это оказывается возможным потому, что, когда происходит рассеяние протонов, обладающих спином с направлением вверх, они преимущественно рассеиваются налево, а не направо.

Рассмотрим теперь, что произойдет с обсуждаемой нами диаграммой распада, если к ней применить операцию обращения времени. Изменение

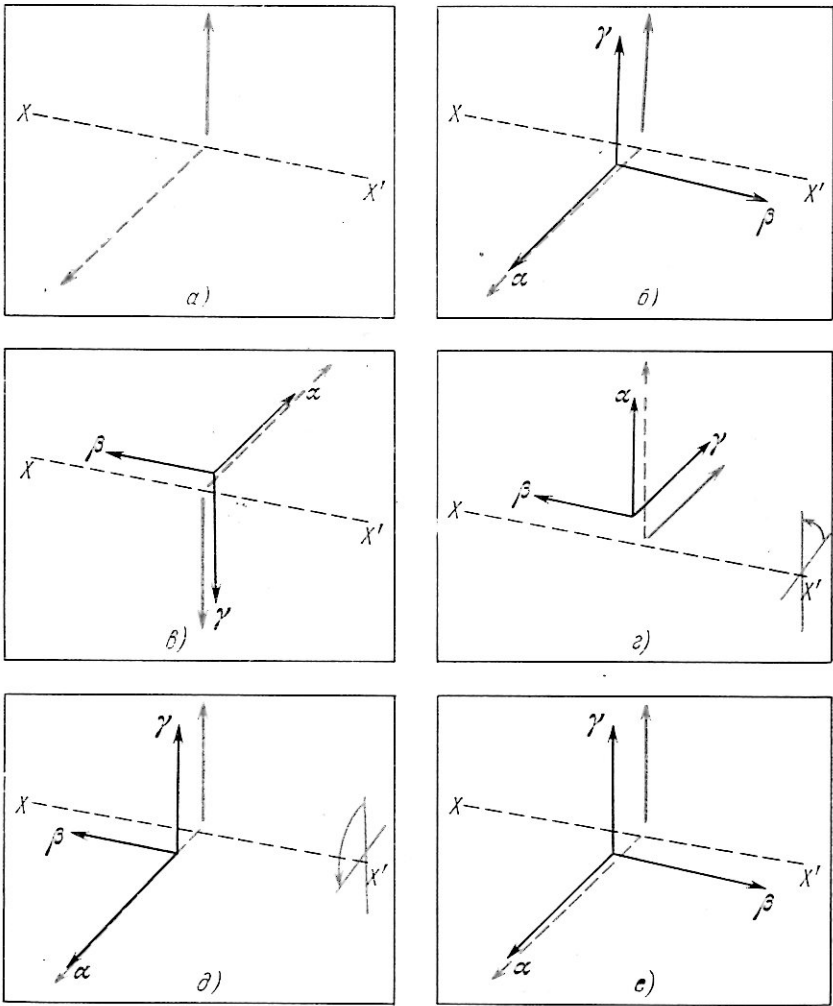


Рис. 5.3. На этих рисунках продемонстрировано, что измерение спина протона после распада Λ -частицы обеспечивает проверку инвариантности относительно обращения времени. Первый рисунок (а) показывает сам распад. Вектор спина Λ -частицы (сплошная стрелка) направлен вверх. Рождающийся протон испускается под прямым углом к вектору спина Λ -частицы. В этом случае он движется по направлению к читателю (пунктирная стрелка). Направление вектора спина протона неизвестно, и поэтому предполагается, что он имеет три произвольные компоненты (рис. б, сплошные черные стрелки). Далее показано аналогичное событие, но обращенное во времени (в). В нем вектор спина Λ -частицы направлен вниз, а испущенный протон движется от читателя. Каждая компонента вектора спина протона α , β и γ также имеет противоположное направление. Когда все идет в обратном направлении, трудно сравнивать исходный случай со случаем, обращенным во времени. Однако, если в случае, обращенном во времени, повернуть рисунок на 180° вокруг оси XX' , то сравнение сделать будет легче. Этот поворот продемонстрирован в два приема, на 90° каждый, на рис. г и д. Для удобства сравнения рядом помещен первоначальный рисунок б, обозначенный теперь е. Эти два рис. д и е оказываются совпадающими во всем, кроме того, что компоненты спина протона, обозначаемые β , имеют противоположные направления. Если никаких нарушений инвариантности относительно обращения времени нет, то наблюдаемое значение этой компоненты спина протона не должно отличаться от нуля.

направления хода времени заставляет все частицы двигаться в направлениях, противоположных первоначальному. Поэтому протон, который считался движущимся к читателю, теперь будет двигаться от него. Кроме того, поскольку в результате обращения времени вращение по часовой стрелке

ке сменится на вращение против часовой стрелки, направления векторов спина также изменятся на противоположные. Это приведет к изменению направления всех трех произвольных компонент вектора спина, приписанных протону.

Если мы теперь захотим сравнить диаграмму, обращенную во времени, с первоначальной, то мы убедимся, что это сделать довольно трудно: в одном случае протон удаляется от нас, а в другом — приближается к нам. Провести сравнение будет легче, если осуществить поворот на 180° вокруг оси XX' на обращенной во времени диаграмме. Тогда на обеих диаграммах протон будет двигаться в одном и том же направлении. Такое вращение вокруг оси ничего не изменит с физической точки зрения, поскольку физические процессы не зависят от ориентации системы координат в пространстве.

Если теперь сравнить первоначальную диаграмму с диаграммой, обращенной во времени, то мы увидим, что все стрелки компонент спина протона ориентированы в одинаковых направлениях, за исключением составляющей спина β . В обращенном во времени мире составляющая спина протона вдоль направления β меняет свой знак. Таким образом, если справедливо утверждение, что в природе ничто не должно меняться при обращении времени, то из него следует требование строгого равенства нулю составляющей вектора спина протона. Наоборот, если на опыте будет найдено, что составляющая β не равна нулю, то мы, тем самым, найдем физически наблюдаемую величину, которая, скажем, положительна в мире со временем, текущим в будущее, и отрицательна в мире со временем, текущим в прошлое. Это был бы пример нарушения T -инвариантности.

Вследствие того, что рассеяние протонов имеет преимущественно одно направление, величину β можно измерить экспериментально. Следует просто сравнить число протонов, рассеянных вдоль направления спина Λ -частицы, с числом протонов, рассеянных в противоположном направлении. Если природа инвариантна по отношению к обращению времени, то числа протонов, рассеянных в двух этих направлениях, должны совпадать.

Прежyдущие рассуждения были, конечно, переупрощены. Если обратиться к более строгой теории, то следует принять во внимание два важных обстоятельства, касающихся значения величины β . Оба эти обстоятельства имеют весьма общее значение для всех проверок T -инвариантности, в которых исследуются физические наблюдаемые, существующие, по самой своей природе, лишь в случае отсутствия инвариантности по отношению к обращению времени.

Первое соображение касается того, что в некоторых процессах распада нулевое значение величины β получится на эксперименте просто потому, что в них вообще нет ни одной величины, на которой могло бы сказаться обращение времени. Оказывается, что физические наблюдаемые, которые должны служить для описания T -инвариантности, возникают только в тех процессах, для которых имеет место интерференция двух амплитуд. Распады, для описания которых не нужны две амплитуды, не могут служить пробным камнем для проверки T -инвариантности. Из более ранних работ по Λ -частицам мой коллега по эксперименту Ричард Ф. Рот и я знали, что распад этих частиц описывается двумя амплитудами, так что с этой точки зрения выбор объекта для проверки T -инвариантности был удачным.

Второе соображение говорит нам о том, что хотя распад Λ -частицы обусловлен слабым взаимодействием, тем не менее, возникающие протон и пион в момент распада взаимодействуют сильно. Учет сильного взаимодействия делает необходимым введение дополнительной малой поправки,

которая приводит к тому, что величина β оказывается не равной нулю даже в случае справедливости требования инвариантности относительно обращения времени. Из имеющихся данных по рассеянию пионов на протонах мы можем без труда рассчитать необходимую величину такой поправки. Когда придет время обрабатывать результаты новых экспериментов, мы будем иметь возможность сравнивать их с правильным значением β . Если теоретическое и экспериментальное значения β не совпадут, то, тем самым, будет установлено, что инвариантность относительно обращения времени отсутствует.

Рот и я осуществили наш эксперимент летом 1965 г., когда мы смогли воспользоваться ускорителем в Принстоне (Пенсильвания) как источником бомбардирующих частиц. Наша аппаратура состояла в основном из трех искровых камер, скомбинированных с четырьмя сцинтилляционными

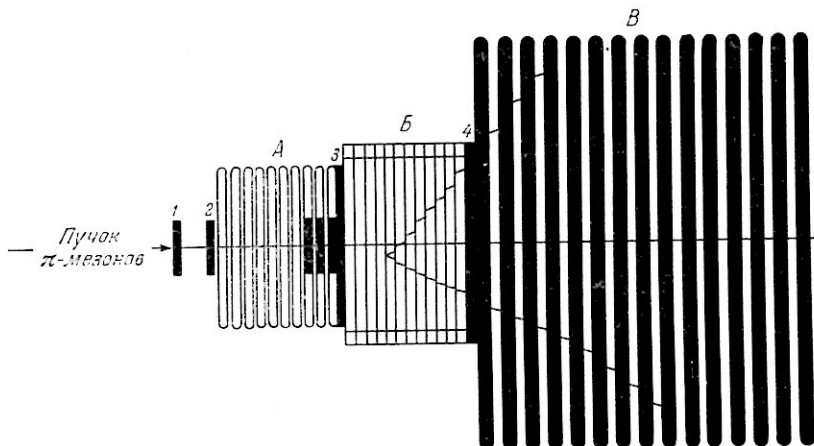


Рис. 5.4. Аппаратура, использовавшаяся для поиска нарушений инвариантности относительно обращения времени, состояла из трех искровых камер (А, Б, В) и четырех сцинтилляционных счетчиков. Ожидаемое событие происходило, когда пион попадал в систему слева, запускал первые два сцинтилляционных счетчика и взаимодействовал с веществом, заполняющим искровую камеру А, порождая Λ -частицу. Эта частица проходила через третий сцинтилляционный счетчик и, будучи нейтральной, не запускала его. Проходя через искровую камеру Б, Λ -частица распадалась на протон и пион. Эти заряженные частицы включали четвертый сцинтилляционный счетчик. Последовательность всплесков счетчиков 1—4—0—1 автоматически запускала искровые камеры, и фотокамера фиксировала трек, оставленный протоном (нижний пункт), который рассеивался на углеродных пластинках в искровой камере В. Из 1,2 миллиона фотографий, выполненных в течение эксперимента, 10 000 фотографий обеспечили хорошие данные по спинам протонов.

счетчиками (рис. 5.4). Пучок пионов высокой энергии из ускорителя проходил через пару сцинтилляционных счетчиков и попадал в первую искровую камеру, где сталкивался с рядом полиэтиленовых пластинок, в результате чего рождались Λ -частицы, необходимые для дальнейшего. Третий сцинтилляционный счетчик отделял первую искровую камеру от второй, а четвертый счетчик отделял вторую камеру от третьей, в которой помещалось несколько углеродных пластин толщиной в 1,5 см.

Сцинтилляционные счетчики были взаимосвязаны так, что они автоматически запускали разряд в искровых камерах, как только происходило событие, представлявшее для нас интерес. Система действовала следующим образом. Когда загорались первый и второй счетчики, это означало, что пион попал в аппаратуру. Если третий счетчик не зажегся, то это означало, что пион провзаимодействовал с полиэтиленовой пластинкой, в результате чего родилась нейтральная Λ -частица. Ее распад на протон и пион происходит во второй искровой камере, и переход этих заряженных

частиц в третью камеру приводит к зажиганию сцинтилляционного счетчика, расположенного перед ней. Каждый раз, когда имела место последовательность событий 1—1—0—1, искровые камеры запускались, и треки, оставляемые рассеиваемыми частицами, регистрировались на 54-миллиметровую пленку для последующего анализа.

В течение всего эксперимента мы произвели более 1,2 миллиона снимков, на что было израсходовано 26 км пленки. Поскольку, кроме интересующего нас процесса, такую же последовательность вспышек в сцинтилляционных счетчиках могли порождать и другие взаимодействия, только 25% или около того наших фотоснимков несомненно содержали распады Λ -частиц. Из этих 300 тысяч выделенных фотографий только 10 тысяч содержали снимки последующего рассеяния протонов, которое позволяет получать информацию о поляризации частиц. Такой низкий выход типичен для экспериментов подобного типа, когда желаемое событие возникает лишь в результате комбинирования ряда весьма маловероятных процессов. В действительности полный итог был значительно хуже. Только одна из 100 триллионов частиц с заданной полной энергией, вылетающая из ускорителя, приводила к появлению интересующего нас случая. С другой стороны, чтобы подчеркнуть преимущества использованной экспериментальной техники, отметим, что нам удалось в течение одного лета зарегистрировать почти треть миллиона распадов Λ -частиц, тогда как десять лет назад весь мировой запас зарегистрированных распадов Λ -частиц составлял менее 1000 случаев.

Наш эксперимент потребовал затраты около трех месяцев на обсуждение его проекта, еще трех месяцев на работу у ускорителя и около полутора лет на анализ результатов. Когда имелась возможность получать пучок из ускорителя, данные снимались день и ночь. Как только оборудование было настроено, мы пригласили группу студентов, чтобы они помогали нам следить за его работой. Поскольку аппаратура оказалась надежной, а студенты были на летних каникулах, они работали обычно в ночную смену от полуночи до завтрака. Когда необходимое количество данных с ускорителя было получено, пленка была доставлена на просмотр в Принстон, где она была изучена на предмет выделения интересных случаев. Следующей задачей, выполненной в университете штата Мичиган, был детальный анализ событий, вошедших в интересующую нас серию из 10 тысяч фотоснимков. Измерительные приборы фиксировали информацию на перфокартах, которые затем были введены в вычислительную машину, запрограммированную на проведение полного анализа каждого события.

Мы установили, что результаты наших опытов не подтверждают каких-либо нарушений инвариантности относительно обращения времени, по крайней мере в пределах надежности, которая основана на изучении 10 тысяч событий. Если предположить, что T -инвариантность имеет место, то предсказываемое значение $\beta = -0,07 \pm 0,02$. Наши результаты дали значение $\beta = -0,10 \pm 0,07$, что не позволяет говорить об отклонениях от теоретического значения. Группа физиков из международной группы повторила этот эксперимент на ускорителе ЦЕРНа в Женеве, и наши выводы были ими подтверждены.

Что касается операций симметрии, отличных от операций обращения времени, то результаты их применения к распаду Λ -частицы можно предсказать с помощью методов, использованных выше для обсуждения проблемы обращения времени. Поскольку операция четности меняет знак импульсов, но оставляет неизменными знаки моментов импульсов или спинов, то нетрудно показать, что если в распаде Λ -частицы четность сох-

раняется, то компонента вектора спина протона α должна равняться нулю (рис. 5.5). Мы нашли, что экспериментальное значение α есть 0,65, так что четность в данном случае не сохраняется, как и следовало ожидать для процессов слабых взаимодействий.

Аналогично можно показать, что если в данном распаде сохраняется комбинация четности и зарядового сопряжения (CP), то компонента спина α для антипротона и зарядового анти Λ -частицы должна быть равна по величине, но противоположна по знаку компоненте спина α для протона в

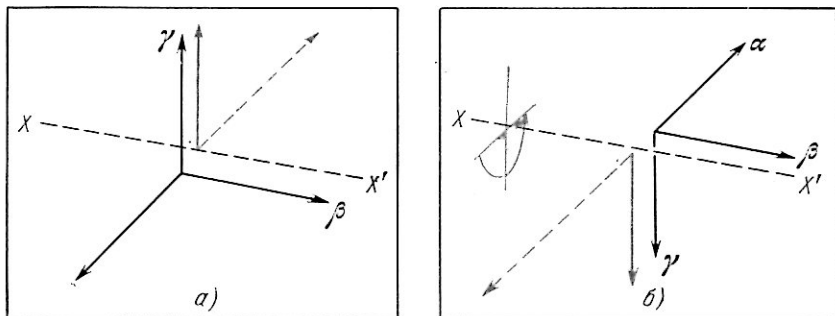


Рис. 5.5. Нарушение четности в распаде Λ -частицы было также открыто путем анализа значений компонент вектора спина протона. Операция четности изменяет направление импульса частицы, но не меняет направления ее спина. Иначе говоря, распад с противоположной четностью приводил бы к появлению протона, движущегося от читателя (а, цветная пунктирная стрелка), а не по направлению к нему. Однако операция четности не меняет направления трех компонент вектора спина (сплошные черные стрелки). Когда в целях сравнения предыдущий рисунок поворачивается на 180° вокруг оси XX' (б), очевидно, что для сохранения четности значение компоненты α должно равняться нулю. Однако на самом деле значение компоненты α оказалось равным 0,65.

распаде Λ -частицы. Экспериментальное подтверждение в пользу или против этого предсказания получить не удалось, поскольку до сих пор неизвестны способы рождения анти Λ -частиц с ориентированными спинами или методы анализа поляризации образующихся антипротонов. Это является главным камнем преткновения на пути изучения нарушений CP -симметрии. Чтобы их наблюдать, необходимо сравнить распад частицы и соответствующей античастицы, а при существующем уровне развития экспериментальной техники трудно получить большое число античастиц, особенно тяжелых типов.

В поисках возможных нарушений инвариантности относительно обращения времени методами, приведенными в табл. 5.2, были изучены три типа взаимодействий. Никаких нарушений не было обнаружено. Первая из сильных ядерных реакций, перечисленных в таблице, обсуждалась на рис. 5.1. Так же, как и в других случаях сильных взаимодействий, экспериментальный верхний предел возможного нарушения T -инвариантности составляет величину порядка нескольких десятых процента. В слабых и электромагнитных взаимодействиях инвариантность относительно обращения времени предсказывает для угла ϕ значение нуль. Экспериментальные верхние пределы значений этого угла показывают, что в пределах экспериментальной точности в несколько процентов никаких отклонений от нулевого значения нет. Очень малые абсолютные значения, приведенные для двух последних примеров электромагнитных взаимодействий, находятся в хорошем согласии с предсказанием, также вытекающим из инвариантности относительно обращения времени, в силу которого ни одна частица не может обладать дипольным моментом.

К сожалению, теоретическое понимание данной проблемы не может возрасти вследствие получения отрицательных результатов, имеющих оп-

Таблица 5.2

Сильные взаимодействия	
$Mg^{24} + d \rightleftharpoons Mg^{25} + p$	$3 \cdot 10^{-3}$
$Mg^{24} + \alpha \rightleftharpoons Al^{27} + p$	$3 \cdot 10^{-3}$
$O^{16} + d \rightleftharpoons N^{14} + \alpha$	$3 \cdot 10^{-3}$
Поляризация—асимметрия в протон-углеродном рассеянии	$1 \cdot 10^{-2}$
Протон-протонное триплетное рассеяние	$5 \cdot 10^{-3}$
Слабые взаимодействия	
$n \rightarrow p + e^{-} + \nu$	$\varphi < 2,5 \cdot 10^{-2}$
$Ne^{19} \rightarrow F^{19} + e^{-} + \nu$	$\varphi < 3,5 \cdot 10^{-2}$
$K^0 \rightarrow \pi^{-} + \mu^{+} + \nu$	$\varphi < 5 \cdot 10^{-2}$
$\Lambda \rightarrow p + \pi^{-}$	$\varphi < 7 \cdot 10^{-2}$
Электромагнитные взаимодействия	
$Ru^{99} \rightarrow Ru^{99} + \gamma$	$\varphi < 2 \cdot 10^{-3}$
$Ir^{193} \rightarrow Ir^{193} + \gamma$	$\varphi < 4 \cdot 10^{-3}$
$Rh^{106} \rightarrow Pd^{106} + e^{-} + \gamma + \gamma$	$\varphi < 2 \cdot 10^{-2}$
Электрон-дейтронное рассеяние	$\varphi < 9 \cdot 10^{-2}$
Рассеяние электрона на поляризованных протонах	$\varphi < 9 \cdot 10^{-2}$
Электрический дипольный момент нейтрона	$\varphi < 5 \cdot 10^{-23}$
Электрический дипольный момент электрона	$\varphi < 3 \cdot 10^{-23}$

ределенный верхний предел. Упорно ищется положительное подтверждение наличию подобных нарушений. С этой точки зрения необходимо провести исследование всех взаимодействий более чувствительными методами, и эта работа уже ведется.

Таким образом, сейчас продолжаются исследования, с помощью которых физики пытаются понять, что представляет собой эффект нарушения CP -симметрии, наблюдаемый в распадах нейтральных K -мезонов. Нарушается ли CP -симметрия всюду? Нарушается ли T -инвариантность? Справедлива ли CPT -теорема? Только эксперимент может дать ответ на эти вопросы. Можно предположить, что те нарушения, которые мы ищем, очень малы. Поэтому эксперименты, необходимые для их обнаружения, должны быть очень точны. Не исключена и такая вполне реальная возможность: эти нарушения столь малы, что при существующем уровне экспериментальной техники их вообще нельзя обнаружить.

Нарушение инвариантности относительно обращения времени в одном из фундаментальных взаимодействий не является столь уж невероятным. Очень важно сейчас, чтобы все сколько-нибудь подозрительные случаи были бы исследованы. Мы совершенно не сможем понять механизм проявления основных сил природы, если не будем знать их свойства по отношению к фундаментальным симметриям. Более того, вся наша концепция окружающей нас Вселенной, наши фундаментальные представления о пространстве и времени находятся в сильной зависимости от того, какие из установленных нами законов сохранения и принципов симметрии соответствуют природе. Одно несомненно: только будущее покажет, существует ли различие между временем, идущим вперед или назад.

МАГНИТНЫЕ МОНОПОЛИ

(ДЕКАБРЬ 1963 г.)

Эти фундаментальные частицы, предсказываемые на основе принципов симметрии и законов сохранения, до сих пор не обнаружены. Столь явное отклонение от выводов теории стимулирует новые поиски этих частиц.

В сороковые годы знаменитый физик — теоретик П. А. М. Дирак предположил, что наряду с элементарными квантами (порциями) электричества (электрон и протон) должны существовать и элементарные кванты магнетизма. Такая магнитная частица обладала бы «магнитным зарядом». Поскольку этот заряд был бы либо «северным», либо «южным», эти гипотетические частицы назвали магнитными монополями.

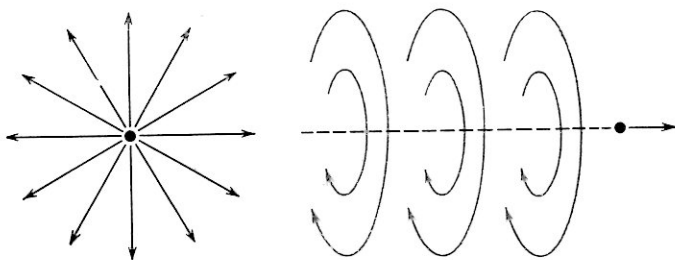


Рис. 6.1. Протон (черная точка) в неподвижном состоянии (слева) создает вокруг себя электрическое поле (черные стрелки). При движении (справа) он создает как электрическое поле (здесь не показано), так и магнитное поле (цветные стрелки). Интенсивность магнитного поля меньше интенсивности электрического поля, и оно ориентировано по-другому. В действительности в левой части рисунка электрическое поле следует представлять в трех измерениях.

Магнитный монополи мог бы придать теории электричества и магнетизма ту симметрию, которой она лишена в данный момент. С точки зрения физиков-теоретиков магнетизм в нашем мире есть просто побочный продукт электричества; он существует только благодаря движению электрически заряженных частиц. «Электрическая» частица служит источником электрического поля (рис. 6.1). При ее движении в качестве вторичного эффекта появляется магнитное поле. По соображениям симметрии должны были бы существовать «магнитные» частицы, которые служили бы источниками магнитных полей (рис. 6.2) и при движении порождали электрические поля подобно тому, как движущиеся электрические частицы порождают магнитные поля. Магнитные частицы должны испускать и поглощать электромагнитное излучение (например, свет) точно так же, как это делают электроны (рис. 6.3). Кроме того, в той же мере, как фотоны высоких

энергий могут порождать пары противоположно заряженных электрических частиц, например электрон и позитрон, они должны были бы порождать пары магнитных монополей.

Идея Дирака о магнитных частицах, высказанная почти одновременно с предсказанием существования позитрона, вызвала многочисленные исследования теоретического и экспериментального характера *). До сих

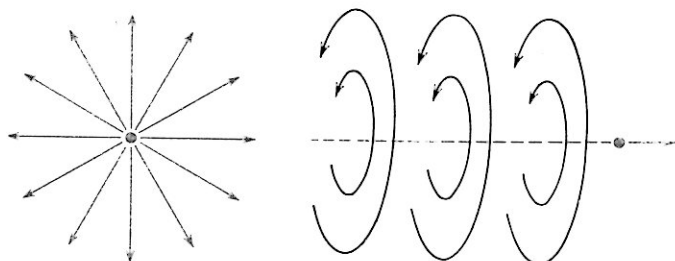


Рис. 6.2 Монополь (цветная точка), будучи неподвижным (слева), порождает вокруг себя магнитное поле, а при движении (справа) — электрическое поле. Здесь показан «северный» монополь. Электрическое поле, создаваемое движущимся южным монополем должно иметь противоположное направление. С точки зрения полной электромагнитной симметрии должны были бы существовать как «магнитно-заряженные» монополи, так и электрически, заряженные частицы.

пор магнитные монополи успешно срывали планы всех, кто их изучал. Экспериментаторы потерпели полный крах в попытках обнаружить хоть какие-нибудь признаки существования этих частиц. Теоретики же, со своей стороны, не смогли найти ни одной серьезной причины, в силу кото-

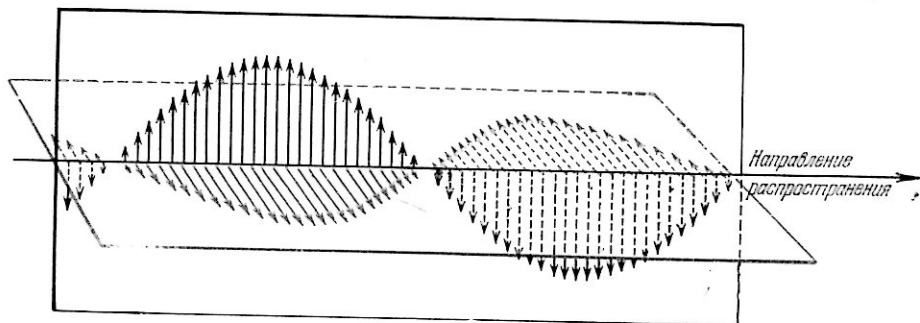


Рис. 6.3. Электромагнитная волна, распространяющаяся в свободном пространстве, содержит осциллирующие электрическое и магнитное поля равной интенсивности. Такая волна может быть генерирована ускоренной заряженной частицей (протоном или электроном). Она может быть также генерирована ускоренным северным или южным монополями. На этом рисунке электрическое поле расположено вертикально, а магнитное — горизонтально.

рой они не должны были существовать. Конечно, этот факт мог бы показаться весьма скудной базой для поддержания сколько-нибудь значительного интереса к данной гипотетической частице. Однако на самом деле это обстоятельство весьма существенно. Одно из элементарных правил, действующих в природе, состоит в том, что в случае отсутствия закона, запрещающего некое событие или явление, оно неизбежно происходит с той или иной степенью вероятности. Более просто и грубо это правило гласит: все, что может случиться, должно случиться. Поэтому физикам придется допускать, что магнитный монополь существует до тех пор, пока они не

*) К числу последних теоретических изысканий относятся работы Ю. Швингера. (Прим. ред.)

установят закон, запрещающий его существование. Открытие такого закона было бы столь же впечатляющим событием, как и открытие самой частицы.

Именно эти обстоятельства поддерживали интерес к проблеме монополя на протяжении последних тридцати лет. Эта проблема оставалась заманчивой «голубой мечтой» современной физики, но она продолжала как бы тлеть на медленном огне костра научных исследований. Физики обращались к ней лишь изредка, поскольку монополи в нашем мире должны были встречаться редко, а само их существование казалось сомнительным.

В последнее время, однако, появились две причины, по которым возрос интерес к столь таинственной частице. Одна из них связана со все возрастающей мощностью средств, которые создают возможность рождения и наблюдения монополей. Эти средства — мощные новые ускорители частиц — на 30 Гэв (миллиардов электрон-вольт) в Брукхейвене и в ЦЕРНе и на 70 Гэв, созданной в СССР (Серпухов), а также новые технические средства для наблюдения монополей в космических лучах. Вторая причина возобновления интереса к монополю связана с удивительным изменением общепhilософских взглядов, которое произошло в физике за последние несколько десятилетий в результате открытия возможности рождения и уничтожения триады различных частиц. Это изменение в философских взглядах (которое мы обсудим позднее в этой статье) интенсифицировало интерес физиков к законам сохранения, которые в огромной степени разграничивают то, что возможно, и то, что невозможно в физическом мире. С этой точки зрения несуществование монополя и вопрос о том, запрещается ли его существование или нет, превратились в проблемы фундаментального значения.

Проблема асимметрии явлений электричества и магнетизма имеет вековую давность. Она берет свое начало со времени слияния теорий электричества и магнетизма в единую теорию электромагнетизма, осуществленного Джеймсом Клерком Максвеллом. Его теория оказалась одним из величайших триумфов науки девятнадцатого столетия. Одним из самых удивительных упрощений, содержащихся в ней, оказалась возможность объяснить все электрические и магнитные эффекты, исходя только из существования электрического заряда. Тем не менее, со времени появления в 1862 г. элегантной формулировки уравнений электромагнетизма, данной Максвеллом, отсутствие в этих уравнениях магнитного заряда кажется несколько странным.

Уравнения Максвелла для электромагнитного поля на самом деле представляют естественную возможность для введения в теорию магнитных монополей. В трехмерных векторных обозначениях их объединяют в четыре уравнения

$$\begin{aligned} \nabla E &= 4\pi\rho, & -\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \times B &= \frac{4\pi}{c} j, \\ \nabla B &= 0, & -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} - \nabla \times E &= 0 \end{aligned}$$

(c — скорость света). В одном из уравнений в правой части стоит плотность электрического заряда (ρ); в другом уравнении в правую часть входит плотность тока (j) движущихся электрических зарядов. В остальных двух уравнениях правые части суть нули. Чтобы всем четырем уравнениям сообщить должную симметрию, один из этих нулей следует заменить на плотность «магнитного заряда», а другой — на плотность тока движущихся «магнитных зарядов». Коротче говоря, эти нули представляют собой как

бы «щель», оставленную для монополей. Для описания монополей не потребовалось бы никаких новых уравнений. Уравнения Максвелла уже существуют и лишь ждут, чтобы монополи были открыты.

Возможность введения в уравнения Максвелла монополей становится еще более очевидной, если последние переписать в обозначениях специальной теории относительности

$$\partial_{\mu} F_{\nu\sigma} = \frac{4\pi}{c} j_{\nu}, \quad \partial_{\mu} F_{\nu\sigma}^{+} = 0,$$

где символы $F_{\nu\sigma}$ и $F_{\nu\sigma}^{+}$ обозначают различные компоненты электрического и магнитного полей, значок перед этими символами — производную по одной из координат в четырехмерном пространстве; j_{ν} — четырехмерный вектор плотности электрического тока.

Тогда будет всего два уравнения, одно из которых содержит в правой части член с электрическими источниками, а другое в правой части имеет нуль, который и следовало бы заменить на член с магнитными источниками (четырёхмерный вектор плотности магнитного тока).

В рамках классической электромагнитной теории не было ничего, что могло бы послужить оправданием для такой асимметрии между электричеством и магнетизмом. В 1931 г. Дирак задал тот же вопрос в рамках квантовой теории: существует ли в квантовой теории электромагнетизма что-нибудь такое, что запрещало бы существование магнитного заряда? Он таких ограничений не обнаружил. Квантовая теория, подобно классической, вполне допускала возможность существования монополей.

Исследование Дираком математической сущности проблемы привело к установлению чрезвычайно интересного факта. Если монополь существует, то величина его магнитного заряда, как и величина электрического заряда частицы, должна быть квантована. Он смог рассчитать величину единицы этого магнитного заряда. Рассматривая взаимодействие монополя и электрически заряженной частицы, он установил, что произведение магнитного заряда монополя и электрического заряда частицы должно быть численно равно некоторой величине, фиксированной фундаментальными константами (а именно, постоянной Планка и скоростью света). В безразмерных единицах, популярных среди физиков, минимально возможное значение этого произведения (отличное от нуля) есть одна вторая. Иначе говоря, произведение электрического заряда на магнитный заряд равно одной второй. Величина элементарного электрического заряда (т. е. минимальная единица заряда), которой обладают электрон или протон, известна и равна в тех же единицах $\sqrt{1/137}$. Поэтому минимально возможная величина магнитного заряда, переносимого монополем, должна равняться $1/2 \sqrt{137}$. Иными словами, элементарный магнитный заряд в 68,5 раза больше элементарного электрического заряда. Следовательно, сила взаимодействия двух монополей должна была бы превосходить силу взаимодействия двух элементарных электрических зарядов на том же расстоянии в $68,5 \times 68,5$ или в 4692 раза. Этот теоретический результат представляет большую ценность, поскольку предсказание подобного рода не имеет прецедента в современной физике. До сих пор никому еще не удавалось достичь успеха в предсказании интенсивности какого бы то ни было взаимодействия между элементарными частицами.

Теоретический анализ величины магнитного заряда, выполненный Дираком, — это единственная возможность, позволяющая приписать рассматриваемой гипотетической частице какое-то определенное качество. Однако, зная только величину магнитного заряда, можно сделать интересные выводы о других возможных свойствах монополя и о его поведении.

Например, естественно предположить, что монополю тяжелее любой открытой до сих пор элементарной частицы. Согласно общему правилу известно, что сила взаимодействия элементарных частиц возрастает с увеличением их массы. Наиболее тяжелые частицы взаимодействуют наиболее интенсивно. Монополи, обладающие большим магнитным зарядом, должны были бы взаимодействовать друг с другом даже сильнее, чем тяжелые ядерные частицы. Следовательно, никто не удивился бы, если бы монополи оказались еще более массивными. Экспериментальные попытки обнаружить монополи на самом деле показали,

что если они и существуют, то их масса должна по крайней мере втрое превышать массу протона *).

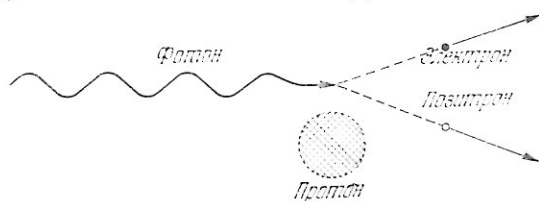
Следует дополнительно отметить, что нет никаких оснований говорить о монополе так, как будто в действительности существует только один-единственный сорт таких частиц. Если монополи вообще существуют, то есть все основания полагать, что они существуют во многих разновидностях подобно тому, как существуют различные сорта электрически заряженных частиц. При этом, как известно, среди последних есть частицы как тяжелые, так и легкие, обладающие ядерным взаимодействием или нет, частицы со спином и бесспиновые.

Предположим, теперь, что монополи действительно существуют. Возникает вопрос: как они рождаются, как живут и как умирают? Где можно было бы попытаться их обнаружить?

Что касается их рождения и смерти, то мы можем быть вполне уверенными лишь в одном: эти процессы должны подчиняться закону сохранения магнитного заряда. Как и сохранение электрического заряда, сохранение магнитного заряда является неизбежным следствием уравнений Максвелла. Это означает, что монополю, однажды рожденный, не может сам по себе исчезнуть, если только он не столкнется с другим монополем, обладающим магнитным зарядом противоположного знака. (В нашем мире, в котором монополи чрезвычайно редки, если вообще существуют, такие столкновения происходят еще реже, так что монополю в принципе должен был бы существовать вечно). Если же северный и южный монополи столкнутся, то они аннигилируют, но при этом никаких изменений в значении магнитного заряда не произойдет. Для пары противоположно «заряженных» частиц полный заряд равен нулю как до, так и после аннигиляции. В силу того же закона сохранения рождение монополей происходит всегда двойнями: северный монополю вместе с южным монополем. В этом случае полный магнитный заряд остается равным нулю, как это и было до рождения данной пары. Таким образом, в данном случае магнитный заряд сохраняется точно так же, как сохраняется электрический заряд при рождении электрон-позитронной пары, когда полный электрический заряд равен нулю (рис. 6.4).

Монополи (если все еще предполагать, что они существуют) рождаются парами при столкновениях других частиц высоких энергий. Одним из

*) За последние десять лет нижний предел массы монополя значительно возрос. (Прим. ред.)



столкновения, которое подходит для этой цели, является взаимодействие фотона сверхвысокой энергии с протоном (рис. 6.5). При этом падающий фотон должен обладать достаточной энергией, чтобы быть в состоянии породить массу покоя двух монополей. Существующие самые мощные ускорители, вероятно, способны породить фотоны требуемой энергии. Еще более вероятным источником монополей должны быть космические лучи высокой энергии. Это либо первичные частицы (главным образом, протоны), либо вторичные фотоны, рожденные при столкновениях первичных частиц с ядрами атомов атмосферы. «Снаряды» обоих типов очень часто обладают столь большой энергией, что они, столкнувшись с ядром, могут породить пару монополей даже в том случае, если монополь оказался бы в сотни раз массивнее протона.

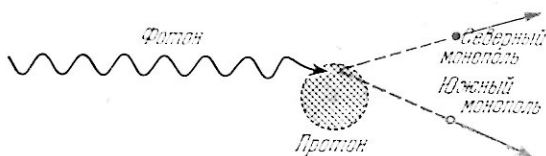


Рис. 6.5. Пара монополей, состоящая из северного и южного, также может быть рождена фотон-протонным столкновением. Из-за того, что они, вероятно, очень массивны, пары монополей должны были бы рождаться гораздо ближе к протону. Кроме того, для этого потребовался бы фотон более высокой энергии, т. е. фотон с более короткой длиной волны, чем это требуется в случае рождения электрон-позитронных пар.

