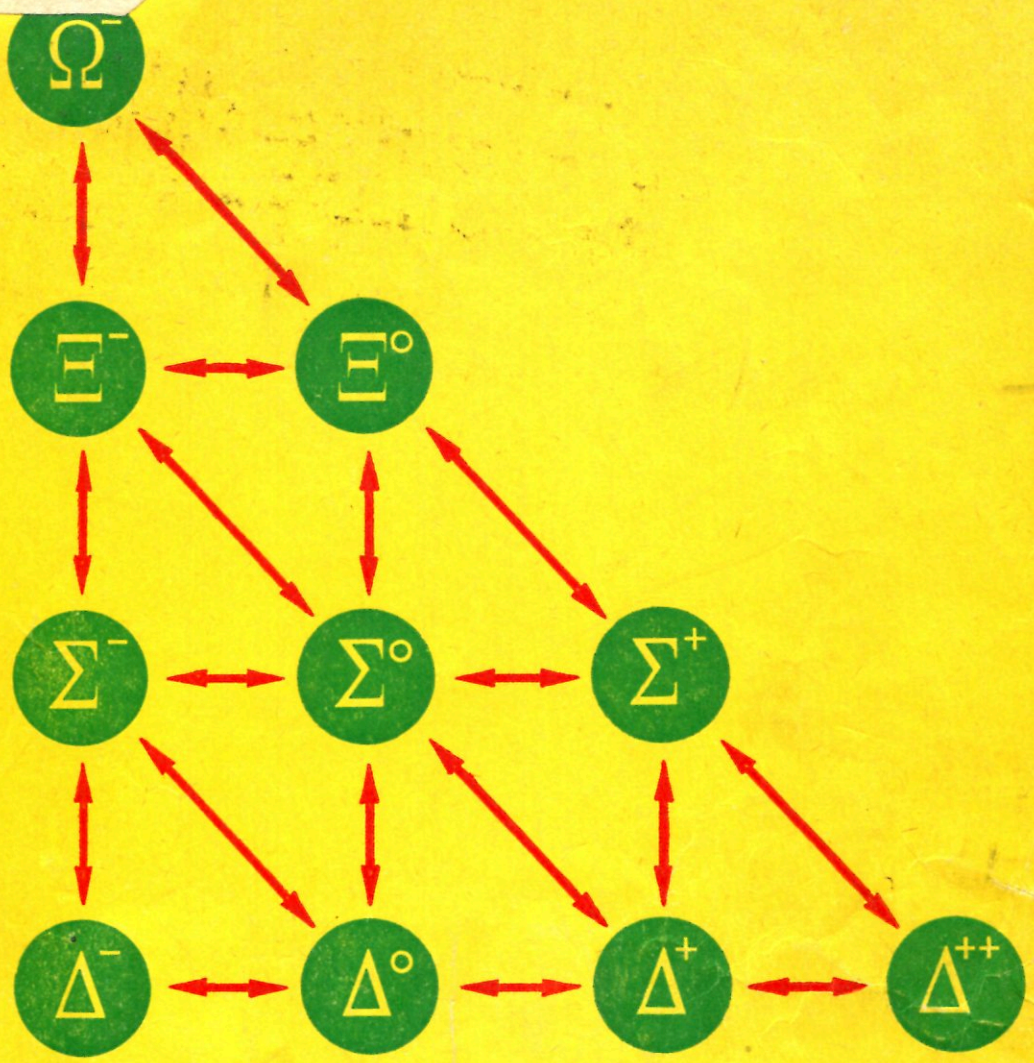


СЗ46
Э-456

01101/2

НАД ЧЕМ ДУМАЮТ ФИЗИКИ



ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ



00
НАД ЧЕМ ДУМАЮТ ФИЗИКИ

ВЫПУСК 3

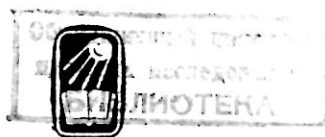
С 346
Э-456

62355

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Перевод с английского
М. К. ПОЛИВАНОВА, Б. М. СТЕПАНОВА
и В. А. БЕЛОКОНЯ

Под редакцией
Б. В. МЕДВЕДЕВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1965

АННОТАЦИЯ

Книга является сборником переводов статей из американского научно-популярного журнала «Scientific American», посвященных одной из наиболее интересных и бурно развивающихся областей современной физики — физике элементарных частиц.

Статьи написаны крупными учеными, активно работающими в этой области. Уровень этих статей, написанных живо и увлекательно, в основном доступен читателям со средним образованием. Цель сборника — познакомить широкие круги советских читателей с самыми интересными проблемами, которыми сейчас занимаются физики.

Над чем думают физики,

выпуск 3

Элементарные частицы

М., 1965 г., 140 стр. с илл.

Редакторы: *И. Г. Вирко* и *В. Б. Орлов*

Техн. редактор *К. Ф. Грудно*

Корректор *Т. С. Писарева*

Сдано в набор 6/VIII 1965 г. Подписано к печати 18/XII 1965 г. Бумага 70×108/16. Физ. печ. л. 8,75 + 2 вкл. Условн. печ. л. 12,78. Уч.-изд. л. 11,98. Тираж 44 000 экз. Цена 43 коп.

Заказ № 2885.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова
Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР
Москва, Ж-54, Валуевая, 28.

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Эта книга является третьим выпуском неперIODической серии сборников научно-популярных статей, выходящих под общим названием «Над чем думают физики».

В сборник включены статьи по различным проблемам физики элементарных частиц, опубликованные в американском научно-популярном журнале «Scientific American». Все статьи написаны широко известными учеными.

Сборник открывает статья, рассказывающая о той проверке, которой подверглись в последнее время классические законы сохранения, считавшиеся ранее неизменными. В статьях Треймана и Чу, Гелл-Манна, Розенфельда даются новые сведения о слабом и сильном взаимодействиях. Со статьёй последних трех авторов перекликается статья Хилла «Резонансные частицы». О привлеченном за последнее время пристальное внимание мюоне и одной из самых интересных частиц — нейтринно рассказывается в статьях Пенмана и Ледермана. Знаменитому следствию специальной теории относительности Эйнштейна посвящена статья Бронковского «Парадокс часов». Завершается сборник обзорной статьёй известного теоретика Дирака — размышлениями о будущем существующих сейчас физических теорий элементарных частиц.

Вследствие бурного развития этой области физики некоторые положения в отдельных статьях оказываются устаревшими. В этих случаях (там, где это особенно существенно) делаются соответствующие примечания.

Статьи «Двухнейтринный эксперимент» и «Парадокс часов» переведены Б. М. Степановым, статья «Эволюция физической картины природы» — В. А. Белоконем, остальные пять статей переведены М. К. Поливановым.

Джеральд Фейнберг и Морис Голдхабер

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ФИЗИКЕ

(ОКТАБРЬ 1963 г.)

Современная физика в сильной степени основывается на классических законах постоянства некоторых величин, таких, как, например, электрический заряд. Однако, когда физика завоевывает новые области, приходится заново проверять, выполняются ли эти законы.

Философ Гераклит учил, что ничто не постоянно, что все непрерывно течет и изменяется. Конечно, не может быть сомнений в том, что за некоторое время предметы вокруг нас меняют свою форму или положение. Как именно происходят эти изменения, это описывается определенными законами физики. Однако человеческий разум всегда старался найти под внешним покровом изменяющихся свойств физических объектов такие свойства, которые не меняются, и в ходе развития физики эти поиски были блестяще вознаграждены открытием законов сохранения. Закон сохранения утверждает, что значение некоторой величины, например энергии или электрического заряда, не изменяется со временем. Само название напоминает нам, что, хотя конкретная форма, в которой такая величина появляется, и может изменяться, некоторая ее сущность сохраняется.

Доверие физики к принципам сохранения основывается на долгом и не знающем исключений опыте. Законы сохранения энергии, импульса и электрического заряда оказывались выполненными (с точностью до ошибок измерения) каждый раз, когда они проверялись. Тщательно возведенное здание физической теории было построено на основе этих фундаментальных представлений, и ее предсказания никогда не обманывали наших ожиданий. Поэтому возникла тенденция забыть то обстоятельство, что законы сохранения опираются, в конце концов, на опыт и что возможность их крушения при распространении на новую область физических явлений всегда остается открытой.

Современные исследования элементарных частиц, из которых построено вещество, не один раз приводили к подобным крушениям. Оказывается, что частицы обладают рядом свойств, которые сохраняются только приближенно, т. е. что «законы» сохранения для подобных свойств выполняются в одной шкале времени, но перестают быть справедливыми для больших времен.

«Естественное» время взаимодействия элементарных частиц составляет примерно 10^{-23} сек, и эта величина определяет масштаб времени «сильных» взаимодействий, которые связывают пионы (пи-мезоны) и нуклоны (протоны и нейтроны) и ответственны за силы, действующие между частицами в ядре атома. Существует другой класс процессов с элементарными частицами, который называется «слабыми» взаимодействиями (наиболее известным из них является бета-распад — радиоактивный распад,

в ходе которого испускаются электрон и нейтрино). Чтобы мог произойти «слабый» процесс, требуется по меньшей мере 10^{-10} сек, т. е. время, необычайно длинное в масштабе сильных взаимодействий.

Один из законов сохранения, который, как оказалось, выполняется лишь приближенно, — это сохранение «странности» — свойства, связанного с так называемыми странными частицами, к которым относятся, например, лямбда-, сигма- и *K*-частицы. Было найдено, что полная странность, которая получается сложением странностей всех отдельных частиц, не меняется в сильных взаимодействиях, но не должна сохраняться в слабых *).

Такой конфуз с законом сохранения подействовал несколько обескураживающе, но не оказался для физиков слишком большим сюрпризом, поскольку исключение было открыто тогда же, когда был открыт и сам закон. Однако вскоре после этого физики были поражены крушением закона сохранения, который уже успел заслужить себе прочную репутацию.

Этим драматическим событием было ниспровержение сохранения четности, выяснившееся в результате обсуждения вопросов, поднятых в 1956 г. Ли и Янгом. Речь шла опять о законе сохранения, который выдержал все испытания в одной области (сильных взаимодействий), но полностью отказал служить в другой (для слабых взаимодействий). Созданное положение взволновало физиков и заставило их задуматься о смысле некоторых из их основных допущений. Падение четности послужило, наряду с некоторыми другими вещами, знаменательным напоминанием, что никакое научное допущение, даже и надежно установленные законы сохранения, нельзя считать гарантированно сохраняющимся в таком круге явлений, для которых оно не было испытано. Это напоминание побудило многих физиков к строгому испытанию всех законов сохранения — и старых, и новых — в области физики элементарных частиц. В этой статье мы хотим рассказать о результатах этих недавних испытаний.

Чтобы проверить, выполняется ли закон сохранения, в принципе достаточно измерить сохраняющуюся величину в два различных момента времени. По некоторым причинам элементарные частицы годятся для гораздо более точной проверки законов сохранения, чем то позволяют сделать тела обычных или астрономических размеров. Прежде всего, изучаемая система должна быть изолированной — в том смысле, что к ней ничего не должно прибавляться снаружи и ничего не должно уходить вовне для той величины, сохранение которой проверяется. Тело больших размеров нелегко изолировать от всех внешних влияний — так, например, Земля все время бомбардируется заряженными частицами и на нее действуют силы тяготения со стороны других небесных тел. Систему же из элементарных частиц изолировать гораздо легче; зачастую она изолирует себя сама уже за счет необычайной быстроты, с которой протекают в ней взаимодействия, совершающиеся прежде, чем что бы то ни было успеет произойти вокруг. Во-вторых, более вероятно, что любое нарушение закона сохранения проявится для фундаментальной частицы, чем для макроскопического тела, где присутствие громадного числа атомов легко может замаскировать небольшое отступление. И, наконец, в-третьих, выполняя сверхточные измерения для реакций с элементарными частицами, мы во многих случаях можем дать количественную оценку того, с какой точностью мы знаем, что закон сохранения удовлетворяется.

*) «Над чем думают физики», вып. 2, «Элементарные частицы», Физматгиз, 1963, статья М. Гелл-Манна и П. Е. Розенбаума.

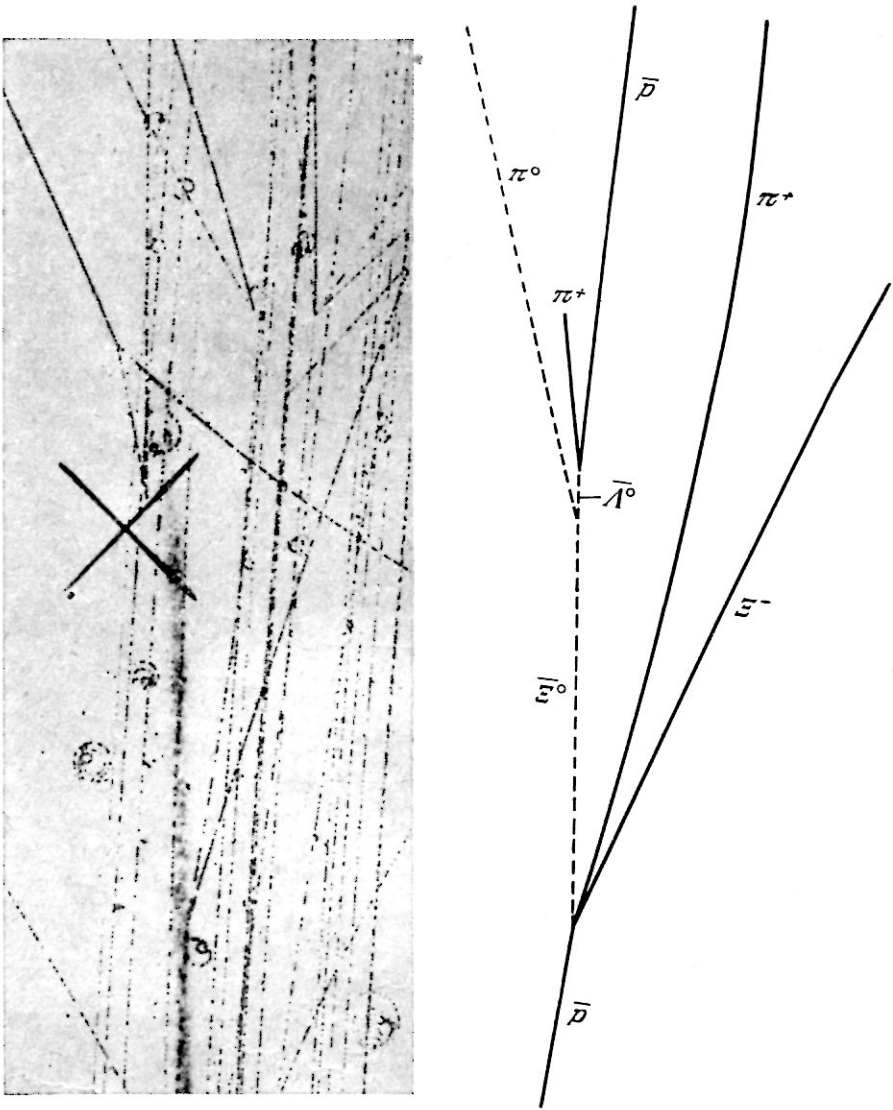


Рис. 1.1. Новая частица — анти-кси-нуль — была открыта недавно, когда в пузырьковой камере было сфотографировано событие, в котором, казалось бы, нарушается закон сохранения импульса. Последовательность событий объясняется на схеме справа. Антипротонный (\bar{p}) трек появляется, как видно, из-за нижнего края фотографии. После соударения протона с антипротоном трек разветвляется, давая начало трекам ксиминос (Ξ^-), положительного пиона (π^+) и анти-кси-нуль ($\bar{\Xi}^0$). Существование анти-кси-нуль-частицы, которая не оставляет трека, было доказано, когда физики проанализировали продукты последовательных распадов в верхнем левом углу: нейтральный пион (π^0) и анти-лямбда-нуль-частицу ($\bar{\Lambda}^0$), которая в свою очередь распадается на антипротон и положительный пион.

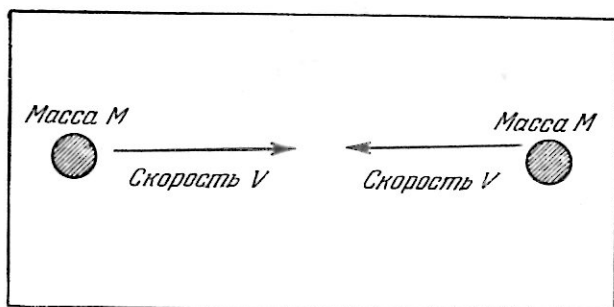


Рис. 1.2. До столкновения двух элементарных частиц с равными массами (M), двигавшихся навстречу друг другу с равными скоростями (V), полный импульс равнялся нулю. Длины стрелок на рисунке пропорциональны скоростям.

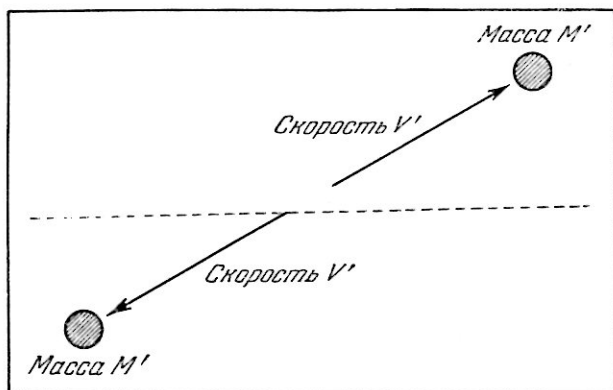


Рис. 1.3. После столкновения частиц их массы, скорости и направления движения могут измениться, но частицы обязательно отскакивают в противоположных направлениях. Направление первоначального движения изображено цветной линией.

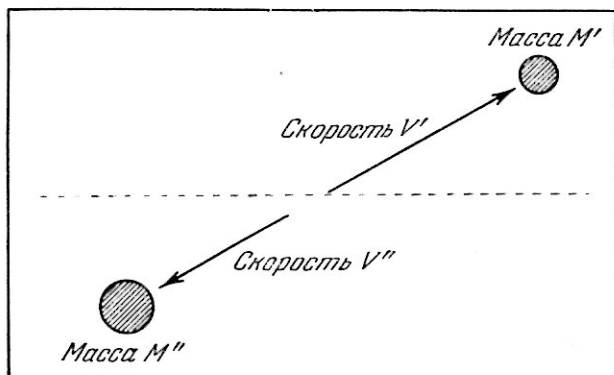


Рис. 1.4. Неравенство масс разлетающихся частиц (M' и M'') ведет к тому, что скорости разлета (V' и V'') тоже не будут равными. Для медленных частиц отношение скоростей обратно отношению масс.

Начнем с проверки закона сохранения импульса — обычного импульса, который в школьном курсе часто называют количеством движения. Наиболее удобным экспериментом для этой цели является соударение (т. е. взаимодействие) двух частиц. Закон сохранения импульса утверждает, что полный импульс обеих частиц после соударения будет в точности равняться их импульсу до столкновения.

Рассмотрим лобовое соударение двух частиц, обладающих равными массами и двигающихся с равными скоростями. Импульс каждой частицы равен ее массе, умноженной на скорость. Поэтому импульсы обеих частиц равны, и, поскольку они противоположно направлены, то суммарный импульс двух частиц равен нулю (рис. 1.2—1.4). Если закон сохранения выполняется, то полный импульс после столкновения должен опять равняться нулю, и обе частицы должны разлетаться с равными и противоположно направленными импульсами. Столкновение может преобразовать одну из них или обе эти частицы — и опять сохранение импульса не будет нарушено, если только произведение массы на скорость для одной частицы будет равно произведению

массы на скорость для другой.

Таково содержание закона сохранения импульса. Надо подчеркнуть, что этот принцип ничего не говорит нам о скоростях отдельных частиц после соударения по сравнению с их скоростями до удара. Так, например, если бы те же самые частицы, которые первоначально сталкивались, разлетелись бы с гораздо большей скоростью, чем та, которая была у них вначале, это не нарушило бы закона сохранения импульса. На самом деле, однако, этого не происходит из-за еще более знаменитого закона — закона сохранения энергии.

Чтобы описывать такие реакции между элементарными частицами, в которых массы частиц могут меняться, нужно обращаться к закону сохранения энергии в его новейшей формулировке, включающей в полную энергию также и «энергию покоя» частиц, которая определяется прославленным уравнением Эйнштейна $E=mc^2$, где E — это энергия покоя, m — масса покоя частицы, а c^2 — квадрат скорости света. У различных частиц будут, вообще говоря, разные массы покоя, а значит, и разные энергии покоя. Полная энергия частицы складывается из ее энергии покоя и кинетической энергии движения, причем последняя — это положительная величина, тоже пропорциональная массе покоя и возрастающая

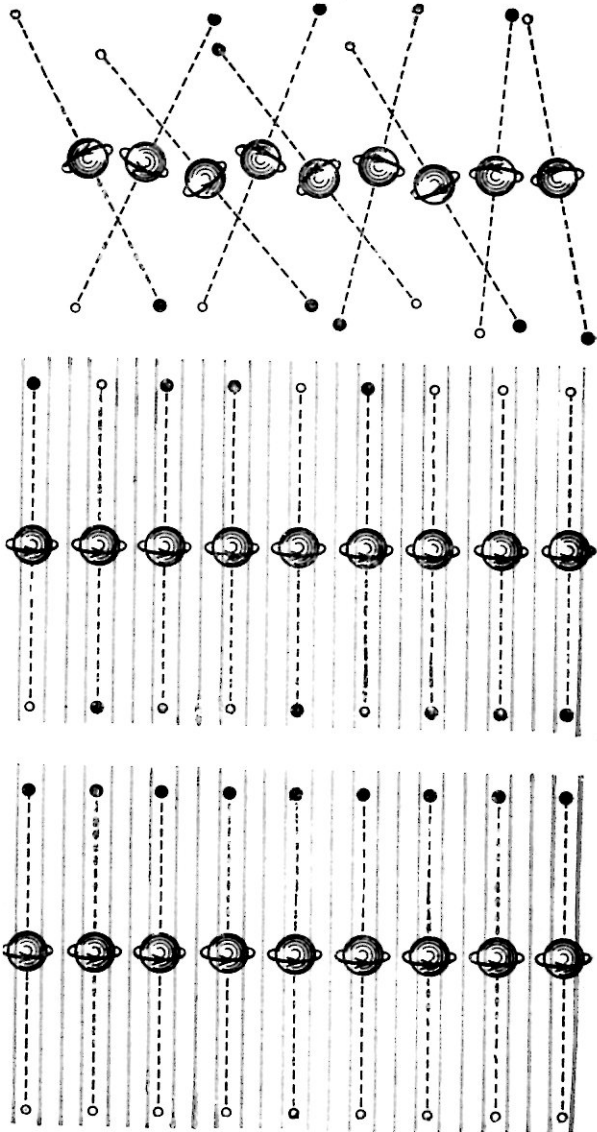


Рис. 1.5. Опыт, выясняющий несохранение четности, изображен здесь в схематическом виде. Вращающиеся шарики наверху изображают радиоактивные ядра в пленке кобальта-60. В процессе распада они испускают бета-частицы (черные кружочки) и нейтрино (белые кружочки). Ниже изображена гипотетическая картина того, как происходил бы распад, если бы ядра были помещены в магнитное поле (вертикальные линии). При этом сохранение четности вело бы к тому, что частицы испускались бы в направлениях, не зависящих от спина (стрелки). Однако на самом деле в опыте, предложенном Янгом и Ли, когда кобальт-60 был помещен в магнитное поле, направление, в котором испускались бета-частицы, оказалось функцией спина, что видно из нижнего рисунка.

вместе с ростом скорости частицы. Для малых скоростей кинетическая энергия пропорциональна квадрату скорости, а когда скорость частицы приближается к скорости света, возрастает и масса, что приводит к видоизменению формулы для энергии.

Закон сохранения энергии утверждает теперь, что при любых взаимодействиях между частицами полная энергия всех частиц не изменяется. Можно сделать определенные предсказания, комбинируя законы сохранения энергии и импульса. Так, если при соударении частиц с равными и противоположными импульсами род частиц не меняется в процессе взаимодействия, то должны остаться неизменными и их скорости. Если частицы превращаются в другие частицы с различными массами, то скорости этих вылетающих частиц должны отличаться от первоначальных скоростей совершенно определенным образом.

Тысячи лабораторных экспериментов, ставившихся самыми различными путями, экспериментов, в которых измерялись все входящие в соотношения величины, убедили нас, что законы сохранения энергии и импульса сохраняют свою справедливость в мире элементарных частиц. Они подтвердили выражение для энергетического эквивалента массы покоя. Некоторые из этих опытов позволили проверить выполнение законов с очень высокой степенью точности.

Положение вещей очень ясно иллюстрируется на примере соударения частицы со своей античастицей. При таком столкновении частица и античастица уничтожают друг друга и превращаются в фотоны или иные частицы, вылетающие с высокой энергией. Так, встреча, скажем, электрона и его античастицы — позитрона создает менее чем за 10^{-10} сек два высокоэнергичных фотона — два гамма-кванта. Когда встречаются протон и антипротон, то происходит взрыв, в котором рождаются разлетающиеся во все стороны пионы и другие частицы.

В этих процессах аннигиляции частица (электрон или протон), по существу, находится в покое, а античастица часто бывает замедленной почти до состояния покоя электрическими взаимодействиями с атомами окружающей материи. Поэтому полный импульс системы частица — античастица близок к нулю. Сохранение импульса означает тогда, что импульсы всех вылетающих частиц должны скомпенсироваться и дать в сумме, опять нуль. Энергии же покоя частицы и античастицы преобразуются в полную — кинетическая плюс энергия покоя — энергию всех продуктов аннигиляции. Поэтому результат измерения этой энергии должен оказаться в согласии с первоначальной энергией покоя.

Вообще говоря, результаты таких опытов подтверждают сохранение энергии и импульса, однако точность измерений всегда ограничена. В случае электрон-позитронного взаимодействия электрон никогда не находится в полном покое, так что трудно убедиться в том, что электрон и позитрон, когда они сталкиваются, действительно имеют полный импульс, строго равный нулю. В случае взаимодействия протона с антипротоном импульсы появляющихся в результате столкновения пионов нельзя измерить с точностью, много лучшей, чем 0,1%. Так или иначе, точность измерений в опытах по аннигиляции оказывается ограниченной по порядку величины интервалом от 1/1000 до 1/10000.