Наконец, и сами монополи могут попадать на поверхность Земли из космоса. Вполне возможно, что они входят в состав первичного космического излучения как сравнительно редкая компонента или, будучи захваченными метеоритами, прибывают к нам вместе с ними. Обе эти возможности были изучены Э. Гото из Токийского университета.

Прежде всего он установил, что все монополи, достигающие поверхности Земли в составе космических лучей, должны обладать феноменально большой энергией. Вследствие большой величины их магнитного заряда монополи должны были бы очень эффективно ускоряться магнитным полем — гораздо более эффективно, чем протоны. В вакууме и на огромных просторах межзвездного пространства даже слабые магнитные поля космоса должны были бы ускорять монополи до средней энергии около 10^{11} Гэв. Обладая такой энергией, монополи должны были пронзить атмосферу Земли и внедряться глубоко в ее поверхность.

Между прочим, это означает, что монополи, если бы мы только смогли создать некоторый их запас, были бы идеальными «снарядами» для наших ускорителей. Расчеты показывают, что магнитное поле в $10\,000$ гс (легко достижимое сегодня в лабораторных условиях) может сообщать монополю энергию порядка $0,2$ Гэв на каждом сантиметре пути. Таким образом, ускоритель монополей длиной 2 м превзошел бы по энергии наиболее мощные из существующих ускорителей, длина кольца которых достигает около 800 м. Кроме того, для работы такого ускорителя хватило бы весьма малого запаса монополей, поскольку их можно было бы повторно выделять из мишеней и использовать вновь и вновь. С учетом этого обстоятельства ускоритель монополей мог бы функционировать почти что бесконечно долго, пользуясь первоначальным запасом «снарядов».

Что же касается обнаружения монополей в метеоритах, то Гото заметил, что случайная пара монополей может быть рождена космическими лучами и в этих космических путешествиях. При своем рождении они могут разлететься друг от друга и, если расстояние между ними достигнет тысячной доли сантиметра, в железном метеорите они уже не смогут про взаимодействовать так, чтобы вновь проаннигилировать друг с другом.

Будучи рожденными и захваченными метеоритом, монополи выживают и остаются связанными в нем бесконечно долго. Их предохраняет от вылета сила, подобная силе, которая удерживает электроны в металле. Вследствие большой величины магнитного заряда монополя энергия связи его в железе в несколько сот раз превышает энергию связи электрона в металле.

Железные и каменно-железные метеориты курсируют в Солнечной системе, можно думать, сотни миллионов лет. В течение столь длительного промежутка времени непрерывная бомбардировка их космическими лучами может привести к рождению монополей во многих из них. Тем самым, многие из метеоритов, экспонированных в настоящее время в музеях или лежащих на поверхности Земли, могут содержать в себе гипотетические магнитные частицы, ожидающие своего открытия.

Гото указал и другую возможность обнаружить монополи на поверхности Земли. Допустим, что первичные космические лучи рождают пару монополей в верхних слоях атмосферы. При своем движении через атмосферу к поверхности Земли они будут замедляться. (Вследствие большой величины магнитного заряда монополь должен был бы терять энергию при прохождении через вещество очень быстро; в железе, если взять крайний пример, эти потери для быстродвижущегося монополя составляют около 60 Гэв на каждый сантиметр пути.) После замедления северный монополь постепенно должен дрейфовать к северу в слабом магнитном поле Земли (менее 1 гс), а южный монополь должен двигаться соответственно к югу. В конце концов каждый монополь, следуя вдоль силовых линий магнитного поля Земли, достигает поверхности Земли со сравнительно малой скоростью. Если он случайно приземлится на кусок железной руды, оказавшейся на поверхности, он будет захвачен магнитным полем железа, заключенным в руде. Поэтому залежки железных руд вблизи поверхности могут оказаться выгодным объектом с точки зрения поиска монополей.

Если предположить, что монополи существуют, то возникает вопрос, каким образом их можно было бы выделить из вещества, в котором они находятся в связанном состоянии? Это можно сделать одним из двух допустимых способов: либо вытянуть их на поверхность с помощью мощного магнитного поля, либо разрушить магнетизм содержащего их вещества (например, метеорита) путем интенсивного нагревания или химического воздействия. Чтобы вырвать монополи из чистого железа, согласно произведенной оценке, необходимо приложить магнитное поле примерно в $50\,000 \text{ гс}$, что может быть достигнуто с помощью специально предназначенных для этой цели магнитов. Для выделения монополей из железной руды или других материалов, менее магнитных, чем чистое железо, потребовалось бы более слабое поле.

Обнаружение и отождествление монополя в принципе должно быть простым делом. В силу того, что он быстро теряет энергию при прохождении через вещество, монополь оставил бы в ядерной фотоэмульсии столь плотный трек, что его просто было бы невозможно спутать с треком любой другой элементарной частицы. Там, где монополь замедлялся бы и взаимодействовал с электронами атомов фотоэмульсии слабее, его трек сужался бы, т. е. превращался бы из плотного в слабый на единице пути. В пузырьковой камере или в камере Вильсона монополь также должен был бы без труда идентифицироваться по характеру поведения в приложенном к камере магнитном поле, которое совсем не походило бы на поведение электрически заряженной частицы.

Вопрос о точном поведении замедленного монополя в веществе все еще не совсем ясен. Согласно имеющемуся предположению в воздухе он может собрать вокруг себя облако из молекул кислорода и образовать слабо связанную «магнитную молекулу». В этом случае весь этот «шарик» должен был бы притягиваться магнитным полем Земли до тех пор, пока не достиг бы ее поверхности. Если подобное приземление произойдет на кусок железа, то монополю окажется вырванным из своего кислородного облака и будет поглощен железом в силу тех самоулавливающих сил, которые его сильно притягивают к железу.

Возможно, что монополи могут пронизывать атомы и удерживаться вблизи атомных ядер за счет присущего им магнетизма. Если это так, то монополю должен был бы притягиваться к ядру очень сильно, столь сильно, что попытка оторвать его была бы подобна попытке отнять любимую куклу у ребенка. Последнее невозможно сделать иначе, как потащив ребенка за собою.

Две попытки экспериментального получения монополей были предприняты в 1962 г. на ускорителях в 30 Гэв в Брукхейвенской национальной лаборатории (Лонг — Айленд) и в ЦЕРНе (Женева). Брукхейвенский эксперимент был выполнен под руководством Эдварда М. Парселла из Гарвардского университета. В качестве мишени, бомбардируемой пучком ускоренных протонов высокой энергии, была выбрана тонкая пластинка металла, например алюминия (рис. 6.6). В результате такой бомбардировки возникает ливень частиц, среди которых, как известно, встречаются π -мезоны (пионы), антипротоны и много других продуктов. Экспериментаторы надеялись найти среди этих осколков несколько монополей. Чтобы поймать монополи, они расположили на пути ливня частиц контейнер с углеводородом (обычная нефть) толщиной в 20 см. Согласно проделанному расчету этого должно было быть достаточно, чтобы затормозить любой монополю, рожденный протонным пучком. Электромагнит (соленоид), соединенный с контейнером, вытянул бы монополи из жидкости, если бы они только появились, и направил бы их в детектор. Были испытаны два типа детектора. Одним из них была сцинтилляционная камера. Она имеет вид трубки, заполненной жидким ксенонном. При прохождении частицы сквозь нее в ней возникают крошечные вспышки света. В данном случае монополи можно было бы идентифицировать по тому факту, что они создавали бы более интенсивные сцинтилляции, чем любая электрически заряженная частица. Другим детектором, использованным в отдельных сериях опытов, была ядерная фотоэмульсия. В этом случае монополи можно было бы обнаружить по их особенно плотным трекам.

В экспериментах в Брукхейвене в мишени было выпущено всего около шести миллионов миллиардов протонов высокой энергии. Однако ни одного монополя обнаружено не было. (Протонные пучки не пропали, конечно, зря. Порожденные ими частицы были выловлены и изучены в других экспериментах, проводившихся в то же время.) Аналогичные исследования, проведенные на ускорителе ЦЕРН, также потерпели крах при попытке обнаружить хоть какие-либо следы монополей. Энергии, использованные в экспериментах на обоих ускорителях, были таковы, что имелась возможность рождения монополей с массами вплоть до тройной массы протона. С учетом результатов этих экспериментов есть все основания утверждать, что никаких монополей с меньшей массой не существует. Если монополи вообще существуют, то они должны быть более массивными.

Недавно Гото, Генри К. Колъм и я предприняли попытку поиска монополей, которые могли быть рождены космическими лучами. Наши эксперименты, проведенные по поручению Массачусетского технологического института в Национальной магнитной лаборатории, были осуществлены как с железной рудой, так и с метеоритами. На месторождении железных руд в Эдирондакских горах (штат Нью-Йорк) мы применили небольшой,

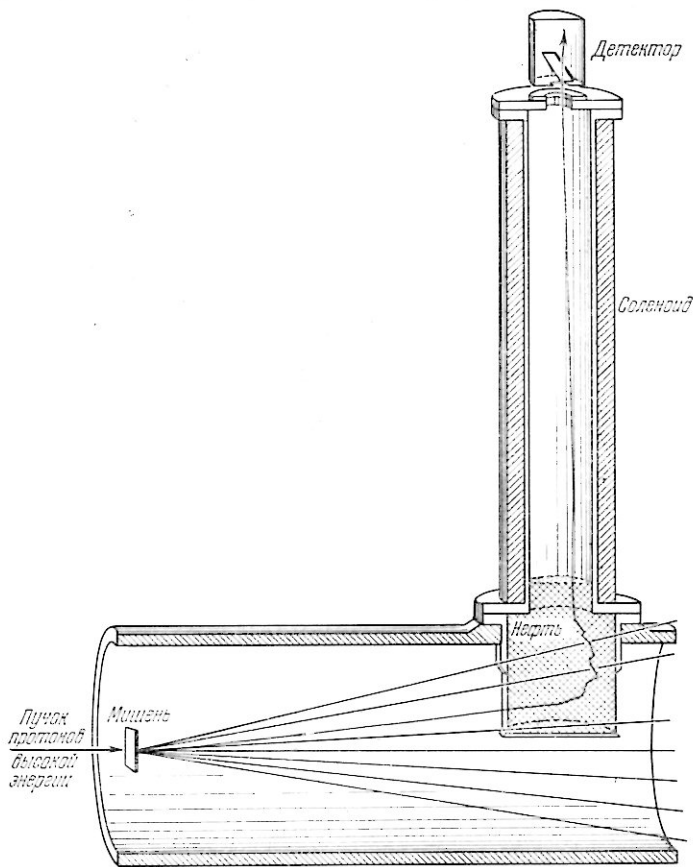


Рис. 6.6. Эксперимент в Брукхейвене, выполненный в 1962 г., был поставлен с целью получить монополи в результате ядерных столкновений при высоких энергиях. Пучок протонов, ускоренных в ускорителе до энергии в 30 Гэв , был направлен на тонкую алюминиевую мишень (слева), породив множество различных элементарных частиц. Имеющийся среди этих частиц монополь (цветная линия) мог бы попасть в контейнер с нефтью (справа внизу), где он замедлился бы до небольшой скорости, а затем с помощью магнитного поля был бы вытянут на поверхность нефти. Освободившись от нефти, монополь мог бы ускориться в вертикальном направлении внутри полого электромагнита, вновь достигая высокой скорости. Наконец, он пролетел бы через детектор (в данном случае — ядерная фотоэмульсия). Никаких монополей на опыте обнаружено не было.

но мощный магнит с портативным генератором, который мог создавать короткие импульсы магнитного поля интенсивностью $60\,000 \text{ гс}$. Такого поля было достаточно для выделения монополей, захваченных поверхностью руды. Наше оборудование было приспособлено к тому, чтобы ускорить выделенные монополи до энергии, превышающей 1 Гэв , заставить их пролететь через пару пластинок с ядерной фотоэмульсией и затем вновь поймать их в железный коллектор для дальнейшего изучения (рис. 6.7).

Исследование железной руды не дало нам ни одного монополя. Тот же результат мы получили, изучая метеориты, хотя к образцам метеори-

тов (предоставленных нам Гарвардским горным музеем) прикладывалось магнитное поле в 100 000 гс.

Итак, мы вновь оказались в положении, с которым физики довольно часто сталкивались в последние годы. В 1953 г. трудности были связаны с только что открытыми странными частицами. Хотя они могли быть получены без труда, тяжелые странные частицы не распадались достаточно

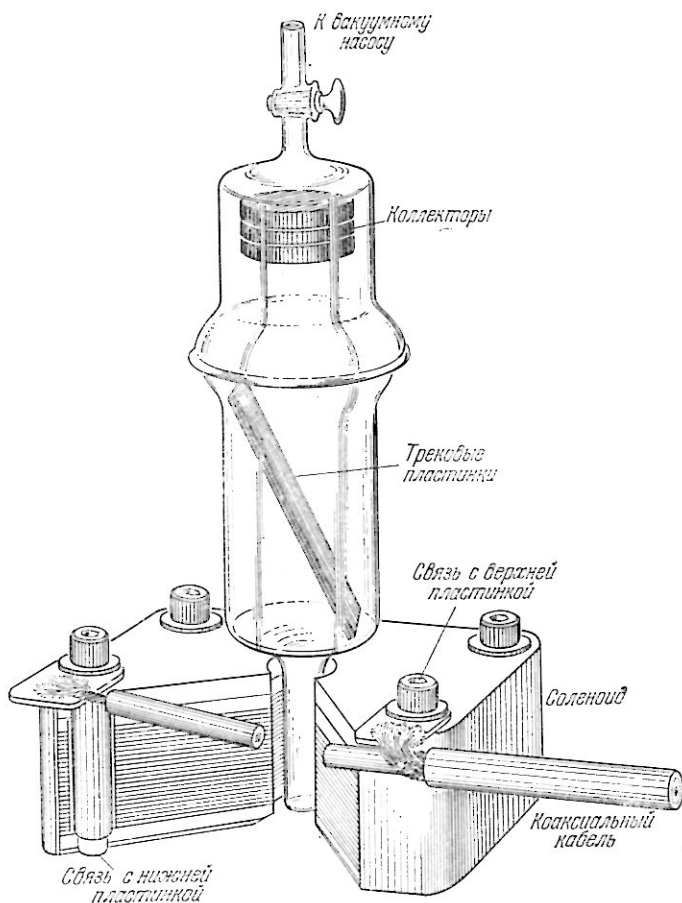


Рис. 6.7. Ловушка монополей, использованная автором для исследования тех монополей, которые могли оказаться в железных рудах на поверхности Земли. Пульсирующий электромагнит (соленоид) позволяет поместить около 5 см² поверхности руды в магнитное поле интенсивностью в 60 000 гс. Импульс, продолжающийся около одной десятичной секунды, может повториться один раз в минуту. Всякий монополюс, находящийся вблизи поверхности руды на глубине нескольких сантиметров, можно было бы выделить из руды, ускорить, пропустить через пару пластинок с ядерной фотоэмульсией и затем вновь выловить его с помощью железных коллекторов в верхней части вакуумной камеры. При исследовании 1000 см² поверхности руды не удалось обнаружить ни одного монополюса.

быстро на более легкие частицы. Факт отсутствия такого распада нельзя было объяснить ни одним из известных законов. Это привело двух молодых физиков Мюррея Гелл-Мана и Казухико Нишиджима к идее закона сохранения «странности». С тех пор этот закон был подтвержден многочисленными экспериментами.

В 1962 г. аналогичное безвыходное положение возникло в связи с μ -мезоном или мюоном. Мюон подобен электрону во всех отношениях, за исключением того, что он в 200 раз массивнее. Предполагалось, что

мюон может превратиться при распаде в электрон, испустив фотон. Однако ни одного случая такого распада не было обнаружено, несмотря на многочисленные попытки экспериментаторов. Объяснение этого явления появилось неожиданно в 1962 г. после успешного эксперимента, осуществленного на ускорителе в Брукхейвене группой физиков из Колумбийского университета. Они открыли, что мюоны следуют ассоциировать со специальным видом нейтрино, отличным от того вида нейтрино, который следует ассоциировать с электронами. Именно это обстоятельство позволяет объяснить невозможность распада мюона на электрон и фотон. Оказывается, что мюоны вместе со «своими» нейтрино подчиняются закону сохранения их полного числа, так что ни один из членов мюонного семейства не может исчезнуть в одиночестве *).

Таким же образом подтвержденное на данный момент несуществование магнитных частиц сталкивает физиков с парадоксом, которым они не могут пренебречь, пока не найдут ему объяснения. Может показаться странным, что отсутствие чего-то в природе вызывает у исследователей такой же, если не более сильный интерес, чем открытие чего-то существующего. К этому выводу нас приводят два наиболее фундаментальных открытия двадцатого века в физике: квантовая механика и теория относительности.

Квантовая механика сформулировала новую точку зрения на вероятностный характер событий в мире элементарных частиц. Эксперименты, выполненные один за другим в точности одинаковым образом, могут привести к различным результатам, каждый из которых имеет определенную вероятность. Например, изолированный K -мезон может распасться более чем полдюжиной различных способов: он может спонтанно превратиться в мюон и нейтрино, в два пиона, в три пиона, в пион, электрон и нейтрино или в ряд других определенных комбинаций продуктов распада. Каждый допустимый результат данного эксперимента возникает с определенной вероятностью, хотя и малой, если только он не запрещен физическим законом. В последнем случае эта вероятность равна нулю. В только что приведенном примере мы достоверно знаем, что вероятность распада K -мезона на электрон и мюон равна нулю, поскольку это следует из известного правила запрета (которое было установлено и проверено другим способом).

Очевидно, что всякие процессы в природе, запрещенные по тем или иным причинам, представляют особый интерес для физики. Их отсутствие выглядит особенно вызывающим в силу тех возможностей, которые они представляют для открытия новых законов природы.

Теория относительности внесла свой вклад в формирование новой точки зрения, сфокусировав внимание на принципах симметрии и законах сохранения; специальная теория относительности сама основана на свойствах симметрии пространства — времени. Во всех областях теоретической физики принципы симметрии и законы сохранения все более и более выступают в роли самых мощных орудий изучения природы **). Это обстоятельство еще более подчеркивает важную роль запрещенных процессов, поскольку в применении к превращениям частиц законы сохранения первоначально выступают в виде правил запрета.

*) См. статью Л. Ледермана «Двухнейтринный эксперимент» в третьем выпуске этой серии. (Прим. ред.)

***) См. статью Дж. Фейнберга и М. Голдхабера «Законы сохранения в физике» в третьем выпуске этой серии. (Прим. ред.)

Все это, конечно, не означает, что физики, столкнувшись с фактом, отсутствия чего-либо в природе, теряют немедленно покой и сон. Они, например, не занимаются поиском законов, которые позволили бы объяснить тот факт, что Земля имеет только один естественный спутник, а Венера не имеет их вовсе. Однако явное отсутствие в природе магнитных монополей беспокоит — причем сейчас еще сильнее, чем во времена, когда Дирак впервые предсказал, — и по весьма серьезным причинам. Мы не должны расстраиваться из-за того очевидного факта, что мир, в котором мы живем, построен только из электрически заряженных (и не заряженных) частиц без всякого участия монополей. Что же касается физиков, то для них важно уже то, что в нарушение принципов симметрии и всех известных законов ни одна магнитная частица до сих пор не была рождена или где-либо найдена. Можно с уверенностью предсказать, что физики будут продолжать свои поиски до тех пор, пока они либо найдут магнитные монополи, либо установят очевидную причину, по которой они не должны встречаться в природе.

Дж. Фейнберг

ЧАСТИЦЫ, ДВИЖУЩИЕСЯ БЫСТРЕЕ СВЕТА

(ФЕВРАЛЬ 1970 г.)

Попытки обнаружить такие частицы, названные тахионами, дали лишь отрицательные результаты. Однако, вопреки существующему всеобщему заблуждению, их существование не противоречило бы теории относительности.

Со времени формулировки Эйнштейном специальной теории относительности в 1905 г. и ее последующего подтверждения многочисленными экспериментами физики почти поголовно убеждены в том, что скорость света в вакууме (около 300 000 км/сек) — это максимальная скорость, с которой энергия или информация могут распространяться в пространстве. Действительно, первая работа Эйнштейна по теории относительности содержит утверждение: «скорости, превышающие скорость света, существовать не могут».

В основе этого вывода Эйнштейна лежало заключение, согласно которому уравнения теории относительности подразумевают возрастание массы объекта с увеличением его скорости. В конце концов при достижении скорости света (которую обычно обозначают c) масса становится бесконечной. Поскольку масса тела является мерой его сопротивления изменению скорости в случае ее приближения к бесконечному значению, дальнейшее ускорение тела становится невозможным. С другой стороны, установленное соотношение между энергией и скоростью, имеющее место в теории относительности, таково, что когда скорость тела приближается к значению c , его энергия стремится к бесконечности. Поскольку эта энергия должна быть сообщена каким-то образом телу в процессе ускорения, для ускорения тела от какой-нибудь малой скорости до скорости света был бы необходим бесконечный источник энергии. Подобные бесконечные источники энергии существовать не могут, и поэтому никоим образом нельзя заставить тело увеличивать скорость от величины, меньшей c вплоть до самой c .

Кроме того, если бы тело смогло хоть как-то перейти от скорости меньше c к скорости больше c , в силу тех же уравнений теории относительности, его энергия и импульс превратились бы в чисто мнимые числа, т. е. в числа, содержащие квадратный корень из отрицательного числа. Подобная ситуация кажется не имеющей никакого физического смысла. Дело в том, что объекты с мнимой энергией, очевидно, не в состоянии обмениваться энергией с объектами, имеющими реальную энергию, и в силу этого не могут на них воздействовать. По этой причине подобные объекты нельзя обнаружить с помощью реальных приборов. Поэтому вполне можно сказать, что они не существуют. В рамках теории, разработанной Эйн-

штейном, в которой свойства объектов изменялись непрерывно, а рождение новых объектов не рассматривалось, по этой причине казалось вполне логичным допустить, что ни одна форма энергии, а тем самым, ни одна форма вещества не в состоянии перемещаться быстрее света.

Однако с развитием субъядерной физики точка зрения на природу значительно изменилась. Как мы теперь знаем, субъядерные частицы могут без труда рождаться и уничтожаться и в результате взаимодействия их энергия и другие свойства меняются скачками, а не непрерывным образом, типичным для классической физики. Тем самым, можно представить себе ситуацию, когда рождаются частицы, уже обладающие скоростью больше скорости света. Это позволило бы обойти необходимость ускорения их через «световой барьер», что должно сопровождаться бесконечным расходом энергии.

Далее можно потребовать, чтобы такие частицы всегда двигались со скоростями, превышающими c , что, очевидно, невозможно предположить для известных частиц. Если предположить выполнение этих условий, то без особого труда будет удовлетворить требованию, согласно которому данные частицы должны переносить вещественную энергию и импульс. Математически этого можно добиться, допустив, чтобы определенная константа, входящая в соотношение между энергией и скоростью, была бы чисто мнимой величиной, а не вещественной, как это имеет место для обычных частиц. Эту константу обычно называют массой покоя, поскольку для обычных тел, которые могут быть замедлены до состояния покоя, она действительно дает значение массы покоя этого тела.

Соотношение между энергией и скоростью, которое должно выполняться для любого объекта, подчиняющегося специальной теории относительности, имеет вид

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (а)$$

где E — энергия объекта, v — его скорость и c — скорость света. Величину m принято называть массой покоя объекта, и она связана с энергией покоя объекта E_0 формулой

$$E_0 = mc^2. \quad (б)$$

Для тела, движущегося со скоростью, превышающей скорость света, отношение v^2/c^2 больше единицы. Поэтому величина под знаком квадратного корня в формуле (а) оказывается отрицательной, а знаменатель величины, обозначенной в той же формуле через E , оказывается чисто мнимым числом (т. е. числом, содержащим квадратный корень из отрицательного числа). Чтобы в этом случае сделать величину E вещественной, следует выбрать в качестве m чисто мнимое число $m = i\sqrt{-1}$. Поскольку такой объект всегда перемещается со скоростью, превышающей скорость света, его энергия, которую можно представить формулой

$$E = \frac{ic^2}{\sqrt{v^2/c^2 - 1}} \quad (в)$$

будет вещественной, поскольку величина $(v^2/c^2 - 1)$ будет в этом случае положительной. Импульс p любого тела, подчиняющегося специальной теории относительности, можно выразить через его скорость формулой

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (г)$$

в которой m не зависит от v . Как это следует из комбинации этой формулы

с формулой (а), величина, представленная формулой

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4, \quad (д)$$

не зависит от v . Поэтому она будет одной и той же для всех наблюдателей. Величина m^2 (называемая квадратом массы покоя) в силу этого является постоянной для всякого объекта, даже для частиц, подобных фотонам (световым квантам) или тахионам, которые никогда не бывают покоящимися. Из этих соотношений можно также вывести формулу

$$\frac{v}{c} = \frac{pc}{E}, \quad (е)$$

из которой следует, что если отношение v/c меньше единицы (как это имеет место для обычных объектов), то pc/E меньше единицы, $E^2 - p^2c^2$ больше нуля и, тем самым, m^2 — положительная величина. С другой стороны, для объектов, которые движутся быстрее света, v/c больше единицы, $E^2 - p^2c^2$ меньше нуля и поэтому m^2 — отрицательная величина. В любом случае квадрат массы покоя для данного объекта имеет всегда неизменное значение и может быть вычислен, если известны из опыта энергия и импульс этого объекта.

Итак, для гипотетических частиц, движущихся быстрее света, которые в принципе нельзя перевести в состояние покоя, масса покоя не является непосредственно измеримой, и поэтому она не обязана быть вещественной. Однако квадрат массы покоя можно выразить через измеримые величины — энергию и импульс частицы, — и, тем самым, непосредственно измерить. Для обычных объектов квадрат массы покоя является положительным вещественным числом. Для сверхсветовых частиц он должен быть отрицательным числом; в действительности на этом обстоятельстве основаны все попытки обнаружить эти частицы. Следует также упомянуть, что существует еще и третий класс частиц, включающий фотоны (световые кванты) и нейтрино, для которых масса покоя равна нулю, так что они всегда движутся со скоростью c .

Поэтому вполне реальной кажется возможность существования объектов природы нового типа: они должны всегда двигаться быстрее света. Последнее утверждение инвариантно в том смысле, что если тело движется быстрее света относительно одного наблюдателя, оно должно двигаться быстрее света и относительно любого другого наблюдателя, движущегося относительно первого наблюдателя со скоростью, меньшей скорости света. Такие наблюдатели — единственные, о которых мы что-нибудь знаем. Следует подчеркнуть, что все рассуждения, приведенные здесь и ниже, совместимы со специальной теорией относительности и исходят из справедливости ее формул для движущихся частиц, даже если эти частицы движутся быстрее света.

В предвидении возможного открытия сверхсветовых частиц я назвал их «тахионами» от греческого слова «тахис», что означает «быстрый». Чтобы показать, как физики подходят к исследованию тахионов, я опишу ряд свойств, благодаря которым можно было бы отличить их от обычных частиц.

Одно такое свойство следует непосредственно из соотношения между энергией и скоростью в теории относительности. Мы видели, что для обычных частиц с увеличением скорости их энергия также возрастает. Для тахионов же наоборот: увеличение скорости приводит к убыванию энергии. Тем самым, тахион, который потерял энергию за счет взаимодействия с

обычной материей или за счет испускания света, должен увеличить свою скорость. В то же время тахион, получивший энергию от некоего источника, должен замедлиться и его скорость должна стремиться к c сверху, а не снизу. Таким образом, скорость света c играет роль предельной скорости и для тахионов, но для них — это нижний предел, тогда как для обычных тел она является верхним пределом их скорости.

В предельном случае тахиона, движущегося с бесконечной скоростью, его полная энергия должна равняться нулю, хотя его импульс остается конечным. Следует подчеркнуть, что для тахиона, движущегося с бесконечной скоростью, в нуль обращается именно полная энергия, а не просто кинетическая энергия. Для обычных частиц с ненулевой массой покоя полная энергия никогда не может обратиться в нуль.

Однако условие бесконечности скорости тахиона не инвариантно, а зависит от наблюдателя. Если тахион движется с бесконечной скоростью с точки зрения одного наблюдателя, то его скорость, измеренная другим наблюдателем, движущимся относительно первого, не должна быть бесконечной, а должна быть некой конечной величиной между c и бесконечностью. Это есть другая интерпретация открытия Эйнштейном того, что понятие одновременности событий в различных точках пространства имеет лишь относительный, а не абсолютный смысл.

Второе свойство тахионов, которое серьезно отличает их от обычных частиц, связано с зависимостью значений энергии и последовательности событий во времени от относительного движения наблюдателей. Для обычных частиц энергия — это число, которое изменяется при переходе от наблюдателя к наблюдателю, но остается всегда положительным. В то же время, если энергия тахиона положительна для одного наблюдателя, она может быть отрицательной для другого наблюдателя, движущегося относительно первого. Вследствие законов теории относительности для тахионов справедливо следующее утверждение: энергия тахиона всегда меньше произведения его импульса на скорость света c ; это замечание не имеет места для обычных частиц. Если тахионы отрицательной энергии испускаются невозбуждаемыми атомами обычной материи, то испускающие атомы должны быть нестабильными, и, тем самым, существование таких тахионов находится в противоречии с установленной на опыте стабильностью обычной материи.

Изменение знака энергии тахиона при переходе от наблюдателя к наблюдателю связано с другим странным свойством тахионов. Если один наблюдатель видит, что обычная частица была испущена (скажем, атомом A) в некоторый момент времени и поглощена где-то (атомом B) в последующий момент времени, то всякий другой наблюдатель, движущийся относительно первого, увидит этот процесс в той же хронологической последовательности — испускание атомом A предшествует во времени поглощению атомом B — хотя временной интервал и будет меняться от наблюдателя к наблюдателю. В то же время тахионы из-за того, что они движутся быстрее света, могут двигаться между точками в «пространстве — времени», хронологическая последовательность которых может меняться от наблюдателя к наблюдателю. Следовательно, если один из наблюдателей увидел тахион, испущенный атомом A в момент времени t_1 и поглощенный атомом B в последующий момент времени t_2 , то другой наблюдатель может найти, что момент времени t_1' , который соответствует t_1 , является более поздним, чем момент времени t_2 , который соответствует t_2' . Если это имеет место, то второй наблюдатель естественно должен интерпретировать эту цепочку событий следующим образом: тахион испускается атомом B

в более ранний момент t_2' и поглощается атомом A в более поздний момент t_1' (рис. 7.1).

Нетрудно видеть, что эта перестановка процессов излучения и поглощения также устраняет проблему интерпретации отрицательности энергии тахионов, поскольку для двух наблюдателей меняется знак энергии тогда и только тогда, когда происходит изменение порядка следования событий во времени. Поскольку испускание частицы с отрицательной энергией и поглощение частицы с положительной энергией, движущейся в

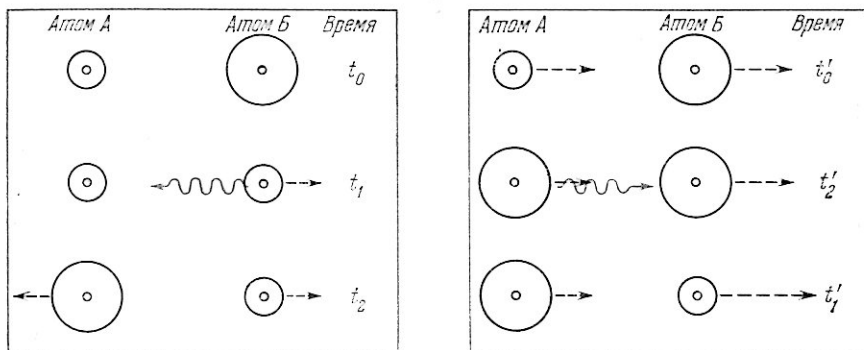


Рис. 7.1. Неожиданное свойство тахионов является следствием того факта, что хронологическая последовательность точек пространства — времени, между которыми должна двигаться «сверхсветовая частица», может меняться от наблюдателя к наблюдателю. Таким образом, процесс, который один наблюдатель воспринимает, как испускание тахиона одним атомом с последующим поглощением тахиона другим атомом, может иметь обратный хронологический порядок для другого наблюдателя, движущегося относительно первого. На приведенной здесь схеме данного явления первый наблюдатель (слева) видит, что в момент времени t_0 атом A покоится в основном состоянии, а атом B переходит в возбужденное состояние. В момент времени t_1 атом B испускает тахион (цветная стрелка), переходя в основное состояние и испытывая отдачу (пунктирная стрелка). В момент времени t_2 этот тахион поглощается атомом A , который переходит в возбужденное состояние и также испытывает отдачу. В этом случае хронологический порядок таков: t_0 , t_1 , t_2 . Для другого наблюдателя (справа), для которого испускание и поглощение поменялись ролями, тот же процесс выглядит следующим образом. Атом A теперь в момент времени t'_0 движется, но находится в основном состоянии. Он испускает тахион в момент времени t'_2 и переходит в возбужденное состояние, теряя при этом часть своей энергии. Атом B , который в момент времени t'_0 двигался и находился в возбужденном состоянии, поглощает тахион в момент времени t'_1 , переходя в основное состояние и приобретая энергию. Для этого наблюдателя последовательность событий во времени такова: t'_0 , t'_2 , t'_1 .

противоположном во времени направлении, оказывает одинаковое влияние на величину энергии системы, любой наблюдатель всегда может утверждать, что все тахионы обладают положительной энергией, а их испускание и поглощение имеют место в обычном хронологическом порядке. Этим устраняются проблемы нестабильности, возникающие в присутствии тахионов с отрицательной энергией. Такая интерпретация состояний тахиона с отрицательной энергией впервые была предложена в 1962 г. О. М. П. Билияном, Е. К. Г. Сударшаном и В. К. Д'Эспанья из Рочестерского университета.

Предложенное выше описание находится в согласии с принципами теории относительности, требующими, чтобы любой процесс, который может наблюдать один наблюдатель, должен также быть наблюдаемым процессом и для другого наблюдателя. Эти принципы, однако, не требуют, чтобы различные наблюдатели давали бы одинаковую интерпретацию любого индивидуального процесса. Поэтому в том факте, что один из наблюдателей видит как поглощение то явление, которое другой наблюдатель воспринимает как испускание, никакого противоречия с принципами теории относительности нет. Дело в том, что как поглощение, так и испускание может быть подтверждено любым наблюдателем при подходящих условиях. Неожиданной особенностью тахионов является то, что испускание и

поглощение должны взаимно превращаться друг в друга в случае изменения скорости наблюдателя. Это означает, что между этими двумя процессами в данном случае существует более тесная связь, чем для обычных частиц.

Это означает также, что число тахионов, находящихся в некоторой области пространства, должно меняться от наблюдателя к наблюдателю (рис. 7.2). Предположим, что один из наблюдателей видит процесс испускания тахиона атомом с последующим удалением тахиона на бесконечность. Другой наблюдатель может наблюдать тот же процесс так, как будто тахион прилетает из окружающего пространства и поглощается атомом. Поэтому между этими двумя наблюдателями будут разногласия относительно числа тахионов, присутствующих в системе в прошлом и в будущем. Такая ситуация опять-таки не похожа на ситуацию с обычными частицами, когда число частиц, имеющихся в произвольный момент времени,

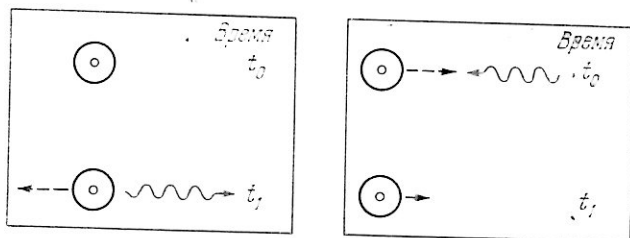


Рис. 7.2. Число тахионов в некоторой области пространства в заданный момент времени также должно меняться от наблюдателя к наблюдателю. Один из наблюдателей (слева) должен видеть испускание тахиона покоящимся атомом с последующей отдачей атома и удалением тахиона на бесконечность. Второй наблюдатель (справа) должен видеть тахион приходящим из окружающего пространства и поглощаемым затем движущимся атомом, что приводит к потере атомом кинетической энергии поступательного движения.

не зависит от наблюдателя. Детальная теория взаимодействия тахионов с обычной материей, которая пока еще не разработана, должна учитывать отмеченные особенности.

Убедившись в том, что существование частиц, движущихся быстрее света, не влечет за собой каких-либо противоречий с теорией относительности, следует, тем не менее, предоставить решение вопроса о реальном существовании таких объектов в природе физикам-экспериментаторам. При существующем уровне развития теоретической физики имеется немного аргументов, в силу которых теория категорически предсказывает существование каких-то новых объектов. Напротив, известные теории, вообще говоря, лишь представляют возможность для описания различных гипотетических объектов, и нам следует придумать эксперименты, в которых эти объекты можно было бы реально обнаружить. Например, имеющиеся теории не запрещают существования частиц с электрическим зарядом, равным половине заряда электрона, и с массой, равной шести электронным массам. Однако проведенные до сих пор эксперименты довольно убедительно свидетельствуют о том, что такие объекты в природе не встречаются. Мы не знаем, однако, почему это имеет место, и не сможем узнать об этом до тех пор, пока не будет создана более фундаментальная теория элементарных частиц, чем имеется сейчас.

В проблеме тахионов ситуация совершенно аналогична; окончательное решение вопроса об их существовании может принадлежать только экспериментаторам. Это не значит, однако, что они должны надеяться лишь на то, что им удастся наткнуться на тахионы где-то во Вселенной. Одной из особенностей всех теорий элементарных частиц, использующих

теорию относительности, является следующее обстоятельство. В них подразумевается, что если частицы определенного типа вообще существуют, то они могут быть рождены другими частицами, если последние обладают достаточной энергией. Для тахионов условие, связанное с достаточностью энергии, удовлетворить особенно легко: быстрые тахионы обладают очень низкой энергией. Поэтому нетрудно представить себе условия эксперимента, в котором тахионы, если они вообще существуют, могли бы порождаться другими частицами. Единственный неизвестный фактор, кроме самой гипотезы существования тахионов, — это вероятность, с какой они могли бы рождаться. Среди известных частиц вероятности рождения при столкновениях различаются по величине на много порядков. Пионы, например, рождаются довольно легко, тогда как нейтрино — очень трудно. В силу этих обстоятельств положительный результат эксперимента, конечно, подтвердит существование тахионов. Однако отрицательный результат может в лучшем случае установить лишь верхний предел вероятности, с которой тахионы могут быть рождены обычными частицами. Только установление того факта, что эта вероятность во всех изученных процессах оказывается намного меньше вероятности рождения любой другой частицы, могло бы привести к выводу, что тахионы, вероятно, вообще не существуют.

До сих пор были предприняты две попытки экспериментального рождения и обнаружения тахионов. Эти эксперименты были чувствительны к столь различным типам тахионов и в них были использованы столь разные методы обсуждения последних, что имеет смысл обсудить их по отдельности. Первый эксперимент, который был поставлен два года назад в Принстонском университете Торстеном Альвагером и Майклом Н. Крайслером, ставил перед собой целью поиск электрически заряженных тахионов. Как известно, около 35 лет назад было установлено, что электрически заряженные частицы могут рождаться парами при прохождении через вещество γ -квантов (фотонов) высокой энергии. Многие известные сейчас заряженные элементарные частицы были впервые воспроизведены именно таким путем. Отсюда следует, что если электрически заряженные тахионы существуют, то их в принципе можно породить с помощью фотонов. Как отмечалось выше, поскольку тахионы могут иметь нулевую полную энергию, пара заряженных тахионов может быть рождена фотоном любой энергии. В то же время пара обычных заряженных частиц может быть рождена только таким фотоном, который обладает энергией, более чем вдвое превышающей энергию покоя каждой из заряженных частиц.

Допустим теперь, что нам удалось породить заряженные тахионы. Возникает вопрос: как в этом случае можно было бы их обнаружить и отличить от других заряженных частиц, которые могут быть рождены тем же способом, например от электрон-позитронной пары? Самый подходящий способ обнаружения — это использование того факта, что заряженные тахионы должны непрерывно излучать фотоны даже при движении через пустое пространство. Это явление, названное излучением Черенкова по имени русского физика, впервые наблюдавшего его при движении электронов в 1934 г., имеет место тогда, когда заряженный объект движется через вещество со скоростью, превышающей скорость света в данном веществе. Таким образом, электрон, движущийся в стекле со скоростью большей чем $0,7c$, будет испускать излучение Черенкова, поскольку скорость света в стекле составляет около $0,7$ от ее значения в пустоте. Поскольку скорость тахиона больше скорости света в пустоте, следует ожидать, что тахион должен испускать черенковское излучение даже в вакууме.

Расчеты подтверждают это предположение: свет должен испускаться под характеристическим углом, зависящим только от скорости тахиона (рис. 7.3). Вычисления также показывают, что тахион с зарядом, равным заряду электрона, должен терять энергию за счет излучения Черенкова невероятно быстро. Даже если он рождается с очень высокой энергией, она уменьшается до величины менее 1 эв при прохождении всего 1 мм пути. Если такое произойдет, то излучение Черенкова не будет более представлять собой видимый свет, энергия фотонов которого превышает 2 эв . В этом случае это излучение содержит фотоны инфракрасного и более длинноволновых участков спектра, которые фиксировать гораздо труднее. Чтобы

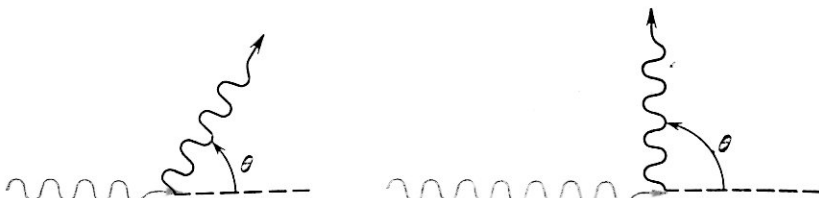


Рис. 7.3. Электрически заряженный тахион, движущийся в вакууме, должен непрерывно излучать черенковское излучение. Характеристический угол θ , под которым должны испускаться фотоны (черные стрелки), должен зависеть от скорости тахиона: чем быстрее движется тахион, тем больше угол θ . Обычные заряженные частицы, например электрон, испускают черенковское излучение только тогда, когда они движутся в некой среде со скоростью, превышающей скорость света в данной среде.

обойти эту трудность, экспериментаторы из Принстона использовали остроумную схему, которая позволяла каждому рожденному тахиону двигаться сквозь область, свободную от вещества, но содержащую электрическое поле. Электрическое поле передает энергию заряженным частицам, но в случае обычных частиц этот факт не приводит к излучению заметных количеств света. В то же время для тахиона, проходящего участок пути с включенным электрическим полем, за счет получаемой от него энергии достигается равновесие между этой энергией и энергией, теряемой на излучение. В силу этого он будет продолжать излучать фотоны примерно одинаковой равновесной энергии. Меняя значение напряженности поля, экспериментаторы могли выбрать эту равновесную энергию так, чтобы она соответствовала излучению фотонов видимого света. Это должно было позволить без труда наблюдать это излучение.

В своих экспериментах Альвагер и Крайслер использовали γ -кванты от радиоактивного цезиевого источника. Эти фотоны высокой энергии попадали в свинцовый экран, который препятствовал попаданию их непосредственно в детектор. За экраном находилась область высокого вакуума, содержавшая две параллельные пластины, между которыми создавалось электрическое поле (рис. 7.4). Пары заряженных тахионов могли порождаться фотонами при прохождении последних через свинец, и некоторые из них должны были проникнуть (поскольку при ускорении они теряют энергию) в область между пластинами. Для обнаружения фотонов, излучаемых тахионами, пересекающими эту область, использовался фотумножитель.

В проведенных экспериментах не было зарегистрировано излучение Черенкова и поэтому не были получены данные, свидетельствующие о рождении тахионов. Точнее говоря, было установлено, что вероятность рождения тахионных пар составляет менее одной десятичной от известной вероятности рождения электрон-позитронных пар фотонами несколько более высокой энергии. Соотношение между массой и энергией

таххионов делает в высшей степени маловероятным предположение, что эта вероятность может сильно зависеть либо от энергии фотона, либо от массы тахиона. Следовательно, если отбросить пока одно уточнение, которое обсуждается ниже, можно сказать, что тахионы с зарядом, близким по величине к заряду электрона, просто не существуют. Тахионы с зарядами, отличающимися от заряда электрона более чем в два раза в большую сторону или в десять раз в меньшую сторону, в данном случае, вероятно, вообще нельзя обнаружить. Конечно, незаряженные тахионы, не испускающие излучения Черенкова, вовсе не могли наблюдаться в этих экспериментах.

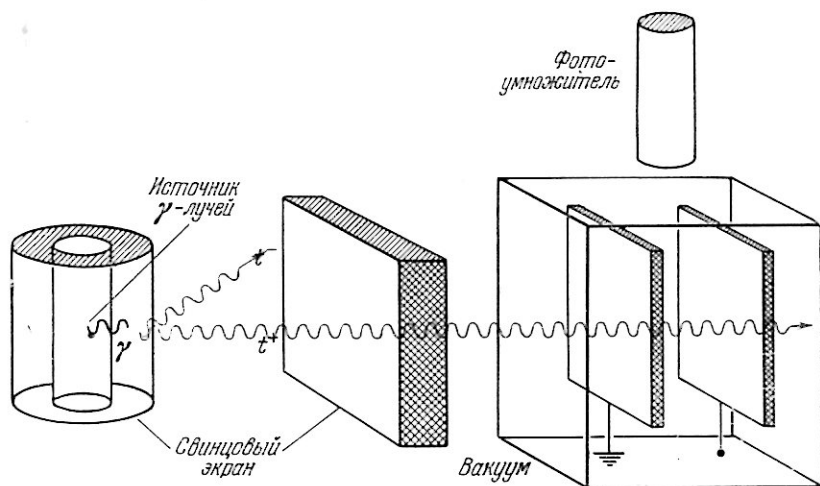


Рис. 7.4. Эксперимент, имеющий целью обнаружить заряженные тахионы по их излучению Черенкова, был выполнен около двух лет назад Торстенем Альвагером и Майклом Н. Крайслером в Принстонском университете. В качестве источника γ -квантов высокой энергии они использовали радиоактивный цезиевый препарат, который был помещен за свинцовым экраном. Такая мера позволила предотвратить попадание γ -квантов непосредственно в приемную аппаратуру. Пары заряженных тахионов могли бы порождаться фотонами источника при прохождении сквозь свинец, и некоторые из них проникли бы в область высокого вакуума, в которой были помещены две параллельные пластины с электрическим полем между ними. Электрическое поле используется здесь только для того, чтобы сообщить тахионам дополнительную энергию, которая могла бы компенсировать энергию, теряемую ими на излучение. Благодаря тому они должны были излучать все время фотоны видимого света. Для обнаружения фотонов, излученных тахионами при прохождении через эту область, был использован фотоумножитель. Никаких следов излучения Черенкова (и, тем самым, ничего, что могло бы свидетельствовать о рождении тахионов) в этих опытах обнаружено не было.

Уточнение, которое следует сделать в этих выводах, связано с тем, что тахионы, быть может, способны терять энергию за счет других процессов, помимо излучения Черенкова. Одна из таких возможностей — распад отдельного тахиона на несколько тахионов, каждый из которых обладает меньшей энергией. Если существуют и другие механизмы энергетических потерь, то интенсивность реально испущенного излучения Черенкова может быть меньше предполагаемой. Поэтому значение верхнего предела для вероятности рождения тахионов может оказаться слишком заниженным. По этой причине, а также потому, что мы, вообще говоря, находимся в неведении относительно возможных типов взаимодействия тахионов с обычным веществом, было бы желательно исследовать тахионы так, чтобы результаты исследования не зависели от того, какие взаимодействия испытывают тахионы после рождения.

Такой эксперимент был выполнен недавно группой сотрудников Колумбийского университета, в которую входили Чарльз Балтэй, Ральф Линскер, Ноэль К. Пех и я. Метод, который был нами использован, хорошо известен среди исследователей новых элементарных частиц. Это

так называемый метод отсутствующей массы. В этом методе в детектирующей аппаратуре (в данном случае — в пузырьковой камере) исследуется большое число реакций между элементарными частицами. Используемая аппаратура позволяет измерять импульсы и энергии заряженных частиц, участвующих в реакции. В некоторых типах реакций помимо наблюдаемых заряженных частиц рождается несколько нейтральных частиц. Эти нейтральные частицы обычно непосредственно не наблюдаются, и часто даже неизвестно, сколько рождено таких частиц. Однако, применяя законы сохранения энергии и импульса, можно предсказать, исходя из значений этих величин, измеренных для заряженных частиц, рождаются ли в реакции какие-либо нейтральные частицы, а также, каковы уносимые этими частицами импульсы и энергии. Последние величины, определяемые как разности между энергиями или импульсами частиц, наблюдаемых после реакции, принято называть отсутствующей энергией или отсутствующим импульсом. Если при анализе данного события вообще не оказалось отсутствующих энергии и импульса, то можно предположить, что никаких новых нейтральных частиц в нем не родилось.

Зная величины отсутствующих энергии и импульса в некотором конкретном событии, можно для этого случая вычислить «квадрат отсутствующей массы». Если была рождена всего одна нейтральная незарегистрированная частица, то квадрат отсутствующей массы был бы равен квадрату массы этой частицы. Таким способом было открыто несколько элементарных частиц, в частности, нейтральный η -мезон. Очевидное преимущество этого метода состоит в том, что о неизвестной частице заранее не делается никаких предположений, в частности, предположений о характере ее взаимодействий после рождения. Ее присутствие в реакции отмечается просто по отождествляемой с ней массе, значение которой устанавливается на основании измерений, сделанных на известных частицах.

Если в эксперименте рождается одна нейтральная частица определенного сорта, отсутствующая масса будет иметь одно и то же значение в каждом повторном событии. Если же рождаются две или более частиц, эта величина не будет иметь определенного значения, а будет меняться от события к событию и будет зависеть, помимо всего прочего, от углов между направлениями движения двух нейтральных частиц. Поэтому события, в которых рождаются несколько нейтральных частиц, вообще говоря, приведут к распределению квадрата отсутствующей массы по некоторому интервалу значений. Поскольку априори мы не в состоянии узнать, сколько нейтральных частиц будет порождено в данном событии, экспериментатору приходится комбинировать все возможные события, чтобы получить полное распределение квадрата отсутствующей массы (рис. 7.5). Рождение одной частицы обычно проявляет себя в виде пика, появляющегося в таком распределении при каком-то определенном значении отсутствующей массы. Если такого пика нет, то обычно это означает, что вероятность рождения одной нейтральной частицы мала по сравнению с вероятностью рождения нескольких нейтральных частиц.

При применении метода отсутствующей массы к исследованию нейтральных тахионов следует обратить внимание на то, что в случае рождения одного нейтрального тахиона квадрат отсутствующей массы будет отрицательным числом. Далее, в случае рождения двух или более нейтральных тахионов квадрат отсутствующей массы может быть либо положительным, либо отрицательным в зависимости от конфигурации последних. Если квадрат отсутствующей массы оказывается отрицательным при любых событиях, то среди рожденных нейтральных частиц должен быть по крайней мере один тахион. Иными словами, группа обычных частиц

не может иметь отрицательного квадрата отсутствующей массы. В силу этого при исследовании рождения нейтральных тахионов с помощью каких-то сталкивающихся частиц, необходимо начертить график квадрата отсутствующей массы для всех событий и поискать на нем события,

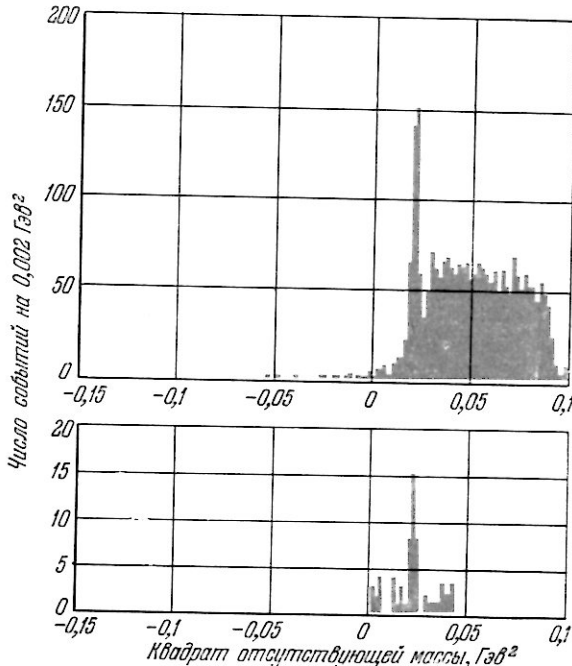


Рис. 7.5. Здесь приведены результаты анализа, проведенного автором и его коллегами из Колумбийского университета. Было рассмотрено около 6000 событий, имевших место в водородной пузырьковой камере и связанных с захватом отрицательных K -мезонов. Они представлены здесь в форме двух кривых, отвечающих полному распределению квадрата отсутствующей массы для всех событий в терминах эквивалентной энергии. Наиболее высокий пик в каждом случае соответствует рождению одиночного нейтрального пиона. Рождение одиночного нейтрального тахиона привело бы к появлению аналогичного пика с отрицательным значением квадрата отсутствующей массы. В то же время рождение двух нейтральных тахионов привело бы к широкому распределению квадрата отсутствующей массы по области положительных и отрицательных значений без каких-либо резких пиков. В первой серии опытов (верхний рисунок) было найдено несколько событий с отрицательным значением квадрата отсутствующей массы, которые можно было бы интерпретировать как рождение тахионов. В последующих сериях опытов (нижний рисунок), в которых были перепроверены предыдущие измерения, число событий с отрицательным квадратом отсутствующей массы существенно приблизилось к нулю. Это означает, что в действительности большинство из предполагаемых случаев рождения тахионов в первой серии экспериментов оказалось ошибочным.

которым отвечает отрицательный квадрат отсутствующей массы. Рождение одного тахиона должно привести к появлению в распределении квадрата отсутствующей массы пика с некоторым отрицательным значением. В то же время рождение двух нейтральных тахионов должно было бы привести к широкому распределению квадрата полной отсутствующей массы, имеющему как положительные, так и отрицательные значения без каких-либо резких пиков.

В наших экспериментах исследовались две реакции. В одной из них отрицательные K -мезоны тормозились до полной остановки и захватывались протонами в пузырьковой камере, наполненной водородом (рис. 7.6). При этом рождалась одна нейтральная частица, лямбда-гиперон, что обнаруживалось по ее распаду на две заряженные частицы.

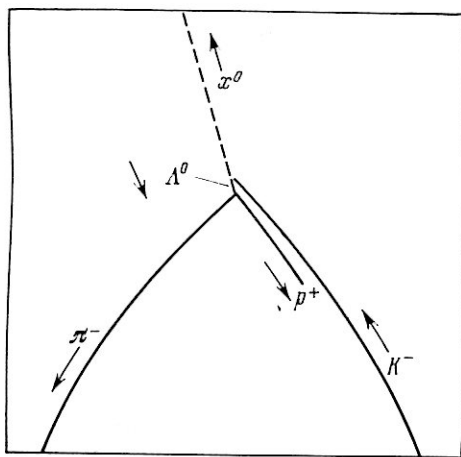


Рис. 7.6. Поиск тахионов, предпринятый автором и его коллегами по Колумбийскому университету, включал в себя скрупулезное изучение тысяч фотографий пузырьковой камеры, подобных фотографии, приведенной на рисунке. Это изучение могло бы косвенным образом подтвердить существование нейтральных тахионов среди продуктов некоторых взаимодействий субъядерных частиц. Фотографии, которые были первоначально получены в Брукхейвенской национальной лаборатории для других целей, анализировались методом «отсутствующей массы». В этом методе энергия и импульс оставленных ими в пузырьковой камере. Хотя нейтральные частицы непосредственно не наблюдаются, зная значение физических величин для заряженных частиц, можно сказать, были ли рождены в реакции нейтральные частицы, а также какова «отсутствующая масса» этих частиц. В данном случае отрицательный K-мезон (K^-) замедлился до состояния покоя и был захвачен протоном в водородной пузырьковой камере (см. диаграмму). Одна из заряженных частиц, лямбда-гиперон (Λ^0), была рождена и обнаружена по ее распаду на две заряженные частицы, отрицательный пион (π^-) и протон (p^+). С точки зрения законов сохранения энергии и импульса, в этой реакции должна рождаться еще одна нейтральная частица (π^0), но экспериментаторы смогли доказать, что эта частица скорее всего является нейтральным пионом (π^0), а не нейтральным тахионом (t^0).

(Импульс и энергию Λ -частицы можно было, тем самым, узнать по измеренным значениям этих величин для заряженных частиц.) Чтобы выполнялись законы сохранения энергии и импульса, вместе с Λ -частицей должны рождаться другие нейтральные частицы. Обычно ими бывают либо один нейтральный пион, либо иногда нейтральный пион и фотон. Все эти события были точно проанализированы для других целей, так что энергия и импульс для заряженных частиц уже были измерены. График квадрата отсутствующей массы был построен для шести тысяч событий, относящихся к захвату отрицательного K -мезона.

Следует подчеркнуть, что в этом случае отсутствующие энергия и импульс определялись как разности между суммами их начальных значений для K^- -мезона и протона и энергией и импульсом соответственно для родившейся Λ -частицы. Последние, как отмечалось выше, могут быть получены из анализа продуктов ее распада, хотя сама она и является нейтральной. В первой серии наших измерений было зафиксировано несколько событий с отрицательным значением квадрата отсутствующей массы, что можно было отождествить с рождением тахионов. Осторожность, однако, подсказывала нам, что следует провести различные контрольные опыты, прежде чем этот результат можно было бы считать твердо установленным.

Одна из проведенных проверок касалась вопроса о том, действительно ли K^- -мезоны покоились в момент захвата. Если бы это было не так, квадрат отсутствующей массы для данного события был бы рассчитан неправильно, поскольку в наших рассуждениях всегда предполагалось, что K^- -мезон в момент захвата находился в состоянии покоя. Если направление движения Λ -частицы было почти таким же, как соответствующее направление для K^- -мезона, захватываемого протоном на лету, то рассчитанный квадрат отсутствующей массы мог бы оказаться отрицательным, даже если он на самом деле был положительным. В соответствии с этим все события, в которых угол между направлениями движения K^- -мезона и Λ -частицы был меньше 60° , были исключены из рассмотрения.

Что же касается истинных случаев рождения тахионов, то в результате применения такой процедуры их число могло лишь уменьшиться за счет уменьшения отношения числа остающихся событий к их полному числу. Дело в том, что теперь из рассмотрения были исключены все сложные случаи с отрицательными квадратами отсутствующей массы, которые относились к захвату K^- -мезонов на лету. Когда это уточнение было сделано, число событий с отрицательными квадратами отсутствующей массы уменьшилось с первоначальной цифры 101 до 23. Это указывало на то, что большинство из предполагавшихся ранее случаев рождения тахионов в действительности были случаями захватов K^- -мезонов на лету, при которых рождались обычные частицы.

Остальные случаи были тщательно переизмерены, что позволило гарантировать высокую точность измерения квадрата отсутствующей массы. В каждом из этих случаев оказалось, что истинный квадрат отсутствующей массы в пределах точности измерений был положительным или равнялся нулю. В силу этого первоначально значительное число событий — кандидатов на рождение тахионов — после тщательного изучения уменьшилось до нуля. Можно было сравнить предел рождения тахионов (меньше единицы) с полным числом наблюдавшихся событий, большинство из которых имело квадрат отсутствующей массы, соответствующий нейтральному пиону. В результате мы пришли к выводу, что вероятность рож-

дения тахиона составляет менее одной четырехсотой вероятности рождения пиона, которое является типичным процессом с сильным взаимодействием. Конечно, вероятность рождения тахионов вполне может равняться и нулю.

Аналогичные исследования той же группы, выполненные на примере аннигиляции антипротонов с протонами, также не дали ни одного примера рождения тахионов и привели к столь же низкому пределу вероятности рождения их в этой реакции. В каждом из экспериментов одиночные тахионы могли бы родиться, только если квадрат их массы оказался бы в определенной области его значений. Поэтому данные эксперименты могут служить проверкой возможности рождения отдельных тахионов только для частиц со значениями квадрата массы в этой определенной области.

Однако есть некоторые основания утверждать, что рождение одиночных тахионов вообще запрещено, точно так же как запрещено рождение одиночных электронов без появления других сходных с ним частиц. Вместе с тем рождение двух тахионов или тахион-анти тахионной пары не является столь же запрещенным процессом. Подобные случаи рождения двух частиц могут происходить в любом эксперименте, независимо от того, чему равен квадрат массы отдельного тахиона. Поэтому из выполненных экспериментов в действительности следует довольно резкое ограничение на рождение одиночных тахионов любой массы, за исключением таких значений масс, которые столь близки к нулю, что их можно в пределах ошибок эксперимента считать положительными.

Таким образом, оба прямых экспериментальных исследования по обнаружению тахионов, проведенные до сих пор, дали отрицательные результаты. Косвенные соображения также имеют тенденцию к дальнейшему ограничению возможных взаимодействий тахионов. Согласно одному из этих соображений, если заряженные тахионы существуют, то фотон должен быть нестабильным и распадаться через некоторое время на пару заряженных тахионов.

Между тем, как известно, фотоны миллиарды лет путешествуют в межгалактическом пространстве и при этом не распадаются. Это означает, что если заряженные тахионы вообще существуют, то либо их заряд по величине на много порядков меньше заряда электрона, в силу чего они взаимодействуют с фотонами очень слабо, либо квадрат их массы очень близок к нулю, что делает задачу распознавания их среди обычных частиц очень трудной. Аналогичные выводы, исходя из косвенных аргументов, можно сделать относительно весьма слабых взаимодействий нейтральных тахионов.

Возможность того, что тахионы существуют, но совсем не взаимодействуют с обычными частицами, не должна нас интересовать. Если они не взаимодействуют с объектами, входящими в состав нашей измерительной аппаратуры, у нас не будет никакой возможности обнаружить их, и с нашей точки зрения это означает то же самое, как если бы они вообще не существовали.

Весьма правдоподобная интерпретация описанных выше результатов состоит в том, что тахионы вообще не могут рождаться при столкновениях обычных частиц. Тогда остаются две возможности. Одна маловероятная возможность связана с допущением, что тахионы взаимодействуют с обычными частицами и могут обмениваться с ними энергией, но не могут ими порождаться. Такая ситуация находилась бы в очень сильном противоречии со всем нашим пониманием релятивистской квантовой теории

фундаментальных частиц, так что она маловероятна, но не невозможна. Эту гипотезу можно было бы проверить, исследуя тахионы в естественных условиях, например, в космических лучах. Трудности в проведении таких исследований обусловлены тем, что тахионы быстро теряют энергию, и их становится трудно обнаружить. Вторая возможность состоит в том, что тахионы просто не существуют, и, тем самым, природа вообще не заполнила эту нишу, дозволенную теорией относительности. Если это так, а теперь это кажется наиболее вероятным, то мы не сможем разобраться, почему это так, пока не достигнем гораздо более глубокого уровня понимания природы элементарных частиц, чем это имеет место в настоящее время.

Фр. Райнес, Дж. П. Ф. Селшоп

НЕЙТРИНО, РОЖДЕННЫЕ В АТМОСФЕРЕ И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ

(ФЕВРАЛЬ 1966 г.)

В подземной лаборатории в Южной Африке впервые обнаружены «естественные» нейтрино, образующиеся в качестве побочных продуктов при взаимодействии космических лучей с веществом земной атмосферы.

В золотой шахте близ Йоганнесбурга, в Южной Африке, на глубине 3 км проводится эксперимент по исследованию высокоэнергетических нейтрино, образующихся при столкновениях космических лучей с веществом земной атмосферы. Необычные условия, в которых проводится этот эксперимент, весьма характерны для необычайной истории этой самой неуловимой из известных элементарных частиц. В течение 25 лет нейтрино существовало лишь в воображении физиков-теоретиков. В 1956 г. впервые было получено прямое экспериментальное доказательство существования нейтрино. Нейтрино были обнаружены в интенсивном потоке частиц, испускаемых ядерным реактором. Последняя глава в истории нейтрино открывается первой попыткой продемонстрировать существование нейтрино в природе. На сегодня наша подземная измерительная аппаратура зафиксировала 10 отдельных событий, виновниками которых, по-видимому, являются нейтрино, родившиеся в атмосфере. Мы представим здесь отчет о мотивах, которыми мы руководствовались, а также о некоторых предварительных результатах нашей работы. Мы выскажем также некоторые предположения относительно возможности обнаружения нейтрино, рожденных на Солнце, звездах и в самых отдаленных уголках межгалактического пространства *).

В 1931 г. Вольфганг Паули постулировал существование нейтрино, чтобы ликвидировать кажущееся противоречие между квантовомеханической моделью бета-распада ядер и наблюдаемым спектром продуктов распада. (Термин «бета-распад» используется физиками для описания спонтанного превращения нейтрона в нестабильном атомном ядре в протон и электрон. Он применяется также к превращению протона в нейтрон и позитрон, или положительный электрон.) Когда экспериментаторы измеряли полную энергию ядерной системы до и после бета-распада, они неизменно обнаруживали, что баланс энергии не сходится. Полная энергия продуктов реакции менялась от измерения к измерению. Более того, эта энергия оказывалась меньше, чем энергия первоначальной ядерной

*) См. также статью Дж. Бекала «Солнечные нейтрино», УФН 101, 739 (1970).
(Прим. ред.)

системы. Перед лицом неприятной альтернативы отказа от закона сохранения энергии Паули предложил менее радикальное решение. Именно, он постулировал существование ненаблюдаемой частицы, которая уносит «пропавшую» энергию.

Энрико Ферми начал свои исследования с того места, где остановился Паули, и через несколько лет опубликовал количественную теорию бета-распада, в которой он ввел понятие о «слабом взаимодействии». Тем самым, он увеличил число взаимодействий, или сил, которые физики считают фундаментальными, с двух (гравитационное и электромагнитное взаимодействия) до трех. Позднее было открыто четвертое взаимодействие — ядерное, или «сильное», — и теперь многие физики считают, что список полон. Интенсивности этих четырех взаимодействий относятся как 1 (гравитационное) к 10^{25} (слабое), к 10^{36} (электромагнитное) и к 10^{38} (сильное).

Теория Ферми была построена по аналогии с теорией электромагнетизма, согласно которой свечение атомов объясняется испусканием фотона при переходе электрона из возбужденного состояния в «основное». В бета-распаде переход ядра из возбужденного состояния сопровождается испусканием не фотона, а двух частиц — электрона и нейтрино. В результате этой реакции остается ядро, заряд которого изменился на единицу. Поскольку электрон уносит как раз одну единицу электрического заряда, нейтрино должно быть электрически нейтральным. Другие наблюдения процесса бета-распада указывали на то, что нейтрино имеет чрезвычайно малую (если не нулевую) массу. Несомненно, что давая этой гипотетической частице название «нейтрино» (что означает по-итальянски «маленький нейтрон»), Ферми имел в виду именно эти два свойства.

Одним из наиболее поразительных следствий теории слабых взаимодействий Ферми является необычайная проникающая способность, предсказываемая ею для нейтрино. Например, нейтрино с энергией в несколько миллионов электрон-вольт могло бы пройти в жидком водороде расстояние более чем в 100 световых лет, ни разу не вступив во взаимодействие с ядром водорода! Такое поведение нейтрино сразу же объясняет, почему их так трудно наблюдать. Одновременно отсюда ясно, что нейтрино является превосходным кандидатом на роль исследователя космоса. Однажды родившись, будь то в центре плотной звезды или в чрезвычайно разреженном межгалактическом газе, нейтрино беспрепятственно путешествует (если не считать его малого гравитационного взаимодействия со Вселенной в целом), сохраняя свою первоначальную энергию, направление движения и все квантовые характеристики — короче говоря, оно несет с собой детальный отчет о своем происхождении.

На первый взгляд кажется, что нейтрино невозможно обнаружить нигде, кроме точки его рождения. Долгое время считалось невозможным убедиться в существовании нейтрино независимым и логически удовлетворительным способом. Поэтому вплоть до 1956 г. среди физиков существовали законные основания для известного скептицизма по вопросу о реальном существовании нейтрино. В 1956 г. группа сотрудников Лос-Аламосской научной лаборатории под руководством одного из авторов настоящей статьи (Райнеса) и Клайда Л. Коузена младшего удалось обнаружить нейтрино, порожденные огромным ядерным реактором. Для обнаружения нейтрино была использована реакция обратного бета-распада. Вылетающие из реактора нейтрино направлялись в огромный бак с водой, где примерно одно из каждых 10^{20} нейтрино должно было вступить во взаимодействие с протоном воды, в результате чего образуются

нейтрон и позитрон. Факт наблюдения позитрона в непосредственной близости к нейтрону принимался за доказательство присутствия в баке летящих от реактора нейтрино.

Со временем стало очевидно, что к нейтрино приложимо и еще одно понятие физики элементарных частиц — понятие об античастицах. В настоящее время с бета-распадом связывают два типа нейтрино: нейтрино, рождающиеся в компании с электронами (произвольным образом названный антинейтрино) и нейтрино, рождающиеся в компании с позитронами (по-прежнему называемые нейтрино). Более того, оказалось полезным считать, что в некоторых распадах других элементарных частиц также появляются нейтрино. Так, пион, или π -мезон, спонтанно распадается на мюон, или μ -мезон, и нейтрино. Мюон в свою очередь распадается на электрон и еще два нейтрино.

Более удивительное свойство нейтрино было открыто несколько позже в 1956 г. Экспериментаторы из Национального бюро стандартов, действовавшие из оснований теоретического предположения, сделанного Т. Д. Ли и Ч. Н. Янгом, обнаружили, что нейтрино не сохраняет четности, т. е. зеркальное отображение нейтрино представляет собой не нейтрино, а антинейтрино. Впоследствии было показано, что нарушение закона сохранения четности характерно для всех слабых взаимодействий. В свете этого открытия можно было сделать вывод, что первые нейтрино, обнаруженные Лос-Аламосской группой, в действительности представляли собой антинейтрино.

На этой стадии все еще казалось вполне разумным допустить, что нейтральные частицы, связанные с распадом пионов, мюонов и других мезонов, идентичны частицам, образующимся в процессе ядерного бета-распада. Тождественность этих частиц была поставлена под вопрос японским физиком Шоичи Саката в 1943 г. и Коуэном и Райнесом сразу же после их эксперимента в 1956 г. Однако эксперименты по проверке этого утверждения были выполнены лишь в 1962 г. группой сотрудников Колумбийского университета и Брукхейвенской национальной лаборатории *). Эта группа, работавшая на Брукхейвенском ускорителе протонов высоких энергий, обнаружила, что в действительности нейтрино, образующиеся при распаде мезонов, не всегда идентичны нейтрино, образующимся при бета-распаде ядер. Более того, из этих экспериментов следовало, что при распаде некоторых мезонов образуются нейтрино нового типа, и необходимо различать «старомодные» нейтрино, рождающиеся в компании с электронами или позитронами (называемые электронными нейтрино), и нейтрино нового типа, рождающиеся в компании с положительными или отрицательными мюонами (получившие название «мюонные» нейтрино). По-видимому, единственное различие между электронными и мюонными нейтрино состоит в том, что они вызывают различные реакции. Во всех остальных отношениях они абсолютно идентичны.

Таким образом, за 35 лет наше понимание природы нейтрино продвинулось настолько, что теперь мы знаем четыре различных вида нейтрино (в скобках приведены принятые сокращенные символы): электронное нейтрино (ν_e), электронное антинейтрино ($\bar{\nu}_e$), мюонное нейтрино (ν_μ) и мюонное антинейтрино ($\bar{\nu}_\mu$). Исследования по физике нейтрино, начавшиеся с гипотетического решения некоторой специальной проблемы, превратились в настоящее время в одну из важнейших отраслей современной физики.

*) См. статью Л. Ледермана «Двухнейтринный эксперимент» в третьем выпуске этой серии. (Прим. ред.)

Таблица 8.1

Источник	Тип образующихся нейтрино	Интервал энергий	Поток нейтрино на квадратный сантиметр в секунду
Бета-распад в Земле	$\bar{\nu}_e$	Низкие	от 10^8 до 10^7
Соударения частиц космического излучения в атмосфере	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$	От низких до очень высоких	$3 \cdot 10^{-3}$
Ядерные реакции в звездах	ν_e	Низкие	от 10^7 до 10^{11}
Соударения частиц космического излучения в межгалактическом пространстве	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$	От низких до очень высоких	от 10^{-5} до 10^{-7}

Быстрое развитие физики нейтрино в последние годы стало возможным в значительной степени благодаря сооружению машин, способных создавать большое число нейтрино как высоких, так и низких энергий. Существуют два основных источника нейтрино. Это ядерные реакторы, генерирующие электронные антинейтрино низкой энергии (их энергия измеряется миллионами электрон-вольт), и гигантские ускорители заряженных частиц, генерирующие нейтрино всех четырех типов. Ускорители генерируют нейтрино высокой энергии (порядка миллиардов электрон-вольт). Не менее существенную роль в последних достижениях сыграло также развитие регистрирующей аппаратуры, в особенности сооружение больших сцинтилляционных счетчиков, искровых и пузырьковых камер. С помощью всех этих приборов физики продолжили исследования по физике нейтрино с целью еще глубже понять природу слабых взаимодействий.

В последнее время некоторые исследователи обратили внимание на то, что нейтрино можно использовать в качестве зонда для исследования космоса. В то же время эти ученые осознали, что исследование нейтрино, родившихся в естественных условиях, открывают новые богатые возможности, поскольку некоторые из этих нейтрино обладают энергиями, значительно большими, чем те, которые можно получить с помощью самых современных высокоэнергетических машин. Это послужило дополнительным стимулом для развития нейтринной астрономии, поскольку с ее помощью можно изучать свойства слабых взаимодействий при энергиях, недостижимых в настоящее время в лабораторных условиях.

Нейтрино, рождающиеся в природе без участия человека, возникают из нескольких источников. В табл. 8.1 указано, какие типы нейтрино порождают различные естественные источники, энергетический интервал этих нейтрино и их вклад в полный поток нейтрино, падающий на поверхность Земли. Наиболее очевидным источником является бета-распад элементов, из которых состоит Земля. Эти естественные нейтрино являются в действительности электронными антинейтрино и обладают очень малыми энергиями. В результате измерений, выполненных авторами, были получены первые экспериментальные оценки потока, порожденного

столкновениями частиц космического излучения в атмосфере. Величины двух других потоков, связанных с астрономическими событиями, представляют собой теоретические оценки. В настоящее время планируются эксперименты с целью измерения этих потоков. В этой статье мы будем иметь дело большей частью с нейтрино, возникающими из других природных источников. Для удобства эти нейтрино можно разбить по энергии на две большие группы: низкоэнергетические и высокоэнергетические нейтрино.

Низкоэнергетические нейтрино, т. е. нейтрино с энергиями от нуля до ~ 15 Мэв, возникают главным образом в результате термоядерных реакций, которые, как принято считать, являются источником энергии подавляющего большинства звезд. Часть низкоэнергетических нейтрино и, возможно, также некоторые нейтрино с несколько более высокими энергиями могли образоваться при ядерных реакциях, сопровождающих взрывы сверхновых звезд.

Высокоэнергетические нейтрино — с энергиями вплоть до десятков тысяч миллиардов электрон-вольт — возникают по крайней мере из двух источников. Механизм, с помощью которого нейтрино образуются в земной атмосфере в результате столкновений первичных космических лучей (состоящих главным образом из протонов) с атомами атмосферных газов, хорошо известен и, вероятно, является преобладающим. Существуют хорошие экспериментальные данные, указывающие на существование таких протонов с энергиями вплоть до 10^{20} электрон-вольт. Меньше известно о втором источнике нейтрино высоких энергий, но в некоторых отношениях эти нейтрино еще более интересны. Эти нейтрино образуются при столкновениях между протонами, входящими в состав космических лучей, и околозвездным веществом в межгалактическом пространстве. Кроме того, вполне вероятно, что нейтрино с различными энергиями могли образоваться в результате реакций, сопровождавших «начало» эволюции Вселенной, и что эти нейтрино до сих пор «скитаются» в пространстве и во времени.