Есть, однако, опыты другого типа, в которых сохранение и энергии, и импульса удалось проверить с гораздо большей точностью. Речь идет здесь об опытах по испусканию гамма-лучей «возбужденными» ядрами. Сохраняется ли полная энергия, когда ядро испускает гамма-квант? Чрезвычайно чувствительный инструмент, позволяющий ответить на этот воп-

рос, мы находим в так называемом эффекте Мёссбауэра, за открытие которого Рудольф Мёссбауэр был награжден Нобелевской премией 1961 года по физике.

Когда ядро испускает гамма-квант, то в нормальных условиях оно должно испытать небольшую отдачу, чтобы сохранился импульс, подобно тому как ружье испытывает отдачу, когда из него вылетает пуля. Полная

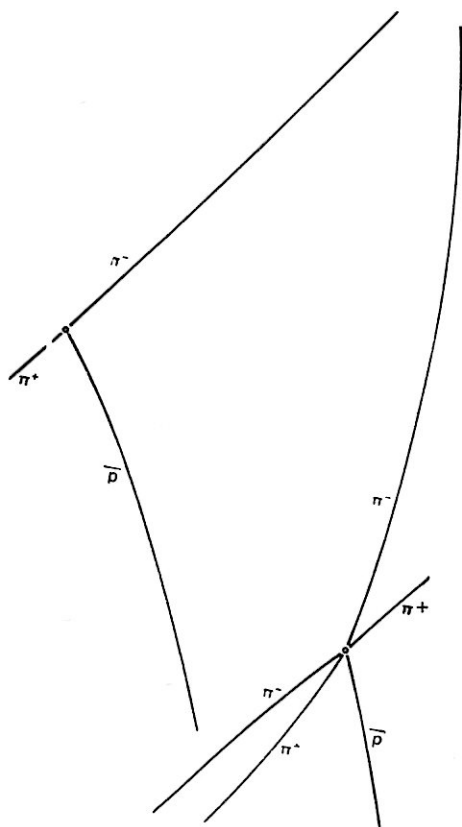
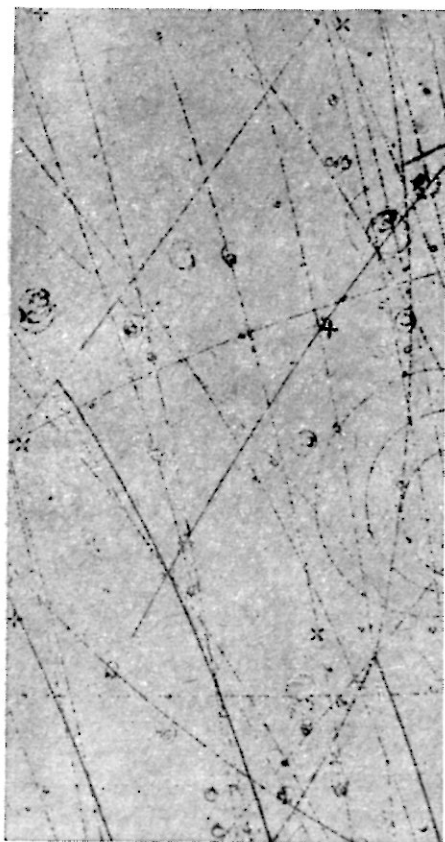


Рис. 1.6. Аннигиляцию протон-антипротонной пары дважды иллюстрирует эта фотография, снятая в пузырьковой камере Д. Стейнбергером из Колумбийского университета, и соответствующая ей схема. Путь антипротона (\bar{p}) можно проследить до той точки, где он останавливается и сталкивается с покоящимся протоном. Сохранение импульса можно проверить, анализируя треки пионов (π^+ и π^-), вылетающих из точки столкновения.

имеющаяся энергия должна будетделиться при этом между фотоном и кинетической энергией этой отдачи, так что фотон получит чуть меньше всей энергии. Допустим, однако, что ядро крепко связано в кристаллической решетке, как это имеет место в металле. Инерция (вес) кристалла так велика, что связанное ядро не испытывает отдачи от фотонного «толчка» в какой-либо заметной степени. Следовательно, гамма-квант получит, по существу, всю имеющуюся энергию и импульс.

Мёссбауэр обратил внимание на то, что такой гамма-квант с неизменной энергией должен был бы очень быстро вновь поглотиться другим ядром того же сорта, что и испустившее его. Это «резонансное поглощение» окажется тем самым чрезвычайно чувствительным и точным способом измерения энергии гамма-квантов. Этот метод столь точен, что, используя эффект Мёссбауэра, Паунд и Ребка из Гарвардского университета оказались в состоянии измерить чрезвычайно малые изменения энергии фотона, которые вызываются изменением гравитационного поля Земли, подтвердив тем самым предсказания общей теории относительности Эйнштейна.

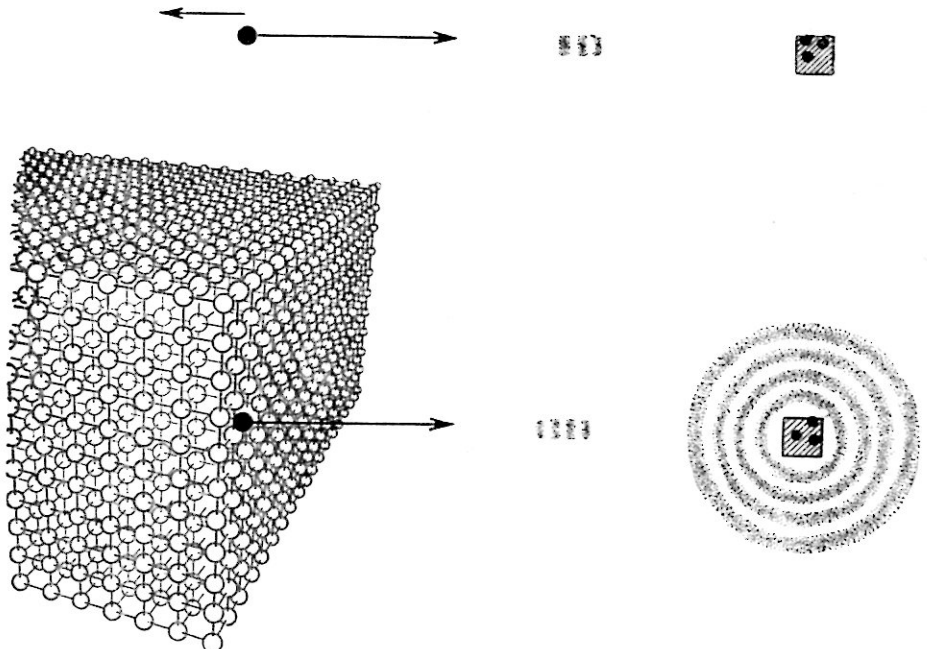


Рис. 1.7. В эффекте Мёссбауэра отдача возбужденного ядра (точка слева сверху) устраняется тем, что оно закрепляется в кристаллической решетке (слева внизу) в то время, когда испускает фотон. Отдача уменьшает частоту испущенного ядром фотона (вверху в середине) и предупреждает резонанс между испускающим и поглощающим ядрами. Резонанс (внизу справа) происходит только при испускании фотона максимальной частоты.

Сам по себе эффект Мёссбауэра является поразительным подтверждением закона сохранения энергии. Если, например, связанное в кристалле ядро атома железа с атомным весом 57 испускает гамма-фотон, этот последний может поглотиться ядром железа-57 в другом кристалле. Это значит, что частота (т. е. энергия) фотона должна быть в резонансе с частотой колебаний ядра железа-57, т. е., что она должна совпасть с этой частотой с точностью 10^{-15} . Такова воистину примечательная демонстрация того, что фотон не теряет энергии и что энергия действительно сохраняется в процессе излучения гамма-лучей. В то же время этот эффект служит и подтверждением закона сохранения импульса, так как специальная теория относительности утверждает, что у фотона, хотя у него и нет массы покоя, есть импульс, пропорциональный его энергии (а именно равный энергии частицы, деленной на скорость света). Поскольку остается постоянной энергия фотона, не должен меняться и его импульс. Итак, нам ясно, что законы сохранения

энергии и импульса, введенные Христианом Гюйгенсом, Даниилом Бернулли и Исааком Ньютоном еще в XVII столетии для описания столкновений между макроскопическими телами, в равной мере применимы с очень большой степенью точности и к соударениям и взаимодействиям субатомных частиц.

К важным аспектам законов сохранения относится то, что они позволяют нам сказать, какие превращения или распады частиц возможны, а какие запрещены. Ведь полная энергия продуктов взаимодействия или распада должна равняться энергии покоя плюс кинетическая энергия первоначальной частицы или частиц; она не может быть ни больше, ни меньше. Как раз это неизбежное правило сохранения энергии привело к открытию нейтрино и некоторых других частиц, которых не ожидали заранее.

Энергия и импульс — это не единственные критерии, от которых зависит, сможет ли осуществиться некоторая определенная реакция. Действительно, если, например, обращать внимание только на массу покоя электрона, мы могли бы сказать, что электрон может распадаться на нейтрино и гамма-квант, не нарушая законов сохранения энергии и импульса. Но такой распад никогда не наблюдался, и мы считаем, что он и в самом деле запрещен законом сохранения электрического заряда.

Этот закон был открыт в XVIII и XIX столетиях Бенджаминем Франклином и Майклом Фарадеем. Было обнаружено, что электрический заряд появляется в двух формах — положительной и отрицательной, причем эти два рода электричества никогда не возникают по отдельности — они всегда возникают вместе и в равных количествах. Более того, они не могут и исчезать по отдельности, а только равные их количества могут объединяться, приводя к нейтральному или незаряженному веществу.

В опытах с элементарными частицами была обнаружена одна очень важная закономерность, присущая электрическому заряду. Если измерять заряд в таких единицах, в которых электрон обладает единичным отрицательным, а позитрон — единичным положительным зарядом, то окажется, что все известные частицы обладают или единичным положительным зарядом, или единичным отрицательным или же нейтральны. Почему не могли бы существовать частицы с зарядом, отличным от единицы, неизвестно, но равенство всех зарядов было проверено с точностью до 10^{-17} .

В применении к реакциям между элементарными частицами закон сохранения заряда утверждает, что полный электрический заряд в начале реакции равен полному электрическому заряду в конце. При этом, чтобы найти полный заряд, надо взять алгебраическую сумму, т. е. положительный заряд считается за плюс единицу, отрицательный заряд — за минус единицу, и два таких заряда складываются в нулевой полный заряд. Теперь легко видеть, почему этот закон запрещает превращение электрона в нейтрино и гамма-квант. Оба последних не заряжены, поэтому такое превращение вызывало бы исчезновение заряда электрона, что запрещено. Если бы электрон вообще распадался, то он должен был бы распадаться на заряженные частицы.

Ввиду этого закон сохранения энергии говорит нам теперь, что на самом деле электрон не может распадаться, поскольку не известно заряженных частиц с меньшей, чем у электрона, массой или энергией покоя. До тех пор, пока такие частицы не будут обнаружены, надо исключить всякую возможность распада электрона, если мы принимаем, что выполняются законы сохранения энергии и заряда.

Электрический заряд сохраняется во всех известных нам реакциях между частицами. Но это не служит, однако, еще неопровержимым

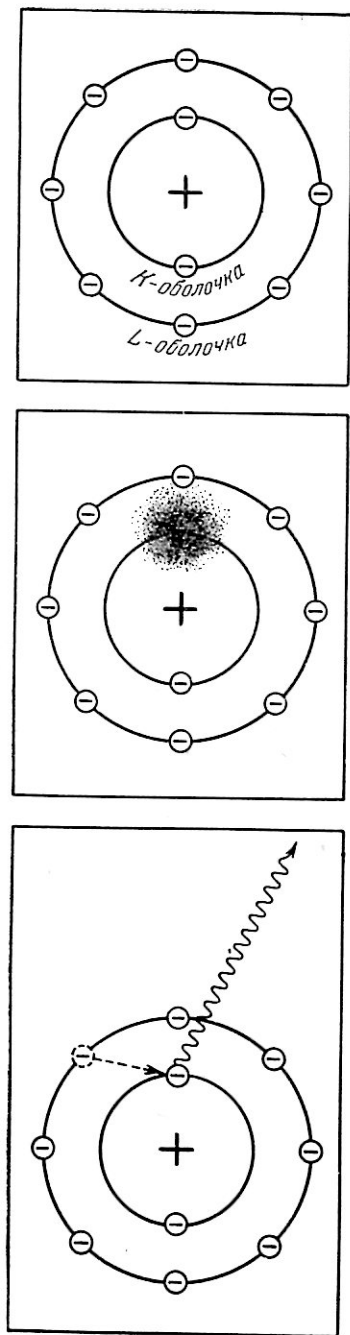


Рис. 1.8. Распад электрона привел бы к образованию «дырки» в K -оболочке атома йода. K -оболочка, изображенная сверху полностью заполненной, имеет на среднем рисунке одно вакантное место. Оно было бы заполнено электроном из внешней L -оболочки, как это показано внизу, с одновременным испусканием рентгеновских лучей.

подтверждением того, что заряд не может уничтожаться никогда и ни при каких обстоятельствах. Хотелось бы как-то оценить возможность существования тех реакций, которые могли бы не сохранять электрический заряд. Примером такой реакции служит распад электрона; поэтому экспериментальная проверка сохранения заряда могла бы состоять в том, чтобы ждать, стараясь «подкараулить» распад электрона. Опыт такого типа был проделан несколько лет назад в Брукхейвенской национальной лаборатории.

Идея эксперимента состояла в следующем. Рассмотрим электрон в самой внутренней заполненной оболочке (K -оболочке) атома. Предположим, что этот электрон «распался» каким-нибудь образом, тогда какой-либо электрон из внешних оболочек сейчас же «упал» бы в образовавшуюся в K -оболочке «дырку», выделяя освобождающуюся в процессе перехода энергию в виде рентгеновских лучей. В опыте «поднадзорные» электроны находились в атомах йода в кристалле йодистого натрия. В таком кристалле можно было бы заметить появление даже одного-единственного кванта рентгеновских лучей, и, поскольку кристалл содержит очень большое число атомов, счетчик следил за громадным океаном электронов, подкарауливая хотя бы один электронный распад, где бы и когда бы он ни произошел в этом океане.

Опыт был поставлен, и кристалл находился под наблюдением несколько месяцев. Исходя из числа K -электронов в кристалле, было подсчитано, что электрон не распадается, т. е. не теряет своего заряда, по крайней мере в течение 10^{17} лет. Это в 10^{24} раз больше, чем обычное время жизни относительно слабых взаимодействий при сравнимых энергиях, т. е. в бета-распадах. Поэтому можно сказать, что закон сохранения заряда подтвержден с исключительно высокой степенью надежности.

В мире элементарных частиц есть и другие законы сохранения. Примером может служить новый закон сохранения, который

требуется для объяснения стабильности частиц в ядрах. Действительно, рассмотрим протон. Ни один из законов сохранения, которые мы обсуждали до сих пор, не предотвратил бы его распад на позитрон и гамма-квант. Ведь в противоположность электрону, протон не является наименьшей заряженной частицей, но есть целый ряд положительно заряженных частиц меньшей массы — позитрон и различные мезоны. Поэтому протон мог бы «развалиться», не нарушая законов сохранения энергии и заряда. Совершенно аналогично, ни один из этих законов сохранения не запретил бы распад нейтрона на нейтрино и один или несколько гамма-квантов.

Однако хорошо известно, что эти две частицы, из которых слагаются атомные ядра, на самом деле не распадаются, по крайней мере со сколько-нибудь заметной скоростью, — иначе все вещество нашей Вселенной уже давно превратилось бы в излучение. Поэтому должно существовать еще какое-то сохраняющееся свойство, отличное от энергии и от заряда. Штюкельберг и Вигнер назвали эту новую сохраняющуюся величину «барионным числом».

«Барионы» — это название, относящееся к сравнительно тяжелым частицам — протону и всем другим частицам той же или большей массы. Штюкельберг и Вигнер предположили, что точно так же, как существует квант, или наименьшая единица, электрического заряда, так существует и «квант» некоего свойства «барионности». Такой квант, или единичное барионное число, несет протон, и то обстоятельство, что протон является самой легкой частицей, несущей эту величину, гарантирует его от распада. Все более тяжелые частицы, которые могут распадаться на протон (например, лямбда-частица, которая распадается на протон с испусканием пиона), должны иметь то же самое барионное число. Поэтому барионное число сохраняется всегда. Барионное число протона должно быть положительным, а барионное число антипротона — отрицательным числом той же абсолютной величины, так чтобы их полное барионное число равнялось нулю. Тогда при их взаимной аннигиляции барионное число не изменится — оно останется равным нулю. Как и для электрического заряда, в любой реакции полное барионное число всех частиц после реакции должно быть тем же, что и полное барионное число до нее.

Как можно найти границы, определяющие точность, с которой мы можем быть уверены в сохранении барионного числа? Самой решительной была бы, конечно, проверка, уже примененная к вопросу о сохранении электрического заряда, — надо караулить протон, чтобы увидеть, распадется ли он когда-нибудь. Если бы протон распался, то обнаружить его взрыв было бы очень легко. Ведь у него столько энергии (такая большая масса покоя) сравнительно с любой частицей типа пиона, в которую он мог бы превратиться, что переход лишней массы в энергию дал бы возникающей частице или частицам очень большую скорость. Поэтому сигналом о распаде протона послужило бы появление очень энергичной легкой частицы среди собрания протонов, которые мы наблюдаем.

Целые серии опытов с большими образцами вещества, содержащего много протонов, были проведены Рейнзом и Коузном, одним из нас (Голдхабером), Фрауэнфельдером и др. Ни в одном из таких образцов, содержавших примерно по 10^{30} протонов, не было зарегистрировано ни одного распада. Тем самым опыты показали, что протон не «разваливается» по меньшей мере за 10^{22} лет, что в 10^{43} раза дольше, чем времена распадов других частиц при сравнимых энергиях.

Единственная проблема, связанная с законом сохранения барионного числа, которая остается неразрешенной, состоит в том, что у барионного числа нет никаких других известных свойств, кроме свойства удовлетворять закону сохранения. В этом оно отличается от электрического заряда, который можно определить и измерить совершенно независимым образом, например рассматривая движение заряженной частицы в электромагнитном

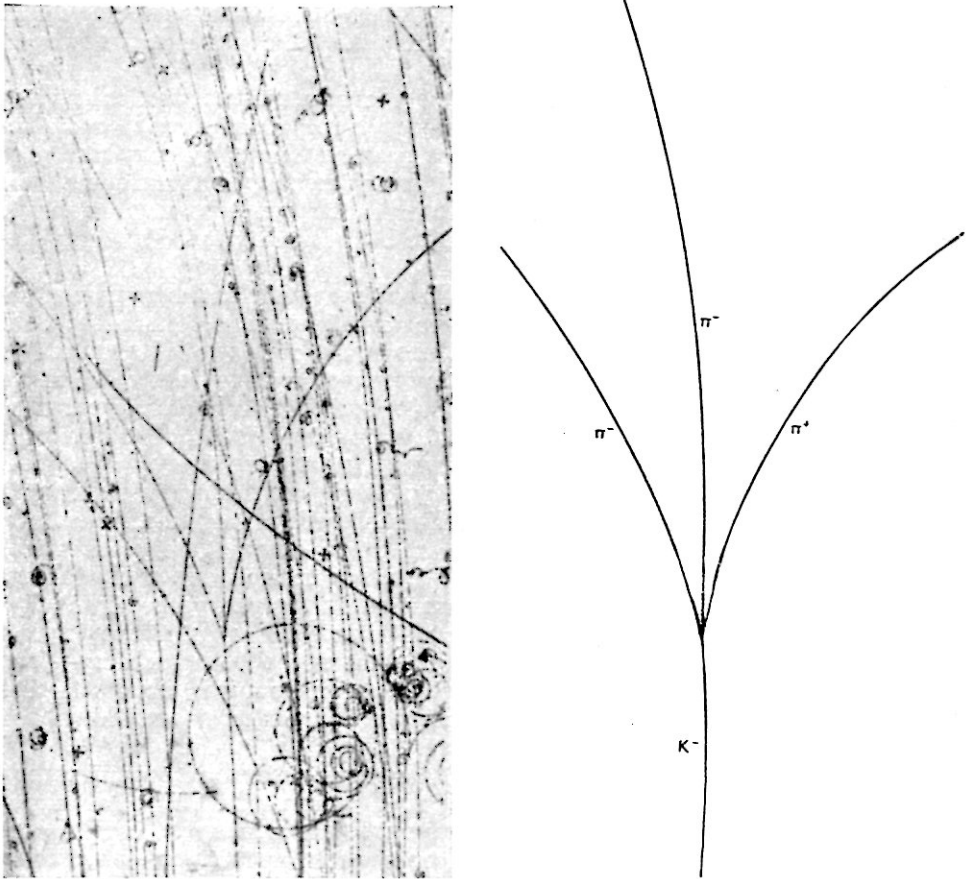


Рис. 1.9. Распад на лету K -минус-частицы демонстрирует эта фотография, снятая в пузырьковой камере в Брукхейвенской национальной лаборатории. Справа помещена поясняющая ее схема. Можно видеть, что трек K -минус-частицы дает начало двум отрицательным пионам (ответвляющимся влево) и положительному пиону (ответвляется вправо). Измеряя кривизну треков, физики могут определить, сохраняется ли импульс.

поле. Отсутствие такого свойства внушает чувство неудовлетворенности, и его поиски будут наверняка продолжаться. Несмотря на отсутствие прочной теоретической основы для этого закона, мы можем пока удовлетвориться уже одним знанием того, что он выполняется с очень большой точностью.

Существуют ли другие законы сохранения в области элементарных частиц? Физики обнаружили два закона, которые по своему характеру (и по своей таинственности) кажутся напоминающими закон сохранения барионного числа. Один из них относится к лептонам (так мы называем

легкие частицы: электроны, мюоны, нейтрино и их античастицы, чтобы отличать их от барионов). Оказалось, что лептоны обладают свойством, которое называют лептонным числом. Его сохранение тоже запрещает некоторые реакции, которые были бы возможны с точки зрения других законов сохранения (например, превращение отрицательного пиона и нейтрона в два электрона и протон). Закон сохранения лептонного числа оказался выполняющимся во всех случаях, которые до сих пор исследовались.

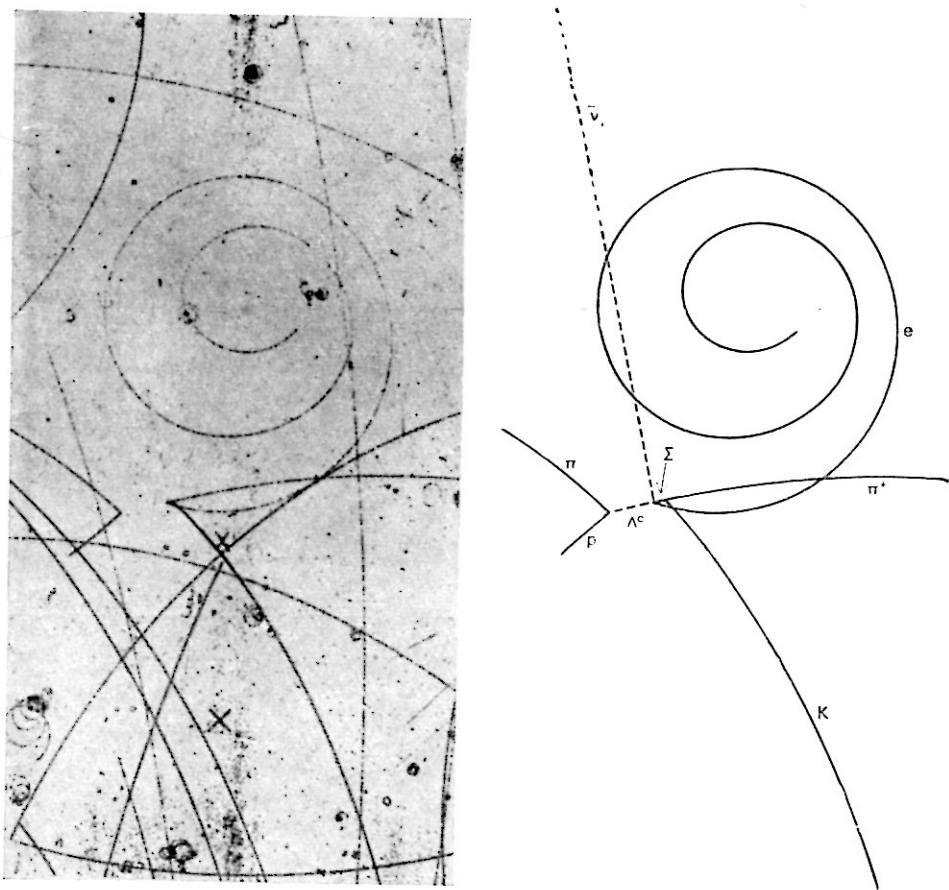


Рис. 1.10. Фотография распада сигма-минус-частицы в пузырьковой камере и поясняющая ее схема. К-минус-частица превращается в сигма-минус (Σ^-), короткий трек которой отмечен стрелкой. Она дает начало электрону (e^-), который оставил спиральный трек, и лямбда-нуль-частице (Λ^0), которая в свою очередь распадается в левой части фотографии и схемы. Наличие антинейтрино ($\bar{\nu}_e$) было выведено из того факта, что в противном случае угол, образованный треками электрона и лямбда-нуль-частицы, соответствовал бы нарушению сохранения импульса.

Второй новый закон сохранения связан с недавним открытием существования двух различных видов нейтрино — одного, связанного с мюонами, и другого — с электронами. Физики считают теперь, что мюонные нейтрино, сами мюоны и их античастицы обладают свойством, которое называется мюонным числом. Это свойство запрещает определенные процессы, как, например, распад мюона на электрон и гамма-квант или объединение

мюонного нейтрино с нейтроном с образованием протона и электрона. Как раз отсутствие таких реакций на опыте и составляет основу для утверждения, что существует закон сохранения мюонного числа.

Элементарные частицы расположены в этой таблице в порядке убывания их средних масс, выраженных в единицах, в которых масса электрона равна единице. Спин определяет число возможных состояний, в которых может находиться покоящаяся частица. Последнее добавление к таблице — анти-кси-нуль-частицу — удалось обнаружить при изучении аннигиляции *).

	Семейства	Частицы	Античастицы	Спин	Средняя масса
Барыоны	Кси-гиперон	Ξ^- Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$ $\bar{\Xi}^+$?	2578
	Сигма-гиперон	Σ^+ Σ^- Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$ $\bar{\Sigma}^+$ $\bar{\Sigma}^-$	1/2	2330
	Лямбда-гиперон	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	1/2	2182
	Нуклон (протон, нейтрон)	p n	\bar{p} \bar{n}	1/2	1837,4
Мезоны	К-мезон	K^+ K^0	\bar{K}^0 K^-	0	970
	Пион	π^+ π^0 π^-	π^- π^0 π^+	0	268,7
Лептоны	Мюон	μ^-	μ^+	1/2	206,7
	Электрон	e^-	e^+	1/2	1
	Нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	1/2	< 7
		ν_e	$\bar{\nu}_e$	1/2	< 1/2500
	Фотон	γ		1	0

Целью этой статьи было показать большое значение законов сохранения и простых экспериментов, которые можно поставить, чтобы проверить выполнение этих законов в мире элементарных частиц. Эти эксперименты подтвердили выполнение законов сохранения с беспрецедентной степенью

*) См. сноску на стр. 20.

точности, однако они оставляют открытым вопрос о том, не смогут ли законы сохранения потерять свою справедливость в космических масштабах, как считают сторонники теории непрерывного рождения материи во Вселенной. Надо, однако, подчеркнуть, что до сих пор никто еще не доказал, что такое нарушение законов сохранения действительно необходимо.

Наконец, следовало бы еще подчеркнуть, что очень полезно рассматривать законы сохранения в свете более фундаментальных физических принципов. Так, например, закон сохранения импульса можно вывести из более фундаментальной концепции, заключающейся в том, что физические явления не должны зависеть от места, где производятся измерения. Такое сведение законов сохранения к более глубоким принципам может, по-видимому, привести к существенному прояснению некоторых все еще таинственных форм сохранения, обнаруженных в мире элементарных частиц.

С. Б. Трейман

СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

(МАРТ 1959 г.)

В них, как признается в настоящее время, проявляется четвертая сила природы. Другие три отвечают тяготению, электромагнетизму, а также сильным взаимодействиям, удерживающим вместе частицы атомных ядер.

Для физики XVII и XVIII столетия прошли под знаком силы тяжести, XIX веком завладели силы электромагнитные. И следовало бы ожидать, что заботой физиков нашего столетия останутся ядерные силы. Эти необычайно мощные силы, связывающие элементарные частицы в ядре атома, изучены все еще недостаточно. Их качества выражены не только в огромной энергии, которая выделяется при слиянии и расщеплении атомных ядер. Это они же рождают новые и таинственные частицы в бурных ядерных столкновениях. И тем не менее ядерным силам уже пришлось — быть может, лишь временно — потесниться у рамп. К ним на авансцену уже выступил совершенно новый класс сил. Невообразимо слабые, эти силы связаны с самопроизвольным распадом и превращениями большинства новых частиц, которые так запутали клубок физической теории. И как ни кратко наше знакомство с этими силами, оно успело привести к одним из наиболее волнующих и обнадеживающих сдвигов в современной физике.

Конечно, мы не можем видеть силы. Наблюдаем мы — взаимодействия: взаимодействие массивных тел в случае тяготения, взаимодействие заряженных тел и полей в случае электромагнетизма, наконец, взаимодействие атомных частиц в случае ядерных и слабых сил. Слабыми взаимодействиями, как таковыми, физики всерьез занялись лишь два десятка лет назад, когда список «элементарных» частиц уже вызвал тревогу по поводу своего начавшегося роста. Сейчас в этом списке стоят 30 открытых экспериментально или предсказанных теоретически частиц (см. таблицу)*). Ни одна из вновь внесенных в список частиц не принимает в обычном смысле никакого участия в построении вещества. Все такие частицы нестабильны; распад большинства из них обязан слабому взаимодействию. Именно оно выделяет особый класс превращений частиц. От него же были получены первые намеки на порядок и закономерности в множестве частиц.

Позднее в слабых взаимодействиях был обнаружен ряд аномалий. Этим мы обязаны знаменитым ныне работам Ли Цзун-дао и Янг Чжень-нин, а также Ву Цзянь-сюн и ее сотрудников в Национальном Бюро стандартов. Их блестящая теоретическая и экспериментальная работа показала, что в слабых взаимодействиях нарушается закон сохранения четности. Впервые оказалось, что один из основных законов сохранения в физике неприменим в природе. Чтобы представить себе значение этого откры-

*) К настоящему времени число известных частиц сильно возросло. Читатель может ознакомиться с более полной таблицей в статье Чу, Гелл-Манна и Розенфельда, помещенной в этом же сборнике.

тия, попытаемся вообразить себе физику без закона сохранения энергии или мир без симметрии. Вместе с четностью был свергнут второй, столь же основной принцип симметрии — симметрия между материей и антиматерией. Природа ставит нас в тупик своим кажущимся пренебрежением к этим центральным концепциям человеческого мышления. И все же можно разрешить наши сомнения; удача придет вместе с изменением наших представлений. Мы поймем, что порядок в природе основан на симметриях более тонких, чем те, которые заложены в наши теперешние теории.

Скорость и интенсивность реакции

Надо признать, что о слабости и силе взаимодействия мы говорим по старинке. Вообще же физик измеряет скорость реакции: абсолютную скорость и скорость относительно других реакций. Он измеряет зависимость скорости от нескольких переменных величин, характеризующих процесс: энергий частиц, их импульсов и т. д. Прежде всего, скорость существенно определяется энергией, которой располагают участвующие в реакции частицы. Но что гораздо существенней для скорости — это присущая реакции интенсивность. Она-то и фигурирует в уравнениях, привлекаемых нами для описания превращений частиц. Уравнения эти чрезвычайно сложны. Решить их можно лишь в рамках весьма сомнительных приближений. Больше того, мы уверены, что теории наши вообще неполны и непоследовательны. В такой ситуации богатство физики частиц должно вызывать священный трепет. И тем не менее в характеристике взаимодействия в терминах присущей ему интенсивности достаточно смысла. Она служит нитью, ведущей нас к более глубокому проникновению в существо явлений.

Скорости, наблюдаемые при сильных и слабых взаимодействиях, настолько резко отличаются друг от друга, что вполне определенно выделяют два класса реакций между частицами. Сначала мы рассмотрим сильные взаимодействия. Они преобладают в высокоэнергетических столкновениях. В одном из хорошо известных «сильных» процессов столкновение протона и пи-мезона дает частицу лямбда и K -мезон. (Протон — единственная стабильная частица из составляющих ядро атома. Пи-мезон — нестабильная частица, способствующая возникновению мощных сил внутри ядра. Лямбда-частица и K -мезон — новые нестабильные частицы, роль которых в природе все еще покрыта мраком.) Временной масштаб этой реакции можно оценить следующим образом. Из многочисленных экспериментов мы знаем, что ядерные силы резко спадают на определенном расстоянии. Они ощущаются при расстояниях между частицами, не превышающих 10^{-13} см ($0,000000000001$ см). Мы знаем также, что при столкновениях частицы движутся со скоростями, близкими к скорости света. Эта скорость составляет примерно $3 \cdot 10^{10}$ сантиметров в секунду ($30\ 000\ 000\ 000$ см/сек). Достаточно близко для взаимодействия частицы находятся лишь в течение некоторого времени. Чтобы найти это время, необходимо радиус сил разделить на скорость частиц. За это время свет проходит примерно диаметр частицы. Порядок его составляет 10^{-23} сек. Силы между частицами, взаимодействующими в такие короткие мгновения, должны быть чрезвычайно велики.

Сравним теперь эту картину с масштабом времени для слабых взаимодействий. Как установлено, рожденная в высокоэнергетическом столкновении лямбда-частица распадается на две дочерние частицы (протон и пи-мезон) в среднем за $3 \cdot 10^{-10}$ сек. В масштабах сильных взаимодействий это невероятно долго. При увеличении в 10^{23} раз $3 \cdot 10^{-10}$ сек становятся миллионом лет! Все же могло бы показаться, что «длинный» промежуток

В этой таблице перечислены элементарные частицы, известные к 1959 г. У отрицательно заряженных частиц стоит индекс минус, у положительно заряженных — плюс, у нейтральных — ноль. В скобках во втором столбце стоят античастицы. В одних случаях античастицу обозначает черта над ее символом, в других — знак заряда, противоположный знаку «частицы». В третьем столбце — массы частиц (за единичную массу принята масса электрона). Справа от стрелки в четвертом столбце стоят частицы, на которые распадаются частицы, находящиеся слева от стрелки. Конкурирующие способы распада (если они есть) перечислены под стрелкой, в которой стоит стрелочка. Значок < означает «меньше, чем», значок ~ — «приблизительно».

Частица	Символ	Масса	Основные виды распада	Время жизни, сек
Фотон	γ	0	Стабилен	
Нейтрино	$\nu(\bar{\nu})$	0	Стабильно	
Электрон	$e^-(e^+)$	1	Стабилен	
Мю-мезон	$\mu^-(\mu^+)$	206	$(\mu^-) \rightarrow e^+ \gamma + \bar{\nu}$	$2,22 \cdot 10^{-6}$
Пи-мезоны	$\pi^-(\pi^+)$	273	$(\pi^-) \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$	$2,56 \cdot 10^{-8}$
	π^0	264	$(\pi^0) \rightarrow \gamma + \gamma$	$< 10^{-15}$
К-мезоны	$K^-(K^+)$	967	$(K^-) \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
			$(K^-) \rightarrow \pi^- + \pi^0$	
			$(K^-) \rightarrow \pi^- + \pi^+ + \pi^0$	
			$(K^-) \rightarrow e^- + \bar{\nu} + \pi^0$	

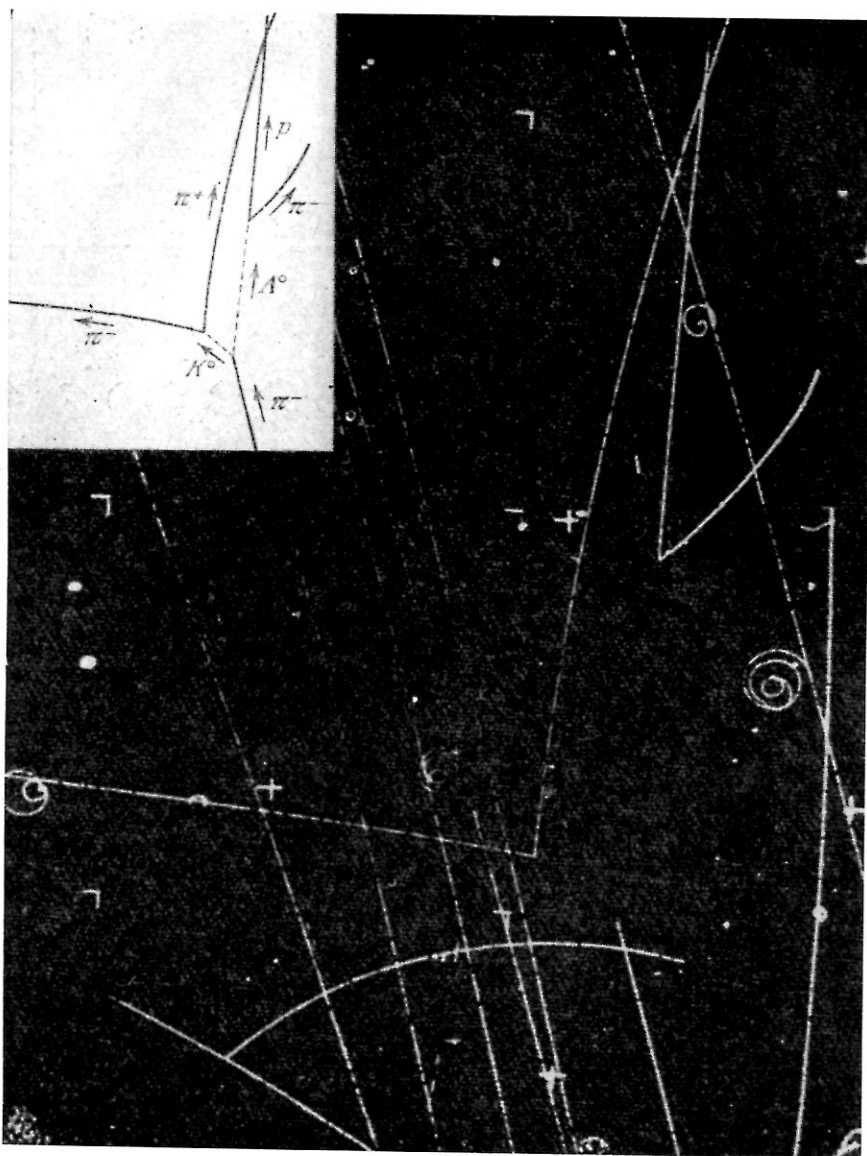


Рис. 2.1. Распад двух элементарных частиц в процессе слабого взаимодействия зарегистрирован на фотографии. Она сделана в пузырьковой камере Луисом У. Альварецем и его сотрудниками из Калифорнийского университета. Схема сфотографированного события показана в верхнем левом углу. Внизу справа в камеру входит отрицательный пи-мезон (π^-) высокой энергии, полученный на беватроне в Беркли. Он сталкивается с протоном жидкого водорода пузырьковой камеры. В столкновении рождаются нейтральные K -мезон (K^0) и лямбда-частица (Λ^0). Не обладая зарядом, эти частицы не оставляют следа. Нейтральный K -мезон распадается на отрицательный пи-мезон и положительный пи-мезон, а лямбда-частица — на протон (p) и отрицательный пи-мезон.

в $3 \cdot 10^{-10}$ сек в действительности слишком короток и трудно поддается измерению. Но это не так. Предположим, что скорость лямбда-частицы в три раза меньше скорости света. В экспериментах эта скорость несколько больше. Тогда за свою короткую жизнь лямбда-частица пролетает три сантиметра — расстояние вполне макроскопическое и измеримое. Процесс лямбда-распада типичен для слабых взаимодействий.

Из всего этого мы заключаем, что интенсивность слабых взаимодействий составляет 10^{-14} интенсивности сильных. Утверждение это не слишком строго, потому что наши теории грубы. Но поражает то, что между сильными и слабыми взаимодействиями имеется столь огромная пропасть в интенсивности.

Сравнение с обычным электромагнитным взаимодействием показывает, насколько мала интенсивность слабых взаимодействий. Мы говорим, что рядом с ядерными силами силы электромагнитные выглядят слабыми. Их интенсивность равна примерно одной сотой (точнее, 0,0073) интенсивности сильных взаимодействий. Но у слабых она еще в 10^{12} раз меньше!

Бета-распад

Наиболее поучительным и самым известным из слабых взаимодействий является бета-распад. Это — один из процессов, открытых еще на рубеже нашего века. В нем естественные радиоактивные элементы уличают себя в своей нестабильности. В типичном явлении бета-радиоактивности нейтрон (нейтральная частица) в ядре самопроизвольно распадается на протон и электрон. Отрицательно заряженный электрон вылетает из ядра, а положительно заряженный протон остается в получившемся ядре. Поэтому атом превращается в другую его разновидность, с зарядом, на единицу большим. Конечно, природа этого процесса выяснилась лишь через несколько лет после самого открытия радиоактивности.

Но если бета-распад может происходить с некоторыми ядрами, то почему не со всеми? Один вариант ответа дал Р. П. Фейнман из Калифорнийского технологического института: если бы дело обстояло по-другому, то нас, задающих здесь этот вопрос, вообще могло бы не быть! Менее философское и более плодотворное объяснение ссылается на справедливость закона сохранения энергии. Этот закон запрещает бета-распад для большинства ядер. Дело в том, что масса ядра (связанная с энергией знаменитой теоремой $E=mc^2$) меньше, чем сумма масс электрона и возможного дочернего ядра. У радиоактивных же ядер ситуация противоположная. Поэтому присущая нейтрону нестабильность получает возможность проявить себя. Ведь масса нейтрона превосходит суммарную массу протона и электрона на величину, соответствующую потенциалу в 780 000 вольт. Величина эта очень мала для ядерных масштабов. В результате нейтрон не должен слишком стремиться к бета-распаду. Он этого и не делает. Время жизни его — около 18 минут, неизмеримо больше, чем у любой открытой нестабильной частицы.

Но мы еще не покончили с сохранением энергии. Избыток в 780 000 электрон-вольт должен принять форму энергии движения, т. е. кинетической энергии продуктов распада. Однако тщательные измерения нейтронного распада, вне сомнений, показывают, что протон и электрон почти всегда уносят лишь малую долю кинетической энергии. К тому же величина этой доли меняется от случая к случаю. Первое время такая ситуация выглядела зловеще. Первый выход состоял в признании того, что нарушается закон сохранения энергии. В противном случае физики должны

были предположить, что существует новая, и притом невидимая, частица. Испущенная при распаде нейтрона вместе с протоном и электроном, такая частица могла бы унести пропавшую энергию. Тем самым она спасла бы основную опору в здании физики. Все это происходило в начале тридцатых годов, когда введение новой частицы было совсем не таким обычным делом, как теперь. И тем не менее, лишь немного поколебавшись, физики выбрали второй выход. Следуя идеям Вольфганга Паули, Энрико Ферми шаг за шагом выяснил свойства недостающей частицы, которую он назвал нейтрино.

В том, что нейтрино невидимо, нет ничего удивительного. Оно должно быть нейтральной частицей, чтобы при бета-распаде нейтрона сохранялся электрический заряд. Кроме того, из последующих экспериментов с бета-распадом мы знаем, что нейтрино не имеет никакой массы. Теоретически же имеются все резоны предположить, что масса нейтрино в точности равна нулю. Остановить нейтрино совершенно невозможно. Да и реагирует с веществом оно крайне слабо. Пусть, например, нейтрино проходит сквозь земной шар. Тогда вероятность того, что оно замедлится или с ним вообще произойдет что-нибудь, чего не могло бы случиться в вакууме, составляет одну часть на миллион миллионов. Лишь в последние годы появилась возможность зарегистрировать нейтрино непосредственно, т. е. поймать его на том, что оно «что-то делает». Для этого потребовались поистине героические экспериментальные усилия *).

Во многом нейтрино является самой странной из частиц. Оно уносит избыток энергии в бета-распаде. На него же приходится избыток импульса и механического момента. Как и энергия, эти величины подчиняются основным законам сохранения. Без нейтрино в бета-распаде не смогли бы остаться справедливыми законы сохранения. Нейтрино избавляет нас от конца мира, но, как мы думаем, во всяком случае сейчас, больше ничего и не делает. Возникшие в Солнце и других звездах (а также в ядерных реакторах), нейтрино мчатся сквозь вещество, но не принимают активного участия в его жизни.

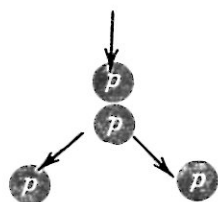


Рис. 2.2. Низкоэнергетическое столкновение двух протонов оставляет частицы теми же. Они отскакивают друг от друга, как бильярдные шары

Новые частицы

Определяющую роль играет закон сохранения энергии и в сильных взаимодействиях. Пусть ускоренный в циклотроне протон сталкивается с другим протоном. Что при этом случится? При низких энергиях происходит простое отклонение. Отдача приводит в движение частицу-мишень, а налетевшая частица отскакивает в каком-то новом направлении. То же самое бывает, когда сталкиваются бильярдные шары: после удара частицы остаются теми же, что и до удара, а их первоначальная энергия остается той же, что и энергия после соударения. Но перейдем к более высоким энергиям, скажем в 350 миллионов электрон-вольт. Тогда вступают в дело конкурирующие реакции. В ряде случаев после реакции появляются протон, нейтрон и новая частица — положительный пи-мезон. Пи-мезон рождается совершенно заново за счет запаса энергии в самом столкновении. Один из протонов превращается в нейтрон и пи-мезон, тем самым не только вызывая к жизни новую частицу, но и

*) «Над чем думают физики», вып. 2, «Элементарные частицы», Физматгиз, 1963, стр. 40.

обнаруживая новое взаимодействие. Оказывается, что при еще больших энергиях идут все новые и новые реакции, рождаются все новые и новые частицы в самых различных комбинациях: K -мезоны, лямбда-частицы, сигма-частицы, кси-частицы.

Усложняя картину вещества, эти новые частицы вместе с тем обеспечивают своим рождением сохранение энергии. То же самое справедливо и для других частиц, рожденных в столкновениях этих новых, а также при

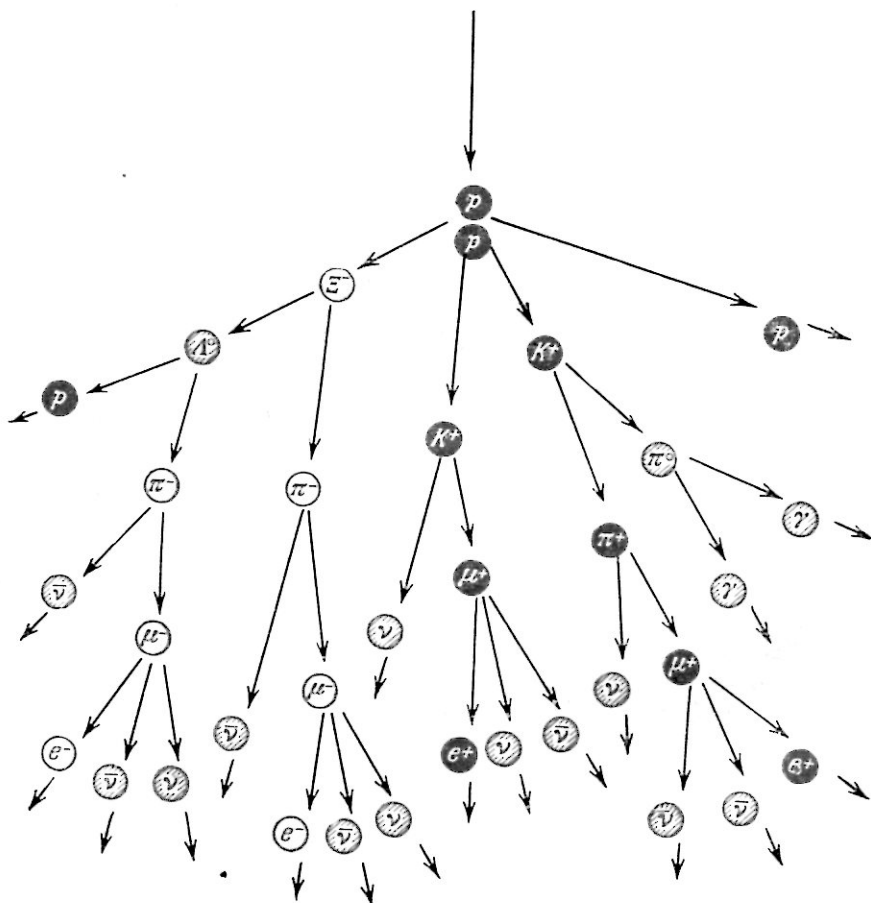


Рис. 2.3. Высокоэнергетическое столкновение двух протонов порождает «ливень» частиц. Один из первоначальных протонов уносится неизменным (справа вверху). Другой порождает отрицательную кси-частицу и два положительных K -мезона. Будучи нестабильными, эти частицы распадаются затем на другие частицы, часть которых снова распадается. В конце концов остаются только стабильные частицы. Их 20 в событии, изображенном на рисунке.

их распадах, обязанных преимущественно слабым взаимодействиям. Рис. 2.3 демонстрирует сложность возможных реакций и изобилие частиц. На нем изображена типичная последовательность реакций, вызванных высокоэнергетическим соударением двух протонов.

Протон-протонная реакция предоставляет нам другую возможность различить сильные и слабые взаимодействия по их относительной интенсивности. Обычно энергия соударения оказывается у одного из протонов,

и именно он посредством сильного взаимодействия превращается в нейтрон и положительный пи-мезон. Но иногда должна происходить другая, слабая реакция. Воспользовавшись энергией соударения, протон вполне может путем бета-превращения перейти в нейтрон плюс позитрон плюс нейтрино. Сохранение энергии не запрещает этой реакции. Она разрешена и законами сохранения импульса и механического момента, а также сохранения заряда. В ней положительный заряд протона уносится позитроном, античастицей для электрона. Вне сомнений, эта реакция при столкновении протонов иногда и идет. Но интенсивность ее настолько незначительна, что в действительности такой процесс никогда не наблюдался. По всей видимости, он встречается лишь один раз в 10^{14} столкновениях. И это — обычная ситуация. В тех обстоятельствах, когда возможны и сильные, и слабые взаимодействия, преобладание сильных — подавляющее. Слабые процессы обнаруживают себя только там, где закон сохранения энергии запрещает осуществление сильных взаимодействий.

Однако поле деятельности слабых взаимодействий не ограничено такими исключительными ситуациями. Обратимся к таблице элементарных частиц. Помимо фотона, нейтрино, электрона и протона (и их античастиц), все остальные частицы нестабильны. Лишь две из нестабильных частиц распадаются быстро, посредством сильного процесса. В их случаях этот процесс разрешен законом сохранения энергии. Остальные частицы распадаются путем слабых взаимодействий. Как видно из таблицы, времена жизни подверженных слабым распадам частиц меняются в очень широком диапазоне. Однако большинство, а вероятно, и все эти различия связаны с различиями в освобождающейся энергии. С переводом на язык интенсивностей взаимодействия все различия исчезают. Интенсивности всегда одного порядка: 10^{-14} от интенсивности сильных взаимодействий.

Никто не сомневается, что эта картина отражает какое-то глубокое внутреннее единство, присущее всем слабым взаимодействиям. Мы, однако, еще не имеем ясных представлений о том, в чем это единство могло бы состоять. Во всяком случае ясно одно. Как и в человеческих отношениях, слабость и сила не являются внутренними свойствами отдельных частиц, они — свойства реакций между частицами. Притом имеется одно исключение: нейтрино участвует только в слабых процессах: эта частица «слаба» во всем.

Низвержение четности

Какое применение могут найти себе слабые взаимодействия? До самого последнего времени они привлекали к себе мало внимания. Им отводили роль мусорщика, выметающего осколки после высокоэнергетических столкновений, отданных на откуп сильным взаимодействиям. Удалять нестабильные продукты путем распадов — дело, конечно, нужное, но немного скучноватое. Но не считаться с наличием таких процессов физикам нельзя. И отнесясь к ним повнимательнее, физики столкнулись с парадоксом. Оказалось, что нарушается закон сохранения четности.