Мы рассмотрим сначала высокоэнергетические нейтрино, которые рождаются в земной атмосфере, поскольку в наших реальных экспериментах мы пока что ограничивались исследованием именно этих нейтрино. Прилетевший извне космический протон сталкивается с атомом земной атмосферы. В результате его взаимодействия с ядром атома рождаются разнообразные элементарные частицы, в том числе пионы (рис. 8.1). Эти пионы впоследствии распадаются на лету на мюоны и мюонные нейтрино. Некоторые мюоны в свою очередь распадаются, в результате чего образуются добавочные нейтрино как электронного, так и мюонного типа. Было вычислено, что полный поток мюонных нейтрино, падающих на поверхность Земли из атмосферы в результате такого процесса, составляет примерно 30 нейтрино в секунду на квадратный метр для частиц с энергиями, превышающими 10 Гэв.

Программа исследований, осуществляющихся до сих пор нашей экспериментальной группой, состоящей из сотрудников Кейзовского технологического института в Кливленде и Университета Витватерсранда в Южной Африке, ограничивалась детектированием именно этих высокоэнергетических мюонных нейтрино. Причина этого станет ясна, если оценить проникающую способность различных частиц, возникающих в результате взаимодействия первичного космического излучения с земной атмосферой. Разумеется, нейтрино обладают несравненно большей проникающей способностью, чем все остальные частицы, и подавляющее большинство их беспрепятственно проходит сквозь Землю. Следовательно, нейтрино, образовавшиеся в любой точке земной атмосферы, могут

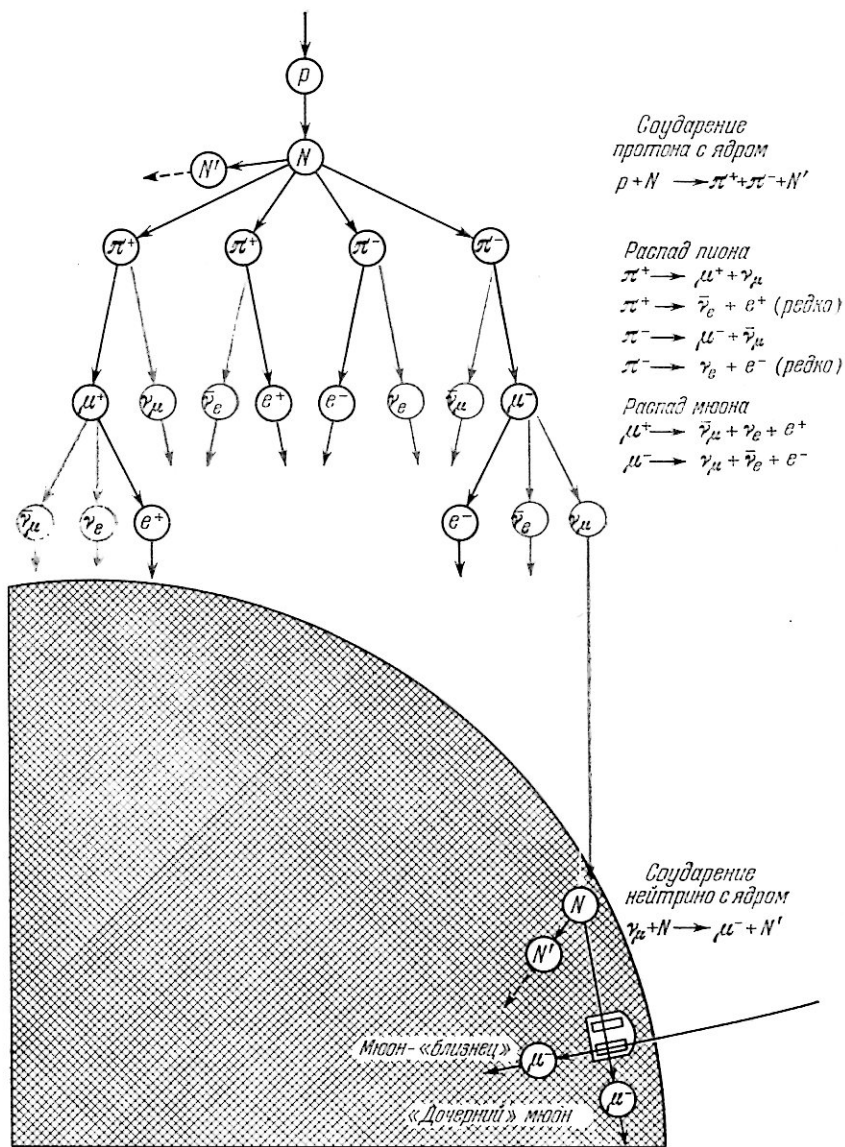


Рис. 8.1. Схематическое изображение механизма образования нейтрино в земной атмосфере. Частица первичного космического излучения, обычно протон, сталкивается с ядром атома атмосферного газа (вверху). В результате образуется ливень различных элементарных частиц, в том числе и пионов. Распадаясь на лету, пионы порождают мюоны и мюонные нейтрино. Некоторые из мюонов в свою очередь распадаются с образованием дополнительных нейтрино как мюонного, так и электронного типа. Целью экспериментальной программы, осуществляющейся до сих пор группой, в которой работают авторы, было обнаружение мюонных нейтрино по их «дочерним» мюонам, которые рождаются при взаимодействии этих нейтрино с тяжелыми ядрами земных пород. Дочерние мюоны можно отличить от мюонов-«близнецов», или космических мюонов, родившихся вместе с нейтрино в атмосфере, по их угловому распределению. Большая часть мюонов-близнецов, достигших детекторной камеры, движется по направлению местного зенита (справа вниз) и проходит только через один из двух параллельных рядов детекторов. Напротив, дочерние мюоны прилетают, грубо говоря, изотропно (т. е. одинаково по всем направлениям), и те из них, которые летят в горизонтальном направлении, проходят через оба ряда детекторов. Объяснение символов, использованных для обозначения различных частиц: p — протон (первичные космические лучи), N — ядро, N' — остаточное ядро, π^+ — положительный пион, π^- — отрицательный пион, μ^+ — положительный мюон, μ^- — отрицательный мюон, $\bar{\nu}_\mu$ — мюонное антинейтрино, ν_μ — мюонное антинейтрино, $\bar{\nu}_e$ — электронное антинейтрино, ν_e — электронное нейтрино.

достичь любой точки как на поверхности, так и внутри земного шара при условии, что они начали двигаться в пучном направлении.

Очень небольшая часть (что-нибудь около одной миллионной) этих нейтрино все же взаимодействует с веществом Земли и одним из продуктов этого взаимодействия в случае мюонного нейтрино является мюон. Поскольку мюоны обладают электрическим зарядом, их в принципе можно наблюдать с помощью самой обычной техники.

Трудности возникают, однако, если мы хотим отличить «дочерние» мюоны, образовавшиеся в результате взаимодействия нейтрино с веществом Земли, от мюонов-«близнецов», родившихся в атмосфере вместе с нейтрино. Нужно было найти какой-нибудь признак, позволяющий различить эти мюоны, которые во всех остальных отношениях абсолютно идентичны. Мы использовали для этой цели различие в их угловом распределении. Первичное космическое излучение совершенно изотропно (т. е. космические лучи приходят с одинаковой интенсивностью со всех сторон). Поэтому распределение мюонных нейтрино и дочерних мюонов также будет примерно изотропным как на поверхности Земли, так и внутри ее. С другой стороны, мюоны, будучи заряженными частицами, не могут свободно проходить через вещество. В действительности значительная часть мюонов-близнецов, родившихся вместе с нейтрино, взаимодействует с ядрами в атмосфере и даже не достигает поверхности Земли. В результате в распределении этих мюонов возникает пик в направлении местного зенита, поскольку мюоны, падающие на Землю под другими углами, должны пройти через большой объем атмосферы.

Из сказанного ясно, что угловые распределения дочерних мюонов и мюонов-близнецов должны быть различны. Можно было бы думать, что аналогичное различие будет наблюдаться также в угловом распределении «дочерних» электронов, родившихся в результате взаимодействия электронных нейтрино с веществом Земли, и электронов-«близнецов», родившихся в атмосфере вместе с электронными нейтрино. В действительности, однако, приведенные аргументы в данном случае неприменимы, поскольку масса мюона более чем в двести раз превышает массу электрона. Благодаря своему малому весу электроны очень легко отклоняются от первоначального направления, и их проникающая способность гораздо меньше, чем у мюонов. Регистрирующая аппаратура достаточно эффективно экранируется от электронов весьма умеренной толщиной Земли, так что в данном случае проблема фона не возникает.

Чтобы поставить реальный эксперимент по обнаружению атмосферных мюонных нейтрино по их дочерним мюонам, нужно знать еще один факт. Какова вероятность того, что мюонное нейтрино провзаимодействует с ядром, входящим в состав вещества Земли? Если бы эта вероятность была известна, то, зная поток нейтрино, падающий на поверхность Земли, мы могли бы предсказать, какое число мюонов должно образоваться в результате взаимодействий атмосферных нейтрино, скажем, в килограмме вещества за год. К сожалению, до сих пор нет ответа на вопрос о вероятности взаимодействия (или, как говорят физики, занимающиеся элементарными частицами, о «сечении») в интересующей нас области сверхвысоких энергий. Ни теория, ни экспериментальные данные, полученные с помощью ускорителей высоких энергий, не позволяют в настоящее время ответить на этот вопрос. Поэтому при планировании нашего эксперимента нам пришлось сделать некое правдоподобное предположение относительно вероятности взаимодействия. В действительности одной из наших главных целей было экспериментальное определение вероятности взаимодей-

ствия мюонных нейтрино. Знание этой вероятности позволило бы лучше понять природу слабых взаимодействий при очень высоких энергиях.

Из математического анализа приведенной выше схемы следовало, что для регистрации нескольких высокоэнергетических атмосферных нейтрино в год нужна детектирующая аппаратура с эффективной массой в несколько тысяч тонн. Большую часть массы детектора должно составлять вещество мишени. Этому условию можно удовлетворить с наименьшими затратами, если использовать в качестве объекта, с которым взаимодействует нейтрино, какое-нибудь широко распространенное вещество (например, горную породу), а для регистрации дочерних мюонов использовать детектирующее устройство с большой поверхностью (например, сцинтилляционный счетчик).

Первая и основная трудность, встречающаяся при осуществлении этой программы, состоит в том, что на уровне моря отсчеты детектора будут в пятьдесят миллиардов раз чаще вызываться родившимися в атмосфере мюонами-близнецами, чем дочерними мюонами, родившимися в результате взаимодействий нейтрино. Чтобы преодолеть эту трудность, естественно было воспользоваться приблизительной изотропией потока дочерних мюонов независимо от положения детектора. Нужно было либо придумать какое-либо устройство, позволяющее регистрировать только мюоны, летящие снизу вверх, т. е. прошедшие сквозь Землю (благодаря чему их можно отличить от нежелательных мюонов-близнецов), либо поместить детектор в глубине океана или в толще Земли (снизив тем самым фон, обусловленный мюонами-близнецами до приемлемого уровня).

В 1962 г. наша группа в Кейзовском институте пришла к выводу, что проще всего сделать подземную установку при условии, что удастся найти помещение подходящего размера, расположенное на достаточной глубине, и что можно будет сделать детектор, позволяющий отличать частицы, летящие главным образом в вертикальном направлении (т. е. мюоны-близнецы, образовавшиеся в результате столкновений космических лучей в атмосфере), от частиц, летящих по всем остальным направлениям (т. е. дочерних мюонов, образовавшихся в результате взаимодействия нейтрино с горными породами).

Все, что оставалось сделать — это найти подходящее помещение, построить, установить и ввести в действие оборудование. В поисках такого помещения мы перебрали всевозможные уголки земного шара, в результате было выбрано превосходное место — шахты близ Йоганнесбурга. Помещение для лаборатории было специально высечено в скале на глубине 3200 м от поверхности Земли. Лаборатория состоит из большого входного помещения, где расположено громоздкое электронное оборудование, и туннеля 150 м длиной и 2,5 м диаметром, в котором установлены детектирующие элементы (рис. 8.2). В конце туннеля находится золотоносная жила, которой обязана своим существованием шахта. В лаборатории работают помимо первоначальной Кейзовской группы присоединившиеся к ней исследователи из расположенного неподалеку университета Витватерсранда. Лаборатория получает поддержку от Комиссии по атомной энергии США.

До сих пор никто еще не наблюдал космические лучи на такой глубине. Поэтому, чтобы оценить фоновый мюонный поток на уровне нашей лаборатории, обусловленный космическими мюонами-близнецами, нужно было экстраполировать имеющиеся данные об интенсивности космических лучей на меньших глубинах. По весьма осторожной экстраполяции на детектор площадью 110 м² должно попадать примерно 150 мюонов-близнецов в год. При этом очень маловероятно, что более чем один из них бу-

дет прилетать под углом, превышающим угол в 45° с вертикалью. Таким образом, мы пришли к выводу, что наш эксперимент по обнаружению атмосферных нейтрино можно было бы осуществить на глубине 3 км, при условии, что детектирующая система будет иметь однородную угловую чувствительность.

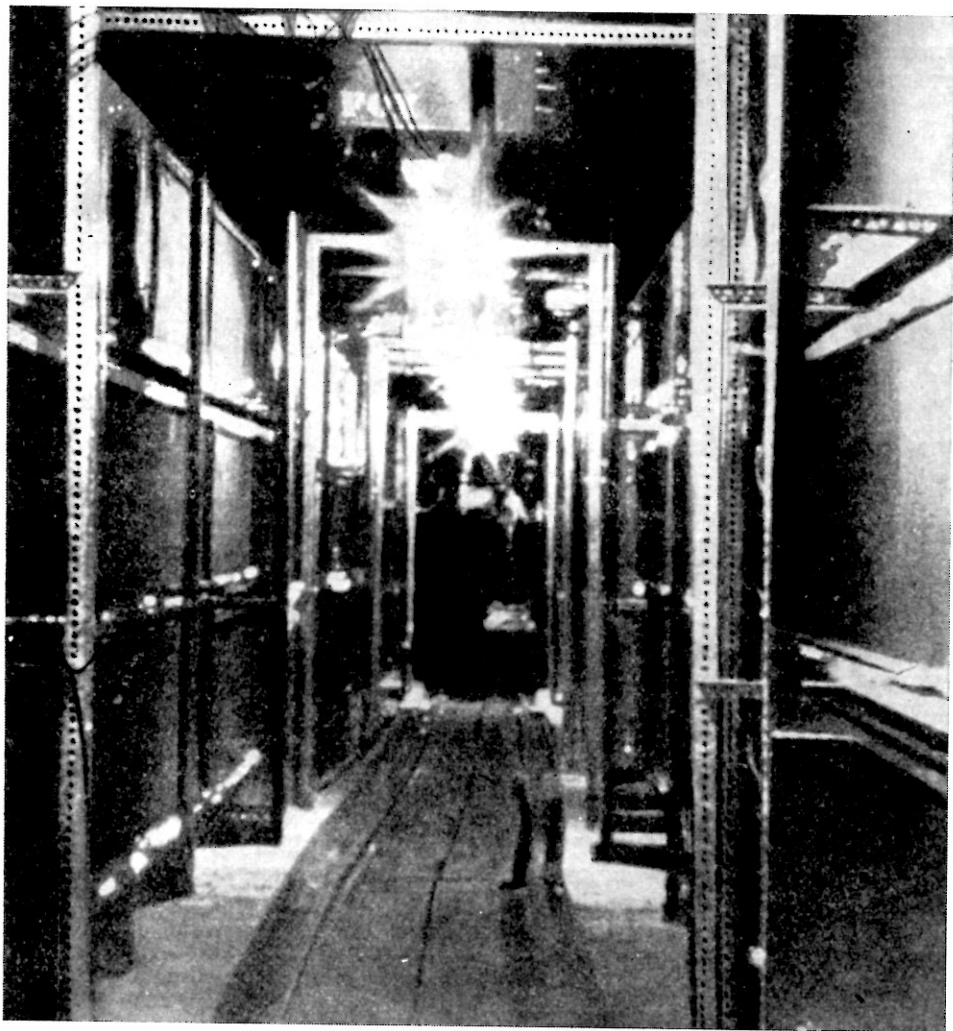


Рис. 8.2 Подземная лаборатория для обнаружения атмосферных нейтрино высокой энергии была вырублена в гранитной скале на глубине 3200 м в шахте близ Йоганнесбурга. В лаборатории работали физики из Кейзовского технологического института и из Университета Витватерсранда. Детектирующие элементы расположены в ряд на полках по обеим сторонам изображенного здесь столпятидесятиметрового туннеля. В конце туннеля находится золотоносная жила, которой шахта обязана своим существованием.

В своем окончательном виде детектирующая система, состоящая из 36 отдельных счетчиков, представляет собой нечто вроде довольно грубого телескопа, поскольку сигналы, возникающие в элементах детектора, позволяют проследить путь мюона. Каждый детектирующий элемент состоит из 5,5-метрового люцитового ящика, наполненного сцинтилли-

рующей жидкостью (чаще всего медицинским минеральным маслом), на каждом конце которого находятся по два фотоумножителя. Когда заряженная частица (в нашем случае мюон) проходит через жидкость, она теряет энергию. Часть этой энергии выделяется в виде слабой вспышки света. Благодаря оптическому процессу, известному под названием полного внутреннего отражения, этот свет оказывается запертым в ящике. Поэтому он без потерь передается к его концам, где расположены фотоумножители. В фотоумножителе световой импульс превращается в электрический, последний усиливается и передается по коаксиальному кабелю

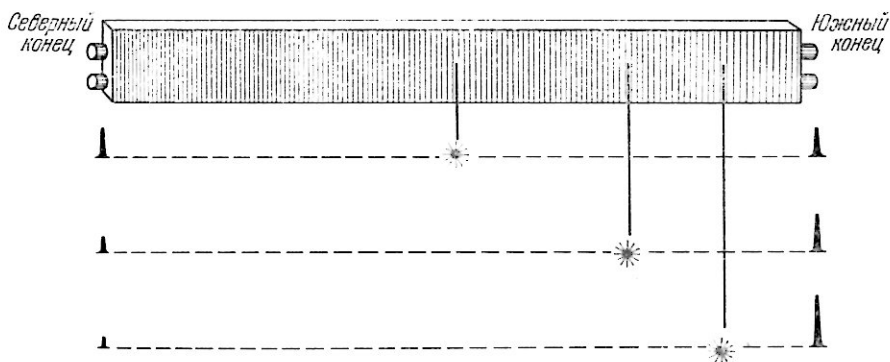


Рис. 8.3. На концах каждого детектирующего элемента расположены четыре фотоумножителя. Анализ возникающих в них электрических импульсов позволяет определить, в каком месте мюон проник в ящик, а также энергию, переданную мюоном содержащейся в ящике жидкости. На рисунке показаны синцилляции (цветные звездочки) для трех различных случаев прохождения мюона. Внизу изображены возникающие при этом на концах ящика импульсы. Именно это свойство позволяет использовать детекторную систему в качестве грубого телескопа.

в блок электроники для дальнейшего анализа. Анализ импульсов четырех фотоумножителей, которыми снабжен каждый детектирующий элемент, позволяет определить, в каком месте частица проникла в ящик и какую энергию она передала синциллирующей жидкости (рис. 8.3).

Расположение детектирующих элементов относительно скалы-мишени было специально выбрано таким образом, чтобы можно было различать мюоны,двигающиеся горизонтально, и мюоны,двигающиеся в вертикальном направлении. С этой целью детекторы были установлены двумя параллельными горизонтальными рядами, причем ящики широкими сторонами обращены наружу (рис. 8.4). Чтобы иметь возможность проводить измерения в трех различных угловых интервалах, были поставлены друг на друга по три детектора. Такое устройство благодаря своим размерам и геометрии представляет собой наиболее чувствительный из всех применявшихся до сих пор нейтринных детекторов.

В принципе вся схема довольно проста, однако на практике возникают осложнения, связанные с очень большими размерами установки. Оборудование детектора включает 8 км кабеля, 16 т синциллирующей жидкости, 144 фотоумножителя и несущую конструкцию 36 м длиной. Чтобы проиллюстрировать трудности, с которыми нам пришлось столкнуться при организации всей этой операции, достаточно сказать, что за последние два года члены нашей группы, путешествуя из США в Южную Африку и обратно, покрыли расстояние в 800 000 км.

27 октября 1964 г., 13 месяцев спустя после того, как Южная Африка была выбрана в качестве места для проведения эксперимента, наша аппаратура впервые зарегистрировала глубоко под Землей космический мюон.

23 февраля 1965 г. детекторы зарегистрировали мюон, который двигался в горизонтальном направлении, — это было первое наблюдение «естественного» нейтрино высокой энергии! С февраля прошлого года мы наблюдали с помощью нашей установки около 80 мюонов-близнецов и 10 дочерних мюонов. Таким образом, начинает накапливаться статистика, позволяющая дать первую экспериментальную оценку вероятности взаимодействия нейтрино высоких энергий.

Особенно тщательно мы искали индуцированный нейтрино-процесс специального типа, обнаружение которого могло бы быть очень важно для теории. Этот процесс должен был бы привести к одновременному

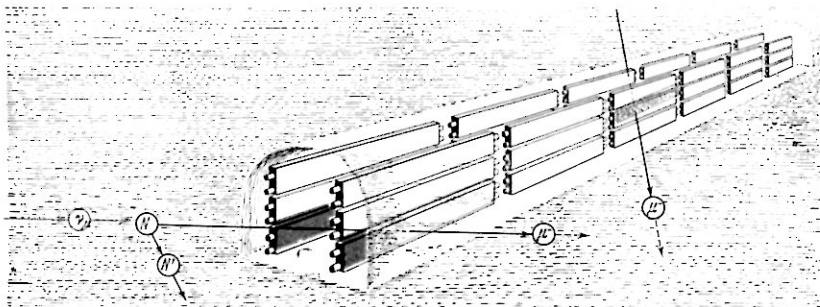


Рис. 8.4. Установка для детектирования нейтрино, используемая в настоящее время в Южноафриканской лаборатории авторов, состоит из 36 отдельных детектирующих элементов. Отдельным элементом называется сцинтилляционный счетчик, который представляет собой 5,5-метровый люцистовый ящик, наполненный сцинтиллирующей жидкостью — обычно медицинским минеральным маслом. На каждом конце ящика находятся по два фотоумножителя. Когда заряженная частица (в нашем случае мюон) пролетает через жидкость, она теряет энергию. Часть этой энергии выделяется в виде вспышки света (выделено цветом). Фотоумножители превращают этот свет в электрический импульс, который в дальнейшем анализируется. Чтобы отличать мюоны, двигающиеся горизонтально, от мюонов, двигающихся в вертикальном направлении, детекторы расположены двумя параллельными горизонтальными рядами. При этом ящики широкой стороной обращены друг к другу. Чтобы иметь возможность измерить три различных интервала углов, детекторы были поставлены друг на друга по три. На рисунке показан процесс детектирования двух мюонов. Дочерний мюон, образовавшийся в результате взаимодействия атмосферного мюонного нейтрино с окружающим скальным грунтом, влетает слева и проходит через два детектора — по одному в каждом ряду. Мюон, влетающий сверху и проходящий только через один детектор, — это мюон-близнец, образовавшийся при взаимодействии космических лучей с веществом атмосферы.

возникновению сигналов в двух ящиках, расположенных по обеим сторонам детектирующей системы. Интерпретация процесса такого рода заслуживает того, чтобы обсудить ее здесь более подробно.

Один из наиболее серьезных вопросов, стоящих сегодня перед теоретиками, изучающими слабые взаимодействия, — это вопрос о гипотетической частице, получившей название промежуточного векторного бозона. Существование этой частицы было постулировано теоретиками, чтобы объяснить слабые взаимодействия таким же механизмом, каким объяснялись другие фундаментальные силы. Например, характерная черта всех теоретических моделей ядерных сил состоит в том, что эти силы считаются обусловленными обменом взаимодействующих частиц третьей частицей-мезоном. Чтобы получить наглядную картину этого механизма, представьте себе двух конькобежцев перебрасывающихся мячом (рис. 8.5). Всякий раз, когда один из конькобежцев бросает мяч, он сам откатывается назад. Точно так же поймавший мяч откатывается назад. Таким образом, обмен мячом, очевидно, приводит к возникновению силы отталкивания между конькобежцами. Чтобы объяснить возникновение силы притяжения, Деннис Уилкинсон из Оксфордского университета предлагает другую аналогию. Если конькобежцы будут обмениваться не

мячом, а бумерангом, то возникающая сила окажется силой притяжения: в этом случае бросающий стоит спиной к принимающему, а принимающий ловит бумеранг, стоя спиной к бросающему (рис. 8.6).

Приведенная аналогия вполне уместна, так как притяжение между двумя частицами в атомном ядре можно объяснить с помощью обмена третьей частицей, которая притягивается к каждой из первых двух. Частица обмена, или мезон, как говорят, переносит взаимодействие. Эта же идея о «нелокальной» силе была применена теоретиками к слабым взаимодействиям. При этом гипотетическая промежуточная частица представляет собой бозон. До сих пор экспериментаторы тщетно искали этот

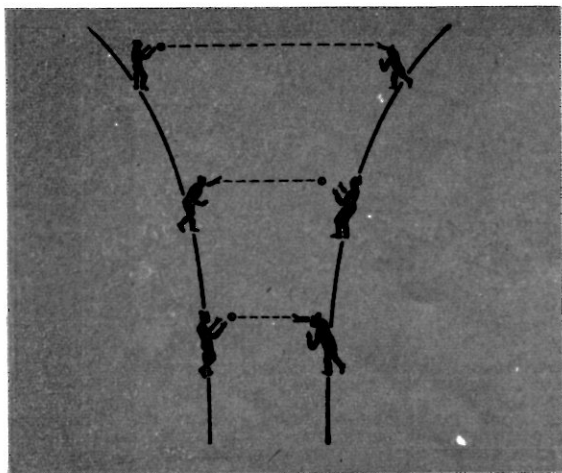


Рис. 8.5. Чтобы наглядно представить себе теоретическую модель, согласно которой сила, действующая между двумя частицами, возникает в результате обмена третьей, промежуточной, частицей, полезно рассмотреть аналогию с конькобежцами. Обмен мячом приводит, очевидно, к возникновению отталкивания между двумя конькобежцами. Всякий раз, когда один из конькобежцев бросает мяч, он испытывает отдачу. Когда в свою очередь второй конькобежец ловит мяч, он также испытывает отдачу.

параллельных мюонных трека, выходящих из общего источника и проходящих через два детектирующих элемента с обеих сторон детектирующей системы (рис. 8.7). Если бы можно было показать, что два наблюдаемых мюона родились достаточно глубоко в скале, то это было бы наиболее вероятное объяснение такого факта. К сожалению, хотя мы и наблюдали одно событие, которое можно было бы интерпретировать таким образом, невозможно было бы со сколько-нибудь разумной точностью определить местоположение общего источника треков, и эта интерпретация остается неоднозначной.

Кроме данного наблюдения в настоящее время остается лишь один экспериментальный факт, который может пролить свет на этот важный вопрос. Речь идет о событии, о котором сообщала группа индийских, японских и английских исследователей, работающих в шахте на золотых приисках Колара к западу от Бангалора в Индии. Эти ученые, работая на глубине 2300 м с детектором, несколько меньшим, чем наш, зарегистрировали событие, при котором явно возникают два почти параллельных трека. Однако, как отмечают сами авторы, их результаты можно интерпретировать и без привлечения гипотетического бозона. Указанные два трека могли быть оставлены порожденной нейтрино пион-мюонной па-

бозон с помощью ускорителей частиц высоких энергий. В результате их поисков был установлен нижний предел массы бозона. Если этот бозон существует, то он должен быть слишком тяжелым (более чем вдвое тяжелее протона), чтобы его можно было получить при энергиях, достижимых в настоящее время в лаборатории.

Напрашивается вопрос: обладают ли космические нейтрино энергией, достаточной для того, чтобы породить этот бозон? Если промежуточные бозоны существуют и если они образуются при взаимодействии нейтрино с веществом скалы, то они должны оставить свой «автограф» — два почти па-

рой. Возможно, что здесь наблюдался тот же эффект, который сбивал с толку исследователей, искавших бозон с помощью ускорителей высоких энергий.

Чтобы дать ответ на вопрос о существовании промежуточного бозона, мы усовершенствовали наше оборудование. С целью повысить чувствительность установки мы в настоящее время увеличиваем ее общую длину до 66 м. В дополнение к этому начаты работы по сооружению на этом же месте новой, несколько глубже расположенной лаборатории, в которой мы намереваемся разместить чувствительную систему искровых камер с целью получить более точную информацию о направлении потоков дочерних мюонов и мюонов-близнецов. Чувствительность системы искровых камер будет по крайней мере в четыре раза выше, чем у первоначальной системы сцинтилляторов *).

На современной стадии наших экспериментов у нас есть данные только об атмосферных природных нейтрино, хотя возможно, что среди наблюдавшихся нами частиц была небольшая примесь космических нейтрино. С увеличением размеров и углового разрешения детектирующей системы наши шансы найти этих неуловимых странников должны возрасти. Джек Кеффель из университета Юты занимается сейчас сооружением большого мюонного детектора, обладающего интересными возможностями в этом отношении. Некоторые из нас в Кейзовском институте обдумывают проект создания глубоко под Землей системы 100 000-тонных искровых камер. Современная горная технология может обеспечить помещение для такой установки на глубине 5000 м. Чтобы избавиться от фона атмосферных нейтрино, было бы еще лучше установить детектор на Луне. Такой колоссальный лунный детектор с необходимостью пришлось бы делать главным образом из материалов, найденных на Луне. К счастью, существуют и более доступные возможности.

Если бы мы, так сказать, опустили наши взоры из области высоких энергий в область с энергиями от шести до 15 *Мэв*, то благодаря чрезвычайно низкому фону космических частиц наша современная Южноафриканская лаборатория оказалась бы очень хорошо приспособленной для того, чтобы «просвечивать» Солнце с помощью испускаемых им нейтрино.

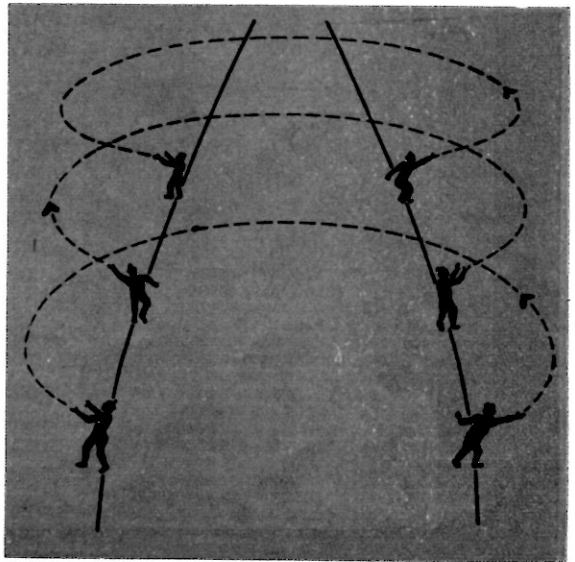


Рис. 8.6. Возникновение силы притяжения можно также представить посредством аналогии с конькобежцами, заменив мяч бумерангом. В этом случае бросающий обращен спиной к принимающему. В свою очередь конькобежец, который ловит бумеранг, обращен в этот момент спиной к бросившему. Такой процесс, очевидно, приводит к возникновению силы притяжения.

*) За прошедшие годы промежуточный бозон так и не был обнаружен, а нижний предел его массы все увеличивается и увеличивается. (Прим. ред.)

Согласно имеющимся теоретическим моделям Солнца одним из побочных явлений ядерных реакций, обеспечивающих Солнце энергией, является нестабильный изотоп бора (B^8), при бета-распаде которого образуются электронные нейтрино с энергиями вплоть до 14 Мэв. Как показывают вычисления, эти нейтрино должны падать на поверхность Земли с интенсивностью порядка 10 миллионов на квадратный сантиметр в секунду. Хотя бета-распад B^8 ответствен лишь за небольшую часть полной энергии, генерируемой Солнцем, этот процесс особенно привлекателен для будущих нейтринных астрономов, поскольку из всех источников солнечных нейтрино только этот источник обладает достаточной энергией, чтобы конкурировать с естественным фоновым потоком.

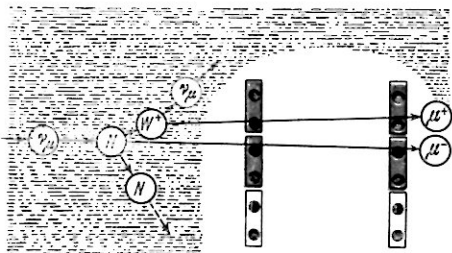


Рис. 8.7. В пользу существования промежуточного векторного бозона, гипотетической частицы, переносящей слабое взаимодействие, свидетельствовало бы наблюдение двух почти параллельных мюонных треков, выходящих из общего источника и пересекающихся по два детектора в каждом ряду. (Источником треков является при этом процессе взаимодействия атмосферного нейтрино с окружающим скальным грунтом.) До сих пор было зарегистрировано два события, которые можно интерпретировать как результат рождения такой мюонной пары. Одно из них было зарегистрировано группой, в которую входили авторы этой статьи, второе — группой экспериментаторов в Индии. Однако оба эти открытия вполне возможно интерпретировать и без привлечения промежуточного бозона. Бозон, распадающийся указанным на рисунке образом, обозначается символом W^+ .

как будет делать около пяти отсчетов в день, то это будет важным свидетельством в пользу того, что регистрируются нейтрино, летящие от Солнца. Другие детекторы, также работающие по принципу обратного бета-распада, но, в отличие от описанной установки, регистрирующие каждое событие в тот момент, когда оно происходит, а не с помощью радиохимических методов, конструируются сейчас в США членами Кейзовской группы *).

В другом подходе, который может дать прямые указания на присутствии на Солнце B^8 , используется процесс упругого рассеяния электронов солнечными нейтрино. Явление упругого рассеяния нейтрино на электронах было предсказано Ричардом П. Фейнманом и Мюрреем Гелл-Манном из Калифорнийского технологического института и Робертом Е. Маршаком и Е. К. Г. Сударшаном из Рочестерского университета. Хотя в общем-то все верят в существование такого процесса, до сих пор в лаборатории это рассеяние не наблюдалось. В этом процессе электронные солнечные нейтрино дают электронам мишени «толчок», который может быть измерен детектором. Зная величину этого толчка, можно вычислить энер-

*) Проведенные эксперименты не подтвердили общепринятую модель ядерных реакций на Солнце. Подробности см. в статье Дж. Бакала «Солнечные нейтрино», УФН 101, 739 (1970). (Прим. ред.)

гию нейтрино. Поскольку электроны мишени могут быть сдвинуты самое большее на 10 см, они должны быть расположены внутри самого детектора. Ожидаемое количество таких толчков, вызванных солнечными нейтрино малой энергии, оценивается приблизительно в 10 толчков в год на каждые 1000 галлонов сцинтиллирующей жидкости. Сейчас представляется вполне возможным сконструировать подходящий детектор для работы в этом энергетическом интервале. Пробная модель уже конструируется в нашей Южноафриканской лаборатории.

В настоящее время мы вплотную подошли к изучению солнечных нейтрино, и наблюдения, которые будут выполнены в ближайшие год или два, должны дать ответ на вопрос, правильна ли современная модель Солнца, или она нуждается в модификации. Трудно представить будущее нейтринной астрономии, но кажется вероятным, что исследования, которые начались 35 лет назад с остроумной выдумки, позволявшей объяснить бесследное исчезновение энергии, со временем позволят физикам не только исследовать фундаментальные силы природы на субатомном уровне, но и прольют свет на процессы, происходящие в центре Солнца, а может быть, и в более удаленных уголках Вселенной.

Дж. Шапиро

ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ МИШЕНИ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

(ИЮЛЬ 1966 г.)

Зависимость ядерных сил от спина взаимодействующих частиц исследуют, бомбардируя частицами высокой энергии кристалл, в котором все ядерные частицы вращаются в одном и том же направлении.

Уже почти сорок лет физикам известно, что многие элементарные частицы вещества находятся в состоянии непрерывного вращения, или, как говорят, обладают спином. Вскоре после открытия этого факта было обнаружено, что силы, связывающие атомное ядро в единое целое, существенно зависят от направления спинов, образующих ядро частиц (протонов и нейтронов). До последнего времени сведения о спиновой зависимости ядерных сил извлекались из косвенных измерений, так как при обычных экспериментальных условиях оси вращения ядерных частиц ориентированы случайным образом. При таких условиях измеряется усредненное по спинам ядерное взаимодействие, т. е. ядерные силы усредняются по всевозможным направлениям спинов частиц. За последние годы в целом ряде лабораторий во всем мире научились изготавливать образцы, состоящие из поляризованных частиц (т. е. частиц, вращающихся в одном и том же направлении). Использование таких поляризованных образцов в качестве мишеней для ускорителей частиц высоких энергий позволило непосредственно измерить, насколько сильно ядерные силы зависят от спина взаимодействующих частиц.

Когда мы говорим о вращении элементарной частицы (например, протона) и о вращении какого-либо большого тела (например, волчка), мы вкладываем в это слово не совсем одинаковый смысл. При вращении волчка все его части движутся по окружностям, центры которых расположены на его оси. На волчок можно нанести метки и наблюдать за их движением. С элементарными частицами дело обстоит не так просто. Было бы, например, чрезвычайно трудно сказать, как быстро вращается протон, или сколько он делает оборотов в секунду. Тем не менее, протон обладает одним свойством, общим для всех вращающихся объектов, — он обладает моментом количества движения. (Для большого вращающегося тела момент количества движения равен произведению массы тела на его скорость и на радиус вращения.) Считается, что, подобно энергии и импульсу, момент количества движения сохраняется. Его полное количество во Вселенной всегда остается неизменным. Любое изменение момента количества движения какого-либо объекта должно сопровождаться соответствующим противоположным изменением момента количества

движения какого-либо другого объекта. Изучение подобных процессов передачи — это единственный способ измерения момента количества движения элементарных частиц.