Недоумение вызвал K -мезон. Иногда он распадается на два пи-мезона, а иногда на три. Но этого не должно быть. Если все законы сохранения остаются в силе, K -мезону положено распадаться либо одним способом, либо другим, но ни в коем случае не обоими сразу. На первый взгляд, возможно, существуют два сорта K -мезонов, каждый из которых отвечает за свой способ распада. Гораздо легче было согласиться с наличием новой частицы, чем с нарушением закона сохранения. Но свидетельство о каких бы то ни было других различиях между двумя частицами физики найти

не могли. Обе частицы реально выглядели, как одна и та же. Картина становилась все более зыбкой. Наконец, в 1956 г. Ли Цзун-дао из Колумбийского университета и Янг Чжень-нин из Института прикладных знаний сделали правильный вывод. Они напомнили своим коллегам, что принцип четности в действительности никогда не проверялся для слабых взаимодействий. Уверенность в его справедливости основана целиком на сведениях

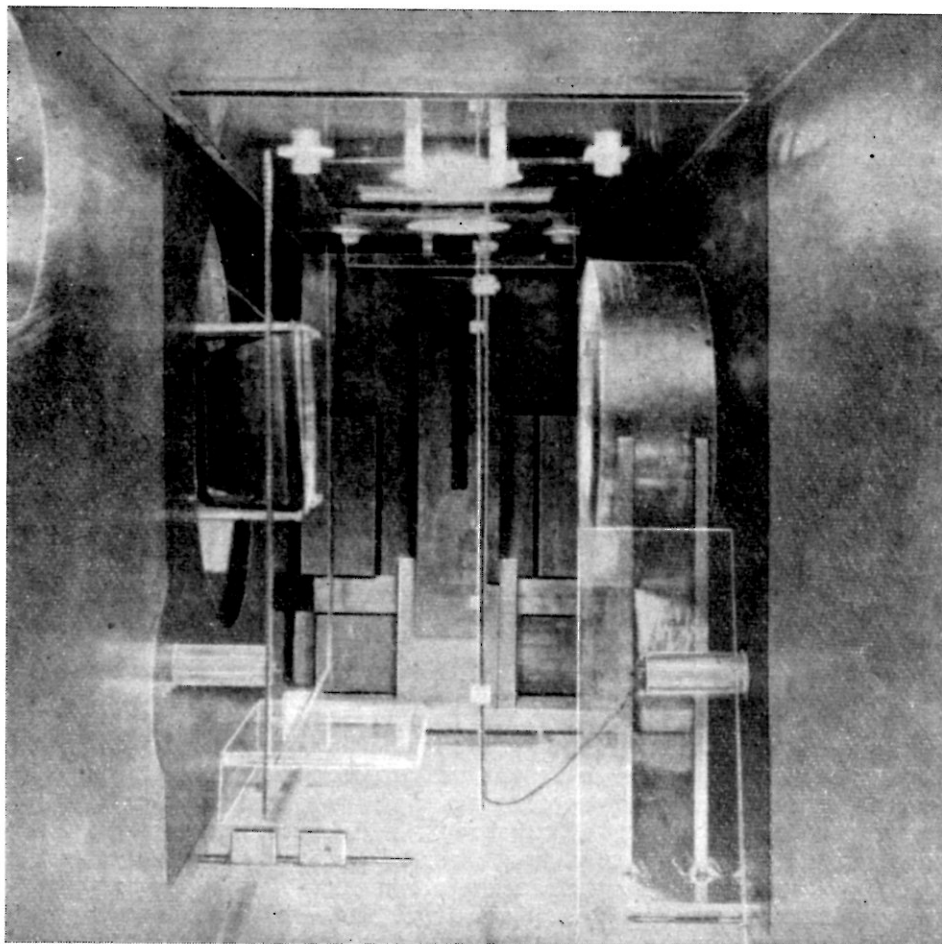


Рис. 2.4. Установка на этой фотографии использовалась в Аргоннской национальной лаборатории для доказательства того, что четность не сохраняется в бета-распаде нейтрона, другом процессе слабого взаимодействия. Нейтроны из ядерного реактора направлялись на намагниченное кобальтовое «зеркало». Оно отражало только те нейтроны, чьи «северные» и «южные» полюсы были направлены по одной линии. Такой поляризованный пучок нейтронов посылался в вакуумную камеру. На фотографии показана вертикальная щель в дальней части установки — выход из камеры. Пройдя сквозь камеру, небольшая часть нейтронов распадалась на протоны и электроны. Похожий на ящик предмет слева от камеры — счетчик протонов. Внутри цилиндра справа расположены счетчики электронов. Эта установка позволила экспериментаторам показать, что электроны имеют тенденцию вылетать в определенном направлении. Это свидетельствует о нарушении закона сохранения четности. В группу экспериментаторов входили М. Т. Бурги, В. Е. Крон, Т. Б. Нови и Г. Р. Ринго из Аргоннской национальной лаборатории и В. Л. Телегди из Чикагского университета.

об относительно хорошо исследованном мире сильных взаимодействий. Вполне вероятно, что в другой области этот принцип неприменим. Ли и Янг предложили конкретные способы проверки своей идеи. Результат опытов мог бы решить проблему.

Последствия теперь хорошо известны. Ву Цзянь-сюн из Колумбийского университета и группа сотрудников Национального Бюро стандартов предприняли целый ряд трудных изящных экспериментов. Они исследовали бета-распад поляризованных ядер кобальта-60. В январе 1957 г. они провозгласили низвержение принципа четности.

Немного позднее группы ученых Колумбийского и Чикагского университетов сообщили о таком же результате опытов с распадом пи- и мю-мезонов. Четность не сохраняется и в этих распадах. Спустя еще некоторое время группа Калифорнийского университета изучила распад заряженного K -мезона на мю-мезон и нейтрино. И здесь четность была низвержена. Другие ученые продолжили эту кампанию. Они подтвердили падение поколебавшегося принципа на огромном количестве разнообразных ядерных бета-распадов, а также на бета-распаде самого свободного нейтрона. С тех пор слабые взаимодействия стали центром внимания. В 1957 г. мисс Ву присутствовала на Международной конференции по физике высоких энергий, на конклаве, созданном главным образом по поводу сильных взаимодействий. И она вправе была сказать: «Я нахожусь здесь в силу и во имя слабых взаимодействий».

Лямбда-частица

Вопросы все же оставались. Все процессы, для которых было непосредственно установлено нарушение принципа четности, обладают общей характерной чертой: в каждом из них среди продуктов распада имеется по крайней мере одно нейтрино. Не может ли стать, что несохранение четности связано исключительно с нейтрино?

В свое время эта частица уже справилась с другим тяжелым бременем. Ведь нейтрино не участвует в парадоксальном распаде K -мезона, который спровоцировал все эти сенсационные открытия. В этом же случае свидетельства о несохранении четности носят лишь косвенный характер. И чтобы быть уверенным в том, что несохранение четности свойственно вообще всем слабым взаимодействиям, необходима прямая экспериментальная проверка этого, хотя бы в одном безнейтринном процессе. Возможность такой проверки предоставляет лямбда-частица. Соответствующие эксперименты были предприняты в Брукхейвенской национальной лаборатории и в Калифорнийском университете. Летом 1957 г. стал известен результат: четность низвергнута и здесь. Оставалось установить точные детали способа и степени нарушения принципа четности в различных слабых процессах. Теперь же несохранение четности представляется совершенно общим свойством слабых взаимодействий. Оно — новое отражение глубокого единства, лежащего в их основе и отличающего их от сильных процессов.

Принцип четности прост и классичен. Он утверждает, что законы природы не делают различий между правым и левым. Читатель может привести противоречащий этому пример: наше сердце почти всегда расположено слева. Но это — лишь частный факт природы, а не ее закон. В атомной и ядерной же физике до тех пор не было обнаружено никакой разницы между правым и левым. Как иногда случается в таких ситуациях, справедливость мощного и плодотворного принципа симметрии правого и левого считалась

само собой разумеющейся. Однако время от времени раздавались иные голоса. Они напоминали, что немного в физике самоочевидно.

Рассмотрим подробнее, к чему приводит сохранение четности на примере рождения и распада лямбда-частицы. В реально проведенных опытах протоны подвергались бомбардировке пучком высокоэнергетических (с энергией до миллиарда электрон-вольт) отрицательных пи-мезонов. Из идущих при этом конкурирующих реакций нас интересует одна: пи-мезон плюс протон дают лямбда-частицу плюс К-мезон. Обычно мы наблюдаем

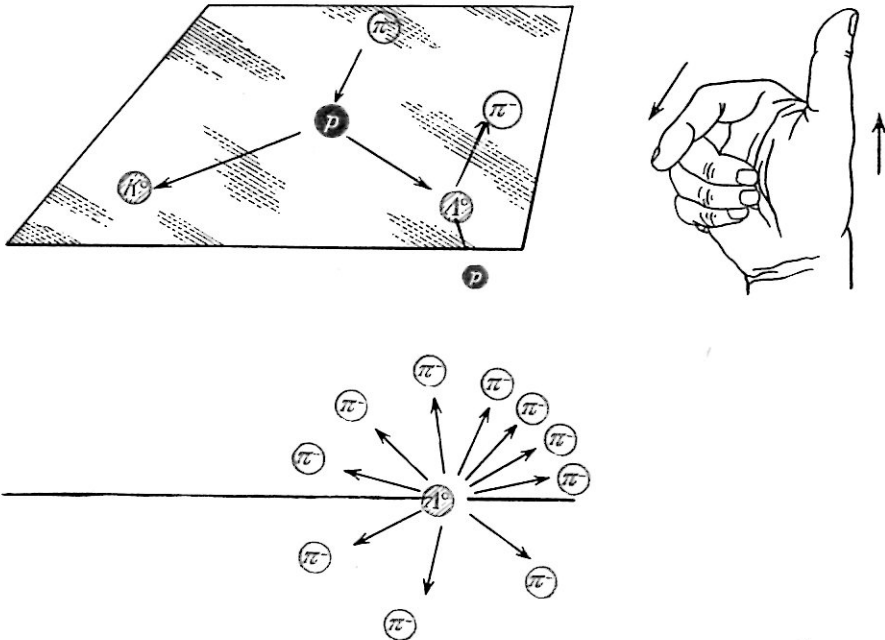


Рис. 2.5. Правило правой руки применяется к рождению и распаду лямбда-частицы (Λ^0). В верхней части рисунка отрицательный пи-мезон (π^-) сталкивается с протоном (p), порождая лямбда-частицу и нейтральный К-мезон (K^0). Затем лямбда-частица распадается на протон и отрицательный пи-мезон. По правилу правой руки отрицательный пи-мезон стремится улететь «вверх» от плоскости, проходящей через траектории лямбда-частицы и нейтрального К-мезона. Это стремление символизирует нижняя часть рисунка.

распад появившейся лямбда-частицы на отрицательный пи-мезон и протон (рис. 2.5). Согласно Евклиду, любые две пересекающиеся прямые определяют проходящую через них плоскость. Возьмем плоскость, проходящую через траектории налетающего пи-мезона и появившейся лямбда-частицы. А теперь займемся пи-мезоном, рождающимся при распаде лямбда-частицы. Он может вылететь в любом направлении. Выделим только два направления, перпендикулярные плоскости: направление «вверх» и направление «вниз». Но как мы можем решить, которое из них верхнее, а которое нижнее? Пока мы произвольным, но определенным образом не уговорились, слова эти смысла не имеют. Сделаем же такой уговор.

Возьмите правую руку. Направьте указательный палец ее по линии полета налетающего пи-мезона, а средний — по линии полета лямбда-частицы. А теперь заявим, что ваш большой палец направлен «вверх» от плоскости. Это зафиксирует смысл «верха», а следовательно, и «низа».

Если же вы возьмете левую руку и сделаете то же самое, то «верх» и «низ» поменяются местами.

Тогда принцип четности утверждает, что природа никак не позаботилась о различии между правым и левым. Ей все равно, какое определение вы выбрали. Таким образом, распадным пи-мезонам следовало бы с одинаковой вероятностью появляться «над» и «под» плоскостью. Однако эксперименты показали, что в действительности такого равноправия нет. Оказалось, что на языке правила правой руки пи-мезоны чаще вылетают «вверх», чем «вниз».

Низвержение другой симметрии

Едва принцип четности был поставлен под вопрос и даже еще до проведения первых опытов по его проверке, физики забеспокоились о другом любимом коньке. Им был принцип симметрии между материей и антиматерией. Признанный достоверным для сильных взаимодействий, он тоже никогда не проверялся для слабых.

Симметрия, о которой мы сейчас говорим, не имеет такой простой геометрической интерпретации, как уже обсуждавшаяся симметрия между правым и левым. Возник этот принцип в квантовой механике и весьма сложен в деталях. Тем не менее ему можно дать довольно наглядную формулировку. Все дело началось с красивой математической теории электрона, развитой более 30 лет назад П. А. М. Дираком из Кембриджского университета. Его теория сразу оказалась чрезвычайно удачной для детального описания поведения электронов в атомах. Но в ином плане она привела к поразительному результату: предсказанию новой частицы, позитрона. Позитрон является античастицей по отношению к электрону, обладая той же самой массой, но противоположным по знаку зарядом. Он был открыт несколько лет спустя после его предсказания. Та же теория предсказала существование антипротонов и антинейтронов. Эти частицы были обнаружены в гораздо более поздних экспериментах. Обобщенные, идеи Дирака были применены ко всей физике элементарных частиц. В настоящее время мы считаем, что каждой частице соответствует своя отдельная античастица. Единственное исключение составляют фотон и нейтральный пи-мезон, для которых частица и античастица совпадают. На деле даже нейтрино соответствует антинейтрино. В бета-распаде нейтрона именно антинейтрино и испускается. И теория Дирака, и ее последовательные обобщения сформулированы таким образом, чтобы трактовать частицы и античастицы на равной ноге. Другими словами, каждой реакции с участием частиц должна соответствовать реакция с участием античастиц. При этом обе такие реакции должны протекать во всех деталях одинаково. Понятно, что само представление о глубокой симметрии между материей и антиматерией заняло положение прочного физического принципа. Ему угрожал ярлык самоочевидной истины.

Вернемся к распаду лямбда-частицы и выясним, что влечет за собой симметрия между материей и антиматерией. На рис. 2.5 изображены рождение и последующий распад лямбда-частицы. На нем показано, в чем состоит несохранение четности для этих процессов. Обратимся теперь к рис. 2.6. Здесь мы имеем дело с соответствующими процессами для античастиц. Предположим, что первоначальная энергия анти-пи-мезона и угол его траектории к линии полета анти-лямбда-частицы те же самые, что и в реакции с частицами на рис. 2.5. Тогда две схемы отличаются только тем, что во второй частицы заменены на античастицы. О реакции с части-

нами мы знаем, что распадные пи-мезоны вылетают преимущественно «вверх», в согласии с правилом правой руки. Преимущественность эта отражает несохранение четности. Останься принцип симметрии между материей и антиматерией справедливым, он потребовал бы той же самой преимущественности «вверх» по правилу правой руки и в реакции с античастицами. Другими словами, частица и античастица должны нарушать четность одинаковым образом. В противном случае имелось бы внутреннее различие между частицей и античастицей, запрещенное принципом симметрии.

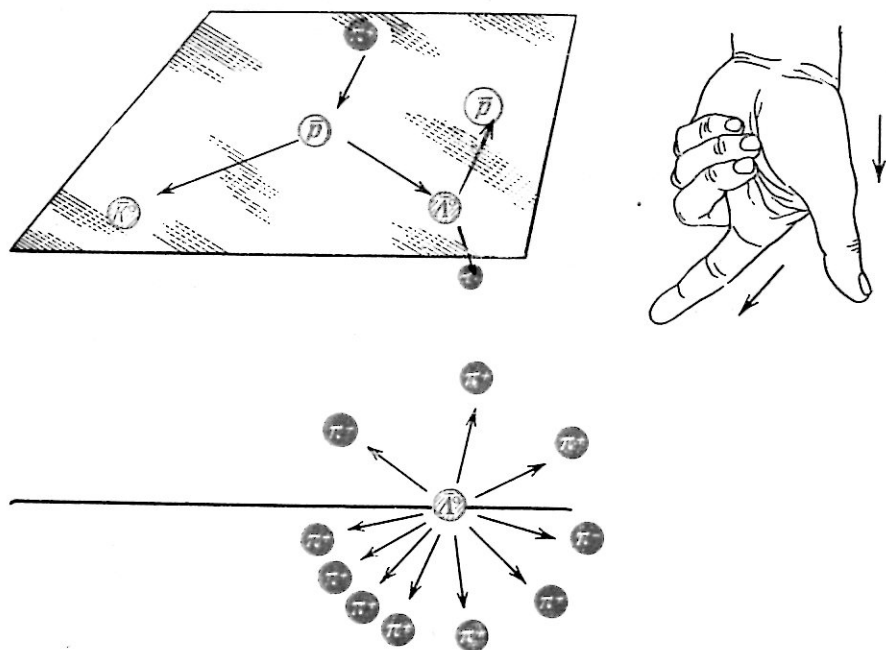


Рис. 2.6. Правило левой руки применяется к рождению и распаду анти-лямбда-частицы ($\bar{\Lambda}^0$). Верхняя часть рисунка изображает соударение положительного пи-мезона (π^+) с антипротоном (\bar{p}), порождающее анти-лямбда-частицу и анти-K-мезон (\bar{K}^0). Затем анти-лямбда-частица распадается на антипротон и положительный пи-мезон. Если «работает» комбинированная симметрия, то по правилу левой руки положительный пи-мезон стремится улететь «вниз» от плоскости, проходящей через траектории анти-лямбда-частицы и нейтрального анти-K-мезона.

В действительности наш воображаемый эксперимент с античастицами еще не проведен, хотя, вне сомнений, будет проведен непременно. Однако принцип симметрии материи и антиматерии не только связывает одну реакцию с другой. Имеются также внутренние следствия из него для каждой реакции, взятой в отдельности. Обнаружить эти следствия — задача чисто вычислительная. Для процесса с участием частиц дело обстоит так. Если симметрия между материей и антиматерией справедлива, то асимметрия между «верхом» и «низом» не должна превосходить некоторой величины, которую можно вычислить. В проведенных же экспериментах этот верхний предел оказался намного превзойденным. Отсюда следует, что в реакции с античастицами распадные пи-мезоны будут вылетать преимущественно «вниз», в терминах правила правой руки. Аналогичные проверки и с тем же самым результатом были проведены для бета-распада, а

также для распадов пи-, мю- и K -мезонов. Мы заключаем, что симметрии между материей и антиматерией нет в этих процессах, а вероятно, и вообще при слабых взаимодействиях.

В настоящее время слабые взаимодействия подорвали два заветных принципа симметрии: правое — левое и материя — антиматерия. Возникает вопрос: нельзя ли все же спасти хоть что-нибудь от этих симметрий? Имеется одна возможность. Что случится, когда мы одновременно поменяем правое на левое, а материю — на антиматерию? Вполне возможно, что эта комбинированная симметрия останется даже в мире слабых взаимодействий. Схема на рис. 2.6 показывает, к чему она приведет. В реакциях с частицами распадшие пи-мезоны действительно предпочитают улетать «вверх», в согласии с правилом правой руки. Если верна комбинированная симметрия, то распадшие пи-мезоны в реакциях с античастицами также должны стремиться «вверх», но направление «вверх» определяется теперь правилом левой руки.

Здесь снова нет реальной необходимости обращаться для проверки комбинированной симметрии к реакциям с античастицами. Проверке доступны вытекающие из принципа следствия для реакций только с частицами. Проводимые в настоящее время тщательные и трудные опыты с бета-распадом должны с высокой надежностью решить вопрос. В данный момент принцип комбинированной симметрии весьма привлекателен.

Допустим, что он справедлив. Тогда никаким законам природы не противоречило бы, если бы сейчас где-нибудь во вселенной Цзун-дао анти-Ли и Чжень-нин анти-Янг обратили внимание на свои сердца. Конечно же, сердца их были бы справа.

МЮОН

(ИЮЛЬ 1961 г.)

Эта элементарная частица имеет в 200 раз большую, чем у электрона, массу, но во всем остальном очень походит на него. В недавних экспериментах физики искали ответ на вопрос: зачем ей быть тяжелее?

Прогресс в физике можно сравнить с наступлением армии. Прорывы удаются там, где сопротивление слабее всего; пока хватает сил, трудные участки обходятся. Примером такой тактики является метод, который применили физики для штурма загадки мю-мезона, или мюона, элементарной частицы, весящей примерно в двести раз больше электрона. Открытый самым первым из нестабильных частиц (не считая свободного нейтрона), легче всех из них поддающийся лабораторному исследованию из-за сравнительно долгой жизни (2,2 миллионных доли секунды) и легкости, с которой его можно получать, мюон изучен тщательнее любой другой нестабильной частицы. Исследования показали, что, в отличие от других мезонов, мюон не участвует в сильных взаимодействиях с другими частицами, т. е. не испытывает сил, удерживающих вместе частицы в ядре атома. Вместо этого, во всем, исключая его нестабильность, мюон выглядит тяжелым родственником электрона. Подобно электрону, он взаимодействует с остальной вселенной только посредством электромагнитных сил и сил так называемого слабого взаимодействия. (Слабые взаимодействия служат причиной таких явлений, как радиоактивный распад с испусканием электрона. Так распадается и сам мюон.) В этом месте физики сталкиваются с вопросом: если мюон во всех своих взаимодействиях идентичен электрону, то зачем ему быть в 200 раз тяжелее? Ведь считается, что масса частицы обусловлена ее взаимодействиями. А когда две частицы одинаково проявляют себя во взаимодействиях, невозможно призвать на помощь никакой механизм, который мог бы объяснить различие их масс.

Мюон был открыт в 1936 г. на фотографиях космических лучей, сделанных в камере Вильсона. Его открыли Карл Д. Андерсон и Сет Х. Неддермейер из Калифорнийского технологического института и независимо Дж. С. Стрит из Гарвардского университета. Поиски частицы примерно с такой массой физики вели с 1935 г., когда японский теоретик Хидеки Юкава постулировал ее существование. Вычисления Юкавы показали, что такая частица помогла бы объяснить громадную величину сил, удерживающих в ядре протоны несмотря на взаимное отталкивание их положительных зарядов. Рассуждая, Юкава пользовался аналогией. Силе электромагнитного поля отвечает фотон, частица нулевой массы. Аналогично полю ядерных сил также должна соответствовать своя частица, только частица эта должна обладать некоторой массой. Это следует из того, что, в отличие от электромагнитных, ядерные силы действуют только

на близком расстоянии от ядра. Конечный радиус действия таких сил свидетельствует о том, что масса соответствующей частицы должна быть примерно в 200 раз больше электронной. Однако вскоре оказалось, что частиц с этой массой — называемых теперь мю-мезонами — чересчур уж много.

	Электрон	Мюон
Год открытия	1897	1936
Масса	1	207
Среднее время жизни, сек. . .	бесконечное	$2,22 \cdot 10^{-6}$
Электрический заряд	-1 (+1)	-1 (+1)
Лептонное число	1 (-1)	1 (-1)
Спин	1/2	1/2
Виды взаимодействия	электромагнитное и слабое	электромагнитное и слабое
Предсказанный аномальный магнитный момент	0,0011596	0,001165
Измеренный аномальный магнитный момент	$0,0011609 \pm 0,0000024$	$0,001145 \pm 0,000022$

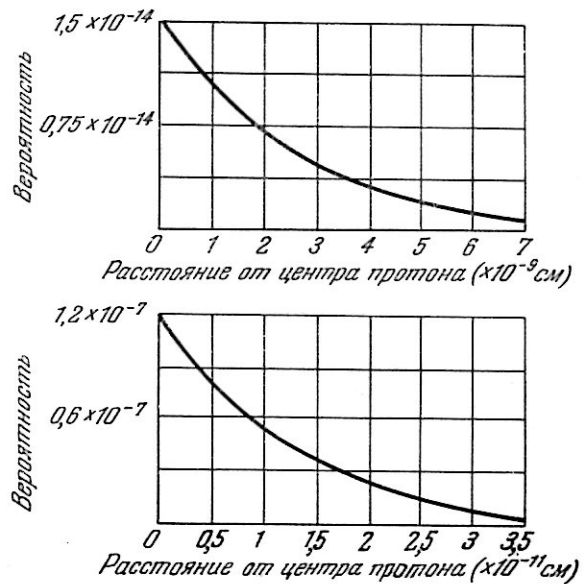


Рис. 3.1. Электрон и мюон отличаются только массами, средними временами жизни и аномальными магнитными моментами (таблица слева). Различие в массах влечет за собой также различие в вероятностях, с которыми каждая частица будет проникать в ядро при движении по орбите вокруг него. Это можно видеть, сравнив две «кривые вероятности» справа. Верхняя кривая изображает вероятность найти электрон на данном расстоянии от центра протона в атоме водорода. Нижняя кривая соответствует аналогичной вероятности для «мезоатома» — мюона и протона.

Мю-мезоны космических лучей легко проходят через атмосферу, проникают сквозь свинцовые пластинки, их можно обнаружить даже в глубоких шахтах. Это поведение вовсе не к лицу гипотетической частице Юкавы. Раз предполагается, что она дает начало мощным силам в ядре, ей положено охотно взаимодействовать с ядрами любого вещества, в которое она попала. Проникать в атмосферу ей положено лишь с трудом, а в свинцовую пластинку вообще не положено.

Как только была точно установлена слабая способность мюона к взаимодействиям, физики продолжили поиски настоящей частицы Юкавы. Эту частицу — пи-мезон, или пион, — обнаружили в конце концов в 1948 г. в виде составной части космических лучей в верхних слоях атмосферы. Время жизни пиона так мало, а взаимодействует с ядрами он так интенсивно, что редко когда проникает он сквозь атмосферу и достигает Земли. Как видно, во всех деталях он достоин быть частицей, отвечающей за поле ядерных сил. Вдобавок он и родитель мюона. Прожив в среднем $25 \cdot 10^{-9}$ сек (25 миллиардных долей секунды), он распадается на мюон и нейтрино. Не имей мюон такого предка в своей родословной, рождение мюона было бы весьма редким событием.

Протоны первичного космического излучения сталкиваются в верхних слоях атмосферы с ядрами и взаимодействуют с ними. Взаимодейст-

вия эти — «сильные», другими словами, точно такие взаимодействия рожают поле ядерных сил. Благодаря им возникают различные ядерные осколки и большое число пионов. Затем пионы распадаются на мюоны. Не принимая участия в сильных взаимодействиях, такая частица, как мюон, не может создаваться посредством прямых столкновений протонов

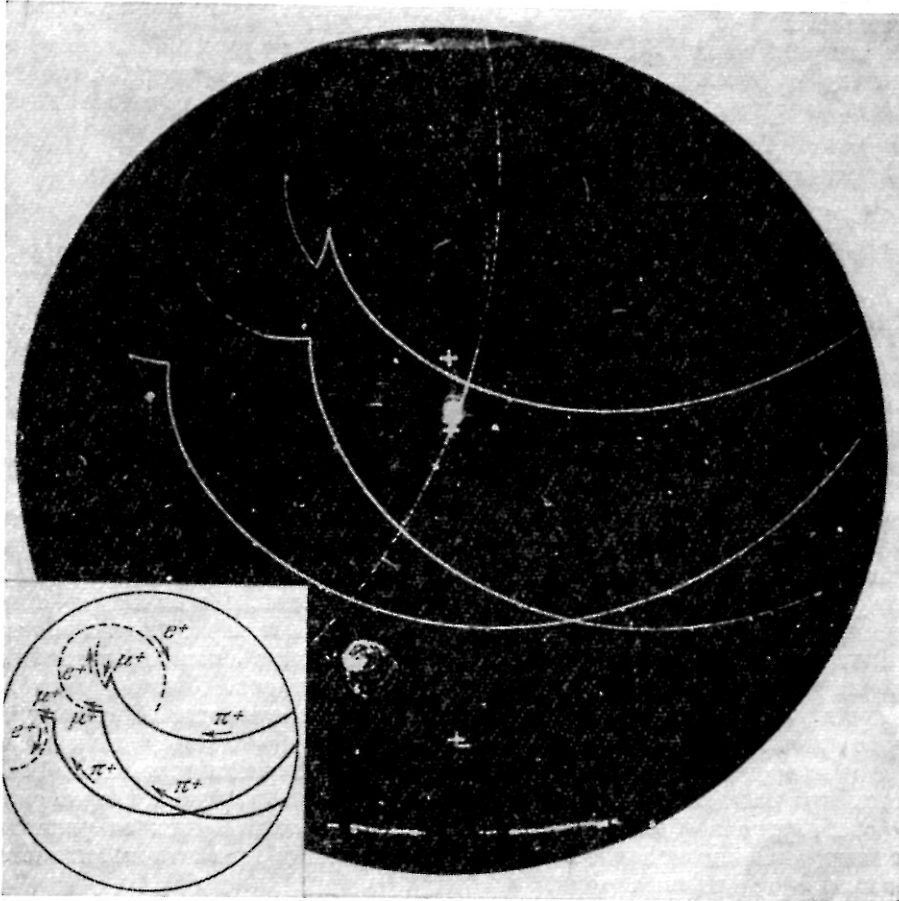


Рис. 3.2. Три мюона зарегистрированы на трех коротких треках. Треки остались после мюонов в жидком водороде пузырьковой камеры. Каждый из трех пи-мезонов (обозначенных как π^+ на схеме слева) распадается на мюон (μ^+) и нейтрино. Нейтрино нейтрально и не оставляет трека. Затем каждый из мюонов распадается на положительный электрон (e^+), нейтрино и антинейтрино.

с ядрами. Назначение ускорителей частиц — столкновения именно такого типа. Поэтому при помощи ускорителей в изобилии создаются пионы, а уж они, распадаясь, обеспечивают изобилие мюонов.

В течение десятка лет вслед за открытием пиона внимание к мюону оставалось сильно ослабленным. Прежде всего, в этом виноват сам пион. А кроме него — открытие сбивающего с толку множества других частиц: К-мезонов и частиц лямбда, сигма и кси. Все эти частицы — обладатели нового квантового свойства, называемого «странностью». Оно отличает их от всех открытых ранее частиц. Однако странность немногим необычнее

такого «старого» квантового свойства, как спин. Подобно веществу и энергии, именно это свойство сохраняется, когда его владельцы — странные частицы — участвуют в сильном взаимодействии. Когда же странные частицы участвуют в слабых взаимодействиях, странность не сохраняется — никто не знает почему.

Физики обычно иллюстрируют связь частиц, участвующих в слабых взаимодействиях (оставляя пока в стороне странные частицы), на треугольной диаграмме (рис. 3.3). Два нуклона (нейтрон и протон) занимают одну вершину треугольника. Электрон занимает вторую вершину, а мюон — третью. Экспериментальные данные свидетельствуют — хотя все еще не вполне убедительно, — что частицы в одном углу диаграммы взаимодействуют с одинаковой силой с частицами в любом другом углу.

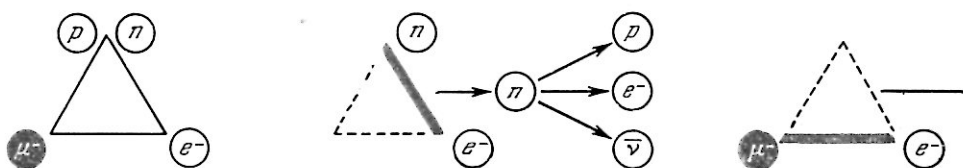


Рис. 3.3. Треугольник взаимодействий (слева) связывает частицы, участвующие в слабом взаимодействии. Вторая сторона соответствует процессу, в котором нейтрон (n) испускает электрон и антинейтрино. Третья сторона относится к слабому взаимодействию, в котором нейтрон и

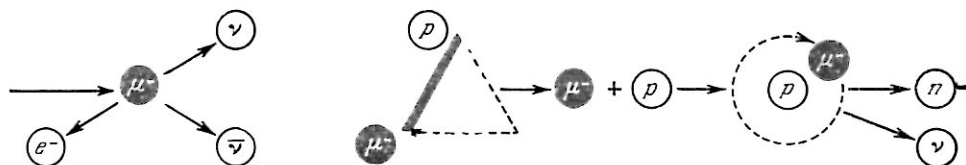
Одна сторона треугольника, соединяющая нуклон и электрон, изображает собой бета-распад. В таком распаде, например, нейтрон испускает электрон и антинейтрино и превращается в протон. По такой же схеме распадаются и тяжелые ядра, когда они испускают электроны. Скорость распада должна была бы служить указанием о силе взаимодействия. Однако на реакцию влияет множество других факторов. Поэтому радиоактивные ядра распадаются с самыми различными скоростями. Одним ядрам хватает для распада ничтожных долей секунды. Другие не успели распасться и за время жизни Вселенной, погруженные в свой летаргический сон. И несмотря на такой громадный диапазон скоростей распадов, теория смогла разобраться в фундаментальных процессах, отвечающих за распады. Тот вывод, что интенсивность этих процессов всегда одна и та же, является подлинным триумфом теории.

Связывающая мюон и электрон вторая сторона треугольника соответствует распаду мюона на электрон. Процесс этот походит на бета-распад. Здесь, однако, вылетающий электрон сопровождают не одно нейтрино, а два. Исходя из скоростей распадов, можно сравнить интенсивности взаимодействия: с одной стороны — мюона и электрона, а с другой — нуклона и электрона. Сравнение говорит о равенстве этих интенсивностей.

Третьей стороной треугольника изображено взаимодействие мюона и нуклона. Примером его служит явление захвата мюона. Остановившись в каком-либо веществе, отрицательный мюон благодаря своему заряду притягивается к ядру. Проникнув сквозь облако окружающих ядро электронов, он ведет себя в дальнейшем, совсем как тяжелый электрон. Именно, он может находиться только на определенных уровнях энергии, или орбитах, около ядра. По этим разрешенным уровням он «сваливается» вниз, испуская при каждом переходе рентгеновские лучи. Поведение обычных электронов в атоме — в точности такое же, поэтому система из ядра и мю-

мезона называется мезоатомом. «Свалившись» до предела вниз, мюон проводит остаток своей жизни в состоянии с наименьшей энергией. При этом орбита проходит чрезвычайно близко к ядру. Мюон примерно в 200 раз тяжелее электрона. Поэтому размер его наименьшей орбиты примерно в 200 раз меньше, чем у электрона вокруг того же ядра.

Но вспомним, чему научила нас современная физика. Движение частицы вокруг ядра мы должны представлять себе не как вращение планеты вокруг Солнца, а скорее как размазанное облако вероятности. При этом значительную часть времени частица проводит фактически внутри ядра (см. рис. 3.1). Находясь на «орбите», мюон может либо распасться, либо вступить во взаимодействие с одним из протонов ядра. Это взаимодействие вызывает переход протона в нейтрон с испусканием нейтрино; оно



бых взаимодействиях (за исключением «странных» частиц). Первой стороне треугольника превращается в протон (p). Вторая сторона представляет распад мюона на электрон, тором протон, связав предварительно мюон в мезоатоме, захватывает его, превращаясь испуская нейтрино.

занимает определенный отрезок времени. Как и в радиоактивном распаде, время зависит от конкретного ядра. Но, опять же как в радиоактивном распаде, удастся установить интенсивность фундаментального взаимодействия. Ее величина получается на основе анализа скоростей захвата мюонов самыми различными ядрами. Сведения о ней не так надежны, как сведения об интенсивности радиоактивного распада. Все же имеются определенные показания в пользу того, что интенсивность мю-захвата совпадает с интенсивностью «универсального» слабого взаимодействия. Большие надежды возлагаются на два проводимых в настоящее время эксперимента. Один из них ставится в Колумбийском, а второй — в Чикагском университетах. Эксперименты предназначены для измерения скорости захвата мюонов ядрами водорода — протонами. В захвате мюонов протонами не играет роли фактор ядерной структуры. Поэтому может быть найдена скорость элементарного взаимодействия. Хотя и используется жидкий водород, в котором ядра расположены сравнительно близко друг к другу, вероятность захвата все же очень мала, и проведение эксперимента наталкивается на чрезвычайные трудности. По-видимому, результаты этих экспериментов должны существенно повлиять на то, чтобы весь разговор о третьей стороне треугольника велся на столь же надежной основе, что и о двух других.

Итак, можно заключить, что во всем, что касается слабых взаимодействий, мюон ведет себя, как тяжелый электрон. Они сходны и во многом другом. Например, подобно положительному и отрицательному электрону, имеются положительный и отрицательный мюоны. Не существует нейтральных мюонов и нейтральных электронов. Внутренний момент мюона — его «спин» — оказывается равным $1/2$, как и спин электрона. Любопытно, что экспериментальные свидетельства об этом фундаментальном свойстве не вполне однозначны. Однако для описания очень многих деталей свойств

мюона годится теория частицы со спином $1/2$. Поэтому остается мало оснований сомневаться в том, что спин мюона действительно равен $1/2$.

Другое сходство между мюоном и электроном состоит в том, что оба они — «лептоны», т. е. легкие частицы. Это означает, что они вместе с нейтрино подчиняются закону сохранения, согласно которому число лептонов во Вселенной постоянно. Это может показаться странным, поскольку существует много процессов, в которых эти частицы рождаются и уничтожаются. Но дело в том, что при подсчете лептонов мы должны приписать число $+1$ электрону, отрицательному мюону и нейтрино, а число -1 — позитрону, положительному мюону и антинейтрино. Тогда число лептонов в начале и в конце любой реакции будет тем же самым. Например, при захвате отрицательного мюона ядром испускается нейтрино. Поскольку обе эти частицы несут лептонное число $+1$, закон сохранения лептонов удовлетворяется. Когда же положительный мюон распадается на позитрон, нейтрино и антинейтрино, полное число лептонов до и после распада равно -1 .

Это, в сущности, и все, что знали о мюоне к 1957 г. Тогда надеялись, что более тщательные эксперименты выявят свойства мюона, которые смогут прояснить происхождение его массы. Мощным толчком для развития мюонных исследований послужило в том же году открытие несохранения четности. Закон сохранения четности утверждал, что в природе нет различий между правым и левым. Другими словами, нельзя уловить разницу между каким-либо событием и его зеркальным отражением. Сама идея о несохранении четности принадлежит Ли и Янгу. Она была выдвинута как попытка понять парадокс в схемах распада K -мезона. (Очень похоже, что в распаде K -мезона четность не сохраняется. Сейчас мы уверены, что это и в самом деле так.)

«Свержение» четности привело к двум важным следствиям в мюонных исследованиях. Прежде всего, обладающий спином мюон можно считать ориентированным в пространстве. Другими словами, можно говорить о том, куда направлена соответствующая спине «ось вращения». Подчеркнем, что бессмысленно говорить о каком-либо действительном вращении частицы. Ведь это означало бы, что мы способны как-то измерить движение точек на ее поверхности. Но этого принципиально нельзя сделать. Представление о спине как вращении эвристично: оно полезно, поскольку служит наглядности описания свойств частицы. Но вернемся к четности. Если бы она сохранялась при рождении мюонов, то появляющийся из ускорителя пучок непременно содержал бы мюоны всех возможных ориентаций. В действительности же оказалось, что мюоны в пучке ориентированы в основном вдоль направления движения. Если бы, кроме того, четность сохранялась при распаде мюонов, то не оказывалось бы предпочтения ни одному из направлений, в которых испускаются рожденные в распаде электроны. Но вышло так, что природа, не заинтересованная в сохранении четности, заставляет электроны вылетать преимущественно в направлении, противоположном направлению оси мюонного спина. Оба эти свидетельства о несохранении были установлены в изящном опыте, сделанном в Колумбийском университете Ричардом Л. Гарвином, Леоном М. Ледерманом и Марселем Вейнрихом.

В результате этих открытий ученые, занимающиеся физикой мюонов, обладают теперь мощными средствами изучения частиц. В их распоряжении оказались мюоны, ориентированные в основном вдоль одного направления. Мало того, направление это можно определить, выявив электроны распада. Огромный прогресс — аналогично тому, как если бы раньше нам

приходилось в темноте и в толстых перчатках заниматься поисками винтиков, а теперь эти винтики оказались аккуратно разложенными на подносе, да еще головка каждого из них помечена светящимся составом. Сейчас точность мюонных измерений вполне может приблизиться к точности, достигнутой в атомной физике.

Тотчас же после открытия несохранения четности началась подготовка целой серии опытов — в Колумбийском университете, Чикагском университете, а затем в ЦЕРНе (Европейской организации ядерных исследований). Их цель — изучение магнетизма мюона. Каждая обладающая

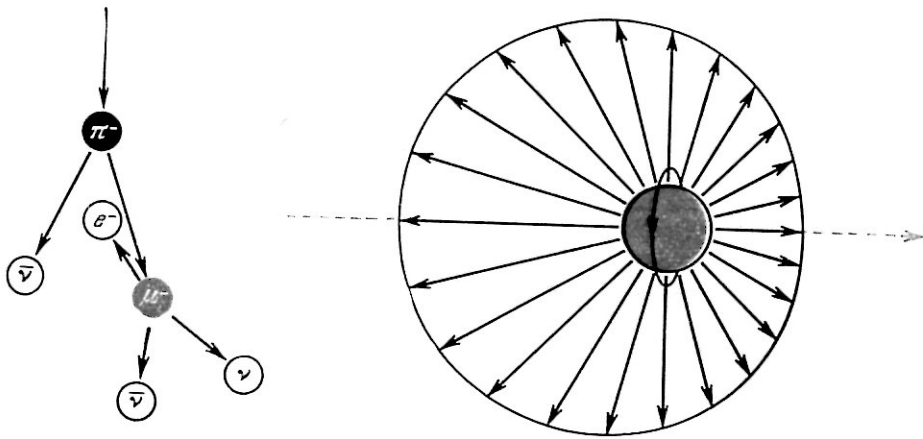


Рис. 3.4. Происхождение и распад мюона, начиная от распада пи-мезона и кончая рождением электрона (e^-). Пи-мезон (π^-) распадается на мюон (μ^-) и антинейтрино ($\bar{\nu}$); мюон распадается на электрон, антинейтрино и нейтрино (ν) (схема слева). Мюон (изображаемый большим цветным кружком на схеме справа) испускает электрон преимущественно в направлении, противоположном направлению оси своего спина (пунктирная цветная стрелка). Вероятность того, что электрон будет испущен в данном направлении (черные стрелки), пропорциональна длине стрелки.

спином заряженная частица ведет себя так, как если бы вдоль оси ее спина лежал прямой магнит. Интенсивность такого магнита называется его магнитным моментом. Величину магнитного момента электрона может с высокой точностью предсказать электромагнитная теория. Измерение магнитного момента мюона представляет очень большой интерес. По его результатам можно судить, применима ли к мюону теория, так хорошо описывающая электрон. Отклонение от предсказанной ею величины могло бы стать желанным ключом к пониманию структуры мюона и, следовательно, происхождения его массы. Например, величина магнитного момента протона совершенно отлична от той, которую предсказывает учет только электромагнитных взаимодействий. Современная физика элементарных частиц считает, что протон непрерывно испускает и поглощает мезоны. Поскольку взаимодействие протона — сильное, связанными с ним мезонами являются пионы. Физически они ненаблюдаемы и называются «виртуальными». Тем не менее они порождают круговые электрические токи, повышающие магнитный момент протона. Но мюон не участвует в сильных взаимодействиях. Поэтому любое отклонение величины его магнитного момента от предсказанной можно было бы отнести за счет какой-то еще не известной до сих пор особенности строения мюона. За это могло бы отвечать даже

взаимодействие с полем еще не открытой частицы. С другой стороны, отклонение величины магнитного момента мюона могло бы свидетельствовать о нарушении законов электромагнетизма на очень коротких расстояниях. Оно могло бы проявиться на мюоне и не проявиться на электроне. Дело в том, что из-за большей массы мюона его взаимодействие с электромагнитным полем происходит в меньшей области пространства. Уже давно теоретики выдвинули идею, что, подобно энергии, пространство не может делиться без конца. Согласно этой идее, могла бы найтись наименьшая длина, которая ограничит применимость законов электромагнетизма в том виде, в каком мы их знаем сейчас. Поскольку у нас нет свидетельств о таком фундаментальном кванте длины, магнитный момент мюона дает физикам новое средство для проникновения в эту проблему.

Магнитный момент частиц измеряется в магнетонах. Поскольку в определении магнетона входит масса, эта единица различна для каждой частицы. Часто величину момента выражают через « g -фактор». Этот термин появился еще в седой древности атомной физики. g -фактор равен отношению реального магнитного момента в магнетонах к величине, равной половине магнетона. Главным триумфом знаменитой формулировки квантовой механики, принадлежащей П. А. М. Дираку, было предсказание значения 2 для g -фактора электрона. Оно согласовалось с экспериментами того времени.

Более точные эксперименты, сделанные Поликарпом Кушем в Колумбийском университете вскоре после окончания второй мировой войны, показали, что в действительности g -фактор электрона отличается от 2 примерно на одну тысячную. Это отклонение было названо аномальным магнитным моментом электрона. Вскоре Джулиан Швингер из Гарвардского университета уточнил уравнения квантовой электродинамики. Теоретическая величина g -фактора снова была согласована с экспериментом. Как ни мала эта аномалия, она имеет решающее значение для понимания того, как заряженная частица взаимодействует с электромагнитным полем. Аномалия возникает потому, что электрон постоянно испускает и вновь поглощает виртуальные фотоны. Ненаблюдаемые сами по себе, они тем не менее приводят к измеримым эффектам.

Цель нескольких экспериментов, предпринимавшихся с 1957 г., состояла в как можно более точном измерении g -фактора мюона. В них применялись два подхода. Первый, наиболее простой, заключался в непосредственном измерении магнитного момента. Сделать это можно с высокой точностью, достигающей в настоящее время одной стотысячной. Однако теория не предсказывает непосредственно магнитный момент. В ней вычисляется только g -фактор, и для сравнения с опытом требуется знать массу мюона. Хотя эта масса измерена куда более точно, чем для любой другой нестабильной частицы, погрешности в измерениях все еще достигают примерно одной десятитысячной. В результате погрешности в экспериментальном значении g -фактора имеют тот же порядок. Но отклонение g -фактора от 2 составляет лишь одну тысячную. Поэтому при измерениях с точностью в одну десятитысячную остается неопределенность в десять процентов. Такая неопределенность слишком велика для того, чтобы можно было обеспечить существенную проверку предсказанной величины.

Тем не менее непосредственное измерение магнитного момента явилось полезным и до некоторой степени удовлетворительным достижением. Самые последние измерения были проведены в Колумбийском университете Д. П. Хатчинсоном, Дж. Минсом, А. Пэтлачем, Г. Шапиро и автором этой статьи. Наш метод состоял в наблюдении скорости, с которой прецесси-

рует ось спина, когда частица останавливается в магнитном поле. Скорость прецессии зависит от магнитного момента и напряженности поля. Рождаются мюоны при распаде созданных в циклотроне пионов. Рожденные от распавшихся в полете пионов, мюоны обладают спином, направленным преимущественно вперед. Затем их останавливает мишень. В состоянии покоя мюоны приходят со спином, перпендикулярным направлению созданного большим электромагнитом поля. Тотчас же начинается прецессия.

Расположенные вокруг мишени счетчики электронов регистрируют момент, когда распадаются мюоны, и направление, в котором они испускают электроны. Это направление преимущественно противоположно тому, куда указывает в момент распада мюона ось его спина. Таким образом, электроны служат как бы лучом прожектора на маяке, причем прожектор вращается со скоростью прецессии. Правда, вспышка прожектора выявляет угол поворота только в сам момент распада. Если тем не менее наблюдать за многими мюонами, каждый из которых распадается по прошествии своего отрезка времени, можно составить вполне удовлетворительное впечатление о самой прецессии. Эксперимент состоит в подсчете числа оборотов, совершенных в данный интервал времени. Но среднее время жизни мюона составляет лишь около 2,2 миллионных долей секунды. Поэтому желательно применять мощный магнит, чтобы получить как можно более высокую скорость прецессии. В нашем эксперименте использовалось магнитное поле напряженностью в 15 000 гаусс. Оно обеспечивало скорость прецессии примерно в 200 миллионов оборотов в секунду. Измерялась она с помощью специальной электронной схемы. Схема проводила сравнение скорости прецессии мюона со скоростью колебаний переменного напряжения точно известной частоты. Такая методика очень сложна, и в измерениях легко могут вкратиться систематические (т. е. присущие самой методике) ошибки. Поэтому необходима особо тщательная настройка и калибровка. Наш принцип калибровки заключался в том, что на измерительную схему посылался сигнал, выработанный электронным генератором. Этот сигнал имитировал поведение мюонов, прецессирующих с высокой и на этот раз точно известной скоростью.

Помимо измерений магнитного момента, для получения g -фактора необходимо разработать методы измерения массы мюона. Наиболее точный из них впервые был предложен пять лет назад в Колумбийском университете Л. Дж. Рейнхутером. Недавно его улучшили другие исследователи в Колумбии и Чикаго. Метод состоит в измерении энергии рентгеновских лучей (подобно свету, состоящих из фотонов), которые испускает отрицательный мюон, когда он «падает» к ядру по разрешенным ему орбитам. Эта энергия подчиняется тем же законам, что и энергия электронов, совершающих аналогичные переходы. Она зависит непосредственно от массы частицы. Поскольку мюон более чем в 200 раз тяжелее электрона, испускаемые им фотоны соответственно более энергичны. К сожалению, порождаемых мезоатомом нескольких сотен фотонов в секунду слишком уж мало для нормальной работы обычного рентгеновского спектрометра, который мог бы измерить их энергию.

Имеется, однако, способ обойти эту трудность. Бывает, что направленные на мишень рентгеновские лучи поглощаются ею по-разному в зависимости от их энергии. Может статься, что лучи с энергией из некоторого узкого интервала поглощаются гораздо сильнее, чем лучи со слегка отличающейся энергией. Эти резкие изменения поглощения, называемые пиками, случаются, когда рентгеновские лучи несут как раз такую энергию, какая необходима, чтобы выбить из атома электрон, занимающий

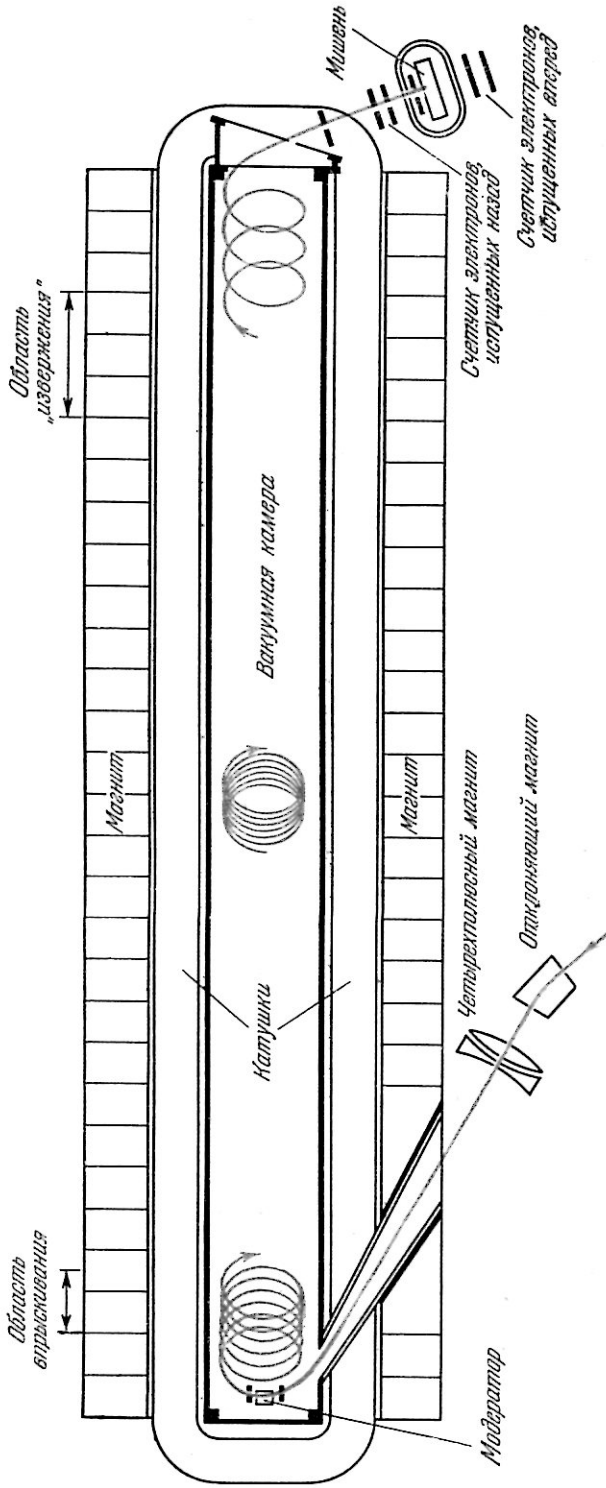


Рис. 3.5. Установка, используемая в ЦЕРН для так называемого « $g-2$ » эксперимента. 20-футовая вакуумная камера помещена между полюсами 85-тонного магнита. Теория утверждает: когда мюон кружится в магнитном поле, ось его спина должна прецессировать, т. е. вращаться со скоростью, несколько превышающей скорость движения мюона по его спиральной траектории. Результат прецессии обнаруживается по направлению вылета электронов при распаде мюонов в мишени (в правой части установки; см. также рис. 3.7 и 3.8). Войдя в вакуумную камеру, мюоны (их траектория — цветная линия) замедляются и начинают двигаться по спирали. Неоднородности магнитного поля заставляют мюоны перемещаться слева направо в их движении по спирали.