Протон обладает точно таким же моментом количества движения, как электрон, нейтрон и некоторые другие частицы. Эта фундаментальная единица спина равна постоянной Планка, деленной на 2π . По обычным масштабам это очень малая величина. Шарик диаметром в один миллиметр и весом в один миллиграмм, обладающий таким спином, поворачивался бы на угол, равный одной секунде, за 300 миллионов лет. Протон ни при каких условиях не может потерять этот крошечный момент количества движения. Спин является одним из его основных свойств, и если бы протон перестал вращаться, то он перестал бы быть протоном. Протон может, однако, изменить направление оси вращения. Поскольку момент количества движения является вектором, т. е. направленной величиной, его направление столь же важно, как и величина. Когда протон, вращающийся вокруг некоторой оси по часовой стрелке, меняет направление вращения на противоположное, он передает «внешнему миру» две фундаментальные единицы момента количества движения. Это максимальная величина спина, которую можно получить за счет внутреннего движения одного протона.

Из сказанного должно быть ясно, что если бы частица обладала спином, но по каким-либо причинам направление ее вращения невозможно было бы изменить, то не существовало бы никакого способа определить спин такой частицы, и было бы бессмысленно даже говорить о нем. Наличие у частицы внутреннего момента количества движения можно установить только путем наблюдения ее зависящего от спина взаимодействия с другими частицами. Джордж Уленбек и Самюэль Гаудсмит, которые первыми в 1925 г. ввели понятие о спине электрона, сделали свое открытие на основании изучения спиновой зависимости электромагнитного взаимодействия электрона. Наличие спина у протона было подтверждено изучением спиновой зависимости ядерных, а также электромагнитных сил.

Существует простая модель, объясняющая механизм возникновения зависящих от спина сил, действующих на электрон. Электрон обладает электрическим зарядом. Когда электрон вращается, его электрический заряд находится в состоянии непрерывного движения. Движущийся электрический заряд создает ток. Электрический ток порождает магнитное поле. Отсюда следует, что вращающаяся заряженная частица, например электрон, должна обладать электромагнитными свойствами, подобными свойствам крошечного постоянного магнита (рис. 9.1).

Как известно, сила такого магнита определяется величиной его магнитного дипольного момента. Удобная единица измерения магнитного дипольного момента называется магнетоном Бора. Величина магнитного момента электрона немного больше одного магнетона. Многие элементарные частицы обладают таким же моментом количества движения, как и электрон. Поэтому те из них, которые обладают большей массой, должны вращаться медленнее и, следовательно, создавать более слабый ток. Как правило, чем больше масса частицы, тем слабее ее магнитные свойства. Электрон, будучи легкой из всех заряженных частиц, обладает магнитным моментом, значительно большим, чем у остальных частиц.

Магнитное взаимодействие электронов может служить хорошим примером зависящих от спина сил. Частным случаем таких сил является так называемое «спин-спиновое» взаимодействие. Два электрона, находящиеся в непосредственной близости друг от друга, взаимодействуют за

счет магнитных сил примерно так же, как два постоянных магнита. Если эти электроны входят в состав двух нейтральных атомов, то магнитные силы могут доминировать во взаимодействии этих атомов. Спин-спиновые силы стремятся ориентировать оси вращения обоих атомов параллельно друг другу. Другой характерной особенностью этих сил является их способность вызывать движение под прямым углом к линии, соединяющей обе частицы. Спин-спиновые силы могут быть как притягивающими, так и отталкивающими. Часто они являются одновременно притягивающими и отталкивающими в зависимости от относительной ориентации участвующих во взаимодействии спинов.

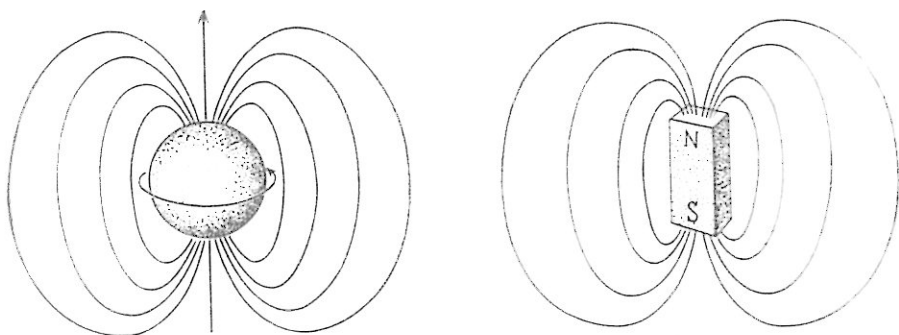


Рис. 9.1. Аналогия с постоянным магнитом помогает наглядно представить электромагнитные свойства вращающейся заряженной частицы. Момент количества движения частицы, являющийся вектором, т. е. направленной величиной, изображен большой стрелкой. Напряженность поля, создаваемого частицей, определяется величиной ее магнитного дипольного момента.

Другой тип зависящих от спина сил называется спин-орбитальным, или зависящим от скорости, взаимодействием. Механизм этого взаимодействия можно проиллюстрировать на примере столкновения электрона с ядром, обладающим очень небольшим или вообще нулевым магнитным моментом (рис. 9.2). С точки зрения электрона ядро движется. Движение заряженной частицы порождает магнитное поле, силовые линии которого представляют собой концентрические окружности с центрами, расположенными на линии движения частицы. Разумеется, величина магнитного поля, действующего на электрон, тем больше, чем ближе он подходит к ядру.

Рассмотрим сначала электрон, пролетающий рядом с ядром с левой стороны. Допустим, что он вращается вокруг вертикальной оси, так что его магнитный дипольный момент направлен вверх. Тогда магнитное поле будет стремиться изменить направление его магнитного момента подобно тому, как магнитное поле Земли меняет направление стрелки компаса. Наиболее выгодной является ориентация, при которой магнитный момент направлен параллельно магнитному полю (и в ту же сторону). Момент рассматриваемого нами электрона имеет противоположную ориентацию, как говорят, он антипараллелен магнитному полю. Электрон может «приспособиться» к магнитному полю, либо изменив направление вращения, либо улетев подальше от ядра туда, где магнитное поле слабее, другими словами, дальше налево.

Рассмотрим теперь другой электрон, магнитный момент которого также направлен вверх, но пролетающий справа от ядра. Направление его магнитного момента параллельно направлению магнитного поля. В результате этого электрон стремится пройти как можно ближе к ядру, где поле сильнее. Очевидно, что электрон, магнитный момент которого

направлен вверх, будет отклоняться магнитным полем влево независимо от того, с какой стороны ядра он пролетает.

Повторяя приведенные выше аргументы, можно показать, что электроны, магнитные моменты которых направлены вниз, будут за счет магнитного взаимодействия отклоняться вправо. В данном случае, однако, гораздо проще воспользоваться соображениями симметрии (см. рис. 9.2). Очевидно, что то же самое магнитное взаимодействие должно отклонять электроны со спинами, направленными вниз, вправо.

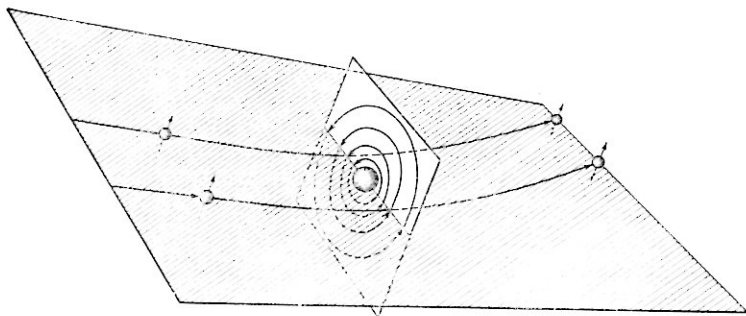


Рис. 9.2. Механизм возникновения зависящих от спина электромагнитных сил (в данном случае «спин-орбитальных», или зависящих от скорости, сил) можно проиллюстрировать на примере столкновения движущегося электрона с электрически заряженным ядром. С точки зрения электрона ядро движется и, следовательно, создает магнитное поле, силовые линии которого представляют собой окружности с центрами, расположенными на воображаемой линии движения ядра. Чем ближе к ядру, тем сильнее поле. Когда электрон пролетает слева от ядра, его магнитный дипольный момент (направленный вверх) антипараллелен, т. е. направлен противоположно магнитному полю. Это приводит к тому, что электрон стремится удалиться от ядра туда, где магнитное поле слабее. Когда электрон пролетает справа от ядра, его магнитный момент (по-прежнему направленный вверх) параллелен, т. е. направлен также как поле. В результате электрон стремится пролететь ближе к ядру, где поле сильнее. Таким образом электрон с магнитным моментом, направленным вверх («электрон со спином вверх»), будет отклоняться магнитным полем влево, независимо от того, с какой стороны от ядра он пролетает. Перевернув рисунок «вверх ногами», легко убедиться, что те же самые силы будут отклонять «электрон со спином вниз» направо.

Мы описали здесь процесс рассеяния, обусловленный спин-орбитальным взаимодействием. Стоит запомнить две его характерные особенности. Во-первых, если падающий пучок поляризован, т. е. если число электронов со спинами, направленными вниз, превышает число электронов со спинами, направленными вверх, или наоборот, то будет наблюдаться асимметрия в распределении рассеянных частиц: больше частиц будет отклоняться вправо (или наоборот влево). Вторая особенность состоит в том, что даже при равном числе падающих частиц со спинами, направленными вверх и вниз, рассеянный пучок может оказаться частично поляризованным. Пучок, рассеянный налево, может содержать больше частиц со спинами, направленными вверх, в то время как пучок, рассеянный направо, может обладать противоположной поляризацией.

Модель, которую я использовал здесь для описания зависящего от спина рассеяния электронов магнитным полем, была довольно грубой. При корректном рассмотрении этого процесса необходимо пользоваться квантовой механикой. Этот вопрос был впервые рассмотрен английским физиком-теоретиком Н. Ф. Моттом в 1929 г., и описанный процесс известен с тех пор под названием моттовского рассеяния. На этом мы закончим обсуждение магнитных свойств электрона.

Уже с 1930 г. стали накапливаться косвенные указания на то, что силы, действующие между ядерными частицами, также зависят от спина, причем эта зависимость слишком сильна, чтобы ее можно было объяснить

электромагнитными эффектами. Эти указания были получены из четырех основных источников.

Во-первых, измеренный в 1932 г. магнитный момент протона оказался равным не $1/1836$ магнитного момента электрона, как это можно было бы ожидать на основании их отношения масс, а $1/658$ магнетона Бора, т. е. почти в три раза больше. Это расхождение можно объяснить различием во внутренней структуре протона и электрона, различием, которое должно возникать из-за ядерной природы протона. Однако до сих пор не существует теории, которая могла бы количественно объяснить магнитный момент протона, хотя магнитные моменты неядерных частиц, таких как электрон и мюон, можно вычислить с точностью до пятого или шестого десятичного знака.

Во-вторых, нейтрон, который не имеет электрического заряда, обладает магнитным моментом, сравнимым по величине с моментом протона. Этот удивительный факт можно объяснить в общих чертах, если представить себе, что внутри нейтрона распределен электрический заряд таким образом, что отрицательные заряды вращаются на большем расстоянии от центра, чем положительные, в то время как полный заряд остается равным нулю. В этом случае также не существует достаточно детальной теории, которая удовлетворительно объясняла бы магнитный момент нейтрона.

В-третьих, простейшее атомное ядро, дейтрон, представляющий собой связанное состояние нейтрона и протона, существует только в одном состоянии — когда спины нейтрона и протона направлены параллельно друг другу. Не существует связанного состояния этих частиц с антипараллельными спинами. Это наводит на мысль о существовании спин-спинового взаимодействия значительно более сильного, чем обычные магнитные силы.

В-четвертых, в оболочечной модели ядра, предложенной в конце сороковых годов Марией Гепперт-Майер из Чикагского университета и Дж. Х. Д. Йенсенем из Гейдельбергского университета, для объяснения правильного расположения оболочек необходимо предположить существование сильного спин-орбитального взаимодействия. И опять-таки сила предполагаемого взаимодействия исключает возможность его объяснения чисто магнитными эффектами.

В начале пятидесятых годов в Рочестерском университете и в Лоуренсовской радиационной лаборатории Калифорнийского университета в Беркли была выполнена серия экспериментов, продемонстрировавших существование сильного спин-орбитального взаимодействия протонов с различными ядрами. Вскоре об аналогичных результатах сообщили исследователи из Гарвардского университета и из Британского атомного центра в Харуэлле. Типичный эксперимент такого рода состоит в следующем. Из ускорителя выводится пучок протонов с кинетической энергией около 300 Мэв (рис. 9.3). Этот пучок ударяется о мишень, сделанную из какого-либо вещества, подобного графиту. (Графит был выбран, в частности, по той причине, что ядра атомов углерода не обладают спином.) В результате столкновения часть протонов рассеивается ядрами мишени. Особое внимание было обращено на протоны, рассеянные на некоторый произвольно выбранный угол, обозначаемый в дальнейшем через ϕ . Чтобы убедиться в том, что оба пучка содержат одинаковое число частиц, на пути L - и R -пучков расположены детекторы частиц. Равенство числа частиц в их пучках означает, что либо выведенный из ускорителя пучок не поляризован, либо в процессе рассеяния не играют роли завися-

щие от спина силы. Сейчас я объясню, почему вторую из гипотезу нужно отбросить.

L -пучок пропускают на экспериментальной площадке через целый ряд различных приборов. На своем многометровом пути он проходит через щели, фокусирующие устройства, управляющие магниты и другую аппаратуру (не показанную на рисунке). После этого он попадает на вторую рассеивающую мишень, идентичную первой. Снова наблюдают протоны, рассеянные влево (L') и вправо (R') на тот же самый угол φ . На этот раз, однако, наблюдается явная асимметрия. Число протонов в L' -пучке значительно превышает число протонов в R' -пучке. В качестве проверки R -пучок направляют на другую идентичную мишень, и снова наблюдается асимметрия вторично рассеянных пучков. На этот раз число частиц в R'' -пучке превышает число частиц в L'' -пучке.

Из анализа этого эксперимента следует очередной логический вывод. Вторичное расстояние L - и R -пучков идентично первичному в той мере, в какой этого вообще можно достичь: используется такая же мишень, пучки обладают той же энергией, рассматривается рассеяние на такой же угол. Следовательно, в результате первичного рассеяния что-то случилось с протонами, что заставило их при вторичном рассеянии вести себя по-другому. Более того, протоны несут с собой информацию о первичном рассеянии. Каким-то образом они во время вторичного рассеяния «вспоминают», были ли они рассеяны в первый раз налево или направо. Те несколько метров, которые протоны пролетают между двумя процессами рассеяния, представляют по ядерным масштабам колоссальное расстояние. Принимая во внимание короткодействующий характер ядерных сил, невозможно представить себе, что протоны во время второго рассеяния все еще ощущают влияние первой мишени. Очевидно, направление первичного рассеяния зафиксировано с помощью какой-то внутренней координаты протона. Единственная известная нам внутренняя координата протона — это направление его спиновой оси. Следовательно, в процессе первичного рассеяния протонный пучок должен стать поляризованным. Асимметрия, проявляемая им при вторичном рассеянии, недвусмысленно указывает на то, что в ядерном рассеянии играют роль спин-орбитальные силы.

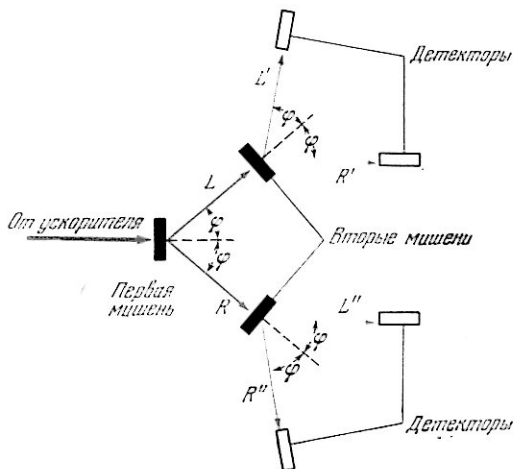


Рис. 9.3. Здесь изображен типичный эксперимент по двойному рассеянию. Большое число таких экспериментов было выполнено в течение последнего десятилетия с целью изучения спиновой зависимости ядерных сил. Пучок протонов из ускорителя направляют на мишень. При этом в результате столкновений с ядрами мишени часть протонов рассеивается. Протоны, рассеянные на некоторый произвольно выбранный угол φ влево, мы будем называть L -пучком, протоны, рассеянные на тот же самый угол вправо — R -пучком. На этом этапе оба пучка содержат одинаковое число частиц. Затем, пройдя путь длиной во много метров через экспериментальную площадку, L - и R -пучки попадают на вторые рассеивающие мишени, по своим свойствам идентичные первым. Снова наблюдаются протоны, рассеянные на тот же самый угол φ вправо и влево. Однако на этот раз число протонов в L' -пучке существенно превышает число протонов в R' -пучке, в то время как число протонов в R'' -пучке превышает число протонов в L'' -пучке. Асимметрия, наблюдаемая при вторичном рассеянии, убедительно свидетельствует о том, что в первичном рассеянии существенную роль играют спин-орбитальные силы.

Только что описанный эксперимент по двойному рассеянию является типичным для той серии экспериментов, которые были выполнены за последние десять лет с целью исследования спиновой зависимости ядерных сил. Дальнейшим усовершенствованием экспериментов такого типа являются эксперименты по тройному рассеянию. В этом случае тройное рассеяние служит для получения пучка поляризованных частиц. Вторичное рассеяние представляет собой ядерную реакцию, зависимость которой от спина подлежит измерению. Третий процесс рассеяния служит для анализа поляризации частиц после реакции. С экспериментами по тройному рассеянию связаны также измерения «корреляции спинов». При этих измерениях изучаемая реакция осуществляется путем соударения неполяризованного пучка с неполяризованной мишенью. Затем поляризация рассеянных частиц и ядер отдачи мишени анализируется с помощью двух одновременных процессов вторичного рассеяния.

В настоящее время удалось добиться частичного успеха в теоретическом анализе рассеяния протонов протонами и протонов нейтронами. Для этого необходимо принять во внимание спиновую зависимость этих реакций. Все экспериментальные данные, относящиеся к этим реакциям при энергиях до 400 Мэв, удастся объяснить в том и только в том случае, если допустить, что между двумя рассматриваемыми частицами существует сильное спин-орбитальное взаимодействие. Когда частицы находятся достаточно далеко друг от друга, главный вклад в это взаимодействие вносит процесс обмена одной «промежуточной» частицей — мезоном.

Это лишь частичный успех, поскольку такая теория является «феноменологической». Мы предполагаем вид взаимодействия, а затем подгоняем несколько «свободных» параметров, чтобы получить наилучшее согласие с экспериментом. При этом удастся извлечь очень мало информации о том, чего следует ожидать в других реакциях или в той же самой реакции при более высоких энергиях. В полной теории все эти результаты должны следовать непосредственно из основных принципов. До сих пор никому еще не удалось построить полную теорию ядерного рассеяния. На практике продолжают пользоваться феноменологической теорией, поскольку ничего лучшего пока не существует. Эта теория позволяет с помощью небольшого числа предположений объяснить целый ряд экспериментальных данных, что само по себе весьма нетривиально.

Хотя эксперименты по двойному и тройному рассеянию дают чрезвычайно ценную информацию, они сталкиваются с рядом довольно серьезных трудностей. Экспериментатору приходится иметь дело с очень малым количеством отсчетов регистрирующей аппаратуры, поскольку лишь небольшая часть частиц рассеивается каждой мишенью на нужный угол. Кроме того, ожидаемые эффекты очень малы, не только потому, что зависящие от спина силы иногда составляют лишь незначительную часть всего взаимодействия, обуславливающего процесс рассеяния, но и потому, что в результате первичного рассеяния пучок очень редко оказывается на 100% поляризован. Вдобавок заключительный процесс рассеяния также является не слишком совершенным анализатором. Очень важную роль играет точное геометрическое расположение всех частей аппаратуры, поскольку выход реакции часто сильно зависит от угла рассеяния, и небольшая неточность в расположении оборудования может привести к ложной асимметрии между правым и левым. Погрешности вносятся также за счет того, что поляризующая и анализирующая способности рассеивателей известны недостаточно точно. Эта способность зависит от энергии рассеиваемых частиц. При некоторых энергиях спиновая зависимость

взаимодействия очень мала. Поэтому оказывается трудно поляризовать частицы или исследовать их поляризацию после рассеяния.

За последние годы для устранения некоторых из этих трудностей были развиты две методики. Одна из них использует поляризованные ускорительные пучки, а вторая — поляризованные ядерные мишени. Поляризованные ускорительные пучки получают путем поляризации частиц до их ускорения. Заранее не очевидно, что процесс ускорения не разрушит эту поляризацию. Это существенно зависит от конструкции используемого ускорителя. Удалось добиться успеха в ускорении поляризованных пучков протонов и дейтронов главным образом при «малых» энергиях (меньших 100 Мэв).

Поляризованная мишень представляет собой просто образец из какого-либо твердого материала, состоящий из ядер, спины которых поляризованы. Прежде чем обсуждать, как можно получить такую поляризацию, уместно ввести понятие о «степени поляризации». Если все частицы в образце вращаются в одном и том же направлении относительно параллельных осей, то мы говорим о стопроцентной поляризации. Если они все вращаются случайным образом, то степень поляризации равна нулю. Обычно мы сталкиваемся с ситуацией, промежуточной между этими двумя крайними случаями. Частично поляризованный образец можно представить себе как образец, в котором некоторая часть частиц (скажем, 60%) полностью поляризована, а остальные частицы неполяризованы. Такой образец мы будем называть 60%-но поляризованным. В действительности, конечно, невозможно отличить, какие именно протоны поляризованы, а какие нет.

Альтернативную интерпретацию можно дать, рассматривая вращение вокруг некоторой выделенной оси и отмечая относительное число частиц, правовращающихся вокруг этой оси (со спином, направленным вверх) и левовращающихся (т. е. со спином, направленным вниз). В только что описанном 60%-но поляризованном образце все поляризованные частицы плюс половина из оставшихся 40% имеют спин, направленный вверх, что в целом составляет 80%, в то время как остальные частицы имеют спин, направленный вниз. Пользуясь любой из этих интерпретаций, легко показать, что «степень асимметрии» рассеяния пропорциональна степени поляризации пучка или мишени. Коэффициент пропорциональности характеризует спиновую зависимость изучаемой реакции.

Наиболее очевидный способ поляризовать большое число частиц — это подвергнуть их действию сильного магнитного поля. Этот метод получил у физиков, занимающихся частицами высоких энергий, название метода «грубой силы». Я уже упоминал раньше, что свойства обладающей магнитным моментом вращающейся частицы во многом аналогичны свойствам постоянного магнита. Эту аналогию можно продолжить, заметив, что в присутствии магнитного поля Земли стрелки всех компасов указывают на север. Пользуясь терминологией этой статьи, эти стрелки следует назвать 100%-но поляризованными.

В идеальных условиях спины частиц, из которых состоит любой образец, будут в магнитном поле поляризоваться аналогичным образом. Читатель, однако, может догадаться, что условия редко бывают идеальными. В любом реальном твердом теле при температурах, отличных от абсолютного нуля, атомы и ядра постоянно испытывают соударения с решеткой, состоящей из соседних атомов. Эти столкновения оказывают на вращающиеся ядра такое же действие, как энергичное встряхивание на стрелку компаса: направления магнитных моментов (совпадающих с направлением

спиновых осей) постоянно отклоняются от направления магнитного поля. В результате степень поляризации значительно понижается. Можно вычислить реальную степень поляризации системы частиц, находящихся в тепловом равновесии с окружающей средой, при некоторой достаточно низкой температуре в присутствии известного магнитного поля. Полученная с помощью «грубой силы» степень поляризации приблизительно равна отношению магнитной энергии (определяемой произведением магнитного момента частицы на напряженность магнитного поля) к средней тепловой энергии окружающих атомов (пропорциональной абсолютной температуре). Рассмотрим для примера магнитный момент протона ($1/658$ магнетона Бора) в поле, созданном сильным лабораторным электромагнитом ($20\,000$ гс) при температуре, которую легко обеспечить, охлаждая систему жидким гелием (1 градус выше абсолютного нуля). Легко показать, что при таких условиях соответствующая тепловому равновесию степень поляризации протонов составляет $0,2\%$. Это значит, что в образце, содержащем 1000 протонов, 501 протон будет иметь спин, направленный вверх, и 499 протонов — спины, направленные вниз. Чтобы получить таким способом более высокую степень поляризации, нужно строить дорогие мощные магниты и использовать специальную технику получения очень низких температур. Отсюда и происходит название «грубая сила».

Если мы рассмотрим влияние того же самого магнитного поля и температуры на поляризацию электрона, то ситуация будет совсем другая. Поскольку магнитный момент электрона очень велик, его магнитная энергия сравнима с тепловой энергией при температуре 1 градус выше абсолютного нуля уже в поле напряженностью $20\,000$ гс. Соответствующая тепловому равновесию степень поляризации электронов в такой ситуации значительно превышает 50% . К несчастью, в любом твердом теле (а все тела, кроме гелия, находятся при таких температурах в твердом состоянии) электроны стремятся объединиться в пары с равными и противоположно направленными спинами, в результате чего поляризация сводится к нулю. Приведенная выше оценка равновесной степени поляризации относится лишь к неспаренным электронам, которые могут составлять лишь незначительную часть от общего числа присутствующих электронов. У ядер тех же самых твердых тел эффект спаривания обычно не наблюдается. Важным исключением из этого правила являются протоны в чистом твердом водороде в состоянии теплового равновесия. К сожалению, это именно одно из тех веществ, в поляризации которых физики больше всего заинтересованы.

Существует несколько хитроумных трюков, с помощью которых удастся перенести высокую степень поляризации неспаренных электронов на некоторые ядра твердого вещества. Наиболее старый метод такого «переноса» — это «статический» метод, предложенный независимо М. Е. Розе из Окриджской национальной лаборатории и К. Дж. Гортером из лаборатории Каммерлинг Оннеса в Нидерландах в конце сороковых годов. Эти ученые заметили, что во многих веществах вблизи каждого ядра существуют неспаренные электроны. Эти электроны взаимодействуют с ядром посредством магнитных спин-спиновых сил. В результате создаются чрезвычайно сильные локальные поля. В непосредственной близости от ядра эти поля могут достигать миллионов гаусс, что в сто раз превышает напряженность внешнего поля. Направления локальных полей в кристалле меняются от точки к точке. В результате среднее поле в любом достаточно большом объеме практически равно нулю. Но если электроны сильно поляризованы, а твердое тело имеет правильную кристаллическую структуру, локальные поля вблизи всех ядер будут иметь одно и

то же направление. Это приведет к тому, что ядра также станут поляризованными. Причем величина поляризации будет такой же, как если бы они находились в сильном магнитном поле соответствующей величины.

Наиболее известный пример использования техники Розе—Гортера — это эксперимент, выполненный в 1956 г. К. С. Ву из Колумбийского университета и группой из Национального бюро стандартов. Целью этого эксперимента было показать, что бета-распад поляризованных ядер Co^{60} можно использовать для того, чтобы провести абсолютное различие между правым и левым *). Группы из Бюро стандартов, Окриджа и Брукхейвенской Национальной лаборатории проводили также эксперименты с использованием поляризованных тяжелых ядер в качестве мишени в ядерных реакциях.

Большинство физиков предпочли бы иметь поляризованные мишени, состоящие из протонов, или каких-нибудь легких ядер, типа дейтерия или He^3 (редкий изотоп гелия, ядро которого состоит из двух протонов и одного нейтрона). Интерпретация таких экспериментов не затемняется лишними осложнениями, связанными с вопросами структуры ядра, и можно ожидать, что в этих экспериментах мы имеем дело с более фундаментальными взаимодействиями. Статический метод поляризации, по-видимому, неприменим к водороду и гелию. Для поляризации этих ядер следует обратиться к «динамическим» методам.

В 1953 г. Альберт В. Оверхаузер, работавший тогда в Иллинойском университете, предложил новый метод поляризации щелочных металлов (таких как литий и натрий). Электроны проводимости (которые в щелочных металлах не спарены) в состоянии теплового равновесия при подходящей температуре и напряженности магнитного поля сильно поляризованы. Если специально деполаризовать электроны, а затем позволить им вернуться в состояние равновесия, то электроны будут возвращаться в состояние равновесия главным образом за счет зависящих от спина столкновений с ядрами. Оверхаузер предположил, что не существует механизма, который позволил бы ядрам быстро избавиться от переданного им в результате таких столкновений избыточного момента количества движения. Поэтому, если многократно деполаризовать электроны (накладывая радиочастотное поле подходящей частоты), это приведет к поляризации ядер, которая будет нарастать до тех пор, пока не станет равной по величине и противоположной по знаку поляризации электронов. К удивлению многих физиков, в 1955 г. Т. Р. Карвер и Чарлз П. Слехтер из Иллинойского университета продемонстрировали, что все происходит именно так, как предсказал Оверхаузер.

Почти сразу же выяснилось, что принцип динамической поляризации ядер применим в гораздо более общей ситуации, чем рассмотренная Оверхаузером. Для поляризации различных ядер использовались разнообразные модификации этого метода. Все эти модификации имеют ряд общих черт с эффектом Оверхаузера. В частности, число поляризованных ядер может значительно превышать число электронов, выступающих в качестве поляризующих агентов, поскольку один электрон может поляризовать много ядер. Во всех случаях переворот спинов определенных частей системы осуществляется путем наложения внешнего поля. Наконец, получаемая поляризация во много раз выше поляризации, соответствующей тепловому равновесию.

*) См. статью Филиппа Моррисона «Ниспровержение четности» во втором выпуске этой серии. (Прим. ред.)

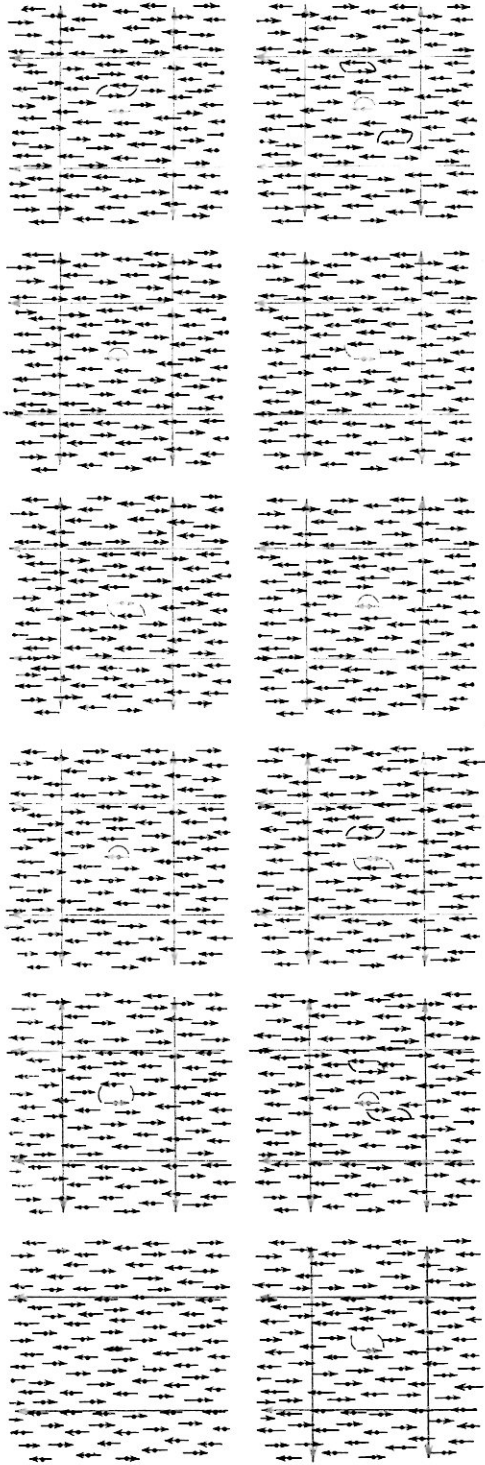


Рис. 3.4. Термин «динамическая ядерная поляризация» применяется для описания нескольких различных методов поляризации ядер. Во всех этих методах используется тот факт, что в некоторых твердых телах при очень низких температурах в присутствии сильного магнитного поля электроны сильно поляризуются. Эту поляризацию удается «передать» части ядер, входящих в состав твердого тела. Изобретенная здесь техника, известная под названием «эффекта твердого состояния», была разработана в конце пятидесятых годов. Наибольший вклад в ее развитие внесли С. Д. Динедфрис и А. Абрагам. Для осуществления «эффекта твердого состояния» требуется вещество, в котором несравненно электроны несомненно эффективно деполаризовать, т. е. вещество, в котором они испытывают столь частые столкновения с соседними атомами, что при любых временных изменениях поляризации оно немедленно возвращается к своему равновесному значению. Наоборот, спины протонов в этом веществе должны быть, очень «незастылыми». Будучи поляризованными, они возвращаются в состояние равновесия в течение многих минут и даже часов. Так же как и в остальных методах динамической поляризации, число поляризуемых протонов может значительно превышать число электронов, выступающих в качестве поляризующих агентов, поскольку один электрон может поляризовать много протонов. На рисунках изображены последовательные этапы применения описываемой техники. На первом рисунке показан отдельный электрон (цветная стрелка), вектор момента количества движения которого имеет такое же направление, как и статическое магнитное поле. Векторы момента количества движения протонов (серые стрелки) ориентированы случайным образом (с точки зрения квантовой механики это просто означает, что половина спинов направлена вверх, а половина вниз). На втором этапе прикладывается радиочастотное поле (большие горизонтальные цветные стрелки) под прямым углом к статическому магнитному полю. Частота этого поля подобрана таким образом, чтобы обеспечить одновременный переворот спина протона и электрона. На третьем этапе электрон немедленно перекувыркивается обратно и оказывается готовым для обработки нового протона (четвертый этап). В то же время протоны, приведенные в состояние «спин вверх», продолжают оставаться в этом состоянии. На последующих этапах поляризация распространяется на все более отдаленные протоны за счет спонтанной передачи поляризации от одного протона к другому. В то же время электрон продолжает переносить спины соседних с ним протонов. Если процесс поляризации протонов электронами прекращается над различными неполяризуемыми процессами, то вскоре большая часть протонов окажется поляризованной. Исходя из описанную технику динамической поляризации, некоторым группам удалось получить поляризацию, превышающую 70%.

Для поляризации протонов чаще всего использовался специальный метод, предложенный в конце пятидесятых годов К. Д. Джеффрисом из Калифорнийского университета в Беркли и А. Абрагамом из Ядерного центра в Сакле (Франция). Последний назвал его «эффектом твердого состояния». В дальнейшем этот метод развивался главным образом этими двумя учеными. Заметный вклад в его развитие внес также М. Боргини, работавший вначале в Сакле, а затем в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве. Важную роль сыграли также исследования, выполненные в Оксфордском университете, Безансонском университете, Мишесотском, Иельском, Гарвардском университетах и Объединенном институте ядерных исследований в Дубне.

Для осуществления эффекта твердого состояния требуется вещество, в котором неспаренные электроны невозможно эффективно деполаризовать, т. е. вещество, в котором они испытывают столь частые столкновения с окружающими атомами, что как бы ни менялась поляризация под влиянием внешних условий, она мгновенно возвращается к своему равновесному значению. С другой стороны, спины поляризуемых ядер (которые мы в дальнейшем будем считать протонами) настолько «медительны», что, будучи однажды поляризованы, они возвращаются в состояние равновесия в течение многих минут или даже часов. Существует, однако, возможность передачи поляризации от одного протона к другому, так что если вначале поляризуется протон, ближайший к неспаренному электрону, то в дальнейшем эта поляризация может распространяться и на более отдаленные протоны (рис. 9.4).

Под прямым углом к статическому магнитному полю накладывает-ся радиочастотное поле с частотой, соответствующей одновременному перевороту спинов протона и электрона. Например, частота может соответствовать переходу из состояния «протон вверх, электрон вверх» в состояние «протон вниз, электрон вниз» (рис. 9.5). Переходы могут происходить в обе стороны, но, поскольку первоначально большая часть электронов ориентирована вверх, реакция преимущественно идет в направлении

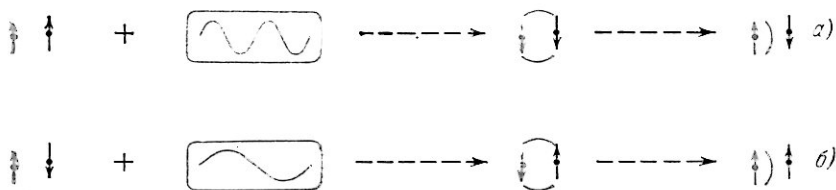


Рис. 9.5. Частоту радиочастотного поля (представленного здесь в виде дискретных квантов, или «порций» энергии) можно слегка менять. За счет этого можно получить любое направление поляризации протонов, не меняя направление статического магнитного поля и оставляя неизменными все прочие экспериментальные условия. В случае *а*) частота подобрана таким образом, чтобы обеспечить переход из состояния «электрон вверх, протон вверх» в состояние «электрон вниз, протон вниз». В случае *б*) частота соответствует переходу из состояния «электрон вверх, протон вниз» в состояние «электрон вниз, протон вверх». В обоих случаях переходы могут идти в обе стороны, однако, поскольку первоначально большая часть электронов ориентирована «вверх», процесс идет преимущественно в направлении слева направо. Электроны немедленно перекувыркиваются обратно, возвращаясь в состояние равновесия. В то же время протоны, будучи поляризованы, остаются в этом состоянии.

слева направо. Согласно гипотезе твердого состояния ориентированный вниз электрон немедленно перекувыркивается обратно и таким образом оказывается готовым для «обработки» нового протона. В то же время протоны, переведенные в состояние «вниз», так и остаются в этом состоянии. Реакция продолжается до тех пор, пока слева остается лишь очень небольшое число ориентированных «вверх» протонов, т. е. большая часть протонов станет поляризованной «вниз».