определенный энергетический уровень. Благодаря случайным обстоятельствам рентгеновские лучи, испускаемые мюоном на одной из ступенек его спуска с орбиты на орбиту к ядру фосфора, обладают той же энергией, что и так называемый К-пик в свинце. Пик этот не идеально острый, а занимает довольно узкий интервал энергий. Интервал был тщательно измерен. Пусть рентгеновские лучи из мезоатома фосфора поглощаются в свинце. Тогда довольно точно можно определить место в интервале энергий пика, которое занимает рентгеновская линия. Отсюда и вычисляется масса

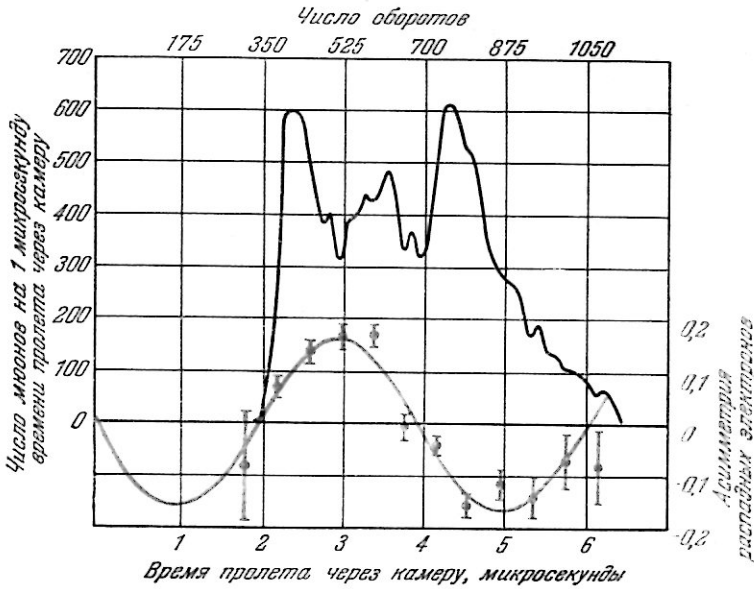


Рис. 3.6. График результатов опыта в ЦЕРНе. На верхней кривой показано распределение мюонов по времени, проведенному ими в магните, и число совершенных при этом оборотов. Вертикальными цветными линиями нанесен разброс значений асимметрии электронов, испускаемых при распаде мюонов в мишени. По синусоидальной кривой, проходящей наиболее близко ко всем экспериментальным точкам, определяется аномальный магнитный момент мюона: $0,001145 \pm 0,000022$.

мюона. Она равна $206,76 \pm 0,02$ электронной массы. Точность этого результата весьма высока для измерений масс. Но все же в величине g -фактора остается проклятая неопределенность в 10%.

Совершенно другой подход к проблеме g -фактора был продемонстрирован в замечательном эксперименте в ЦЕРНе. Добрых три года потребовались для его проведения — от замысла до окончательного завершения в начале 1961 г. В группу исследователей входили ученые пяти национальностей. Это были Ж. Шарпак и Т. Мюллер (Франция), А. Зикики (Италия), И. С. Сенс (Нидерланды), Ф. Дж. М. Фарли (Англия), Ричард Л. Гарвин и В. Л. Телегди (Соединенные Штаты). Для этого остроумного эксперимента недостаточность знаний о массе мюона не играла роли. В нем непосредственно измерялась отклонение g -фактора от двойки. Он и получил поэтому «кликну»: « g минус 2» эксперимент. Своим происхождением он частично обязан « g минус 2» эксперименту для электрона, проведенному недавно А. А. Шуппом, Р. У. Пиддом и Г. Р. Крейном в Мичиганском университете.

Когда заряженная частица движется в магнитном поле перпендикулярно его направлению, на эту частицу действует сила, искривляющая ее траекторию. В однородном поле траектория была бы окружностью. Время, необходимое частице для завершения одного оборота по окружности, зависит только от напряженности поля и заряда и массы частицы. От скорости оно не зависит, по крайней мере до тех пор, пока скорость частицы не приблизится к скорости света. Дело в том, что с увеличением скорости увеличивается и диаметр орбиты, так что время, необходимое для одного полного оборота, остается постоянным. Как раз на этом основан принцип работы циклотрона. Частота же, с которой частица движется по своей круговой орбите, называется циклотронной частотой.

Мы уже видели, что частица, обладающая магнитным моментом, в магнитном поле будет прецессировать. Если g -фактор частицы равен в

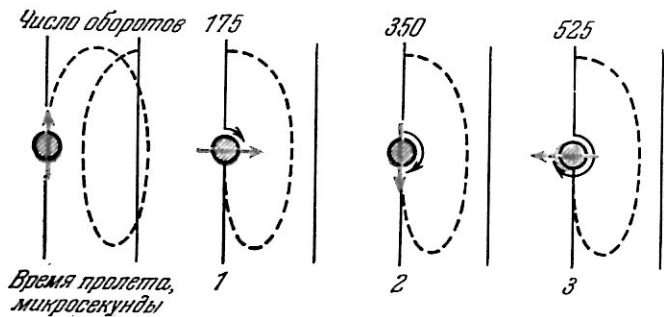
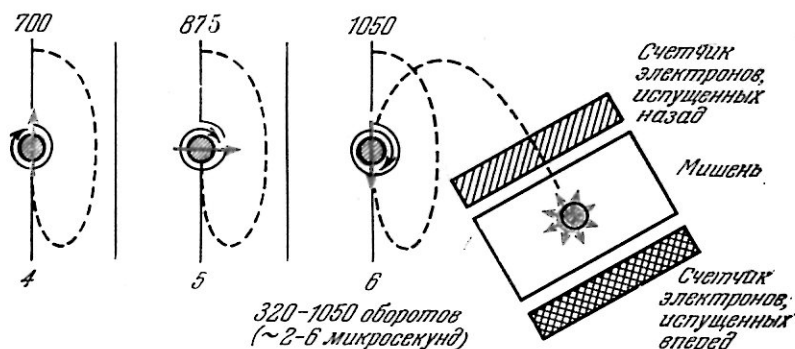


Рис. 3.7. Прецессия оси мюонного спина (цветная стрелка) в малом магнитном поле мюона. Вначале (слева) ось спина за 175 оборотов (второе положение) и на 540° за 1050 оборотов затраченного времени и направлению, в котором испускают

точности 2, а в магнитное поле она вошла со спином, направленным вдоль движения, то прецессия оставляет спин направленным все время точно по траектории. Если же g -фактор отличается от 2, то циклотронная частота и частота прецессии уже не совпадают. В этом случае ось спина будет постепенно прецессировать относительно траектории. Предоставим частице провести известный промежуток времени в известном магнитном поле. Остановив ее и измерив угол, который ось ее спина составляет с направлением движения, можно найти величину, на которую g -фактор отличается от 2.

Легко говорить о принципе эксперимента. Другое дело — его физическая реализация. Провести электронный « $g-2$ » эксперимент было трудно. С мюонным « $g-2$ » экспериментом дело обстоит гораздо тяжелее. Многие физики полагали даже, что он вообще неосуществим. По сравнению с электронами мюонов в нашем распоряжении слишком мало, а время их жизни чрезвычайно мало. Кроме того, относительно большая масса мюона требует сильных магнитных полей. Чем больше оборотов заставить совершить мюон, тем больше будет прецессионное отклонение от направления его полета, тем больше будет точность измерения. Поле в упомянутом эксперименте составляло 16 000 гаусс, а мюоны тратили на движение в поле от двух до шести миллионов долей секунды.

Для мюонного пучка характерен весьма широкий разброс в импульсах, положениях и направлениях частиц. Магнитное поле, способное удержать пучок при таких обстоятельствах, должно быть тщательно спроектировано и скрупулезно подогнано. Церновский магнит весил 85 тонн и заключал внутри себя вакуумную камеру примерно 20 футов длиной (рис. 3.9). Мюоны проникали в один конец камеры. Там, пройдя сквозь бериллиевый блок, они замедлялись настолько, чтобы начать движение по нужной орбите. В однородном поле, просто описав окружность, мюоны попали бы назад в блок. Чтобы предотвратить это и тем самым обеспечить «гуляющие» орбиты, необходима неоднородность. С такой целью поле вдоль одного бока вакуумной камеры было создано более сильным, чем вдоль другого. В более сильном поле мюон вынужден описывать более крутую дугу. Поэтому после каждой полной петли он оказывается смещенным. Поле



церновской установке (см. рис. 3.5)—основа определения ано-направлена вдоль движения мюона. Ось прецессирует на 90° (последнее положение). Прецессия вычисляется по величине ся электроны при распаде мюонов в мишени (см. рис. 3.8).

подобрано таким, что после каждого из первых оборотов орбита уходит на два сантиметра, быстро удаляясь от бериллия. Далее следует участок, на котором дуги почти топчутся на месте (чтобы свести до минимума длину камеры). В конце шаг орбиты снова увеличивается. Мюону дается толчок, выкидывающий его из сферы действия поля. Вдобавок ко всему магнитное поле должно обеспечить и вертикальную фокусировку. Тогда частицы, движущиеся не строго горизонтально, не будут попадать в наконечники полюсов магнита. Покинув магнитное поле, мюоны проникают в мишень. Там они остаются до тех пор, пока не распадутся, испустив электроны. Конечно, многие мюоны распадаются еще в дороге и уже никогда не достигают мишени.

В эксперименте должны быть осуществлены два измерения: времени, проводимого каждым мюоном в магнитном поле, и направления, в котором испускаются электроны при распаде мюона в мишени. Время, проведенное в магнитном поле, определяет число оборотов, совершенных мюоном. Если шаги орбиты мюона велики, ему может хватить уже 320 оборотов, чтобы пройти всю камеру. Мюону с очень короткими шагами орбиты может потребоваться более 1000 оборотов. Когда же в магнитное поле проникают два мюона, один тотчас после другого, бывает трудно разобраться, который

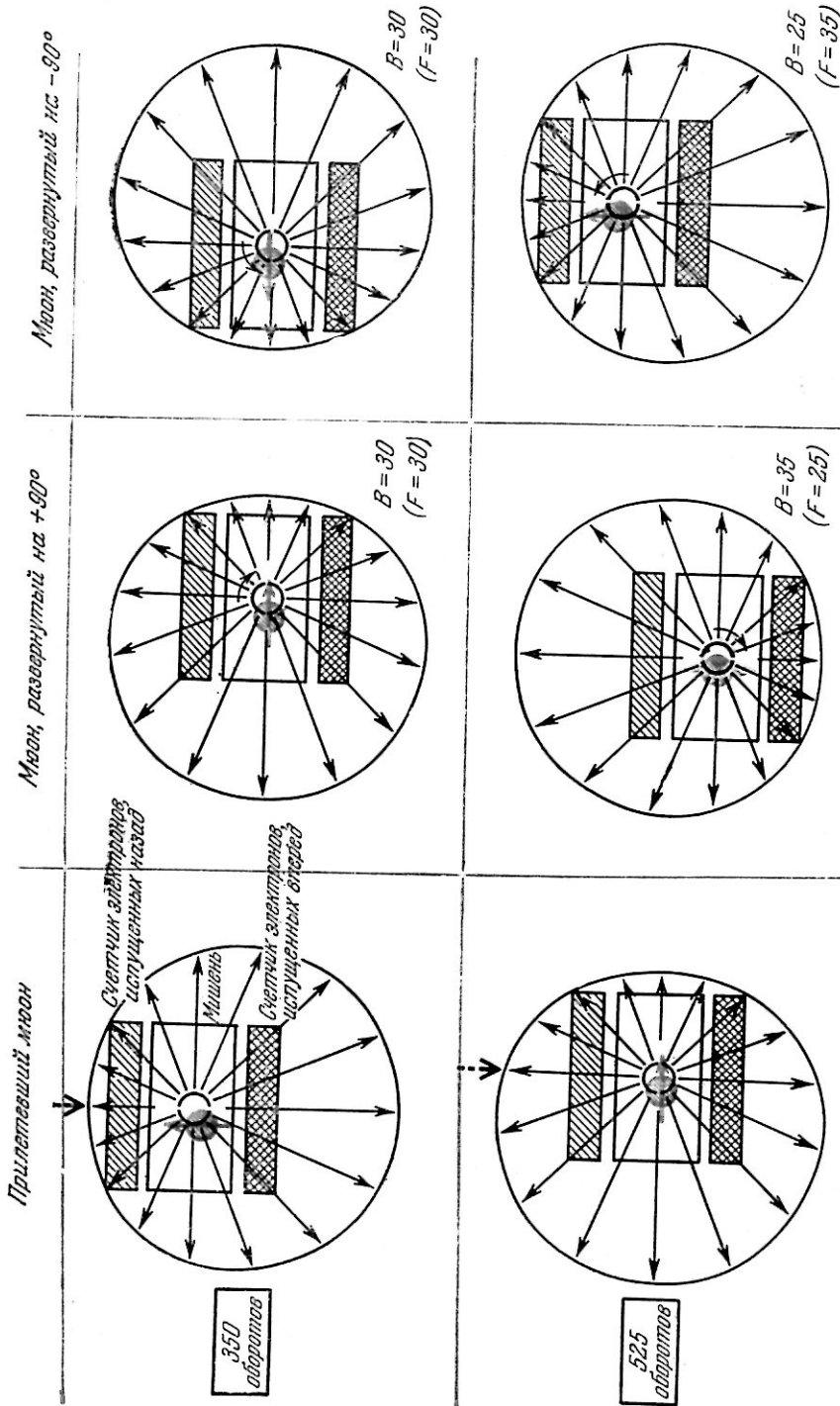


Рис. 3.8. Испускаемые при распаде мюонов электроны служат для нахождения скорости прецессии. Совершивший 350 оборотов мюон входит в мишень со спином, повернутым назад. Длина исходящих из мюона черных стрелок пропорциональна вероятности испускания электрона. Чтобы избежать от систематических ошибок, проводится подсчет числа электронов для двух групп мюонов. Мюоны одной группы повернуты магнитом на $+90^\circ$, другой группы — на -90° . Для мюонов, совершивших 350 оборотов (или 700 оборотов, или 1050 оборотов), число электронов (например, испущенных назад) должно совпадать для обеих групп. Для мюонов, сделавших, скажем, 525 оборотов, отклонение приведет к разнице в числе электронов (например, назад испускается соответственно $B=35$ и $B=25$ электронов). Число F электронов, испускаемых вперед (стоит в круглых скобках), ведет себя аналогично.

из них движется быстрее и вылетает первым. Выход здесь один: учитывать только разделенные достаточно большим промежутком мюоны. Тогда уж второй мюон никак нельзя будет спутать с первым.

Выполняя второе измерение, можно было бы попытаться точно определить угол, под которым испускается распадный электрон. Но даже если бы это оказалось возможным, результат позволил бы судить только о вероятной ориентации мюона, выбросившего электрон. Один и тот же мюон может, с известной вероятностью, испустить электрон в любом направлении. Проще поэтому учитывать только электроны, выбрасываемые в фиксированном направлении последовательными группами мюонов. К тому же осуществляется небольшой трюк. После остановки в мишени половина таких групп разворачивается на 90° по часовой стрелке при помощи слабого пульсирующего магнитного поля. Остальная половина разворачивается на 90° против часовой стрелки. Можно ожидать, что, развернутые

$$\begin{aligned} \text{Асимметрия}_{(B)} &= \\ &= \frac{B_{+90^\circ} - B_{-90^\circ}}{B_{+90^\circ} + B_{-90^\circ}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Асимметрия}_{(B)} \text{ (350 оборотов)} &= \\ &= \frac{30 - 30}{30 + 30} = \frac{0}{60} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Асимметрия}_{(B)} \text{ (525 оборотов)} &= \\ &= \frac{35 - 25}{35 + 25} = \frac{10}{60} = 0,17 \end{aligned}$$

Уравнение, по которому находится величина асимметрии для графика на рис. 3.6, использует число электронов в церновском опыте. Даны примеры его решения для 350 и 525 оборотов. Подставлены числа испускаемых назад электронов, взятые из рис. 3.8.

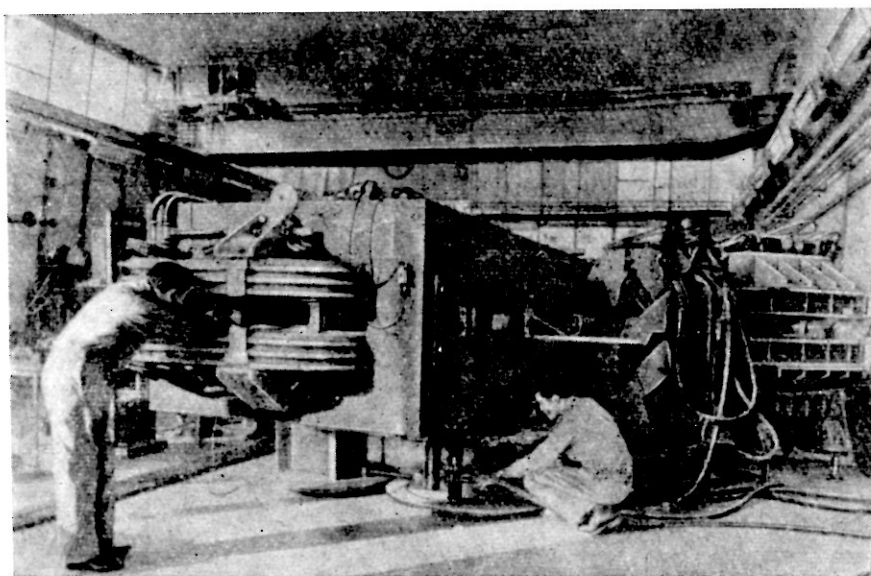


Рис.3.9. Установка «g минус 2», применявшаяся в ЦЕРНе для определения аномального магнитного момента мюона. Стоящий слева человек смотрит в то место между катушками магнита, где проходят траектории мюонов. Мюоны возникают, когда рожденные циклотроном пионы распадаются в полете. Перед тем, как попасть в большой магнит, пучок мюонов фокусируется меньшим магнитом справа.

каждая в своем направлении, две группы дадут слегка различающиеся числа электронов. Описанный трюк избавляет нас от систематических ошибок, которые непременно сопровождали бы любую попытку применить два (или более) набора счетчиков, чтобы считать электроны в двух (или более) направлениях (см. рис. 3.7. и 3.8).

Эксперимент показал, что g -фактор мюона равен $2,001145 \pm 0,000022$. Теоретически предсказана величина 2,001165. Таким образом, с точностью до одного процента для аномальной части g -фактора эксперимент подтверждает, что мюон ведет себя совсем как тяжелый электрон. Из этого результата следует также, что законы электромагнетизма не нарушаются вплоть до расстояний в $7 \cdot 10^{-14}$ см и что фундаментальных квантов длины больше чем $2 \cdot 10^{-14}$ см не существует. Вдобавок оказывается, что любая попытка объяснить массу мюона при помощи взаимодействия с еще не открытым полем, отличным от электромагнитного, должна быть отвергнута.

Тайна мюонной массы стала еще более глубокой. В настоящий момент нет бесспорных предложений по поводу того, как могли бы физики к ней подступиться. Большие надежды возлагаются на эксперименты по рассеянию мюонов высокой энергии. Пучки таких мюонов будут получены с помощью новых ускорителей на 30 миллиардов электрон-вольт, построенных в ЦЕРНе и Брукхейвенской национальной лаборатории. Всегда есть шанс, что в таких высокоэнергетических столкновениях проявится что-то новое. Пока же мюон все еще являет собой «тайну потайного тайника».

Леон М. Ледерман

ДВУХНЕЙТРИННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

(МАРТ 1963 г.)

Рассказ о героическом эксперименте, в котором принимали участие ускоритель на 30 Гэв, десятитонная искровая камера и 45 футов стальной брони и который доказал, что имеется не один вид нейтрино, а два.

В наши дни открытие новой элементарной частицы едва ли можно назвать новостью. В течение какого-то времени физика была наводнена, как казалось, излишними частицами. За последний год, однако, была открыта частица, которая сумела больше проблем решить, чем поставить. Эксперимент, выполненный в Брукхейвенской национальной лаборатории на ускорителе в 30 миллиардов электрон-вольт, доказал, что существует не одна, как считалось, разновидность частиц, известных как нейтрино, а две. 10 лет назад, когда брукхейвенский ускоритель еще только проектировался, предусматривались многие его применения, но никто и не предполагал, что его можно будет использовать с целью создания нейтрино для экспериментальных наблюдений. Действительно, 10 лет назад многие исследователи все еще занимались проверкой существования нейтрино. Окончательное доказательство было получено как результат длинного ряда кропотливых экспериментов, кульминационным пунктом которых явилось прямое наблюдение в 1956 г. реакций, индуцированных нейтрино.

Среди частиц нейтрино — наиболее неосязаемые. У них нет заряда, нет массы (во всяком случае такой, какая могла бы быть измерена), и (если считать, что их масса равна нулю) они перемещаются со скоростью света. Нейтрино образуются в огромном числе при ядерных процессах внутри Солнца и других звезд. Те из них, которые на своем пути встречают Землю, с легкостью проходят прямо сквозь нее. И лишь одно нейтрино из каждых 10 миллиардов (10^{10}), проходящих через центр Земли, имеет некоторую вероятность прореагировать с другой частицей. Разумеется, частица, которая вообще ни с чем бы не реагировала, никогда не смогла бы быть обнаружена. Это была бы фикция. Нейтрино же — попросту факт.

Элементарные частицы обнаруживают свое присутствие, взаимодействуя различным образом. Физики говорят о четырех фундаментальных видах взаимодействия (современный термин — вместо сил), заметно различающихся по интенсивности. Самым слабым является гравитация, которая настолько слаба, что начинает себя проявлять, лишь когда частицы собраны вместе в огромном числе, образуя тяготеющее тело. Поэтому в атомной области ею можно пренебречь. При изучении поведения элементарных частиц достаточно рассматривать лишь три силы: «сильную», электромагнитную и «слабую». Интенсивности этих трех сил находятся друг к другу примерно в отношениях $10^{12} : 10^{10} : 1$.

Сильное взаимодействие — это то, которое удерживает частицы в атомном ядре и энергия которого освобождается при ядерных расщеплениях и захватах. В свою очередь оно имеет свойство генерировать реакции между сильно взаимодействующими частицами. Эти реакции имеют характер катаклизма: едва частицы попадают в «область» сильного взаимодействия, как начинается реакция. Электромагнитная сила — это то, что удерживает электроны возле атомного ядра и что лежит в основе всех химических и электрических явлений. Для наших целей важно отметить, что быстродвижущиеся электрически заряженные частицы в веществе замедляются из-за их постоянного взаимодействия с атомными электронами. Слабые взаимодействия ответственны за спонтанный распад нестабильных — радиоактивных — ядер и элементарных частиц. Считается, что все элементарные частицы подвержены слабым взаимодействиям, хотя их результаты часто затемнены сильными и электромагнитными взаимодействиями.

Все это можно выразить и по-другому, классифицируя частицы по взаимодействиям, в которых они могут участвовать. В нашей статье мы будем иметь дело лишь с шестью частицами: протоном, пионом, нейтроном, электроном, мюоном и нейтрино (рис. 4.1). Протон и пион участвуют во всех трех взаимодействиях: сильном, электромагнитном и слабом. Нейтрон, как электрически нейтральный, имеет лишь весьма delicate электромагнитные свойства, но он участвует как в сильных, так и в слабых взаимодействиях. Физики часто называют эти частицы — протон, пион и нейтрон — «сильно взаимодействующими», три другие — электрон, мюон и нейтрино — «слабо взаимодействующими». Нейтрино, единственное среди частиц, участвует лишь в слабых взаимодействиях. Каждая из этих шести частиц имеет соответствующую античастицу с тождественным набором взаимодействий.

Раньше всего начали исследовать одну из форм ядерной нестабильности, известную под наименованием бета-распада. Это спонтанное испускание электрона (или его античастицы — позитрона) нестабильным атомным ядром. В 20-х годах впервые были измерены энергии испущенных электронов, и результаты оказались озадачивающими. Ожидалось, что все электроны, испущенные каким-нибудь одним видом ядер, будут иметь одинаковую энергию. Вместо этого у них был обнаружен широкий спектр энергий, простирающийся вниз от некоторого максимального значения. Как объяснить эту недостачу энергии?

С глубокой проникательностью и большой смелостью Вольфганг Паули из Австрии предположил в 1931 г., что недостающая энергия уносится какой-то необнаруженной частицей. Энрико Ферми предложил вскоре для нее наименование «нейтрино». Заметив, что скорость бета-распада чрезвычайно мала по сравнению с другими ядерными реакциями, Ферми постулировал, что бета-распад представляет собой новое взаимодействие, и развил теорию для его описания. В простейшей реакции бета-распада участвует свободный нейтрон. После вылета из атомного ядра нейтрон спонтанно распадается на протон и электрон. Здесь снова возникла нехватка энергии, требовавшая объяснения, и она также приписывалась нейтрино или, точнее, антинейтрино.

Теория Ферми предсказала возможность протекания реакции в обратном направлении, т. е. имеется какая-то вероятность того, что антинейтрино прореагирует с протоном, в результате чего получится нейтрон и (для баланса заряда) позитрон. Эту реакцию искали и нашли в 1956 г. Фредерик Райнес и Клайд Л. Кауэн, мл.