Аналогичным способом можно получить также протоны, поляризованные «вверх». Для этого нужно изменить радиочастоту так, чтобы она соответствовала переходу из состояния «электрон вверх, протон вниз» в состояние «электрон вниз, протон вверх». Как и раньше, переходы будут происходить главным образом в направлении слева направо, до тех пор пока слева останется лишь незначительное число ориентированных «вниз» протонов. Таким образом можно получить любое направление поляризации протонов, не меняя направления магнитного поля и сохраняя неизменными все прочие экспериментальные условия.

Наиболее удобным веществом для получения высокой степени поляризации протонов оказался динитрат лантана—магния (химическая формула $\text{La}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), в котором один процент редкоземельного элемента лантана замещен другим редкоземельным элементом, неодимом, являющимся поставщиком неспаренных электронов. Это соединение было выбрано, поскольку оно содержит как редкоземельные элементы, так и значительное количество водорода. Кроме того, оно обладает всеми свойствами, необходимыми для осуществления эффекта твердого состояния. Несколько групп сообщали о получении в этом кристалле поляризации протонов со степенью выше 70%. Хотелось бы научиться поляризовать материалы, более богатые водородом. Поиски таких возможностей продолжаются.

Следует упомянуть по крайней мере еще об одном методе поляризации ядер. Этот метод использовался для поляризации ядер He^3 . Исследовательские группы из «Компани техас инструментс» и Райсовского университета применили для этой цели технику «оптической накачки» *). Они использовали для возбуждения атомов He^3 видимую область спектра. При надлежащем выборе длины волны и поляризации света процесс возбуждения происходит таким образом, что при обратном переходе в основное состояние спины всех ядер ориентируются преимущественно в одном и том же направлении (скажем, вверх). Этот метод, в отличие от всех упоминавшихся до сих пор, можно применять при комнатной температуре, что представляет огромное преимущество. Однако, чтобы избежать столкновений, в результате которых быстро восстановилось бы состояние теплового равновесия, необходимо работать с сильно разреженным газом. Этот метод наиболее эффективен при давлениях порядка 1 мм рт. ст. Столь малые плотности неудобны для изучения ядерных реакций. В этом случае гораздо более вероятно рассеяние стенками камеры, чем самим газом. Тем не менее, упомянутым ученым удалось выполнить с такими мишенями некоторые эксперименты, например, эксперимент по рассеянию α -частиц ядрами He^3 .

Связь между экспериментами по многократному рассеянию и экспериментами с поляризованными мишенями можно установить из соображений симметрии. Одним из таких соображений, применимым к протон-протонному рассеянию, является принцип неразличимости тождественных частиц. После столкновения двух протонов в принципе невозможно сказать, какая из двух рассеянных частиц была первоначально мишенью, а какая снарядом. Следовательно, безразлично, был ли поляризован пучок или мишень — наблюдаемая асимметрия рассеяния будет в обоих случаях одна и та же.

Другое соображение симметрии — это так называемый принцип «обращения времени». Этот принцип фактически означает, что если любой

*) См. статью Арн. Блума «Оптическая накачка» в пятом выпуске этой серии. (Прим. ред.)

процесс снять на киноплёнку, то независимо от того, будем ли мы прокручивать фильм назад или вперед, изображенная на плёнке система будет подчиняться одним и тем же физическим законам. До 1964 г. не существовало ни одного эксперимента, который противоречил бы принципу инвариантности относительно обращения времени. Недавно, однако, этот принцип был поставлен под вопрос некоторыми экспериментами по распаду нейтральных K -мезонов. Рассмотрим два процесса упругого рассеяния частиц (не обязательно идентичных), являющихся отраженными во времени образами друг друга. В первом процессе сталкиваются две неполяризованные частицы, и в результате столкновения одна из них поляризуется. В обращенном во времени процессе одна из начальных частиц поляризована, а поляризации частиц в конечном состоянии не измеряются. Принцип инвариантности относительно обращения времени гласит, что во втором процессе будет наблюдаться асимметрия, и ее степень численно будет равна степени наведенной поляризации в первом процессе.

Отсюда следует, что из наблюдения однократного рассеяния на поляризованной мишени можно извлечь такую же информацию, как из наблюдения двойного рассеяния на неполяризованных мишенях. Более того, при этом удастся избежать большей части упоминавшихся ранее осложнений, связанных с экспериментами по двойному рассеянию. Так, например, отпадает проблема точного геометрического размещения детекторов. Экспериментатор наблюдает изменение количества отсчетов при обращении направления спинов протонов мишени. Это эквивалентно перевороту аппаратуры «вверх ногами». В результате, не меняя расположения детекторов, удастся поменять местами «левое» и «правое». Вдобавок измерения можно проводить одновременно под несколькими углами. Поскольку мы имеем дело лишь с однократным рассеянием, количество отсчетов достаточно велико. С помощью поляризованных мишеней удастся измерить спиновую зависимость самых разнообразных реакций в широком интервале энергий, причем это можно сделать достаточно быстро.

Аналогичным образом тройное рассеяние можно симулировать двумя реальными процессами рассеяния, если в нашем распоряжении есть поляризованная мишень. Иногда, например, когда падающая частица является мезоном, использование поляризованных мишеней — это единственный способ провести подобные измерения. Некоторые мезоны не обладают спином, и следовательно сами не могут быть поляризованы. Кроме того, они нестабильны, и поэтому их нельзя использовать в качестве мишени для поляризованных протонных пучков. Не существует другого способа симулировать процесс тройного рассеяния мезонов, кроме как использование двойного рассеяния на поляризованной мишени.

С помощью поляризованного пучка и поляризованной мишени можно выполнить обращенный во времени эксперимент по измерению корреляции спинов. Это чрезвычайно экономичный способ использования ускорительных пучков, поскольку таким образом, с помощью одного рассеяния удастся измерить то, для чего раньше требовалось три отдельных процесса рассеяния. В первом реальном эксперименте с поляризованными мишенями, выполненном в Сакле, проводились измерения именно такого рода в процессе протон-протонного рассеяния при энергии 20 $Mэв$.

Использовавшиеся ранее аргументы, касающиеся обращения времени, непосредственно неприменимы к процессам неупругого рассеяния, когда конечные частицы отличаются от начальных. Тем не менее, если суммарный спин и «относительная внутренняя четность» конечных частиц такие же, как у начальных, то можно сделать те же самые выводы. (Внутренняя четность — это свойство, подобное спину, часто приписываемое

элементарным частицам. Четность может иметь только два значения $+1$ или -1 . Поскольку, в отличие от момента количества движения, четность не всегда сохраняется, имеет смысл говорить лишь об относительной четности пары частиц) Таким образом, сравнивая результаты двух экспериментов, можно определить спин и четность некоторых новых частиц. В первом эксперименте посредством определенной реакции получают изучаемые частицы. При этом пользуются неполяризованной мишенью и измеряют степень поляризации вылетающих частиц. Во втором эксперименте осуществляют ту же самую реакцию, используя поляризованную

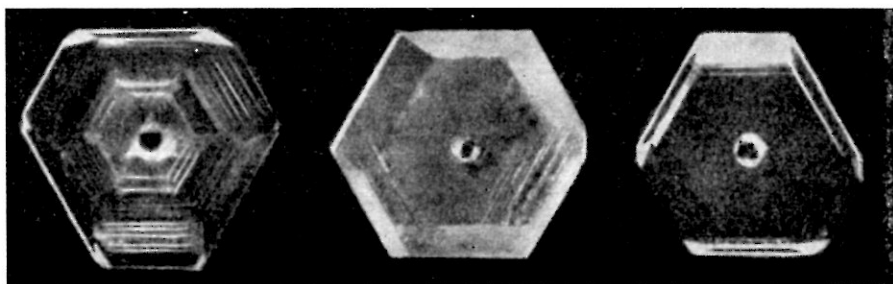


Рис. 9.6. Мишени, использованные автором и его коллегами в экспериментах с поляризованными протонами, выполненных в Лоуренсовской радиационной лаборатории Калифорнийского университета в Беркли, представляют собой большие монокристаллы динитрата лантана — магния ($\text{La}_2\text{Mg}_2(\text{NO}_3)_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), в которых один процент редкоземельного элемента лантана замещен другим редкоземельным элементом неодимом. Отверстия в центре каждого кристалла проделаны не ускорительным пучком. Это отпечатки небольшого стержня, на котором выращивались кристаллы.

мишень, и наблюдают спиновую зависимость выхода реакции. Результаты обоих экспериментов численно совпадают в том и только в том случае, если спин и относительная четность конечных частиц такие же, как и у начальных. Если относительная четность изменилась, то эти два эксперимента должны дать равные по величине, но противоположные по знаку результаты.

Два эксперимента подобного рода уже были выполнены, хотя их анализ к моменту написания этой статьи еще не был завершен. В Беркли мы измеряли относительную четность Σ - и K -частиц. В ЦЕРНе был выполнен эксперимент по проверке относительной четности Ξ -гиперона и протона. Результаты этих экспериментов представляют определенный интерес, поскольку почти все существующие теории предсказывают в первом случае отрицательную относительную четность, а во втором — положительную.

Наша группа в Беркли, возглавляемая Оуэном Чемберленом, начала заниматься созданием поляризованных протонных мишеней для высокоэнергетических ядерных реакций в 1960 г. Некоторые члены нашей группы раньше занимались упоминавшимися в этой статье экспериментами по двойному и тройному рассеянию. Работая в тесном контакте с Джеффрисом, мы решили использовать для поляризации протонов эффект твердого состояния. До тех пор удавалось изготовить лишь небольшие поляризованные образцы, кристаллы весом не более 200 мг. Чтобы достаточно полно использовать высокоэнергетические пучки, получаемые на ускорителе в Беркли, нам нужны были мишени в 100 раз больше. Создание таких мишеней представляло серьезную инженерную задачу. Все должно было быть увеличено в 100 раз: емкость охлаждающей гелиевой системы, мощ-

ность высокочастотного поля, используемого для получения поляризации, напряженность магнитного поля с высокой степенью однородности. Нужно было вырастить большие монокристаллы (рис. 9.6). Это процесс, требующий большого усердия и терпения, так как очень часто попытки оканчиваются неудачей. В 1962 г. Клоду Шульцу и мне удалось получить 26-граммовый образец, обладающий 20%-ной поляризацией протонов.

Со времени наших первых успехов было сделано много различных усовершенствований. В настоящее время поляризованная протонная система состоит из следующих ингредиентов: сама мишень, представляющая

собой кристалл динитрата лантана — магния с 1%-ной примесью неодима; низкотемпературная система, поддерживающая температуру мишени на уровне 1,15 градуса выше абсолютного нуля путем погружения ее в находящийся под низким давлением жидкий гелий; магнитное поле напряженностью 18 750 гс, отклонение которого от однородности во всем объеме образца не превышает 1 гс, и микроволновое поле, поддерживающее процесс динамической поляризации (в данном случае используется поле с частотой 70 000 Мгц и мощностью в 1 вт) (рис. 9.7). При этом поляризация протонов обычно меняется в пределах от 45 до 65%. В отдельных случаях всем группам удавалось получить еще более высокую степень поляризации.

В связи с использованием подобных мишеней необходимо решить две важные проблемы. Во-первых, важно в любой момент знать реальную степень поляризации. Во-вторых, нужно уметь отличить эффект, обусловленный свободными протонами (составляющими всего 3% от полного веса кристалла), от эффектов, вызванных кислородом, лантаном и другими ядрами, входящими в состав используемого соединения. Степень поляризации измеряется с помощью метода ядерного магнитного резонанса. Для этого систему помещают в слабое поле с частотой около 80 Мгц и измеряют количество энергии, поглощенной кристаллом. Это количество, грубо говоря, пропорционально степени поляризации. Чтобы получить точный результат, нужно учесть некоторые более сложные поправки. Что касается выделения эффекта, обусловленного свободными протонами, то мы заметили, что любые изменения выхода реакции, происходящие при перемене поляризации мишени, должны быть обусловлены именно протонами, поскольку большая часть остальных ядер не обладает спином, а

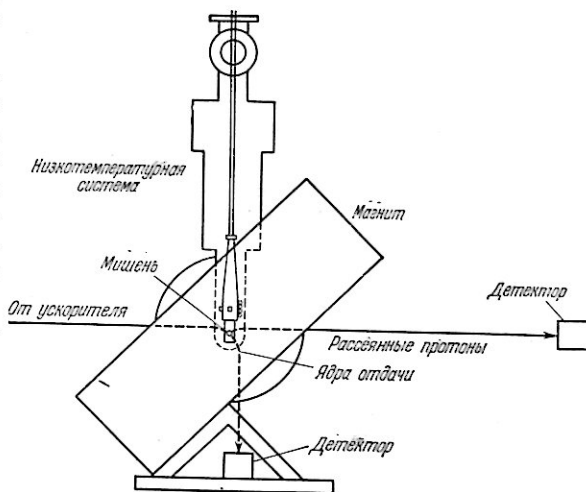


Рис. 9.7. Здесь показана экспериментальная установка, использовавшаяся в Беркли для определения поляризации протонов. Низкотемпературная система поддерживает кристаллы мишени при температуре 1,15 градуса выше абсолютного нуля. Это достигается путем погружения их в находящийся под низким давлением жидкий гелий. Магнит создает поле напряженностью 18 750 гс, отклонение которого от однородности не превышает 1 гс во всем объеме образца. Для поддержания процесса динамической поляризации используется микроволновое поле мощностью около 1 вт и частотой 70 000 Мгц. На пути протонов, рассеянных из падающего пучка, а также на пути выбитых из мишени ядер отдачи (которые в данном случае являются также протонами) установлены детекторы.

если и обладает, то их вклад в поляризацию образца пренебрежимо мал. Кроме того, мы воспользовались законом сохранения энергии и импульса, чтобы показать, что при рассеянии на свободных протонах между энергией и углом рассеяния существует соотношение, которое не выполняется при рассеянии на тяжелых ядрах. В тех экспериментах, которые мы проводили до сих пор, при подходящем выборе углов рассеяния количество событий, обусловленных рассеянием на свободных протонах, часто превышало фон в пять и более раз.

Описанные методы открыли для экспериментаторов широкое и почти нетронутое поле деятельности. Поэтому неудивительно, что многие лаборатории создали свои собственные поляризованные протонные мишени. Лаборатории в Беркли, Сакле, ЦЕРНе, лаборатория им. Резерфорда близ Оксфорда в Англии и Аргоннская национальная лаборатория уже провели на своих ускорителях эксперименты с поляризованными мишенями. Для ЦЕРНа вполне обычным стало одновременное использование двух поляризованных мишеней. В настоящее время в эту деятельность включились также группы, работающие на установках, рассчитанных на более низкие энергии.

Не будет большим преувеличением сказать, что любую реакцию, которая когда-либо изучалась с помощью неполяризованных протонных мишеней, можно с большой пользой повторить, используя поляризованные мишени, так как это дает возможность изучить спиновую зависимость реакции. По-видимому, именно такую программу и ставят перед собой упомянутые выше лаборатории. Берутся всевозможные пучки частиц, в первую очередь протонов и л-мезонов, а в будущем, вероятно, также пучки К-мезонов и антипротонов, при всех доступных энергиях и измеряется зависимость поляризации от угла упругого рассеяния. Само собой разумеется, что с тех пор, как были впервые выполнены эксперименты с неполяризованными частицами, техника регистрации частиц и обработки данных существенно усовершенствовалась, и эффективность получения экспериментальных данных в настоящее время гораздо выше. За последние несколько лет были выполнены эксперименты по упругому рассеянию на поляризованных мишенях в широком интервале энергий.

На рис. 9.8 приведены для случая протон-протонного рассеяния максимальные значения параметра поляризации (равного отношению степени асимметрии рассеянных пучков к степени поляризации мишени) при различных энергиях. По поводу этих результатов стоит сделать четыре замечания. Во-первых, весьма обнадеживает согласие между результатами, полученными в различных лабораториях, в тех точках, где эти данные перекрываются. Это свидетельствует о правильности калибровки поляризации мишеней. Во-вторых, согласие между данными, полученными в опытах с поляризованными мишенями и данными (обычно менее точными), полученными из экспериментов по двойному рассеянию, свидетельствует о том, что на сегодня, по-видимому, нет оснований сомневаться в инвариантности этих реакций относительно обращения времени. В-третьих, высокая степень поляризации, наблюдаемая при энергиях около 700 Мэв, в сочетании с другими данными, полученными при тех же энергиях, может рассматриваться как указание на существование нового «резонанса», или нестабильной частицы (возможно сильно возбужденного несвязанного ядра «гелия-2»). В-четвертых, даже при максимальных энергиях, достигнутых в Беркли, все еще наблюдается сильная спиновая зависимость. Существуют теоретические предсказания, основанные на довольно общих соображениях, согласно которым при достаточно

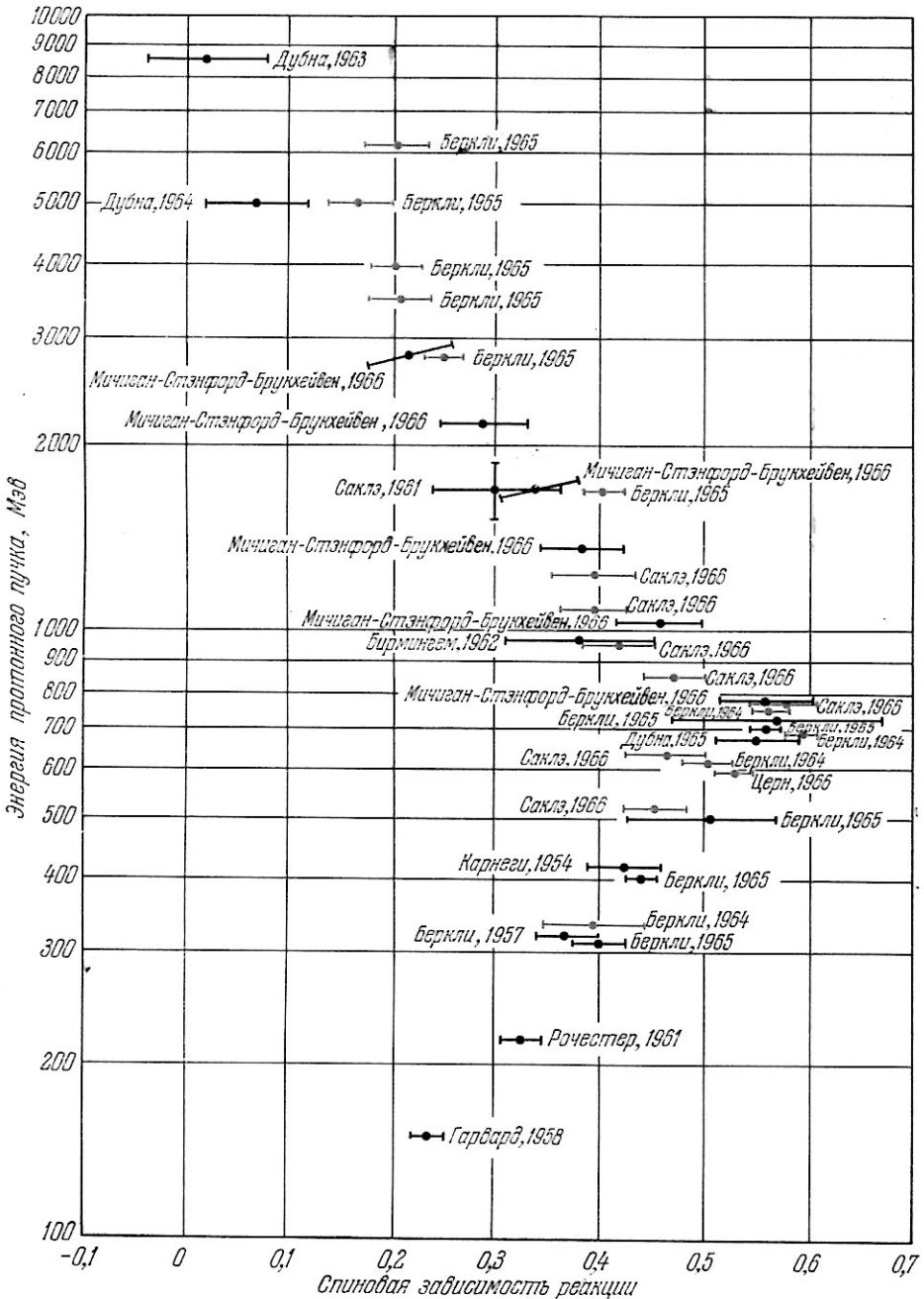


Рис. 9.8. Сравниваются результаты экспериментов по упругому протон-протонному рассеянию. Черным обозначены результаты, полученные с помощью техники двойного рассеяния, цветным — результаты, полученные с помощью техники поляризованных мишеней. Эксперименты были выполнены в лабораториях университетов различных стран, а также в центре ядерных исследований (Саклэ), Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве, в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) в СССР и в Брукхейвенской национальной лаборатории. На графике указаны годы, когда были выполнены эксперименты. Спиновая зависимость, или параметр поляризации, каждой реакции определяется отношением процента асимметрии рассеяния протонов к проценту поляризации протонов мишени. Черточками указаны экспериментальные ошибки.

высоких энергиях спиновая зависимость всех ядерных реакций должна исчезать. До сих пор не существует никаких оценок того, какую энергию можно считать «достаточно высокой». Из наших результатов следует, что эта энергия должна быть значительно больше 6200 *Мэв*.

Что касается пион-протонного рассеяния, то данные, полученные в Резерфордской лаборатории при энергиях ниже 1700 *Мэв*, позволили работающим там теоретикам различить несколько перекрывающихся по массе резонансных частиц. С помощью этого метода были идентифицированы по крайней мере два неизвестных раньше резонанса и были определены их свойства. Аргоннская группа проделала аналогичный анализ при несколько ббльших энергиях, а группа в Беркли в настоящее время анализирует данные по пион-протонному рассеянию в области еще более высоких энергий. Большой интерес представляет также исследование области наиболее высоких энергий, достигнутых в настоящее время в ЦЕРНе и Брукхейвене, с целью определить, при какой энергии исчезает спиновая зависимость (если она вообще исчезает).

Существует множество различных областей для дальнейшего применения техники динамической поляризации ядер. Несомненно, в недалеком будущем будут поставлены эксперименты по многократному рассеянию на поляризованных мишенях. Можно рассматривать также неупругое рассеяние на таких мишенях. С их помощью можно осуществить также некоторые специальные проекты, как, например, предложенный Т. Д. Ли из Колумбийского университета проект поисков нарушения инвариантности относительно обращения времени в электромагнитных взаимодействиях, путем изучения неупругого электрон-протонного рассеяния на поляризованных мишенях. Несомненно, на очереди стоит много экспериментов, которыми будут заниматься многие группы во многих лабораториях в течение многих лет.

Д. Йант

СТРИМЕРНАЯ КАМЕРА

(ОКТАБРЬ 1967 г.)

На Стэнфордском линейном ускорителе применяется новый тип детектора частиц. Путь частицы в нем прослеживается по маленьким искровым стримерам в газе, находящемся между высоковольтными электродами.

Усилия физиков, направленные на то, чтобы расчлениить материю на ее мельчайшие составные части и выяснить природу элементарных частиц, зависят от двух одинаково важных и связанных друг с другом инструментов. Это — ускорители частиц, которые зондируют вещество все более и более глубоко и энергично и порождают все больше и больше сложных реакций. С их семейством крепкими узами связан дополнительный и необходимый партнер: детекторы частиц, роль которых существенна не только для распознавания частиц, но и для изучения их взаимодействий. Оба инструмента развивались вместе. Как только строится новый ускоритель с ббльшей энергией и интенсивностью, в пару к нему приходит новый детектор, наделенный ббльшей способностью отражать события внутриатомного мира. Детекторы занимают настолько важное место в атомных исследованиях, что если перечислить их, то перед глазами пройдет вся история физики элементарных частиц: «туманная» камера Вильсона, счетчик Гейгера, ядерная фотоэмульсия, сцинтилляционный счетчик, пузырьковая камера, искровая камера. Теперь это семейство пополнилось новым многообещающим членом: стримерная камера.

Прежде чем описать это новое устройство, было бы полезно дать обзор принципов, лежащих в основе обнаружения невидимых элементарных частиц. Первым делом надо перехватить частицу в веществе какого-либо сорта — газообразном, жидком или твердом. Когда энергичная заряженная частица проходит сквозь вещество, то, сталкиваясь на своем пути с атомами, она ионизует их, оставляя после себя свободные электроны и положительно заряженные ионы. В детекторах типа «счетчик» этот «сигнал» усиливается и преобразуется в электрический импульс. По нему можно судить не только о присутствии частицы, но и о направлении ее движения, ее импульсе (масса, умноженная на скорость) и даже о ее сорте. Современные счетчики могут регистрировать такие события (т. е. прохождение отдельных частиц) со скоростью более чем 10 миллионов случаев в секунду.

Для изучения природы частиц желательно получать гораздо больше информации. В частности, нас интересуют их взаимодействия при столкновениях и возможное расщепление или превращение сталкивающихся частиц в новые их разновидности. Такую информацию дают детекторы

«трекового» типа, которые позволяют видеть реальный трек (траекторию) налетающей частицы и рождение, и дальнейшую судьбу каждой вновь возникшей частицы.

Первым детектором такого сорта была «туманная» камера, изобретенная в 1911 г. Ч. Т. Р. Вильсоном. Основная идея трекового детектора — это метод усиления ионизационного следа частицы до такого уровня, чтобы он стал видимым. Необходимость усиления объясняется тем, что число ионизующих столкновений относительно мало (например, проходя через газообразный водород, частица обычно порождает лишь около десяти ионов на сантиметр своего пути), а сами ионы, конечно, не видны ни в какой микроскоп. Вильсон усилил след до уровня видимости, заставив капельки воды конденсироваться на положительно заряженных ионах. Камера Вильсона наполнена водяным паром и может работать в паре со счетчиком Гейгера. Когда частица проходит сквозь счетчик, он запускает механизм, резко увеличивающий объем камеры и охлаждающий ее. Тогда-то переохлажденный пар и конденсируется на ионах, отмечающих трек. Тот же «триггерный» (запускающий) механизм дает команду для фотографирования трека.

Триггерный характер камеры Вильсона — одно из наиболее ценных ее свойств. Механизм увеличения объема камеры и фотографирования можно заставить работать в таком режиме, что он будет запускаться лишь в том случае, когда происходит интересующее нас событие. Это во многом упрощает задачу просмотра фотографий для отбора нужных событий. Здесь камера Вильсона имеет значительное преимущество над таким «трековым» детектором, как фотоэмульсия. В эмульсии остаются запечатленными треки всех частиц без разбора. Поэтому требуется долгая, кропотливая работа с микроскопом, чтобы разобраться в треках и выделить те из них, которые могут представлять интерес.

В возможностях камеры Вильсона имеются, однако, серьезные ограничения. Поскольку частицы летят в ней в газообразной среде, многие из них пролетают насквозь, не породив ни одного интересного события. Длительность рабочего цикла очень велика: обычно требуется 20 сек после каждой фотографии, чтобы подготовить камеру к следующей. Следовательно, камера не может регистрировать быстрые серии событий от ускорителя частиц высокой энергии. Далее, трек держится в камере целые доли секунды — время, вполне достаточное для того, чтобы картину запутали другие, не относящиеся к делу треки.

В начале 1950 г. Дональд А. Глейзер изобрел пузырьковую камеру, которая весьма успешно заменила камеру Вильсона в физике частиц высокой энергии. В этом приборе рабочим веществом служит перегретая жидкость. Проходя сквозь жидкость, заряженная частица образует ионы и вызывает образование пузырьков вокруг них, в результате чего след становится видимым. Хотя большинство пузырьковых камер работает примерно с одним циклом в секунду, некоторые позволяют получить за секунду до 10 фотографий. Жидкое рабочее вещество пузырьковой камеры более плотно, содержит гораздо больше атомов-мишеней и обеспечивает гораздо больше событий, чем газ камеры Вильсона. Подобно камере Вильсона, пузырьковая камера может полностью зарегистрировать сложное событие, выявляя треки всех заряженных частиц, испущенных при первоначальном и последующих столкновениях. Ее можно сделать достаточно большой, чтобы следить за частицами на значительном удалении. Треки в пузырьковой камере резко выражены, так что положение точек вдоль траектории частицы можно определить с высокой точностью. Более того, в качестве специальных мишеней в камере можно использовать

самые различные жидкости. Например, если заполнить пузырьковую камеру чистым жидким водородом, она будет показывать ядерные реакции налетающих частиц исключительно с протонными мишенями.

К сожалению, пузырьковая камера обладает серьезным недостатком. Ее нельзя запустить для регистрации избранных событий, когда они реально имеют место. Первоначальный след ионов, порожденных налетающей частицей, сохраняется менее миллионной доли секунды — время, слишком короткое, чтобы привести систему в действие. Поэтому камера должна быть запущена еще до того, как ожидаемое событие случилось. В современных экспериментах с пучком протонов и с пузырьковой камерой получают до миллиона фотографий, на которых оказываются зарегистрированными около 10 000 событий одного типа. Очевидно, это вызывает значительные затраты времени на анализ данных, даже с помощью современных полуавтоматических методов обработки материала.

Совершенно новый подход к проблеме детектирования частиц был открыт искровой камерой. В отличие от камеры Вильсона и пузырьковой камеры, этот прибор не был плодом мысли одного изобретателя. Его идея медленно сформировывалась примерно 15 лет и обязана своим развитием работе многих физиков *).

Принцип действия искровой камеры чрезвычайно прост. Если вблизи металлической пластины, заряженной до высокого напряжения, поместить другую пластину, то в щели между пластинами будут проскакивать искры. Похожего эффекта можно добиться даже с допороговым напряжением, если через щель протянут «мостик» из ионов. Такой мостик от одной пластины к другой возникнет при прохождении через газ ионизирующей частицы. Немногочисленные электроны, освобожденные первоначальным процессом ионизации, под действием высокого напряжения ускоряются и, сталкиваясь с атомами газа, порождают вторичную ионизацию. Так на пути через щель образуется лавина ионизации. Размножение ионов вызывает яркую искру, отмечающую путь частицы.

Стандартная искровая камера состоит из ряда близко расположенных параллельных металлических пластин, помещенных в инертный газ, обычно в смесь неона и гелия. Пересекая камеру (т. е. проходя сквозь пластины и через газ между ними), интересующая нас частица попадает в счетчик. Счетчик запускает механизм, который через миллионную долю секунды после появления частицы заряжает пластины через одну коротким импульсом высокого напряжения. Через щели вдоль пути частицы проскакивают искры, и образованный светящимися отрезками трек фотографируется. Информацию о заряде и импульсе частицы можно получить, так же как в камере Вильсона и пузырьковой камере, помещая камеру в магнитное поле, искривляющее путь частицы.

Искровая камера сочетает в себе ряд достоинств камеры Вильсона и пузырьковой камеры. Подобно камере Вильсона, ее можно запускать. Подобно пузырьковой камере, она воспроизводит треки на короткое (на самом деле даже более короткое) время, так что картину не запутывают ложные события, происходящие до и после интересующего нас. К искровой камере приложено постоянное слабое электрическое поле, которое за несколько микросекунд «выметает» треки. Некоторые типы искровых камер способны зарегистрировать до 1000 событий в секунду.

*) См. статью Ж. К. О'Нейла «Искровая камера» в четвертом выпуске этой серии. (Прим. ред.)

Однако в некоторых отношениях стандартная искровая камера менее эффективна, чем пузырьковая. События, происходящие внутри пластин, не видны. Трек разбит на отрезки, так что он определяет путь частицы не с той точностью, как тонкий трек в пузырьковой камере. Кроме того, пузырьковая камера изотропна, т. е. отчетливо воспроизводит треки, идущие в любом направлении. Напротив, искровые камеры обычно неэффективны для регистрации треков тех частиц, которые пересекают щели под углом менее 45° к пластинам. Наконец, наиболее серьезный недостаток искровой камеры состоит в том, что она не может быть чувствительной

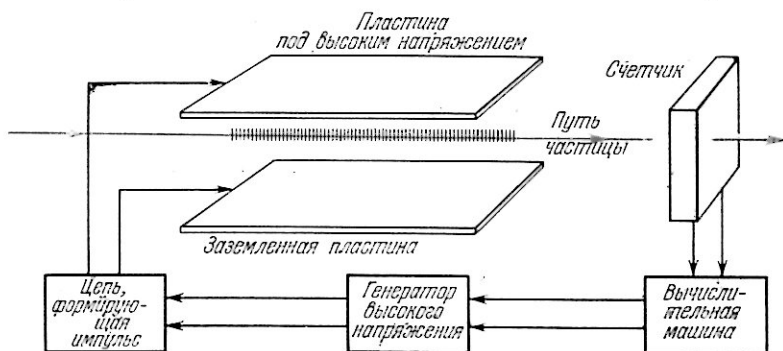


Рис. 10.1. Блок-схема стримерной камеры показывает одно из основных преимуществ, которые отличают ее от прочих типов искровых камер: она может быть запущена событием того типа, какой мы желаем детектировать. Пролет заряженной частицы (цветная линия) регистрируется счетчиком (или серией счетчиков). Вычислительная машина анализирует типы событий и отбирает то, которое интересует экспериментатора. После этого к генератору высокого напряжения посылается запускающий импульс, а выход генератора присоединен к цепи, формирующей высоковольтный импульс. Наконец, этот импульс подается на пластины камеры. В результате на ионах, оставшихся вдоль пути заряженной частицы, образуются стримеры (короткие вертикальные линии). Весь цикл занимает менее одной миллионной доли секунды.

ко всем вторичным частицам, испущенным при столкновении. Обычно ее хватает только на первые четыре—шесть треков, относящихся к данному событию. Этого явно недостаточно при изучении высокоэнергетических столкновений, нередко порождающих большое число вторичных частиц.

Нельзя ли объединить преимущества пузырьковой и искровой камер, т. е. сконструировать прибор, в котором сочетались бы изотропия, высокая эффективность при работе со многими треками и высокая разрешающая способность первой и триггерные свойства второй? Энергичные исследования, предпринятые в этом направлении, привели к созданию стримерной камеры — достойной сменой для искровой камеры.

Первый шаг был сделан А. И. Алиханяном и его сотрудниками в СССР *). В 1963 г. они сообщили, что ими построена «искровая камера с широкой щелью». При помощи довольно длительных импульсов высокого напряжения прибор «проявлял» треки частиц, попадающих в пространство между двумя далеко отстоящими друг от друга пластинами. К пластинам было подведено высокое напряжение — к одной положительное, а к другой отрицательное. В такой камере получается непрерывный (не разделенный на отрезки) видимый трек и можно было видеть вершины — начальные точки треков для событий, происходящих в щели между пластинами. Прибор способен регистрировать путь частицы с высокой точ-

*) За работу «Трековые искровые камеры» А. И. Алиханян, Г. Е. Чиковани и группа их сотрудников были удостоены Ленинской премии за 1970 г. (Прим. ред.)

ностью, но лишь в тех случаях, когда трек идет от одной пластины к другой. Частицы же, летящие параллельно или почти параллельно пластинам, прибор детектировать не способен.

Несколькими месяцами позже другая группа советских физиков, руководимая Г. Е. Чиковани, объявила о следующем изобретении, названном ими «стримерная камера с широкой щелью» (рис. 10.1). Главная особенность этого прибора состоит в использовании крайне коротких импульсов, вызывающих появление очень коротких искр (стримеров) вдоль ионизационного следа частицы. Фактически след состоит из отдельных

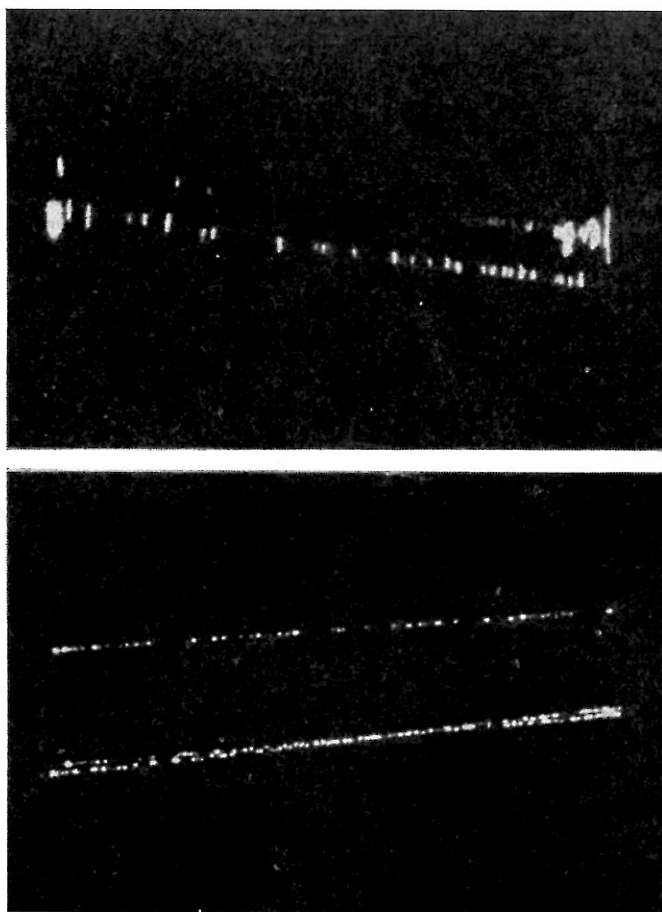


Рис. 10.2. Два изображения стримерных треков показывают, как растут стримеры параллельно силовым линиям электрического поля. Верхние треки сфотографированы сбоку, т. е. под прямым углом к силовым линиям. Нижние треки сфотографированы сверху, т. е. параллельно полю. Оба изображения получены Ф. Бюло и его сотрудниками в Стэнфордском центре линейных ускорителей.

«отпечатков ног». Если смотреть на него в направлении, перпендикулярном электрическому полю, виден ряд параллельных стримеров-отпечатков. В направлении же, параллельном полю, стримеры видны с конца, так что трек выглядит как серия точек (рис. 10.2).

Поскольку размеры разрядов небольшие, стримеры способны прописывать треки, идущие в любом направлении, а не только от одной пластины к другой. Вдобавок к этой способности изображать события,

происходящие в любом месте в газе между пластинами, стримерная камера, в отличие от обычной искровой, может зарегистрировать целый набор далеко отстоящих друг от друга событий, состоящих из множества треков (рис. 10.3).

К стримерной камере немедленно возник острый интерес в Стэнфордском центре линейных ускорителей, где в то время строился двухмиллиметровый ускоритель электронов (см. рис. 2.1). Новый прибор был компактным, обладал высокой разрешающей способностью и детектировал частицы, пролетающие в любых направлениях. Поэтому он обещал оказаться в высшей степени пригодным для высокоэнергетических экспериментов, планировавшихся на этом ускорителе, в частности, для экспериментов со встречными пучками очень высоких энергий. Вскоре после того, как стало известно об изобретении советских ученых, физики Стэнфордского центра предприняли дальнейшие усовершенствования стримерной камеры. Среди исследователей, работавших в Стэнфорде над этой темой, были Ф. Бюло, Р. Ф. Мозли, Ал. С. Одиан, Фр. Вилла и автор этой статьи. Кроме того, мы получали ценную помощь от Ч. Мартина и А. Смита, двух англичан, приехавших в Стэнфорд для разработки генератора очень коротких импульсов высокого напряжения, необходимых в стримерной камере.

Создание стримеров — очень сложное дело. Для начала посмотрим, что происходит с электроном, выбитым летящей сквозь газ ионизирующей частицей, под действием сильного электрического поля. Ускоренный полем электрон сам ионизует атом, с которым он сталкивается на своем пути. В результате этих столкновений высвобождаются вторичные электроны и испускаются фотоны (кванты электромагнитного излучения высокой энергии). Они также участвуют в ионизации, так что число ионизирующих электронов и фотонов «размножается». За десять миллиардных долей секунды электроны высокой энергии (со скоростью примерно в $\frac{1}{30}$ скорости света) пролетают около 1 мм. В течение этого времени идет экспоненциальное нарастание числа свободных электронов, так что от одного первоначального электрона порождается сто миллионов вторичных электронов. Кроме того, появляется такое же число положительных ионов. Короче говоря, возникает лавина заряженных частиц длиной в 1 мм.

Если длительность приложенного импульса высокого напряжения несколько меньше, чем десять миллиардных долей секунды, рост лавины на этом прекращается. Вспышка света, длящаяся в течение времени образования лавины, обычно недостаточна, чтобы оставить видимый след даже на наиболее чувствительных из существующих сейчас фотопленок. Чтобы сделать видимыми лавины, оставляющие в камере след, необходимо дальнейшее усиление. К счастью, в первичных лавинах идут внутренние процессы, вызывающие их нарастание до уровня видимых на фотографии стримеров.

После образования первичной лавины электронов главной причиной дальнейшей ионизации становятся фотоны, испущенные во время первичного процесса. Высвобождаемые в результате этого добавочные электроны порождают вторичные лавины, расположенные вблизи положительного и отрицательного концов первоначальной лавины, т. е. в областях, где пространственный заряд усиливает электрическое поле. Эти концы растут за счет новых лавин. В отличие от первоначальной лавины, стример распространяется симметрично в обоих направлениях — и к положительной, и к отрицательной пластинам с высоким напряжением. Развитие стримера идет очень быстро, гораздо быстрее, чем вызванное импульсом образование первоначальной лавины. Причиной этого является доминирующая роль фотоионизации. Стримеры образуются одновременно во

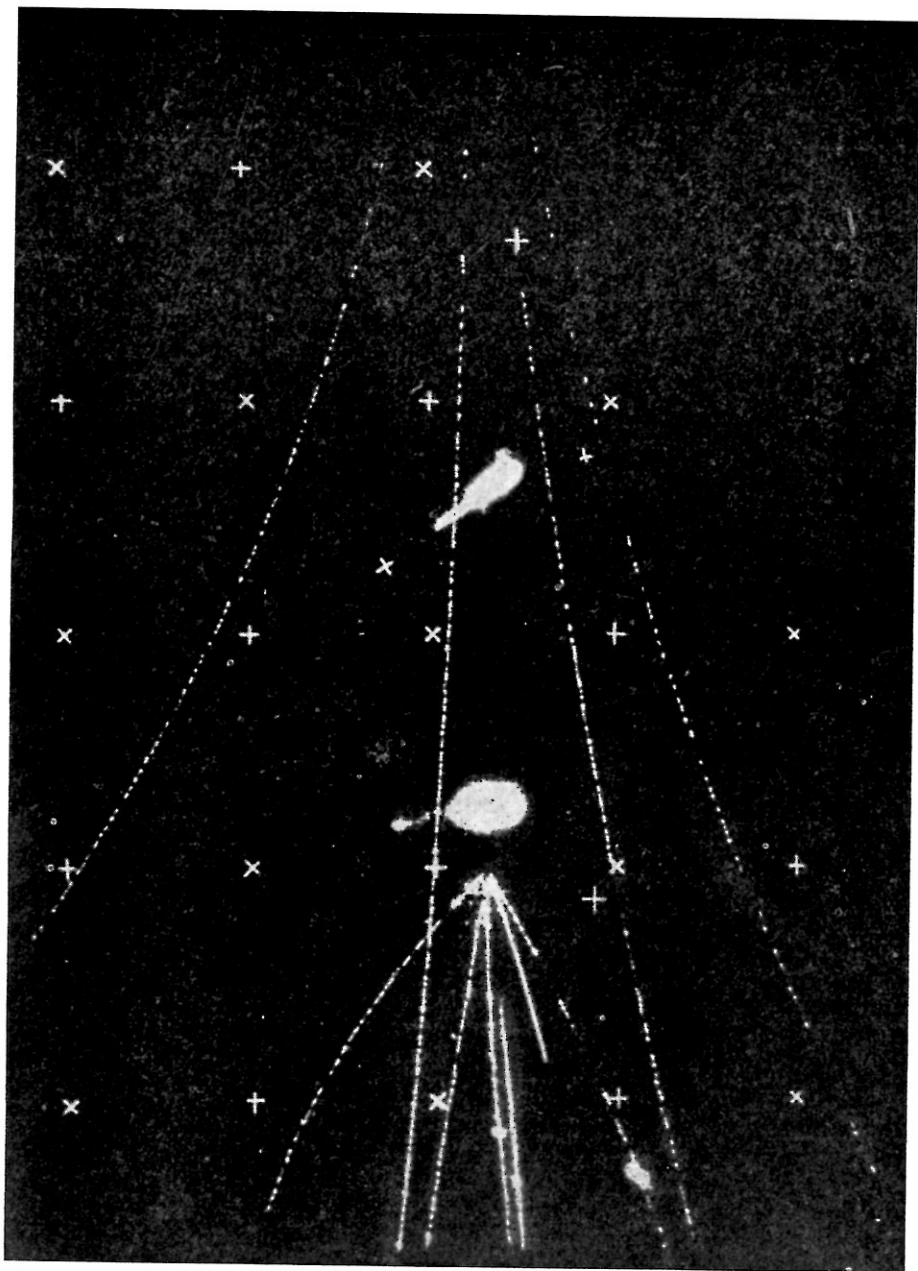


Рис. 10.3. Снимок, сделанный в стримерной камере, похож на снимки камеры Вильсона или пузырьковой. Каждая из точек, образующих след пролетевшей частицы, — это стример, видимый «с конца». Пучок от ускорителя направлен сверху вниз. Пути частиц искривлены магнитным полем, силовые линии которого перпендикулярны плоскости снимка. Четыре длинные кривые трека, идущие сверху вниз, — «фон». Скопление частиц внизу — интересное нас событие. В результате взаимодействия среди прочих была рождена нейтральная Λ -частица. Пройдя небольшое расстояние от места своего рождения, она распалась на две противоположно заряженные частицы.

многих точках вдоль пути частицы. Достигнув определенной длины, они дают достаточно света, чтобы стать видимыми на фотографии.

Теоретические расчеты и эксперименты позволили установить основные требования, необходимые для того, чтобы стримерная камера давала видимые треки частиц. Рабочий объем между пластинами высокого напряжения должен быть заполнен газом, содержащим не слишком много вредных примесей. Наиболее удобна смесь из 90% неона и 10% гелия, обычно используемая в искровых камерах. В камере, наполненной таким газом, с расстоянием между пластинами в 30 см нужно использовать импульсы напряжением в 600000 в. Длительность импульса не должна превышать 10 миллиардных долей секунды. Импульс должен быть подан не позже одной миллионной доли секунды после того, как регистрируемая частица оставила в камере свой ионизационный след.

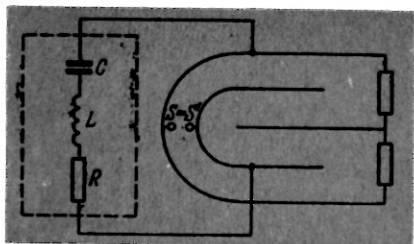


Рис. 10.4. Электрическая схема формирующей импульс цепи Блюмлейна. Генератор Маркса символически представлен здесь заряженным конденсатором C , разряжающимся через индуктивность L и сопротивление R . Накопленное конденсатором напряжение подается на пластины камеры в течение одной-двух миллиардных долей секунды при помощи разрядного промежутка SS' .

Основная техническая трудность заключается в формировании требуемых импульсов. Обычные генераторы, сконструированные для получения высоких напряжений, дают импульсы недостаточно быстро. Поэтому оказалось необходимым разработать специальный тип генератора.

Изобретатели стримерной камеры, группа Чиковани в СССР, усовершенствовали для этой цели хорошо известный генератор Маркса, как правило, применяемый для создания импульсов высокого напряжения. Напряжение этого генератора обычно «строится» последовательным наращиванием, а такой процесс обязательно увеличивает время разряда и, следовательно, длительность импульса. Советские физики смогли укоротить импульс, поместив на выходе генератора специальную емкость, способную накопить 200 000 в. Искровой разряд этой емкости подавался непосредственно на пластины камеры. Чтобы сделать импульс более резким, использовалось шунтирующее устройство. После того как напряжение от генератора Маркса достигало своего пика, это устройство «отводило» от камеры медленно спадающий «хвост».

В Стэнфордском центре линейных ускорителей благодаря усилиям Мартина и Смита была разработана иная система формирования импульса, т. е. его амплитуды и длительности. В их подходе стримерная камера рассматривалась не как конденсатор с широко отстоящими пластинами, а скорее как волновод. Основанием к этому служит то обстоятельство, что длительность импульса, который нужно подать на камеру, меньше того времени, которое нужно радиоволне, чтобы пролететь с одного конца камеры на другой. В свете этого было решено спарить стримерную камеру с системой, формирующей импульс, так чтобы электрические характеристики подводящего «волновода» соответствовали электрическим характеристикам камеры. При этом сам импульс можно считать радиоволной, распространяющейся фактически со скоростью света. Основной недостаток этой схемы состоит в том, что при равных импедансах (эффективных сопротивлениях) подводящего волновода и камеры теряется половина разрядного напряжения. Обойти эту трудность помогла удвояющая напряжение цепь (рис. 10.4), изобретенная английским инженером

Ал. Д. Блюмлейном. Цепь Блюмлейна (ее стали называть просто «Блюмлейн») по существу представляет собой замкнутый сам на себя волновод. Длительность образуемого ею импульса определяется длиной разрядных электродов. Генератор Маркса медленно заряжает их до максимального напряжения, а их разряд через искровой промежуток происходит быстро.

В самой стримерной камере оказалось удобным ввести еще одну, центральную пластину, перегораживающую рабочий объем так, что получается две камеры вместо одной. На центральную пластину подается высокое напряжение, а верхняя и нижние пластины и боковые стенки

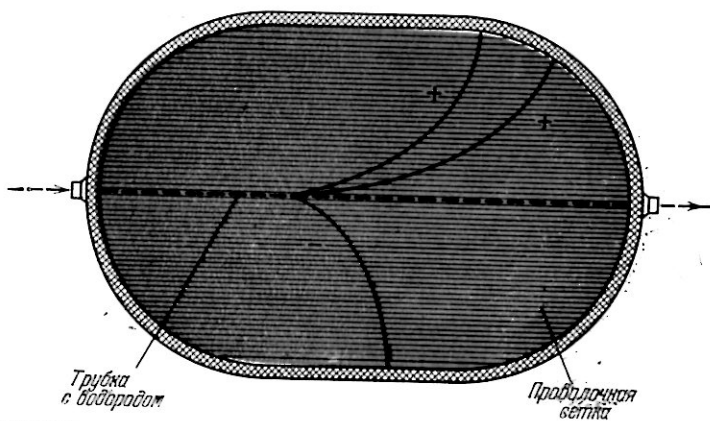


Рис. 10.5. Двухметровая стримерная камера, построенная автором и его сотрудниками в Стэнфордском центре линейных ускорителей. На этом виде сверху мишень — длинная трубка, наполненная газообразным водородом и помещенная на пути пучка из ускорителя (изображенного стрелками). Когда частица пучка взаимодействует с протоном газа, продукты реакции попадают из пучка в камеру; частицы противоположных зарядов отклоняются в противоположных направлениях. Камера заполнена смесью из 90% Ne и 10% He . Пластины сделаны из проволоки, натянутых через каждый сантиметр; это позволяет фотографировать стримерные треки сверху. Имеется три слоя проволочных сеток: верхняя и нижняя играют роль отрицательных полюсов, а центральная, расположенная чуть ниже трубки-мишени — положительного полюса.

заземлены. Такая конструкция позволяет удвоить объем камеры, не удваивая рабочего напряжения. Кроме того, она обеспечивает защиту от опасного излучения, состоящего из мощных радиоволн. «Пластины» можно устроить из тонких металлических струн, протянутых достаточно тесно (в сантиметре друг от друга), чтобы служить «стенками» для радиоволн. Такая проволочная сетка не служит препятствием свету, и события в камере можно фотографировать через нее с тем же успехом, что и через газонепроницаемые окошки из прозрачного пластического материала.

Самая последняя стримерная камера, построенная в Стэнфордском центре, имела рабочий объем в 2,3 м длины, 1,5 м ширины и 60 см высоты (рис. 10.5, рис. 10.6, рис. 10.7). Вырабатывающий импульсы генератор Маркса имел 34 ступени, по 16 конденсаторов в каждой, и был способен давать импульсы в 1,3 миллиона вольт, что примерно в два раза превышает необходимое для запуска камеры напряжение (рис. 10.8, рис. 10.9, рис. 10.10). Для импульсов в 600 000 в пиковый ток составлял около 26 000 а. Окружавший камеру 400-тонный магнит давал поле более чем в 15 000 гс и потреблял мощность около 6 Мвт. Камера должна измерять импульсы высокоэнергетической частицы (энергия — до 10 Гэв) с точностью примерно в 2%, а разрешение по массам для многочастичных событий достигает 0,5%.

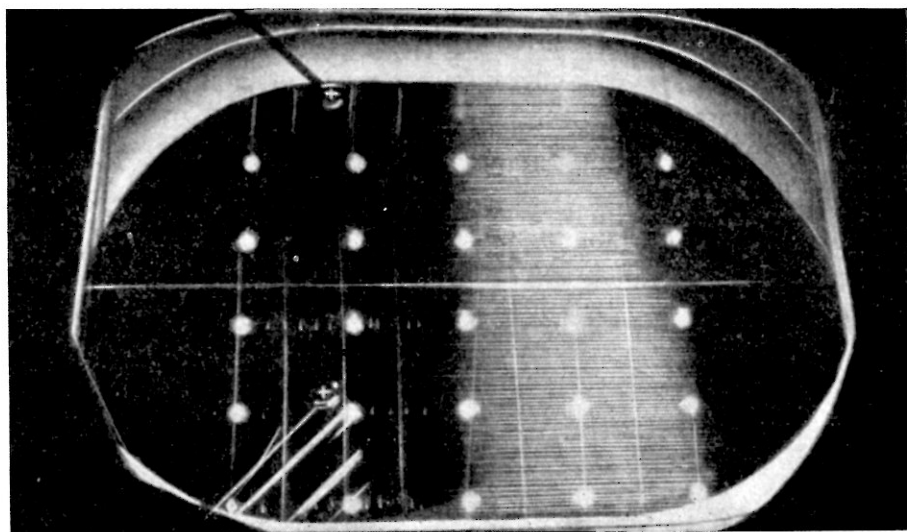


Рис. 10.6. Стримерная камера Центра линейных ускорителей. Фотография сделана сверху через окошко в магните. Яркие пятна — это метки в форме крестов, показанные на рис. 10.3. В центре видна трубка-мишень.

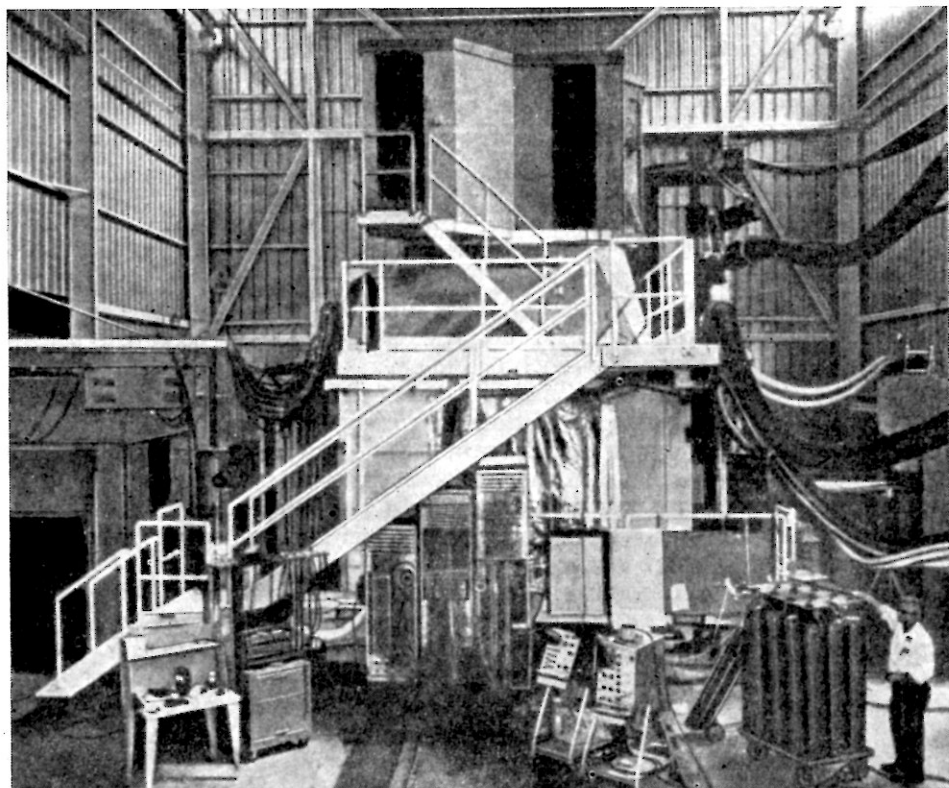


Рис. 10.7. В рабочем положении двухметровая камера заслонена вспомогательным оборудованием. Пучок от ускорителя направляется в камеру по горизонтальной серебряной трубке (вдали справа.) В деревянных сооружениях наверху — фотокамеры.

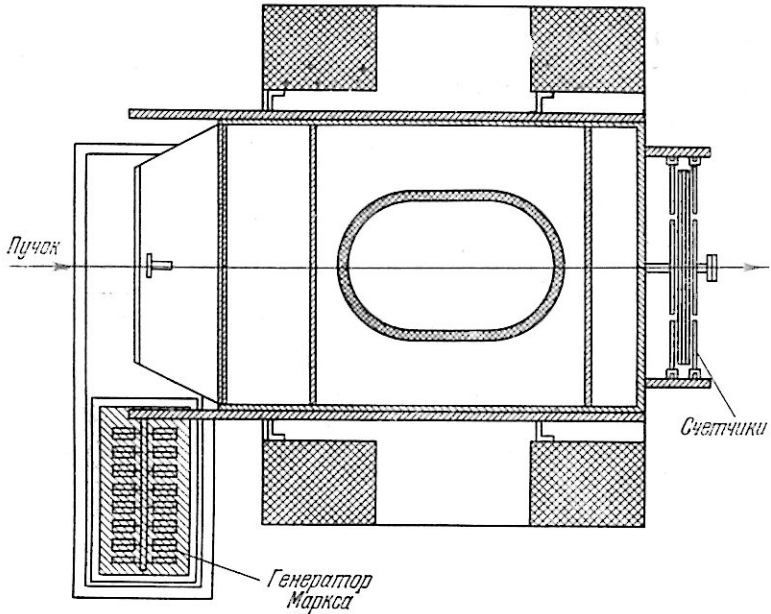


Рис. 10.8. Двухметровая камера со вспомогательным оборудованием (вид сверху). Слева — генератор Маркса, служащий источником высокого напряжения (см. схему на рис. 10.10).

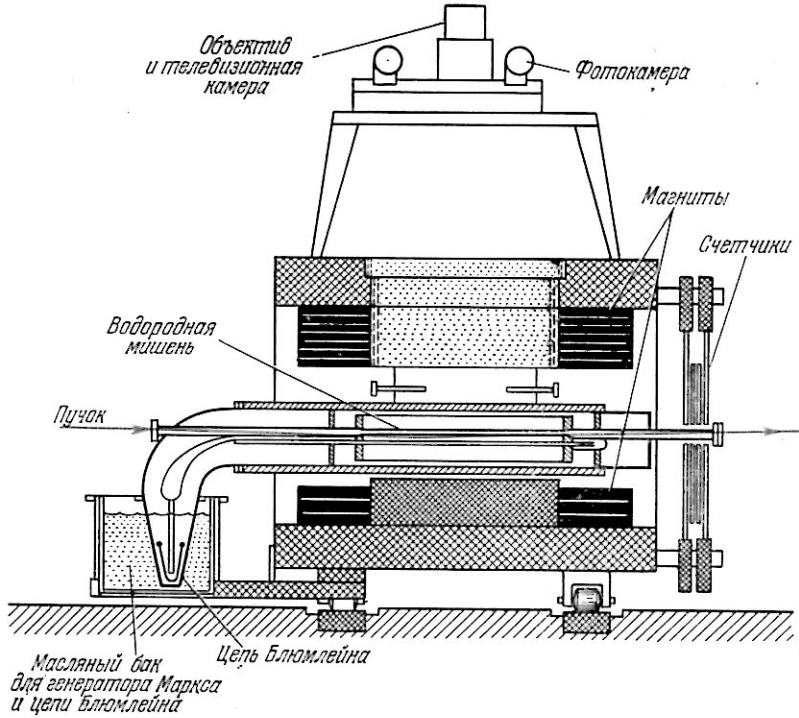


Рис. 10.9. Монтаж камеры и магнитов (вид сбоку). Слева — соединенные генератор Маркса и «Блюмлейн» — цель, формирующая импульс от генератора.

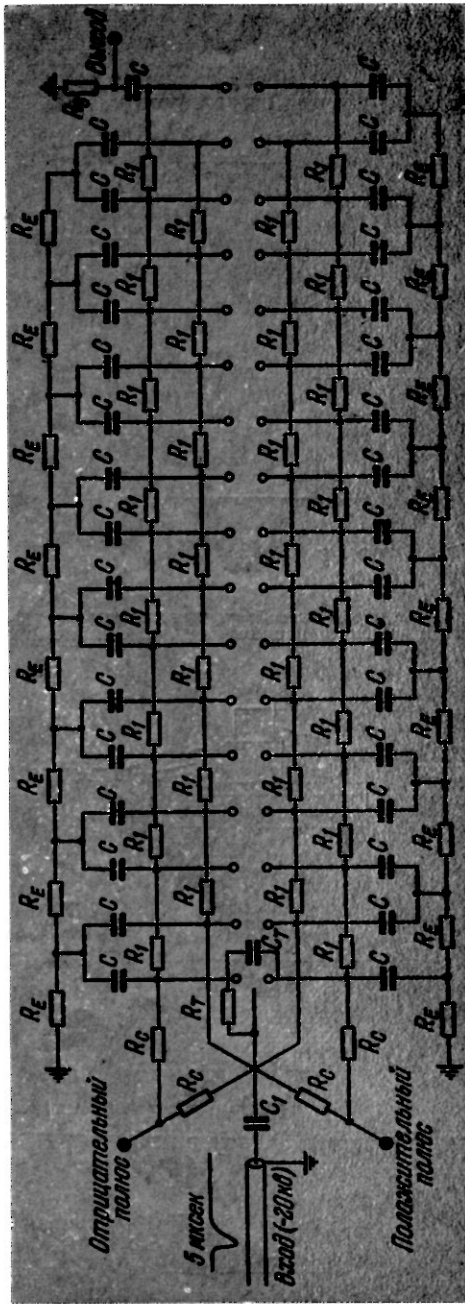


Рис. 10.10. Электрическая схема генератора Маркса. Показано, как соединены 34 ступени его конденсаторов. Бугвенные символы обозначают: C — емкость, R_C — зарядное сопротивление, R_T — сопротивление триггера, R_E — внешнее сопротивление, R_1 — внутреннее сопротивление, R_B — сопротивление заземления, R_I — входная емкость, C_T — емкость разрядника. На вход генератора поступает 20 000 в в импульсе длительностью 0,5 мксек. Когда все емкости одновременно разряжаются через выключен, они подают на стримерную камеру импульсы в 1,3 Ме.

Стримерная камера может работать в режиме нового двухмильного линейного ускорителя, который способен выбрасывать сгустки частиц высокой энергии (до 20 Гэв) с частотой в 360 «залпов» в секунду. Одно из достоинств ускорителя, определяющих его высокую эффективность, заключается в том, что он может «обслуживать» одновременно несколько типов детекторов. Высокочастотный переключатель направляет импульсы пучка попеременно в несколько мест. Таким образом при полном использовании ускорителя можно проводить одновременно несколько различных экспериментов — в стримерной камере, в искровой камере и в пузырьковой камере.

Стримерную камеру можно применять для детектирования частиц, летящих не только от мишени вне камеры, но и от мишени, помещенной в саму камеру. В первых экспериментах, проведенных с этой камерой в Стэнфордском центре, от ускорителя брали пучок фотонов. Сколламированный пучок направлялся в камеру через «соломинку» — трубку диаметром в 12 м.м. В качестве мишени можно было взять практически любой газ и наполнить им «соломинку». Это давало превосходную возможность работать с мишенями, представляющими для физиков огромный интерес: ядрами водорода, дейтерия и различными изотопами гелия. В других экспериментах мишенью прекрасно служил сам газ, заполняющий рабочий объем камеры. Таким целям может служить среди прочих газов чистый гелий или чистый неон.

В Стэнфордском университете небольшая стримерная камера использовалась для изучения рождения «триплетов» — электрона и электрон-позитронной пары — процесса, сопровождавшего столкновения жестких гамма-лучей с атомами неона. В рабочий объем камеры можно помещать и твердые мишени — из непроводящих материалов.

В двухметровой стримерной камере Стэнфордского центра линейных ускорителей недавно было сфотографировано одно интересное событие. При ударе жесткого гамма-кванта о протон в электромагнитном взаимодействии получилась «вилка с пятью зубцами», свидетельствующая о рождении пяти сильно взаимодействующих частиц, после чего в результате слабого взаимодействия произошел двухчастичный распад. Таким образом, в этом одном событии приняли участие все основные типы взаимодействий элементарных частиц.

Весьма удачно, что успешное завершение строительства двухмильного электронного ускорителя сопровождается вводом в действие нового детектора элементарных частиц — детектора, обеспечивающего максимальную эксплуатацию новых уникальных свойств ускорителя.

Ж. К. О'Нейл

НАКОПИТЕЛЬНЫЕ КОЛЬЦА

(НОЯБРЬ 1966 г.)

Новый метод, осуществляющий взаимодействие между частицами, использует тот факт, что при лобовом столкновении двух движущихся объектов высвобождается больше энергии, чем при ударе движущегося объекта о неподвижную мишень.

За 1965 и 1966 гг. были достигнуты первые успехи в применении нового метода проведения экспериментов в физике высоких энергий. С момента, когда этот метод был предложен, он привлекал к себе внимание и был предметом споров. Но даже теперь перспективы его дальнейшего развития, в общем многообещающие, неопределенны в деталях. Метод состоит в том, чтобы обеспечить лобовое столкновение внутриатомных частиц. В противоположность ему, в обычных экспериментах при высоких энергиях ускоренные частицы сталкиваются с покоящимися. Поскольку очень трудно «загнать» частицы в два сталкивающихся пучка, выгода, оправдывающая такие усилия, должна быть достаточно весомой. Выгода — в энергии.

Когда сталкиваются два объекта — два автомобиля, два бильярдных шара, два протона или два любых других объекта, — полная энергия, имеющаяся до столкновения, равна энергии, имеющейся после него. Некоторая часть энергии может обратиться в теплоту, а в случае столкновения между частицами она может перейти в массу покоя согласно соотношению Эйнштейна $E = mc^2$, но полная энергия остается неизменной. Полный импульс системы также сохраняется.

Когда скорости намного меньше, чем скорость света (обозначенной символом c в соотношении Эйнштейна $E = mc^2$), кинетическая энергия объекта массы m равна половине величины mv^2 , где v — скорость объекта. Импульс объекта при тех же условиях равен просто mv . Имея в виду, что полная энергия и полный импульс не меняются при любом столкновении, можно проследить, куда уходит энергия в каждом из двух случаев: при столкновении между движущимся объектом и неподвижной мишенью и при лобовом столкновении между движущимися объектами (рис. 11.1 и рис. 11.2).

Легко понять, что если движущийся объект, скажем, автомобиль, врежется в другой объект той же массы, но покоящийся, то при условии, что после удара они движутся вместе, скорость их равна в точности половине скорости двигавшегося до удара объекта. Но сколько энергии ушло на ломку металла? Ответом будет разность между первоначальной кинетической энергией и конечной, $\frac{1}{4}mv^2$, равная половине кинетической энергии, которой обладал движущийся автомобиль. Это и есть чистая «энергия столкновения». Если бы мы имели дело не с автомобилями,

а с элементарными частицами, такая доля энергии могла бы пойти на рождение новых частиц, в соответствии с уравнением Эйнштейна, описывающим превращение кинетической энергии в массу (энергию) покоя.

Предположим теперь, что два автомобиля, движущихся с равными скоростями, сталкиваются лоб в лоб и в результате остаются неподвижными. Здесь вся первоначально имевшаяся кинетическая энергия (дважды $\frac{1}{2} mv^2$, или просто mv^2) идет на ломку металла. Это в четыре раза больше, чем энергия, высвободившаяся в предыдущем примере.




	До столкновения		После столкновения
	Первый автомобиль	Второй автомобиль	
(Неподвижная мишень)	Двигается вправо 	Неподвижен 	Двигаются вправо с половиной скоростью 
Импульс	$+mv$	0	$(2m)(v/2) = mv$
Кинетическая энергия	$\frac{1}{2}mv^2$	0	$\frac{1}{2}(2m)(v/2)^2 = \frac{1}{4}mv^2$

Рис. 11.1. Столкновение с неподвижной мишенью иллюстрирует ситуацию в обычном ускорителе частиц. Каждый из автомобилей обладает массой m , а один из них движется со скоростью v . Только половина первоначальной энергии движущегося автомобиля $\frac{1}{4} mv^2$ идет на ломку металла.

Вплоть до прошлого года все эксперименты по столкновениям в физике высоких энергий использовали неподвижные мишени. Это не было серьезным недостатком, когда скорости частиц были относительно низки.




	Двигается вправо	Двигается влево	Неподвижны
(Лобовой удар)			
Импульс	$+mv$	$-mv$	0
Кинетическая энергия	$\frac{1}{2}mv^2$	$\frac{1}{2}mv^2$	0

Рис. 11.2. Столкновение двух движущихся объектов представляет ситуацию, которой можно добиться при использовании накопительных колец для электрон-электронных и протон-протонных столкновений. В этом случае на ломку металла идет кинетическая энергия обоих автомобилей, дважды по $\frac{1}{2} mv^2$, или mv^2 . Это в четыре раза больше «энергии столкновения», высвобождаемой в случае неподвижной мишени на предыдущем рисунке.

Однако ускорители, построенные за несколько прошлых лет, могут довести скорости частиц почти до скорости света. При таких скоростях следует применять формулы специальной теории относительности. Они заменяют наши простые выражения для энергии и импульса несколько более сложными. Релятивистские формулы показывают, что при приближении скорости налетающей частицы к скорости света все меньшая и меньшая доля потребляемой энергии переходит в энергию столкновения с неподвижной мишенью. Для наибольших из существующих ускорителей энергия столкновения составляет лишь пятую часть потребляемой энергии, а для наибольших из проектируемых ускорителей она не превышает одной десятой части (рис. 11.3).

В физике высоких энергий энергии обычно выражают в единицах, равных миллиарду электрон-вольт. Эту единицу измерения обозначают

через $Гэв$. Энергия в $1 Гэв$ приблизительно эквивалентна массе одного протона или 2000 электронов. Протон с энергией в $1 Гэв$ движется со скоростью, составляющей примерно 90% скорости света. Скорость же электрона с такой энергией отличается от скорости света лишь на одну десятиллионную часть.

Итак, для обычных ускорителей характерна низкая эффективность в превращении потребляемой энергии в энергию столкновения. Эта серьезная причина вынудила физиков разработать проекты устройств со сталкивающимися пучками. Чтобы воплотить идею в жизнь, прежде всего необходимо решить проблему увеличения интенсивности взаимодействия

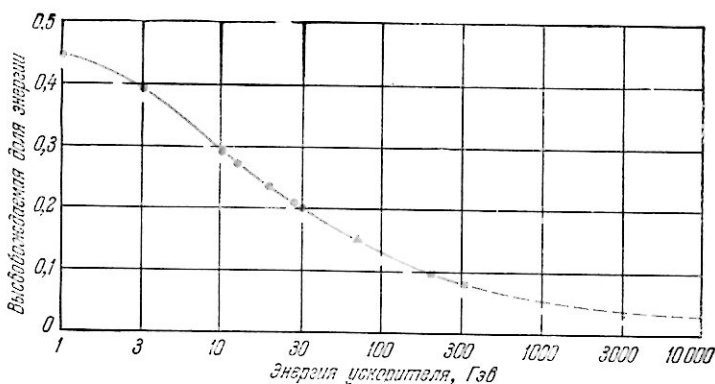


Рис. 11.3. Отношение высвобождаемой энергии столкновения к энергии ускорителя для стационарных протонных мишеней уменьшается с ростом энергии налетающей частицы. На кривой отмечены кружками действующие ускорители, треугольниками — строящиеся, а квадратиками — проектируемые.

между частицами двух пучков до достаточного уровня. Число взаимодействий, происходящих за секунду в данном объеме, пропорционально числу частиц мишени в этом объеме и числу налетающих за секунду частиц. Произведение этих величин называется светимостью. В типичных опытах с неподвижной мишенью, состоящей из жидкого водорода, светимость составляет примерно 10^{27} . При такой светимости произойдет одно взаимодействие в секунду на каждый сантиметр толщины мишени, если считать, что каждая частица при столкновении ведет себя так, как если бы она имела поперечное сечение площадью в 10^{-27} $см^2$.

Если бы два обычных ускорителя «выстрелили» пучками частиц друг в друга, светимость достигла бы лишь величины 10^{18} . Это число в миллиард раз меньше необходимого 10^{27} . Средство заработать необходимый множитель в миллиард состоит в том, чтобы резко увеличить число частиц в каждом пучке и предоставить каждой частице больше шансов провзаимодействовать с партнером противоположного пучка. Обеих целей можно достичь, собирая частицы от многих циклов ускорения и накапливая их в каком-нибудь круговом устройстве, где они могли бы вращаться до тех пор, пока не столкнутся. Эта основная идея теперь представляется очевидной; к ней независимо пришли многие ученые из различных стран, а ее разработка продолжалась более десяти лет.

Насколько я знаю, первый практический проект встречных пучков был предложен норвежским физиком Рольфом Видерое. В 1949 г. он подал заявку на немецкий патент своей идеи. Однако, как писал Видерое в своем письме, «сотрудники патентного бюро сочли интересный энергетический аспект встречных пучков очевидным и вовсе не заслуживающим патента, так что мне пришлось привести некоторые другие аргументы в

пользу моей идеи». Эти дополнительные аргументы носят совершенно второстепенный характер, и нам нет необходимости их касаться. Основное предложение Видерое состояло в том, чтобы накапливать частицы одинакового электрического заряда, заставляя их двигаться в противоположных направлениях по одной круговой орбите. Для получения искривляющей силы, необходимой для удержания частиц на орбите, он предложил использовать электростатическое поле. Однако технически достижимые электростатические силы по своей величине достигают лишь около 1% магнитных. Поэтому для достижения даже умеренной энергии протон-протонное накопительное кольцо, основанное на концепции Видерое, должно иметь огромные размеры. С работой Видерое я познакомился уже после того, как его основная идея претерпела ряд усовершенствований.

В начале пятидесятых годов физикам из Исследовательской ассоциации Среднезападного университета в штате Висконсин (MURA, МЮРА) пришлось в голову, что разработанный ими специальный тип синхротрона годится как для ускорения, так и для накопления частиц. Тем самым они предложили ускоритель, в котором можно заставить сталкиваться встречные пучки большой интенсивности. К сожалению, машина, пригодная одновременно и для ускорения, и для накопления частиц, должна быть слишком громоздкой. Ее стоимость начисто бы стерла экономические преимущества метода встречных пучков, и это было одной из причин, по которым такие машины не строили.