В то время, когда, наконец, удалось наблюдать нейтрино, физики погрузились в новые заботы, принесенные открытием новых частиц. Таких частиц было много, они были нестабильны, и их времена жизни указывали,

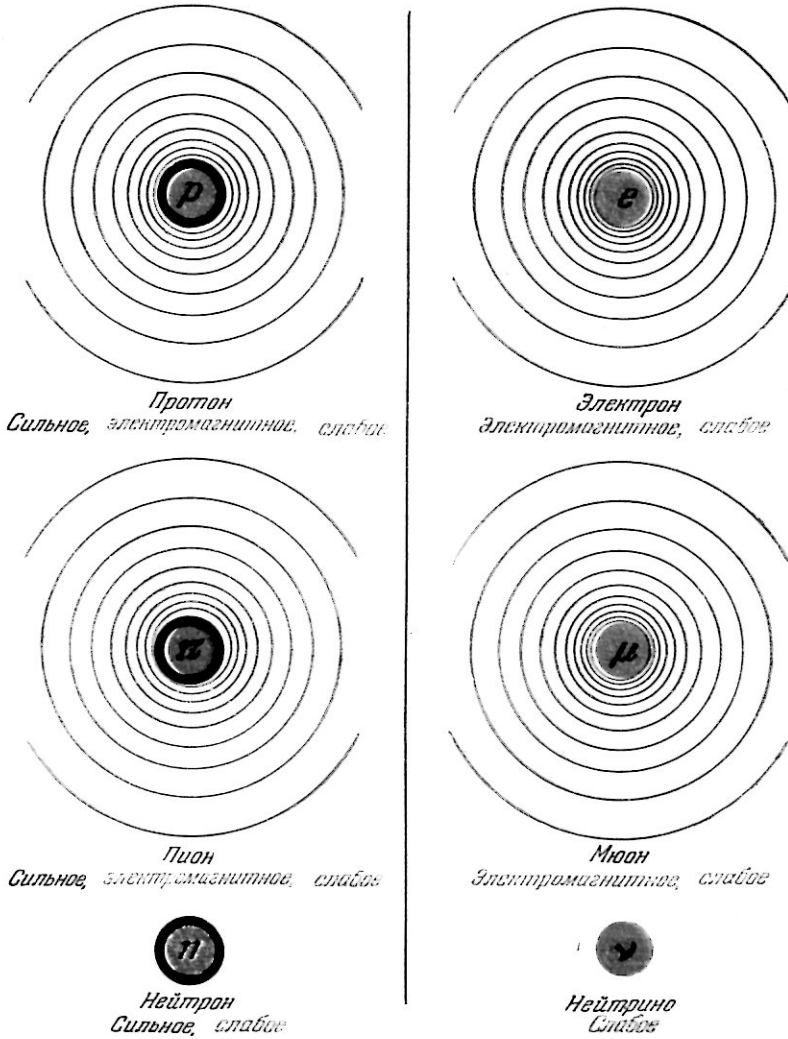


Рис. 4.1. Шесть частиц, которые обсуждаются в тексте, характеризуются тремя типами «взаимодействий» (современный термин вместо «сила»): сильное (черный цвет), электромагнитное (голубой) и слабое (красный). Протон и пион вступают во взаимодействия всех трех типов; нейтрон обнаруживает сильные и слабые взаимодействия. Электрон и мюон обладают тождественными свойствами. Из всех частиц лишь нейтрино вступает только в слабые взаимодействия. Вообще же три левые частицы можно считать сильно взаимодействующими; три правые — слабо взаимодействующими.

что почти все они распадаются благодаря слабым взаимодействиям. Распад из-за слабого взаимодействия характеризуется временем жизни, простирающимся примерно от 10^3 до 10^{-10} сек. Если бы это были сильные взаимодействия, то скорость распада была бы 10^{-23} сек.

Среди многих новых частиц была одна, предназначенная сыграть центральную роль в двухнейтринном эксперименте. Этой частицей был пион, открытый К. Ф. Пауэллом, К. М. Дж. Латтесом и Дж. П. С. Оккиалини в Бристольском университете в 1947 г. Пион появился в треках космических лучей, зарегистрированных в фотографических эмульсиях, которые были экспонированы на большой высоте. Физики ожидали появления пиона начиная с 1935 г., когда японский физик Юкава предсказал его существование, исходя из теоретических соображений. Согласно квантовой теории поля, каждая сила в природе связана с некоей частицей, назначение которой — передавать эту силу от одной взаимодействующей частицы к другой. Например, электромагнитная сила переносится фотоном. Юкава постулировал, что для переноса поля ядерных сил (сильное взаимодействие) между ядерными частицами могли бы понадобиться частицы с массой в 200 или 300 раз больше электронной. Мюон-мезон, или мюон, был открыт в 1936 г., и у него оказалась правильная масса, но последующие наблюдения установили, что мюон — слабо взаимодействующая частица. Он не является носителем сильного взаимодействия. По сути дела, это была первая из элементарных частиц, которой физическая теория не смогла отвести какую-то роль. Пи-мезон, или пион, подошел под спецификацию Юкавы. Самые первые эмульсионные фотографии показали, что пион энергично реагирует с атомными ядрами.

За $2,55 \cdot 10^{-8}$ сек положительный пион распадается на положительный мюон и нейтрино. Как и в бета-распаде, нейтрино необходимо для объяснения нехватки энергии (и импульса). Однако в первой работе по анализу реакции пионного распада невидимой частице, возникающей при распаде, приписывалась масса примерно в 100 электронных масс. Эту частицу окрестили «нейтретто», чтобы отличить ее от предположительно безмассового нейтрино. Вскоре оценка массы снизилась в 10 раз и различие было упразднено. Простейшим выводом явилось то, что пионы распадаются на мюоны и нейтрино — предположительно, нейтрино того же вида, что и получающиеся при бета-распаде. Далее, из закона сохранения, известного под названием зарядового сопряжения, следовало, что если положительные пионы рождают положительные мюоны и нейтрино, то отрицательные пионы должны рождать отрицательные мюоны и антинейтрино.

Приписывание нейтрино положительному пиону, а антинейтрино — отрицательному пиону соответствует тому, что «лептоны» сохраняются. Лептоны — это электрон, отрицательный мюон и нейтрино; антилептоны — позитрон, положительный мюон и антинейтрино. Сохранение лептонов требует, чтобы в каждой реакции полное число лептонов минус число антилептонов было постоянным.

К 1958 г. теория слабых взаимодействий, первоначальной разработкой которой мы обязаны Ферми, была весьма успешно развита в работах многочисленных исследователей, в особенности Ц. Д. Ли из Колумбийского университета и Ч. Н. Янга из Института высших исследований, Ричарда П. Фейнмана и Мюррея Гелл-Манна из Калифорнийского технологического института. Тем не менее проблемы остаются.

Во-первых, была (и остается) мюон-электронная проблема. Для каждой реакции, о которой известно, что в ней участвует электрон, найдется соответствующая ей реакция с участием мюона (рис. 4.5). Сходство мюонов и электронов распространяется также на их внутренние свойства: у них одинаковая квантовая характеристика — спин, а их магнитные и электрические свойства сравнивались с точностью до нескольких миллионов и оказались одинаковыми. Действительно, за исключением того, что мюон при-

мерно в 200 раз тяжелее электрона, обе частицы кажутся тождественными.

Проблема массы является центральной во всем круге вопросов, связанных с элементарными частицами. То, что большое различие в массах мюона и электрона не приводит, по-видимому, к другим различиям в их свойствах, является одним из наиболее примечательных фактов в современной физике. Эти различия надо искать, как бы они ни были слабо выражены. Как может здесь оказать помощь нейтрино? В бета-распаде электрон создается вместе с нейтрино. В пионном распаде мюон создается вместе с нейтрино. В нейтринно-ядерных соударениях должны бы создаваться электроны и мюоны. При высоких энергиях эксперимент этого типа мог бы явиться чувствительным зондом для выявления мюон-электронных различий. Никто, однако, не показал тождественность нейтрино, возникающего вместе с электроном при бета-распаде, и нейтрино, возникающего вместе с мюоном при пионном распаде. Если бы они были различны, то это различие следовало бы, очевидно, связать с мюон-электронным различием. Это и побудило заняться нейтринным экспериментом при высоких энергиях.

Плодотворность подобного эксперимента тщательно проанализировали Ли и Янг в конце 1959 г. Все сведения о слабых взаимодействиях вплоть до весны 1962 г. были почерпнуты из наблюдений при низких энергиях. Ни в одном случае передача

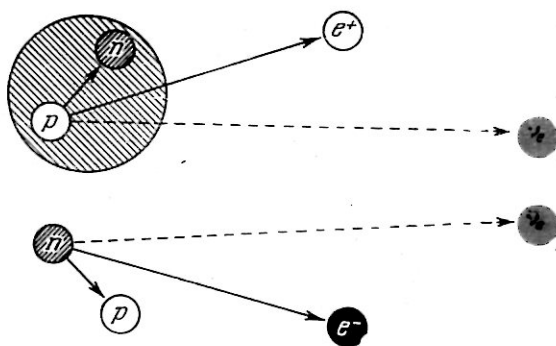


Рис. 4.2. Бета-распад — слабое взаимодействие с участием протона или нейтрона. Внутри атомного ядра протон (вверху) может распадаться на нейтрон, позитрон и нейтрино электронного типа. Свободный нейтрон (внизу) распадается на протон, электрон и антинейтрино электронного типа.

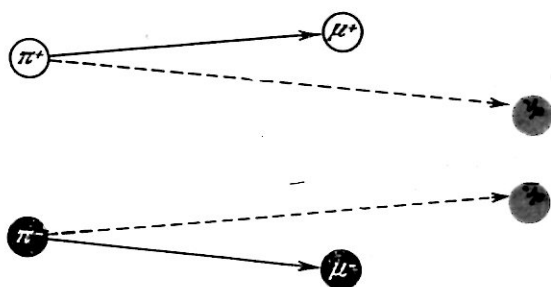


Рис. 4.3. Пионный распад — еще одно слабое взаимодействие — дает положительный мюон и нейтрино мюонного типа (вверху) или отрицательный мюон и антинейтрино мюонного типа (внизу) в соответствии с зарядом пиона.

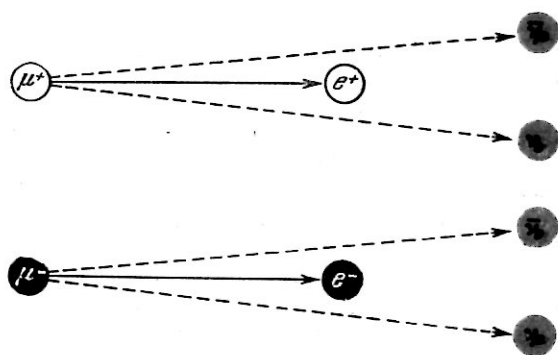


Рис. 4.4. Мюонный распад — также слабый — дает позитрон (вверху) или электрон (внизу). Оба распада дают нейтрино и антинейтрино, причем одна из частиц принадлежит мюону, а другая — электрону.

энергии не превосходила 100 миллионов электрон-вольт. Больше всего физики хотели узнать, как будет себя вести слабое взаимодействие, когда обмен энергией достигнет миллиарда электрон-вольт и больше. Традиционный результат наблюдения взаимодействий при все более высоких энергиях сводился к тому, что удавалось «увидеть» все более тонкие детали структуры. Что было нужно — так это, очевидно, эксперимент по столкновению при высокой энергии с участием слабого взаимодействия. Единственное соударение, которое смогло бы что-то сказать о слабом взаимодействии и которое не было бы «заглушено» электромагнитным и сильным взаимодействиями, — это соударение, в котором одна из частиц — нейтрино.

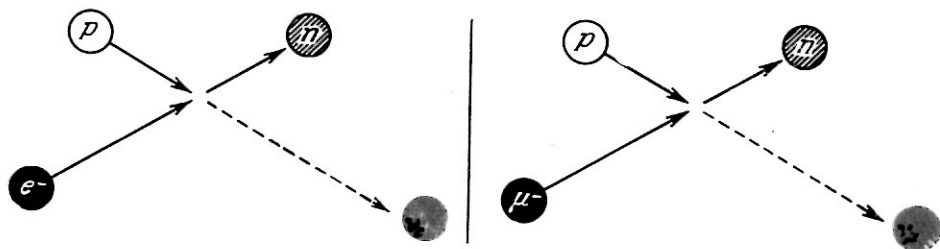


Рис. 4.5. Электрон и мюон представляются тождественными во всех отношениях, кроме массы (и времени жизни): масса мюона примерно в 200 раз больше. Эта тождественность распространяется и на реакции, в которых они могут участвовать. Для любой реакции с электроном найдется соответствующая реакция с мюоном; например, реакция любой из этих частиц с протоном дает нейтрон и нейтрино.

Желание поставить высокоэнергетический эксперимент по слабому взаимодействию усиливалось еще и из-за широко известного недочета теории слабых взаимодействий. Летом 1960 г. Ли и Янг детально проанализировали эту проблему. Хотя теория давала превосходные предсказания в случае низкоэнергетических реакций, она приводила к абсурдным результатам при высоких энергиях. Как правило, увеличение энергии приводит к росту числа каналов, по которым идет реакция. В случае фермиевской теории слабых взаимодействий это приводило к предсказанию, что, начиная с некоторой энергии, возникает больше реакций, чем частиц, способных принимать в них участие. Поэтому что-то должно вмешаться, чтобы снизить скорость реакции. Что же это такое?

Механизмом затухания слабой реакции могло бы явиться возможное существование некоей еще не открытой частицы, относительно которой велась широкая дискуссия со времен юкавской теории мезона. Для нее были предложены наименования «промежуточный бозон» и символ ω .

Она могла бы служить для переноса слабого взаимодействия подобно тому, как фотон переносит электромагнитное взаимодействие, а пион — сильное взаимодействие. Она могла бы быть «расклеивателем», который дает частице расколоться при распаде. Ее нельзя было бы непосредственно зарегистрировать с помощью фотографических эмульсий, пузырьковых камер, искровых камер или других приспособлений, делающих след частицы видимым, из-за того, что ее предсказанное время жизни — около 10^{-17} сек — слишком коротко. За такое время частица, движущаяся почти со скоростью света, прошла бы меньше чем миллионную часть сантиметра.

Подходящая реакция для генерации такой частицы — соударение нейтрино высокой энергии с протоном. Из этого соударения должны были бы возникнуть промежуточный бозон (если он существует), протон и отрицательный мюон. Сразу после этого бозон должен был бы распасться, давая, почти мгновенно, позитрон и нейтрино (рис. 4.6). С помощью должным образом устроенного детектирующего приспособления можно было бы увидеть отрицательный мюон и позитрон, как если бы они возникли в одной и той же точке. Это была бы «подпись» бозона. Большое преимущество использования нейтрино для охоты за промежуточным бозоном — это то, что нейтрино вызывают сравнительно мало фоновых событий, затемняющих «подпись» бозона.

Желание изучать слабые взаимодействия при высоких энергиях сильнее всего стимулировалось загадкой, связанной с некоторыми ненаблюдаемыми реакциями. Всякий раз, когда в какой-нибудь реакции появляется электрон или мюон, его всегда сопровождает нейтрино. Можно, однако,

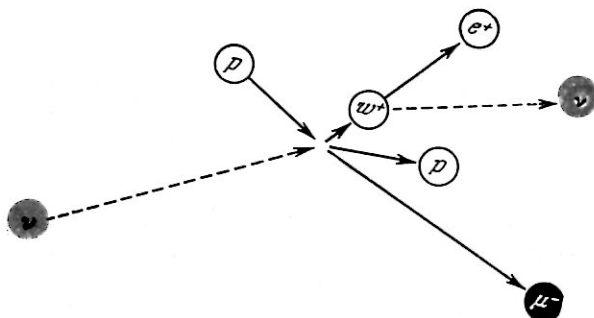


Рис. 4.6. «Промежуточный бозон», если он существует, возникал бы в столкновениях при высокой энергии между нейтрино и протоном. Почти мгновенно он распадался бы на позитрон и нейтрино, хотя возможны также и другие пути распада. Распад настолько быстрый, что на фотографии, полученной с помощью искровой камеры, точки, в которых возникли позитрон и отрицательный мюон, совпадали бы.

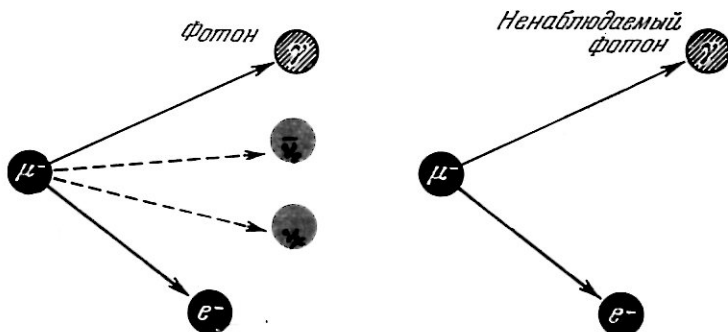


Рис. 4.7. Аннигиляция нейтрино и антинейтрино (слева) приводила бы к реакции справа, если бы существовал только один сорт нейтрино.

написать вполне хорошие «слабые» реакции для мюона и электрона, которые удовлетворяют всем законам сохранения и в которых нейтрино не появляются. И все же ни одна такая реакция никогда не была наблюдаена. Если нельзя увидеть реакции, которые могли бы идти, то надо сделать вывод, что работает какое-то фундаментальное правило запрета.

Поиски, в особенности одной из этих, очевидным образом запрещенных реакций велись во многих лабораториях с помощью очень чувствительной техники. Эта реакция — распад мюона на электрон и фотон. Хорошо

известно, что мюон иногда распадается на электрон, фотон, нейтрино и антинейтрино (рис. 4.7). Далее, частицы и их античастицы аннигилируют друг с другом, когда оказываются в достаточной близости. Можно считать, что распад мюона на четыре частицы и аннигиляция двух из них — это два этапа некоей «виртуальной» реакции. Слово «виртуальная» означает, что реакция удовлетворяет теоретическим требованиям, но не может быть наблюдаема. Указанная нами виртуальная реакция стимулировалась бы присутствием промежуточного бозона. При этих обстоятельствах электрон и фотон уносили бы всю энергию и весь импульс мюонного распада. Но именно это-то никогда и не наблюдалось.

Гелл-Манн и Джеральд Фейнберг из Колумбийского университета независимо друг от друга указали, что если бы промежуточный бозон существовал, то ненаблюдаемые реакции шли бы со скоростью в тысячи раз большей, чем минимальная скорость, доступная эксперименту. Фактически отсутствие этой реакции часто принималось за свидетельство против существования промежуточного бозона. Для нашей экспериментальной группы в Колумбии эта загадка превратилась в кризис из-за одного дальнейшего момента, который подчеркнул для нас Ли (и который содержался также в работе Ли и Янга 1960 г.). Любой механизм, который способствовал бы затуханию скорости реакции со слабым взаимодействием, в то же время стимулировал бы как раз ту реакцию, которую никто не смог наблюдать.

Один путь решения парадокса — это предположить, что нейтрино и антинейтрино из мюонного распада не могут аннигилировать друг с другом, потому что они разных сортов. Можно допустить, что один сорт принадлежит исчезающему мюону, а другой — вновь созданному электрону. Эта гипотеза имеет то большое преимущество, что она сохраняет все удачные черты существующей теории. Ясно, что требовался решающий эксперимент, и это был другой мотив проведения брукхейвенского нейтринного эксперимента.

Итак, имелись три веские причины для желания изучать слабые взаимодействия при высоких энергиях: получить больше сведений о мюоне и электроны, понаблюдать скорости реакций при высоких энергиях и поискать второй сорт нейтрино. В любом случае ключ к эксперименту был в наблюдении нейтрино при высоких энергиях. Как же их можно было бы получить?

В конце 1959 г. Бруно Понтекорво, работающий в Лаборатории физики высоких энергий в Дубне, к северу от Москвы, и Мелвин Шварцц из Колумбийского университета независимо друг от друга указали на возможность использования ускорителей для получения нейтрино желаемой энергии. Предполагалось, что нейтрино будут первоначально возникать при распаде пионов, получающихся, когда протоны, разогнанные на ускорителе до высокой энергии, ударяют по подходящей мишени.

В 1960 г. Шварцц, Джек Штейнбергер и я вычислили, что синхротрон с жесткой фокусировкой, строительство которого недавно завершено в Брукхейвене, по-видимому, смог бы дать нейтрино высокой энергии в количестве, нужном для проведения поисков второго нейтрино и для наблюдения скоростей слабых взаимодействий при высоких энергиях. Еще лучше, если бы эксперимент дал доказательство существования промежуточного бозона. Персонал Брукхейвена с энтузиазмом встретил это предложение, и наши две группы, при поддержке Атомной комиссии, совместно начали подготовку эксперимента. В нем со Шварццем, Штейнбергером и мной сотрудничали Гордон Т. Данби из Брукхейвенского отдела ускорителей, два аспиранта из Колумбии, Константин Гулианос и Нариман Мистри, и

Жан-Марк Гайар, гость из Лаборатории физики высоких энергий в Сакле (Франция).

Поиски второго нейтрино основывались на следующем соображении. Ускоритель в Брукхейвене создает большое число пионов высокой энергии. Нейтрино, возникающие при распаде пионов, рождаются вместе с мюонами; поэтому они будут мюонного типа, если только на самом деле нейтрино бывают двух типов. Возникло бы лишь пренебрежимо малое число нейтрино электронного типа. (Они возникали бы от ничтожной доли пионов и K -мезонов, которые распадаются на нейтрино и электроны.) Нейтрино будут сталкиваться с нейтронами (и протонами), в результате чего возможны две ситуации. Если бы нейтрино были только одного типа, то в результате реакции с нейтронами возникало бы одинаковое число электронов и отрицательных мюонов. Если же имеется два сорта нейтрино, то в нашем эксперименте возникнет такой сорт, который не сможет генерировать электроны, и мы будем наблюдать только мюоны.

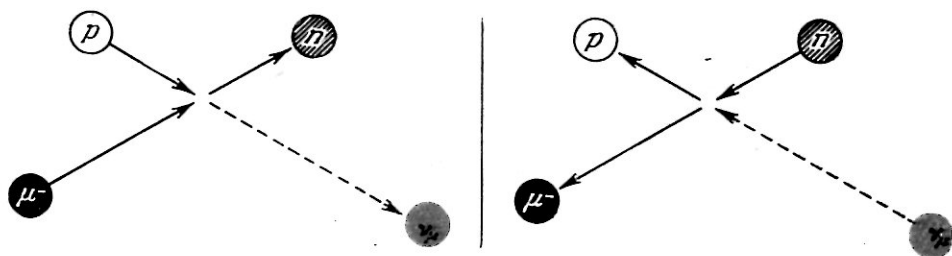


Рис. 4.8. Детектирование нейтрино зависит от обращения реакции, которое, как уже известно, возможно. Нейтрино не оставляет никаких видимых следов в искровой камере, поэтому его можно детектировать лишь благодаря его взаимодействию с другими частицами. Так как мюон-протонная реакция (слева) дает нейтрон и нейтрино, то видимый мюон (справа) мог бы случайно появиться при соударении нейтрона и нейтрино.

Хотя в своей идее эксперимент прост, потребовались значительные усилия, чтобы получить подходящий пучок пионов, обеспечить защиту, которая уменьшала бы помехи до какого-то допустимого уровня, а также спроектировать и построить детектор для нейтринных соударений. Прошло около 18 месяцев начиная от первоначальных замыслов до первых запусков с участием всех приборов.

Диаметр большого брукхейвенского синхротрона равен 600 футам. Впрыскиваемым в него протонам требовалось несколько секунд для достижения полной энергии в 30 миллиардов электрон-вольт (30 $Gэв$). При достижении полной энергии мюоны, получающиеся из пионных распадов, были бы настолько энергичны, что проникли бы даже через такую защиту, какую мы не смогли бы даже обеспечить, и испортили бы наши результаты. В соответствии с этим мы избрали для эксперимента пучок с энергией в 15 $Gэв$. Когда протоны такой энергии отводятся на мишень, сделанную из бериллия, они создают пионы с широким распределением энергии, пик которого приходится примерно на 3 $Gэв$. Некоторая часть этих пионов попадает в конус, с углом при вершине в 14° , сориентированный в направлении на наш детектирующий прибор.

Распад пиона с энергией в 3 $Gэв$ наступает в среднем после пробега в 150 м. Нейтрино, возникающее при этом распаде, будет продолжать двигаться в том же направлении, в каком двигался его родитель. Простые выкладки показали, что если бы мы обеспечили полные 150 м для распада

пионов, то пучок продолжал бы расходиться и через наш детектор прошло бы меньше нейтрино, чем в том случае, когда детектор находился бы ближе к мишени. Оказалось, с учетом требуемой защиты, что оптимальная длина пробега составляет около 20 м. На такой дистанции распадается примерно 10% пионов, посылающих свои мюоны и нейтрино вперед. Последние вместе с остающимися пионами врезаются в главную защитную стену — 13,5 м стальной брони со старого броненосца. Стальная стена

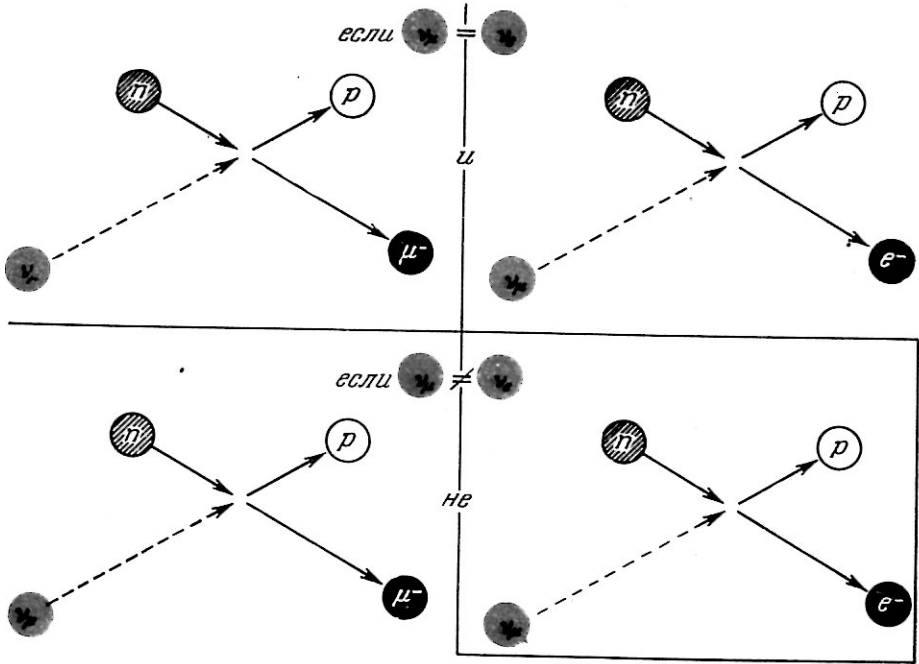


Рис. 4.9. Логика двухнейтринного эксперимента зависит от тождественности (вверху) или нетождественности (внизу) нейтрино электронного и мюонного типов. Если они тождественны, то реакция нейтрино мюонного типа (из пионного распада) с нейтронами давала бы мюоны и электроны в равных количествах. Если же два типа нейтрино различны, то та же реакция даст мюоны, но не электроны.