В начале 1956 г. независимо и одновременно были опубликованы три предложения, которые в некотором отношении можно считать усовершенствованием идеи Видерое. Они послужили теоретической и технической основой для реализации идеи. Поразмыслив над предложением МЮРА, я придумал, как сочетать преимущества принципа накопления частиц с относительной простотой проекта обычного ускорителя. Ту же самую идею почти одновременно высказали У. М. Бробек из Калифорнийского университета в Беркли и Дон Лихтенберг, Роджер Ньютон и Марк Росс из МЮРА. Замысел состоял в том, чтобы создать вблизи обычного ускорителя два направляющих поля синхротронного типа. Устройства, создающие эти дополнительные направляющие поля, были названы накопительными кольцами. Они должны были иметь общую прямолинейную секцию — область, свободную от магнитного поля, по которой проходят обе орбиты. Каждое кольцо наполняется путем накопления многих ступков частиц, которые выбрасываются из ускорителя-источника, проводятся по промежуточному участку и вырываются на орбиту кольца. Как обычно в ускорителях, отклоняющая сила создается магнитными полями. Физики из МЮРА теоретически разработали и опробовали на электронах процесс накопления высокоэнергетических частиц. Несколько лет спустя И. Дж. Вудс и я показали, что решение проблемы сталкивающихся пучков посредством накопительных колец в принципе позволяет достигнуть той же светимости, что и предложенный МЮРА ускоритель-накопитель.

Доведение идеи накопительного кольца до практической реализации прежде всего зависело от изобретения специальных быстродействующих магнитов, способных создавать сильные магнитные поля строго определенной конфигурации на время в десятиллионную долю секунды. В 1957 г. В. Коренман и я, работая в Принстонском университете, построили магнит такого типа.

Первое успешное применение принципа встречных пучков в физике высоких энергий было осуществлено в 1956 г. на электронах. Именно они, а не протоны были выбраны для первоначального эксперимента по двум причинам. Во-первых, масса электрона составляет лишь $1/1836$ массы

протона; следовательно, для ускорения электрона до данной скорости необходимо в 1836 раз меньше энергии, чем для ускорения протона. Во-вторых, вращаясь в магнитном поле, электрон излучает энергию в форме видимых или мягких рентгеновских лучей. Потеря энергии в такой форме обеспечивает затухание колебаний, что в значительной мере упрощает процедуру впрыскивания электронов в накопительное кольцо. Эти полезные потери энергии у протонов имели бы место лишь при энергиях в тысячи гигаэлектрон-вольт.

В конце 1956 г. я начал проектировать эксперимент со сталкивающимися электронными пучками в накопительных кольцах. Я поставил

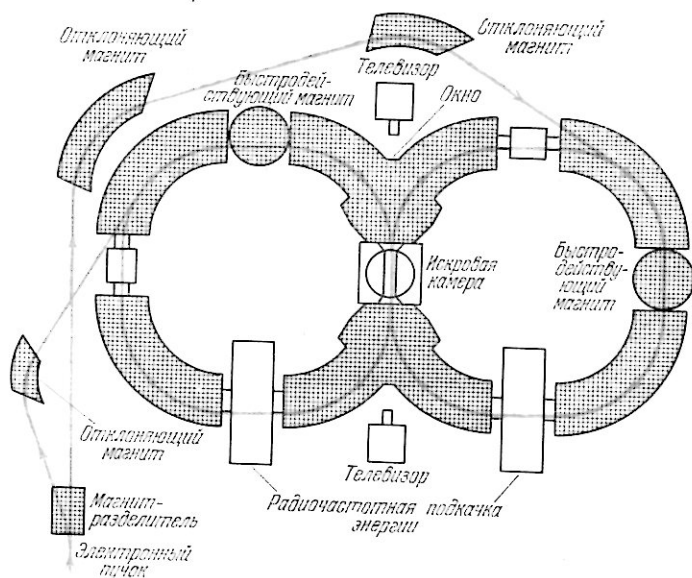


Рис. 11.4. Схема Принстон-Стэнфордских накопительных колец. Показано, как образуются и поддерживаются встречные пучки электронов. Быстродействующие магниты-переключатели необходимы для впрыскивания прилетающих электронных сгустков в ведущее поле каждого кольца. Для возмещения энергии, излучаемой вращающимися электронами, подводится энергия от радиочастотного источника. Каждый вращающийся пучок обладает энергией в $0,56 \text{ Гэв}$.

целью обеспечить столкновение одного электрона с другим при энергии в $0,5 \text{ Гэв}$ у каждого из них. При такой энергии необходимые размеры аппарата должны быть средними, а радиационное затухание сильным. Чтобы провести такой же эксперимент с обычным электронным пучком и неподвижной мишенью, потребовался бы ускоритель на 1000 Гэв , а это было в 1000 раз больше энергии любого из действовавших тогда ускорителей.

Примерно через год после начала разработки проекта со мной начал сотрудничать Вольфганг Пановский из Стэнфордского университета. В следующем году окончательно сформировалось сотрудничество физиков из Принстона и Стэнфорда. В 1959 г. началось строительство пары накопительных колец при Стэнфордском линейном электронном ускорителе на 1 Гэв (рис. 11.4 и рис. 11.5). Я потому выбрал для работы линейный ускоритель, что это автоматически решало часть проблемы — получение интенсивного электронного пучка в коротком импульсе. Довольно трудно вывести хороший пучок из кругового ускорителя, а из линейного он выходит таким, хотите вы этого или нет. Нашими сотрудниками из Стэн-

форда были У. С. Барбер и В. Рихтер, Принстон был представлен Б. Гиттельманом и мною. Мы дружно работали над решением различных проблем, которые одна за другой возникают при освоении новой техники.

В накопительных кольцах на $0,5 \text{ Гэв}$ электроны с максимальной энергией излучают за время каждого оборота около одной стотысячной доли своей энергии. Эта энергия непрерывно возмещается при помощи радиочастотного устройства, подкачивающего ее извне. Этот процесс весьма существен для накопления частиц в кольце нашего типа. Первой

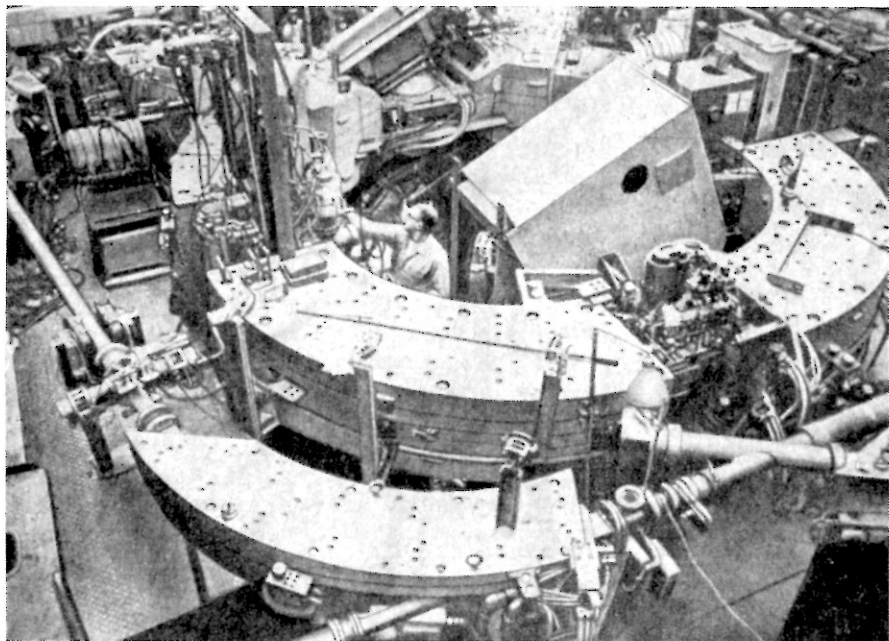


Рис. 11.5. Принстон-Стэнфордские накопительные кольца содержат пучки вращающихся электронов, которые сталкиваются в месте соединения колец (вверху в средней части фотографии). Искровые камеры, помещенные за этой областью, регистрируют трети заряженных частиц, порожденных при столкновении. По трубам в нижней части фотографии впрыскиваемые в кольца электроны переносятся от расположенного неподалеку линейного ускорителя на 1 Гэв .

неприятной неожиданностью для нас оказалось то, что рентгеновские лучи от вращающихся электронов поднимали давление газа в разреженном пространстве кольца до уровня, мешающего работе. Объяснение этому эффекту дал в конце концов Е. Гарвин из Стэнфордского университета. Его причиной является двухступенчатый процесс, в котором рентгеновские лучи выбивают электроны со стенок вакуумной камеры, а электроны в свою очередь высвобождают атомы газа, адсорбированные стенками. Впоследствии М. Бернардини из Итальянской национальной лаборатории во Фраскати и Л. Мальтер из Варианской ассоциации вывели количественные следствия из гипотезы Гарвина. Решением проблемы было увеличение числа вакуумных насосов, обслуживающих накопительное кольцо.

Причина второй неприятной для нас неожиданности была более тонкой. Частицы, вращающиеся в любом синхротроне или накопитель-

ном кольце, удерживаются на их круговых орбитах фокусирующими магнитными силами. Когда возмущение смещает их с орбиты, частицы начинают колебаться около нее. Их движение во многом подобно движению шарика, движущегося внутри чаши (рис. 11.6). У частиц в магнитном поле имеются горизонтальные и вертикальные колебания, каждое с различной частотой. Ни одной из этих частот нельзя позволить стать целым кратным от частоты вращения. Если бы такое резонансное соотношение осуществилось, неизбежные слабые «шероховатости» ведущего поля вызвали бы нарастание одного из колебаний. Оно шло бы до тех пор, пока частицы не врезались бы в вакуумную камеру и были утрачены.

Проектируя опыт на энергию в $0,5 \text{ Гэв}$, я предвидел, что при прохождении двух пучков друг через друга частоты их колебаний приходят в резонанс.

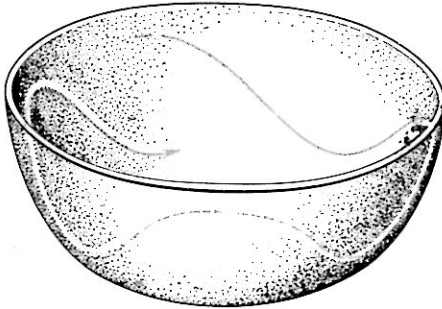


Рис. 11.6. Аналогом вращающейся частицы служит шарик, движущийся внутри чаши. Если только шарик не начал двигаться строго горизонтально, он будет колебаться вверх и вниз во время своего движения. Под действием радиочастотной подкачки электрон в направляющем поле ведет себя подобно шарикку с учетом трения. После завершения каждого оборота электрон испытывает толчок вперед.

По этой причине я включил в проект магнит, обеспечивающий легкие зигзаги в орбитах частиц. Благодаря этому электростатическая сила, действующая со стороны одного пучка на частицы другого, в среднем оказывается нулевой (рис. 11.7).

Вплоть до 1962 г., когда мы начали накапливать электроны в кольцах на $0,5 \text{ Гэв}$ до токов в несколько миллиампер, мы и не подозревали о каких-либо других нестабильностях пучка, способных вызвать трудности. Однако природа недвусмысленно напомнила нам о своей изощренности. Мы обнаружили, что, когда токи достигают нескольких миллиампер в каждом пучке, даже в отсутствие остаточных ионов и при достаточно точной конфигурации ведущего магнитного поля возникают, тем не

менее, вертикальные колебания. Они нарастают до тех пор, пока, после примерно миллиона оборотов, совершаемых за время меньше секунды, пучок полностью не исчезнет. Похожий эффект наблюдался примерно в то же время на протонном ускорителе в Брукхейвенской национальной лаборатории. Через несколько месяцев, за которые было предложено и отвергнуто множество новых теорий, Д. Де-Пак из Военно-морской исследовательской лаборатории обнаружил ключ к разгадке эффекта в работе, сделанной в 1951 г. Дж. Р. Пирсом в лаборатории «Белл телефон компани». В работе Пирса исследовался один экзотический тип микроволновой ускорительной электронной лампы.

Де-Пак смог показать, что наша загадочная нестабильность была вызвана «пробуждением» электрических зарядов и токов, остающихся на стенках вакуумной камеры после прохождения пучка. Раньше они ускользали от внимания, поскольку для их проявления требуется, чтобы стенки были проводниками, но не слишком хорошими проводниками. Существовавшие в то же время теории пренебрегали этой тонкостью. Мы обнаружили, что электростатических сил, обязанных своим происхождением остаточным ионам, достаточно, чтобы «убить» колебания. Поэтому мы сделали вывод, что колебания будут нарастать лишь в направляющем поле необычайно высокого качества, в котором частота колебаний не зависит

от их амплитуды. По предложению Д. Ритсона из Стэнфорда мы добавили магнит, «портящий» конфигурацию поля, и это дало нам возможность работать даже при полном отсутствии ионов.

Когда накопление пошло в обоих кольцах, мы обнаружили, что один пучок иногда «забывает» другой. Этот эффект также был неожиданным, и до сих пор не получил полного объяснения. В марте 1965 г. в Академгородке близ Новосибирска состоялась небольшая конференция, организованная академиком Г. И. Будкером и его коллегами. На ней были высказаны различные идеи, которые должны были помочь в интуитивном понимании более сложных нестабильностей. Эти идеи получили дальнейшее развитие во время летней сессии в Стэнфорде в том же году. Эрнст Д. Курант из Брукхейвена и А. М. Сесслер из Калифорнийского университета в Беркли внесли особый вклад в выяснение природы различных нестабильностей.

К счастью, оказалось возможным найти условия работы, при которых ни одна из нестабильностей не была слишком серьезной. В итоге в начале 1965 г. мы смогли достичь светимости, превышающей минимально необходимую, т. е. 10^{27} . Устройство для детектирования событий столкновения состояло из искровой камеры и счетчиков (рис. 11.8). С их помощью мы сфотографировали около 400 электрон-электронных столкновений при энергии в $0,3 \text{ Гэв}$ у каждого электрона. Недавно мы сделали ряд усовершенствований в аппаратуре и теперь способны работать при энергиях в $0,56 \text{ Гэв}$ у каждой частицы. Это несколько выше, чем первоначально проектировавшаяся энергия. Мы собрали данные, обеспечивающие особенно точную проверку квантовой электродинамики, теории, за которую в 1965 г. С. Томонага, Ю. Швингеру и Р. Фейнману была присуждена Нобелевская премия по физике.

В то время, как мы медленно двигались вперед в работе над интенсивными вращающимися пучками, необходимыми для экспериментов при высоких энергиях, другая исследовательская группа добилась многого в исследовании накопительных колец и быстрее нас достигла некоторых специальных целей. Эту группу составляли итальянские физики, работавшие в Римском университете и в расположенной в нескольких милях от него Национальной лаборатории во Фраскати. В начале 1960 г. они решили построить небольшое накопительное кольцо одновременно для отрицательно и положительно заряженных электронов (собственно электронов и позитронов) с энергией по $0,25 \text{ Гэв}$. Они назвали свою машину «Ада» по первым буквам итальянских слов *anelli d'accumulazione* (в переводе — накопительные кольца). Электроны и позитроны могут вращаться в противоположных направлениях в одном и том же направляющем магнитном поле. Из-за этого и из-за их низкой энергии размеры

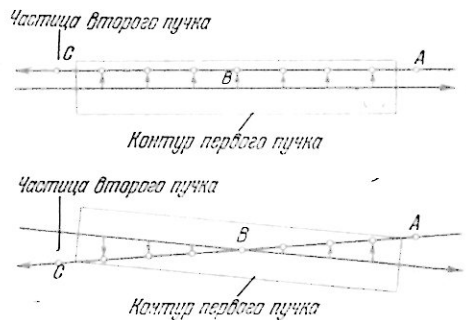


Рис. 11.7. При проектировании накопительных колец необходимо учитывать силы, действующие между пересекающимися пучками. Когда частицы одинакового заряда — электроны или протоны — летят точно навстречу друг другу, электростатические силы, действующие в каждый момент времени, складываются, так что в итоге частица, движущаяся от точки А к точке С, выталкивается вверх (рисунок сверху). Вывод заключается в том, чтобы заставить пучки пересекаться под малым углом (рисунок внизу). В этом случае частица испытывает отталкивание вверх на пути от А к В и компенсирующее отталкивание вниз на пути от В к С, так что средний эффект близок к нулю.

Ада были в четыре раза меньше, чем у нашего устройства. Небольшие размеры и простота позволили быстро запустить аппарат. При этом целью были не реальные эксперименты при высоких энергиях, а изучение самих накопительных колец. Система инжекции Ада была весьма проста, но не давала возможности накапливать интенсивные пучки. Практически все измерения с Ада проводились на электронных токах в 1—2 ма, тогда как на электрон-электронных кольцах в Стэнфорде мы получали токи в 50 ма.

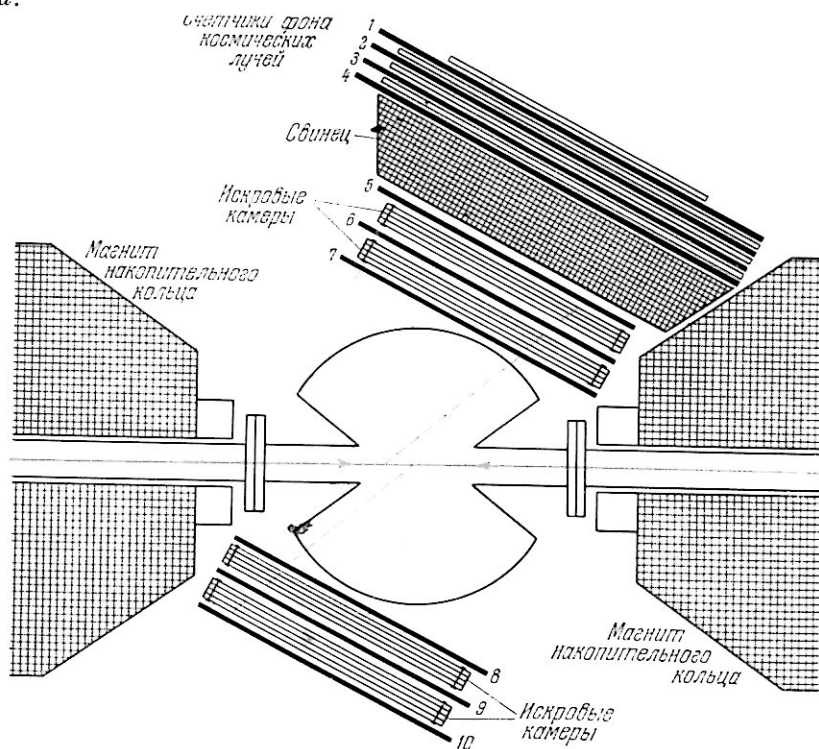


Рис. 11.8. Искровые камеры Принстон-Стэнфордских электронных накопительных колец установлены под таким углом, чтобы зарегистрировать максимальное число треков частиц. Искровой камера запускается лишь в том случае, когда частица с нужными свойствами проходит сквозь систему счетчиков (5, 6, 7, 8, 9, 10). Тогда трек частицы фотографируется. Если же частица, проходящая через искровую камеру, порождена, например, космическими лучами, она запускает другие счетчики (1, 2, 3, 4), предотвращающие запуск камеры.

В конце 1961 г. Ада была оборудована вакуумной камерой сверхвысокого разрежения, и накопленные в ней электроны смогли вращаться по несколько часов. В 1962 г. все кольцо, оставаясь под высоким вакуумом, было перевезено к французскому линейному ускорителю на 1 Гэв в Орсе близ Парижа. Здесь, при наличии более интенсивного впрыскиваемого пучка, обнаружилось, что время жизни вращающихся частиц падает при увеличении интенсивности накопления. Новый эффект был объяснен Бруно Тушеком из исследовательской группы Ада. Он показал, что, когда плотность электронов возрастает до определенной величины, электроны выталкивают друг друга из накопительного кольца, и это косвенно связано с их электростатическим отталкиванием. К счастью, «эффект Тушека» существует лишь для электронных накопительных колец при низких энергиях и весьма слаб при энергиях выше 0,3 Гэв. В конце 1963 г. группа Ада зарегистрировала первые ясные реакции на встречных пучках.

Наблюдаемые события имели высокую вероятность, но не могли дать важную для физики высоких энергий информацию; они просто свидетельствовали о том, что столкновение электронов имело место. Позднее Ада использовалась для систематического исследования формы пучка, а в 1965 г. была демонтирована. На наши электрон-электронные накопительные кольца мы возлагали больше надежд. Несмотря на то, что их строительство было начато на несколько лет раньше, чем Ада, мы зарегистрировали первые реакции на встречных пучках лишь в январе 1964 г., а данные по высоким энергиям начали поступать только в 1965 г. В конце этого же года начали давать информацию и электрон-электронные накопительные кольца на 0,4 Гэв в Новосибирске.

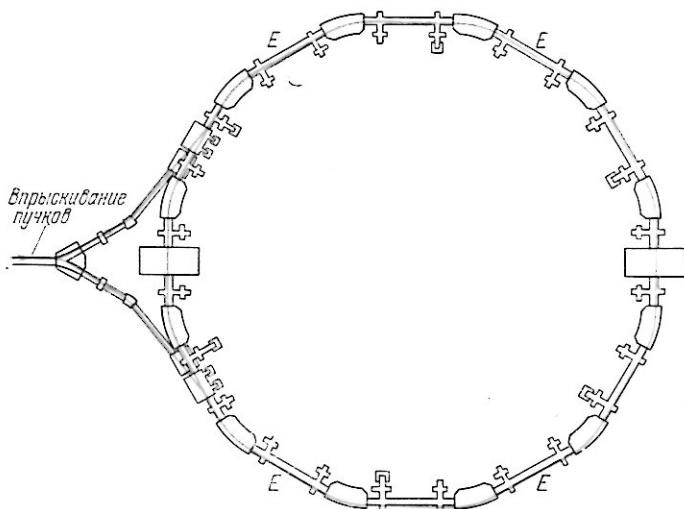


Рис. 11.9. Электрон-позитронное накопительное кольцо «Адопе» Итальянской национальной лаборатории (близ Рима). Энергия частиц в каждом пучке 1,5 Гэв. Кольцо имеет четыре прямые секции (E) для проведения экспериментов.

На электрон-позитронных кольцах можно поставить более широкий круг экспериментов, чем на электрон-электронных. Сейчас мы полагаем, что наше возросшее понимание механизма накопления способно перевесить то обстоятельство, что интенсивность впрыскивания позитронов в кольцо в 1000 раз меньше, чем электронов. Поэтому сейчас проектируется и строится несколько электрон-позитронных колец. В их число входят новые кольца в Орсе, Стэнфорде и Новосибирске, причем энергия в пучке будет повышена с 0,45 до 4 Гэв. Кольцо с пучком на 1,5 Гэв строится во Фраскати (рис. 11.9). Почти решено начать строительство кольца с пучком на 3 Гэв в Стэнфорде. Кольцо на 4 Гэв будет построено в Кембридже (штат Массачусетс) на основе модификации электронного синхротрона, принадлежащего объединенному Гарвардскому и Массачусетскому технологическому институту. В Новосибирске работает кольцо с пучками на 0,38 Гэв и строится другое, на 4 Гэв.

Основной реакцией для колец, накапливающих электроны (e) и позитроны (\bar{e}), является рождение пар частица — античастица по формуле $e + \bar{e} \rightarrow A + \bar{A}$. Здесь A — любая частица, а \bar{A} — ее античастица, массы которых не превосходят энергии частиц в пучке. Почти все частицы, время жизни которых превышает 10^{-20} сек, обладают массами, не превосходящими 1,3 Гэв; то же верно и для многих короткоживущих частиц. Поэ-

тому новое устройство во Фраскати с накопительным кольцом на $1,5 \text{ Гэв}$, названное «Адоне» (по-итальянски — «большая Ада»), даст возможность изучить много реакций. В кольцо «Адоне» будут включены четыре прямолинейные секции, эксперименты в которых можно готовить одновременно, а в двух из них — одновременно проводить. Начало работать электрон-позитронное накопительное кольцо в Орсе, но пока еще в нем не удастся накопить большие позитронные токи. Кольцо в Новосибирске только что начало давать информацию для физики высоких энергий.

В 1956 г., когда возник интерес к методу встречных пучков, основной целью считались протон-протонные накопительные кольца. За прошедшее десятилетие стало ясно, что достичь этой первоначальной цели гораздо труднее, чем построить электрон-электронные накопительные кольца. Было ясно, что продуктивные протон-протонные кольца должны иметь значительные размеры, но со временем всплыли и другие технические трудности.

Протоны, не обладающие способностями электронов к излучению, имеют особое свойство «запоминать» все, что случилось с ними с самого начала процесса ускорения. В частности, начав однажды колебаться, они все время продолжают свои колебания. В первом проекте протонного накопительного кольца я предложил использовать устройство, намеренно вызывающие энергетические потери, надеясь погасить таким образом нежелательные колебания. Впоследствии расчеты на вычислительной машине показали, что потери энергии ни при каких условиях не приведут к нужному результату.

В конце 1956 г. К. Р. Саймон и Сесслер, работавшие тогда в МЮРА, смогли показать, что никакая система, основанная на энергетических потерях, не сможет смоделировать электронное излучение. Только после разработки быстродействующих магнитов (которые могут «вести» протонный пучок без потерь) и дальнейших теоретических исследований стало ясно, что при накоплении протонов можно достичь больших токов.

С 1958 г., когда выяснились окончательно возможности для строительства протонных накопительных колец, реально встал вопрос, как можно использовать встречные пучки протонов. Здесь во многом помогли две новые идеи. Первая была предложена Т. Коллинсом, членом группы, обслуживавшей электронный ускоритель Кембриджского университета. Он нашел способ существенно увеличить длину свободных от магнитного поля прямолинейных секций, пригодных для проведения экспериментов. Второй идеей была новая геометрия пути кружащихся протонов, которая обеспечивает возможность одновременно проводить несколько экспериментов (рис. 11.10). В этом случае кривизны большой и малой окружностей чередуются, так что пучки, идущие в противоположных направлениях, несколько раз пересекают путь друг друга. Идея новой, «концентрической» конструкции обсуждалась на конференции в Женеве в 1959 г., почти в то же время, когда Коллинс выдвинул свое предложение о длинных прямолинейных секциях. Энтузиазм по поводу накопительных колец увеличился благодаря успешной разработке искровых камер для регистрации траекторий заряженных частиц, участвующих в ядерных реакциях *). Хотя искровые камеры оказались полезными в высокоэнергетических

*) См. статью Ж. К. О'Нейла «Искровая камера» в четвертом выпуске этой серии. (Прим. ред.)

экспериментах многих типов, они как бы сделаны на заказ для накопительных колец, подчеркивая их преимущество и мирясь с их недостатками.

С 1960 г., когда с технической точки зрения ситуация достаточно прояснилась, было сделано несколько попыток начать разработку протонных колец. Наиболее последовательной, хорошо организованной и систематической из них была программа ЦЕРНа в Женеве. Эта лаборатория, работающая благодаря объединенным усилиям более двенадцати стран Европы, является убедительным примером успешного международного сотрудничества в науке. Одним из наиболее существенных ее достижений был запуск протонного синхротрона на 28 Гэв в 1959 г., на несколько месяцев раньше срока. Многие из тех физиков и инженеров,

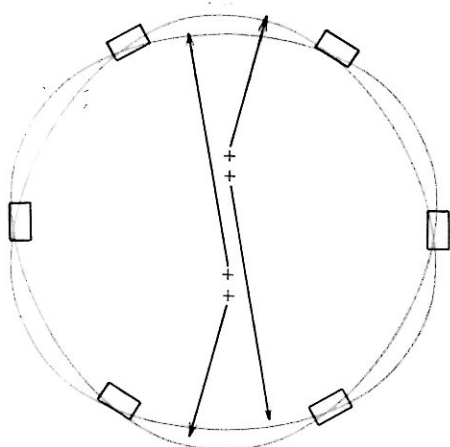


Рис. 11.10. Концентрический вариант накопительного кольца позволяет частицам, вращающимся в противоположных направлениях, несколько раз за каждый оборот пересекать пути друг друга. Это достигается за счет такой конфигурации орбит, при которой участки с малым радиусом чередуются с участками большого радиуса. Эксперименты можно проводить в месте каждого пересечения.

которые работали над проектом ускорителя, объединились в группу под руководством Кьелла Йонсона, начавшую теоретическое изучение накопительных колец. В 1962 г. они остановились на «концентрической» конструкции и провели изучение программы экспериментов. В 1965 г. страны—участники ЦЕРН окончательно одобрили проект пересекающихся накопительных колец. Через год после уточнения деталей проекта было начато строительство колец, окончание которого ожидается в ближайшем будущем.

Рабочие характеристики ЦЕРНовских колец впечатляющи и надолго останутся уникальными. В каждом кольце будут вращаться протоны, отвечающие току в 200 а, и в каждом столкновении будет высвобождаться энергия в 56 Гэв. Хотя стоимость проекта—85 миллионов долларов — и велика, она меньше, чем стоимость последнего из утвержденных основных проектов ускорителей — двухмильного линейного ускорителя в Стэнфорде. Она составляет лишь малую часть 350-миллионной стоимости проектируемого американского протонного синхротрона на 200 Гэв. Обычные синхротроны еще долгие годы вряд ли сравняются по энергии с пересекающимися накопительными кольцами ЦЕРНа, поскольку для этого им необходимо достичь уровня в 1700 Гэв. Синхротрон ЦЕРНа на

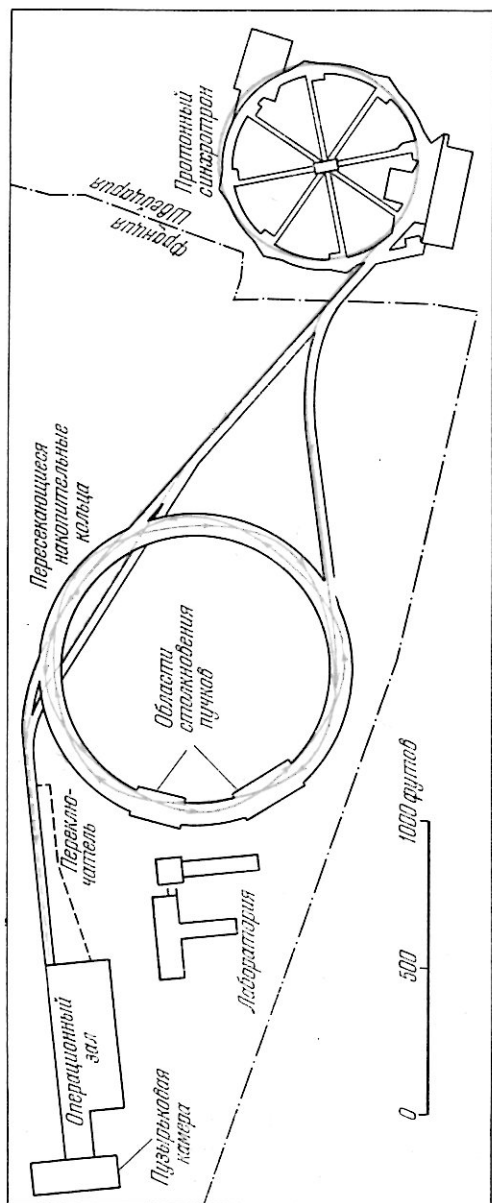


Рис. 11.11. В накопительных кольцах ЦЕРНа (Европейская организация по ядерным исследованиям) будут вращаться протоны, ускоренные уже существующим синхротроном на территории Швейцарии. Концентрические накопительные кольца диаметром в 3,5 м будут построены во Франции. На этой схеме показано, как пересечение-маневратор может либо вырывать протоны в кольца, либо посылать их в операционный зал, где их можно направить на различные неподвижные мишени. Пересекание колец ЦЕРНа должно начать работу в 1971 г.

28 Гэв, который будет поставлять протоны для новых накопительных колец, расположен в Швейцарии, а само кольцо будет находиться во Франции (рис. 11.11).

Совсем недавно остроумный и смелый проект протон-антипротонного накопительного кольца предложил Г. И. Будкер, директор Института ядерной физики в Новосибирске. В этом будет использовано несколько технических трюков, придуманных в Новосибирске. В нем будет применена также техника подавления колебаний антипротонов, которую некоторые из нас рассматривали в Принстоне в 1956 г., но отвергли как слишком сложную для практической реализации в то время.

В противоположность теоретической, практическая сторона проблемы протонных накопительных колец в Соединенных Штатах была менее удачной. В начале 1963 г. подкомитет президентского наблюдательного комитета по науке рекомендовал постройку накопительных колец при Брукхейвенском синхротроне на 31 Гэв, почти как близнец похуже на синхротрон ЦЕРНа. В конце того же года директорат Брукхейвенской лаборатории провел двухмесячное изучение проекта накопительных колец, но специалисты по физике высоких энергий, работавшие тогда в Брукхейвене, не одобрили предложения о начале строительства. Первым их доводом было то, что круг экспериментов, доступных для накопительного кольца, был бы уже, чем для обычного синхротрона. Во-вторых, они считали, что было бы гораздо полезней потратить деньги на усовершенствование существующего ускорителя. В-третьих, если бы в Брукхейвене было построено накопительное кольцо, то весьма туманными стали бы шансы Брукхейвена на выигрыш в конкурсе мест для строительства синхротрона на 200 Гэв. Поэтому сейчас в Соединенных Штатах не ведется активной работы над протон-протонным кольцом, хотя разработки в этом направлении пока являются единственной альтернативой все продолжающемуся увеличению размеров и стоимости обычных ускорителей.

В то время, когда «нынешнее» поколение накопительных колец работает, мне представляется неизбежным дальнейшее развитие этого метода. Одним из направлений развития является накопление нестабильных частиц, другим — усиление полей, необходимое для уменьшения радиуса орбит. Почти все существующие в физике высоких энергий эксперименты по столкновению частиц проводятся с мезонами или стабильными частицами. Мишенью же по необходимости служат стабильные частицы — нуклоны или электроны. Но если в одном кольце накопить электроны, протоны или дейтроны (ядра атомов дейтерия — тяжелого водорода), а в другом — μ -, π - или K -мезоны, то откроется возможность для широкого круга новых экспериментов. При обычных магнитных полях мюоны в кольце живут примерно 400 оборотов, пионы — три оборота, а K -мезоны — пол-оборота. Накопительное кольцо ЦЕРНа можно использовать для мюон-протонных столкновений. Есть все основания считать возможным строительство накопительных колец, использующих сильные магнитные поля. В них можно накапливать интенсивные, концентрированные пучки протонов. Они-то и могут служить мишенью для короткоживущих частиц, испускаемых непосредственно из ускорителя или накопленных в другом кольце с сильным полем и малым радиусом орбиты.

Несколько лет назад в Америке проектировалось большое электрон-позитронное накопительное кольцо, а протон-протонные встречные пучки даже не обсуждались. К счастью, и во Фраскати, и в ЦЕРНе благожелательно относятся к американскому участию в экспериментах на встречных пучках. Это отношение особенно похвально, если вспомнить, что все

эти проекты — чисто европейские, без какого-либо финансового участия Соединенных Штатов.

Для того, кто, подобно мне, желает продолжить работу на встречных пучках, перспективой на ближайшие пять—десять лет является положение пригородного жителя. Проекты накопительных колец, близкие ныне к завершению во Фраскати и ЦЕРНе, открывают дверь в почти неизвестный мир сверхвысоких энергий. Как заметил несколько лет назад один из моих коллег по Принстону, «основной инструмент для исследований в физике высоких энергий — Боинг 707». Я думаю, что он будет прав до тех пор, пока на сумму, которую стоит синхротрон на 200 Гэв, можно купить миллион билетов на трансатлантический рейс *).

*) Все последние годы интенсивно создавались накопительные кольца для протон-протонных и протон-антипротонных встречных пучков все более высокой энергии и интенсивности. Основными центрами их создания и применения по-прежнему остаются Новосибирск, Женева (ЦЕРН), Фраскати и Орсе. На запущенных установках был получен ряд интересных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>В. Д. Баргер, Д. Б. Клайн</i> , Рассеяние при высоких энергиях	3
2. <i>Г. В. Кендалл, В. К. Г. Пановский</i> , Структура протона и нейтрона	19
3. <i>Фр. В. Мэрфи, Д. Е. Йант</i> , Фотоны как адроны	37
4. <i>В. В. Юз</i> , Атом мюония	52
5. <i>Ол. Е. Оверсет</i> , Обратимо ли время? Что говорит опыт?	64
6. <i>К. В. Форд</i> , Магнитные монополи	78
7. <i>Дж. Фейнберг</i> , Частицы, движущиеся быстрее света	90
8. <i>Фр. Райнес, Дж. П. Ф. Селион</i> , Нейтрино, рожденные в атмосфере и за ее пределами	104
9. <i>Дж. Шапиро</i> , Поляризованные мишени для ускорителей	120
10. <i>Д. Йант</i> , Стримерная камера	139
11. <i>Ж. К. О'Нейл</i> , Накопительные кольца	152

Над чем думают физики
выпуск 9

Элементарные частицы

М., 1973 г., 168 стр., с илл.

Редактор *Д. А. Миртова*

Техн. редактор *И. Ш. Аксельрод*

Корректоры *З. В. Азмонцева, Н. Д. Дорохова*

Сдано в набор 20 XI 1972 г. Подписано к печати 15/III
1973 г. Бумага 70×108^{1/8}. Физ. печ. л. 10,5. Услови.
печ. л. 14,7. Уч.-изд. л. 14,47. Тираж 50 000 экз.
Цена книги 72 коп. Заказ № 1448

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

2-я типография изд-ва «Наука»
Москва, Шубинский пер., д. 10

Настоящий сборник научно-популярных статей является девятым выпуском неперодической серии сборников под общим названием «Над чем думают физики». Каждый сборник этой серии посвящается какому-либо важному разделу современной физики. Поскольку статьи написаны крупными учеными, сборники особенно интересны тем, что читатели могут «из первых рук» узнать о самых последних достижениях науки, о пока неподтвержденных, но весьма интересных гипотезах, наконец, о том, как делаются сами научные открытия.

В данный сборник включены статьи по различным проблемам физики элементарных частиц, опубликованные в американском научно-популярном журнале «Scientific American». Первую группу образуют статьи общетеоретического плана, посвященные современным идеям о структуре и фундаментальных взаимодействиях элементарных частиц. Вторая группа статей содержит работы, в которых описываются различные гипотетические частицы, нередко с «фантастическими» свойствами, как-то: магнитные монополи, тахионы и т. п. Наконец, в последнюю группу отнесены статьи о различных экспериментальных методах физики элементарных частиц, которая продолжает оставаться передним краем современной науки.