останавливает все частицы, за исключением нейтрино, которые проникают через стену, как если бы ее и не было. Пионы и другие сильно взаимодействующие частицы проникают примерно на фут, прежде чем остановиться. Мюоны, которые «чувствуют» только электрическую силу электронов в атомах железа, проникнут дальше, прежде чем потеряют всю свою энергию. На самом деле толщина защиты диктовалась необходимостью остановить именно эти сильно проникающие частицы.

На ранних стадиях эксперимент сильно страдал от утечек, главным образом частиц, которые проходили выше или ниже стальной стены, а затем отклонялись в детектор. Однако благодаря усердию персонала ускорителя, руководимого Кеннетом Грином, источники фона были наконец локализованы и устранены. Это потребовало нагромождения сотен тонн ржавой брони с дюймовыми допусками механизма, размещенного точнейшим в мире образом.

Детектор, которым мы пользовались для эксперимента, носит наименование искровой камеры и является еще совсем новым прибором в физике

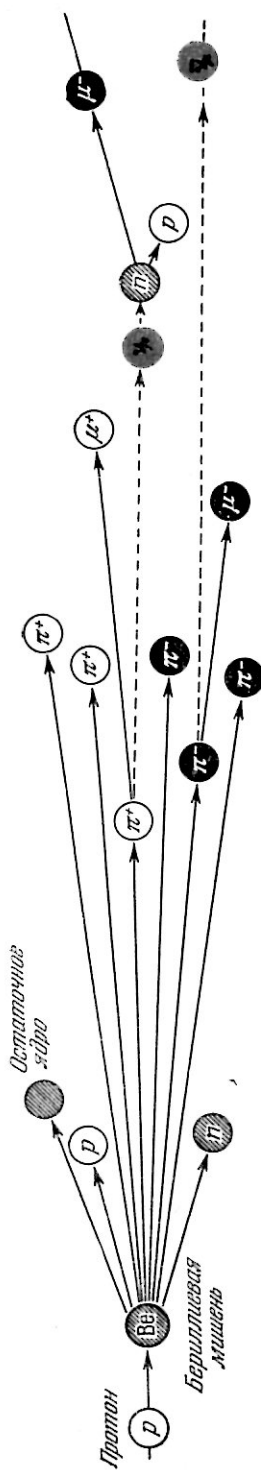


Рис. 4.10. Получение нейтрино для двухнейтринного эксперимента достигалось с помощью пучка ускоренных протонов, направленных на мишень из атомов бериллия (Be). При взаимодействии этих протонов с нейтронами и протонами мишени возникают положительные и отрицательные пионы, которые распадаются на мюоны, нейтрино и антинейтрино мюонного типа. Случайно нейтрино (или антинейтрино) может прореагировать с нейтроном (или протоном), образуя мюон (см. рис. 4.8).

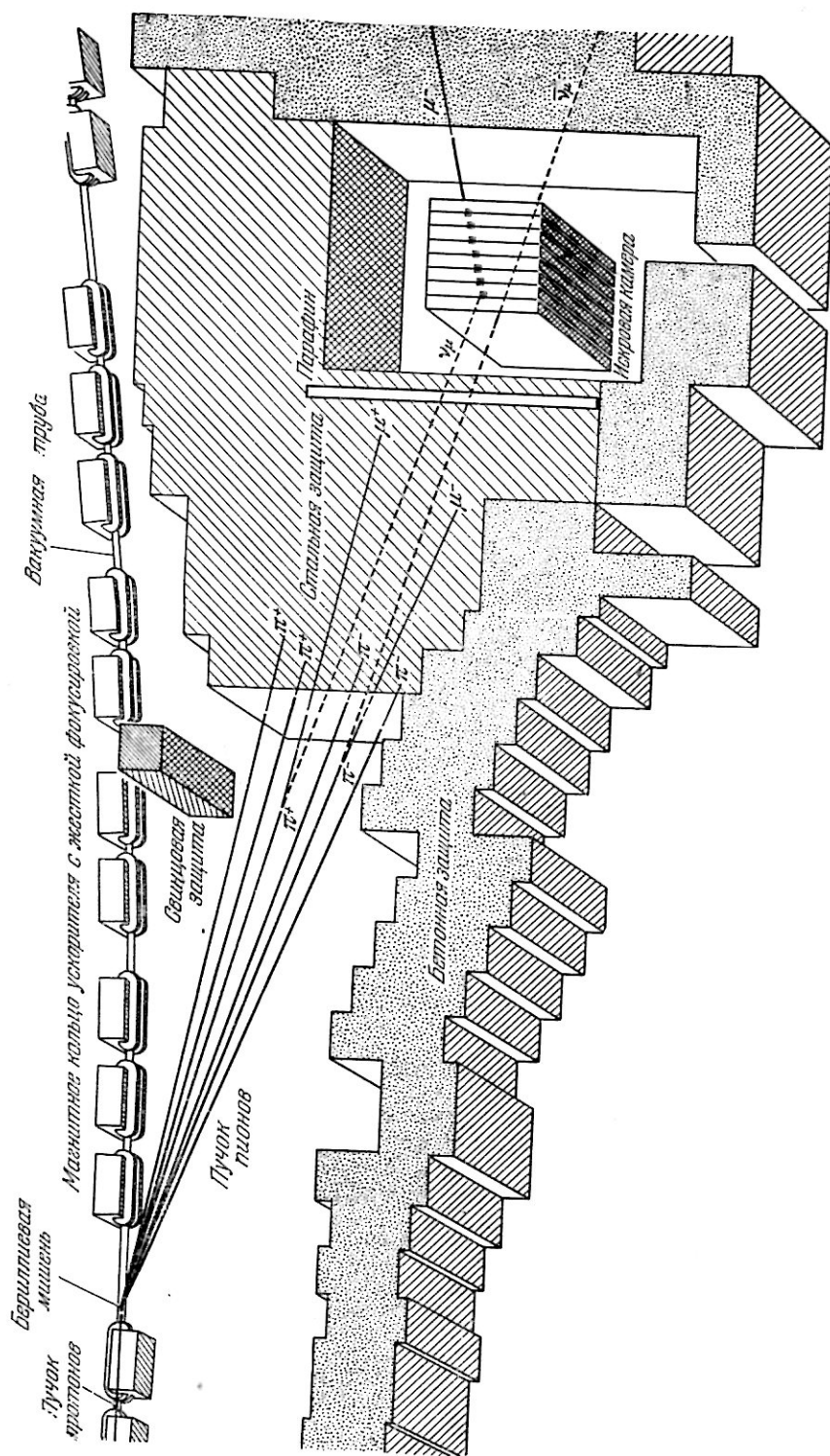


Рис. 4.11. Двухнейтринный эксперимент потребовал для своего осуществления ускорителя диаметром 600 футов (Брукхейвен), часть которого изображена на рисунке. Пучок протонов в 15 ГэВ направлялся на бериллиевую мишень, при соударении с ней создавался интенсивный пучок пионов. Около 10% пионов распадалось на мюоны и нейтрино, прежде чем врезаться в стену из брони толщиной 13,5 м. Пионы и мюоны задерживались этой стеной; нейтрино с легкостью проникали за стену и проходили через детектор — искровую камеру. С редкими интервалами камера «запускалась» при появлении мюона (цветной трек), возникшего при взаимодействии нейтрино или антинейтрино.

частиц *). Это пока единственный освоенный детектор, в котором могло бы поместиться 10 тонн протонов и нейтронов, которые необходимы для создания разумного числа реагирующих нейтрино. Иными словами, число нейтринных событий, которые можно было бы надеяться наблюдать, зависит от числа протонов и нейтронов, которые смогут находиться в детекторе. Наша искровая камера состояла из 90 алюминиевых пластинок, каждая толщиной в дюйм и площадью в четыре фута, сгруппированных в 10 блоков из девяти пластинок каждый. Пластишки располагались на расстоянии трех восьмых дюйма друг от друга

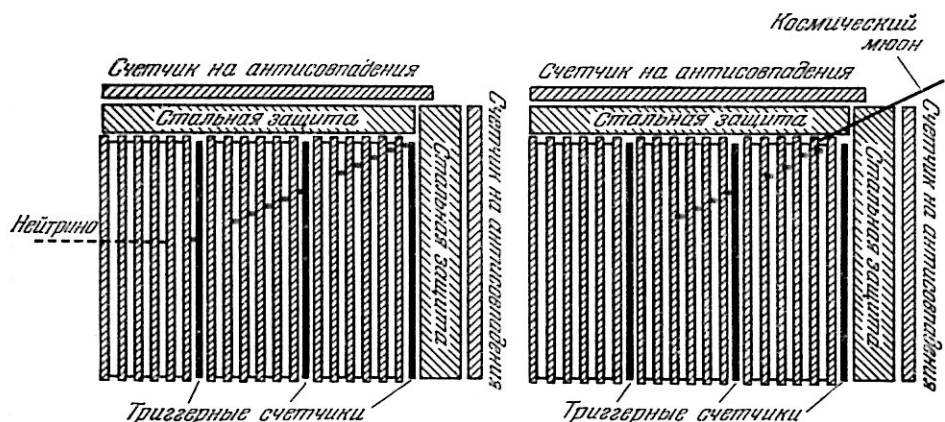


Рис. 4.12. Реальные и посторонние события, которые отмечает искровая камера, часто бывают неразличимы. Постороннее событие (справа) вызвано космическим мюоном, проникшим в камеру и не запустившим счетчики на «антисовпадения». Обычно же они не допустили бы регистрации этого события другими счетчиками внутри камеры. В настоящем эксперименте было зарегистрировано несколько сот событий, вызванных космическими лучами, но их можно было распознать по углу, под которым они проходили через камеру. Все же, согласно оценке, из 56 событий, приписываемых нейтрино, около пяти были вызваны космическими мюонами, которые вошли под таким углом, что их не удалось отличить от подлинных событий.

с помощью разделителя, изготовленного из прозрачного пластика. Пространство между пластинками было заполнено неоном.

Когда заряженная частица проходит через искровую камеру, она оставляет за собой кильватер из свободных электронов, который не разрушается в течение многих миллионов долей секунды. Это время, хотя и короткое, является решающим, потому что оно позволяет зарегистрировать только избранные события. Сцинтилляционные счетчики, расположенные как внутри, так и снаружи камеры, отмечают прохождение заряженных частиц. Показания этих счетчиков дают информацию о событиях, происходящих внутри камеры. Лишь только если событие «интересно», регистрирующее устройство приводится в действие. Это достигается путем подключения высокого напряжения к пластинкам камеры. Там, где частицы покидают кильватер из свободных электронов, проскакивает искра в неооне. Фотокамеры фотографируют треки этих искр сквозь прозрачные пластиковые стенки, давая тем самым стереоскопическое изображение пробегов, проделанных частицами меньше чем за миллионную долю секунды до этого.

*) «Над чем думают физики», вып. 4, «Физика атомного ядра», изд-во «Наука», 1965.

В этом эксперименте нас интересовали события, вызванные заряженными частицами, обладавшими энергией свыше 100 миллионов электрон-вольт (100 Мэв) и образовавшимися *внутри* камеры. Оказалось непрактичным строить такую защиту, которая блокировала бы все космические мюоны, входящие в камеру снаружи. Последние, конечно, были в состоянии активизировать триггерные счетчики, расположенные в виде вертикальных столбцов между десятью блоками камеры. Мы установили, что каждую секунду в камеру входило несколько сот космических мюонов. Во избежание фотографирования такого большого числа бесполезных событий мы поставили счетчики на «антисовпадение» перед камерой, позади камеры и над ней. Если какой-нибудь из этих счетчиков регистрировал прохождение частицы непосредственно перед тем, как его открывали триггерные счетчики внутри камеры, то команда «открыть огонь» отменялась. Так как нижнюю и боковые стороны камеры нельзя было предохранить таким же образом, то счет мюонов из космических лучей все еще доходил до 80 за секунду.

С этой проблемой удалось справиться, сделав продолжительность излучения, создаваемого синхротроном, настолько короткой, насколько это было можно. Брукхейвенские специалисты сумели создать такие пульсации излучения, которые длились всего три миллионных доли секунды. Пульсации повторялись с интервалами в 1,2 сек. Большая часть космического фона могла быть поэтому исключена простым требованием, чтобы синхротрон был «включен», когда частица детектируется. Весь эксперимент, тянувшийся больше восьми месяцев, как раз и состоял почти из двух миллионов пульсаций. Это означает, что машина была включена лишь в течение шести секунд за все время эксперимента. При скорости 80 отсчетов в секунду за этот период было зарегистрировано примерно лишь 480 космических событий, и обычно было легко установить по положениям треков на фотографиях, какие из них вызваны космическими лучами. Тем не менее мы подсчитали, что около пяти космических мюонов вошли в камеру под таким углом, что их нельзя было отличить от истинных событий. Число таких событий, которые могли бы симулировать нейтринные соударения, было тщательно определено во время фактического бездействия синхротрона.

Эксперимент проходил без перерыва с сентября 1961 г. по июнь 1962 г. Когда синхротрон работал хорошо, при каждой пульсации через камеру проходило 10 миллионов нейтрино. За час хорошей работы машина выдавала 3000 пульсаций, а в «хорошем» дне было 20 «хороших» часов. Эксперимент длился 25 таких хороших дней, и за это время сквозь искровую камеру прошло примерно 10^{14} , или 100 триллионов, нейтрино высокой энергии. Примерно таково же и число низкоэнергетических нейтрино от Солнца, пронизывающих каждую секунду наши тела и вызывающих, быть может, одну реакцию за всю человеческую жизнь. Мы подсчитали, что 10^{14} нейтрино высокой энергии дали бы около 25 реакций.

Счетчики запускали камеру около 10 раз в час — примерно в пять раз больше предположенной скорости, — снабдив нас почти 5000 фотографий. Больше половины изображений оказались белыми; мы так и не смогли представить себе почему. Мы обнаружили ожидавшееся число треков космических лучей (около 480) и неожиданное число треков, оставленных мюонами от пучка ускорителя, которые проскользнули мимо счетчиков на антисовпадения и запустили систему. Когда все такие незначительные события были отброшены, нам осталось 51 событие, которое можно было приписать нейтринным соударениям. Из них 29 обнаруживали треки отдельных

мюонов; а 22 обнаруживали треки мюона вместе с одним или большим числом треков, оставленных пионом или чем-то другим.

Каким же образом можно было удостовериться, что треки были оставлены мюонами, а не наполовину мюонами и электронами? Разумеется, для этого пункта важно, существует ли два нейтрино или только одно. К счастью, электронные треки легко отличить от мюонных. Мы установили вид электронных треков, подставив два блока нашей искровой камеры под электронный пучок, полученный на другом ускорителе. Мюон почти всегда оставляет четкий трек, идущий вдоль прямого пути. Электронный же трек неровный, с небольшими отклонениями из стороны в сторону. Часто электронный пробег бывает отмечен несколькими слабыми вспышками, неоднократно также в треках бывают разрывы. В нашем нейтринном эксперименте было получено всего шесть фотографий, которые можно было бы интерпретировать как электронные ливни. Все они были получены на первом этапе эксперимента, когда какая-то часть нейтронов почти наверняка просочилась в искровую камеру. Не исключено, что среди этих шести событий были небольшие «звезды», созданные нейтронами. Один или два трека

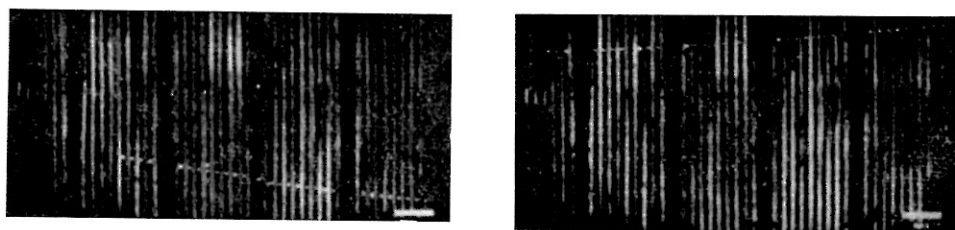


Рис. 4.13. Треки отдельных мюонов фотографировались в 10-тонной искровой камере во время двухнейтринного эксперимента в Брукхейвене. Они дали наглядное доказательство того, что между индивидуальными нейтрино и нейтронами (или антинейтрино и протонами) могут идти реакции. Электронные треки имели бы совершенно другой вид.

могли на самом деле принадлежать мюонам. Наконец, несколько электронных событий можно было ожидать от нейтрино электронного типа, образующихся при распаде K -мезонов, которые, как известно, имеются в пионном пучке. Короче, не было ничего такого, что подтверждало бы представление, к которому приводит «однейтринная» теория о рождении в равных количествах мюонов и электронов.

Вывод, как мы полагаем, совершенно ясен. Имеются два сорта нейтрино. Те, что возникали в нашем эксперименте при распаде пионов, — мюонного типа, они не могут породить электроны, взаимодействуя с нейтронами. Для такой реакции необходимы нейтрино электронного типа.

Кроме этого замечательного открытия, эксперимент в Брукхейвене доказал возможность нейтринных экспериментов при высоких энергиях с использованием ускорителей на 15 и больше $Gэв$. Единственные ускорители, на которых возможны такие эксперименты — это брукхейвенский синхротрон и подобная машина при Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве. Исследователи в обеих лабораториях (а также в Аргоннской национальной лаборатории, где близятся к завершению работы над машиной на 12 $Gэв$) готовят эксперименты, в которых протонный пучок после вывода из машины будет создавать интенсивный пионный пучок.

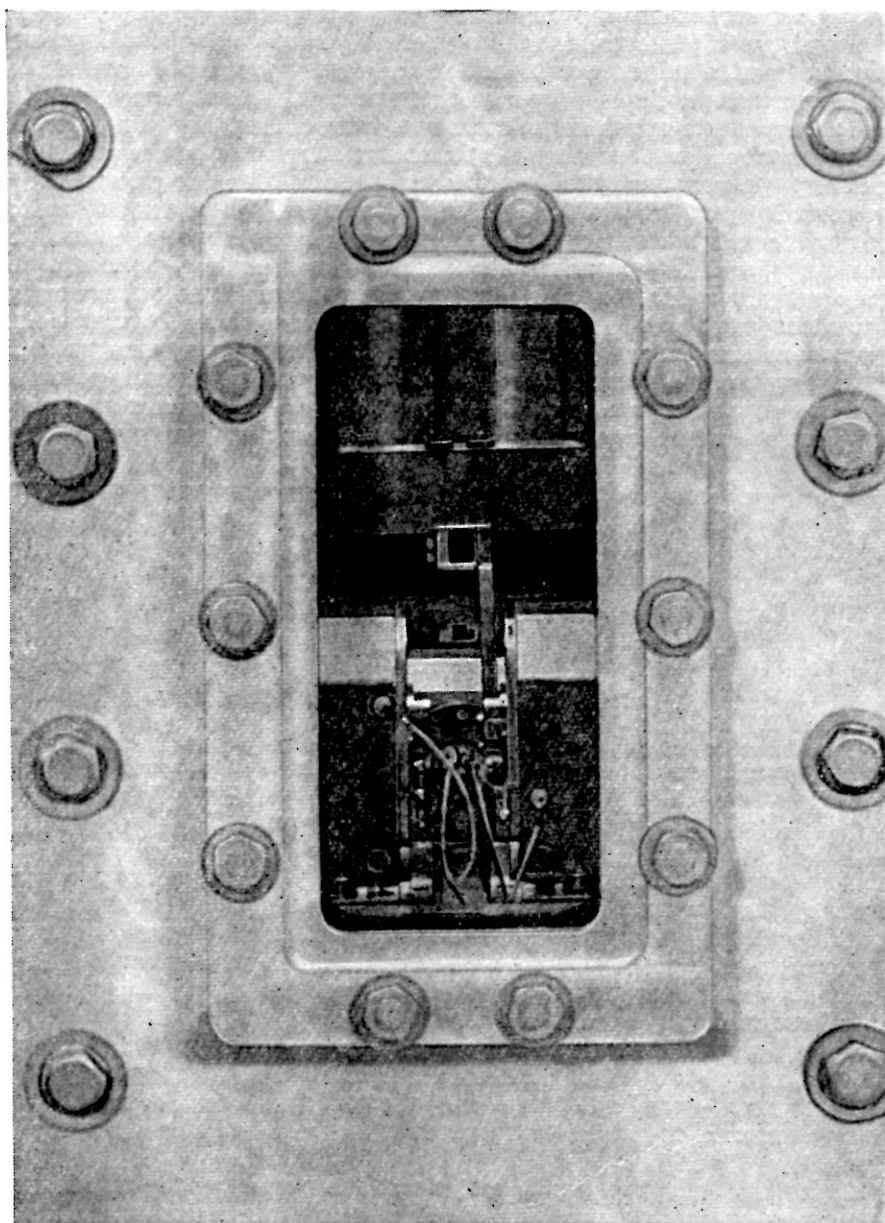


Рис. 4.14. Мишень протонного пучка, в которой рождались нейтрино одного из двух видов, — горизонтальный блок в верхней части вакуумной камеры синхротрона с жесткой фокусировкой Брукгейвенской национальной лаборатории. В результате столкновения протонов с атомами мишени возникают пионы, нужные для эксперимента, описанного в тексте. В этом эксперименте синхротрон ускорял протоны до 15 Гэв , половины его энергетической возможности.

Брукхейвенский эксперимент не смог указать никакого отклонения от скорости слабого взаимодействия, предсказываемого теорией. Возможная причина этого заключается в том, что средняя энергия наших нейтрино все еще ниже той, при которой теория предсказывает резкий рост. Надо поставить дальнейшие эксперименты с частицами существенно более высокой энергии. Мои сотрудники и я готовим новый эксперимент, который смог бы установить, существует промежуточный бозон или нет.

Между тем теоретики могут забавляться с двумя нейтрино. Первый явный выигрыш от этого открытия — длинный список запрещенных реакций — может быть теперь понят. Нейтрино, рожденные вместе с мюонами, некоторым образом отличаются от нейтрино, рожденных вместе с электронами. Это различие можно отметить неким новым «квантовым числом» — скажем M (мюонное число), — которое должно сохраняться. Для положительного мюона и его нейтрино M равно 1. Для отрицательного мюона и его антинейтрино M равно -1 . Для всех других частиц M равно 0. Новое квантовое число должно сохраняться в реакциях, и это не что иное, как стандартный способ «объяснения», почему ненаблюдаемые реакции не происходят. Электрон и его нейтрино имеют соответствующее квантовое число, скажем N , которое также должно сохраняться.

До последнего времени физики задавали вопрос: зачем природе понадобились две частицы — мюон и электрон, которые сходны между собой во всем, кроме массы? Теперь надо добавить: зачем природе нужны мюонное нейтрино и электронное нейтрино, которые, как может оказаться, не отличаются даже массой? Теперь известно, что масса электронного нейтрино меньше одной тысячной массы электрона и вообще считается равной нулю. Менее известно о массе мюонного нейтрино. Лучшие измерения показывают, что эта масса меньше семикратной массы электрона. Если бы она оказалась не равной нулю, то ей лучше всего подошло бы первоначальное название «нейтретто».

Загадка двух частиц может найти решение на двух различных путях. Может оказаться, что за «мюонностью» скрывается сложная внутренняя структура, к которой эксперимент сегодняшнего дня нечувствителен. Другая возможность, указанная Ли, заключается в том, что мюонность-электронность аналогичны ситуации электрического-магнитного полей. В XIX столетии считалось, что эти поля подобны между собой, но не тождественны. Специальная теория относительности Альберта Эйнштейна, предложенная в 1905 г., вскрыла внутреннюю связь между этими двумя полями и объяснила, как электрическое и магнитное поля могут превращаться друг в друга. Теория, которая объяснит, как «мюонность» преобразуется в «электронность», сможет привести к новому глубокому прояснению физических представлений.

Р. Д. Хилл

РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТИЦЫ

(ЯНВАРЬ 1963 г.)

Большая часть 32 фундаментальных частиц, из которых построена материя, распадается очень быстро. Но есть еще и другие частицы, распадающиеся еще быстрее. Сейчас кажется вероятным, что это — «резонансные» образования из частиц первого типа.

Когда можно назвать частицу «элементарной»? Поскольку большинство субатомных частиц распадается — и очень быстро — на другие частицы, этот вопрос постоянно встает перед физиками. В последнее время положение запуталось еще больше из-за открытия большой группы частиц, несравненно более эфемерных, чем все известные ранее.

Таблица «старых» частиц, которые обычно считают элементарными и которые мы будем называть частицами типа I, более или менее стабилизировалась за последние годы (табл. 5.1). В нее до сих пор входят только те частицы, которые упоминались в качестве уже открытых или предсказанных в опубликованной более пяти лет назад статье Гелл-Манна и Розенбаума *).

Если не говорить о совершенно стабильных частицах, большая часть частиц первого типа распадается за примерно десяти миллиардную долю секунды. Такое время жизни позволяет им переместиться на заметное расстояние в детекторе типа пузырьковой камеры. Новые частицы, которые мы будем называть частицами типа II (табл. 5.2), распадаются за время, примерно требующееся свету, чтобы пройти расстояние в несколько диаметров атомного ядра. Их время жизни измеряется примерно сотысячными миллиардно-миллиардных долей секунды (10^{-23} сек), т. е. неизмеримо короче времени, которое позволило бы им оставить видимый трек или быть обнаруженными каким-либо другим прямым способом. Поэтому их существование можно вывести лишь косвенно, изучая образующиеся при их распадах частицы типа I. Возникает вопрос: что это, все-таки? Самостоятельные частицы, или, может быть, всего лишь группы отдельных независимых частей, которые совсем недолго летят вместе, перед тем как разлететься в разные стороны? Физики обошли этот вопрос, назвав новые частицы «резонансами», подразумевая тем самым, что это, может быть, все-таки временные объединения других частиц.

Как же вообще обнаруживают их существование? Чтобы пояснить читателю путь, который привел к их открытию, начнем с описания одного красивого мысленного эксперимента из области классической физики, т. е. той части физики, которую мы знали до открытия квантов и теории относительности. Как и всегда при классических иллюстрациях квантовых и релятивистских явлений, аналогия будет далека от совершенства, но тем

*) «Над чем думают физики», вып. 2, «Элементарные частицы», Физматгиз, 1963.

Таблица 5.1

Частицы типа I считаются элементарными из-за их сравнительно длинного времени жизни, составляющего в среднем 10^{-10} сек. В зависимости от их массы частицы разбиты на группы: лептоны, бозоны и барионы.

Частицы		Зарядовое состояние частицы	Зарядовое состояние античастицы	Масса, Мэв	Среднее время жизни, сек
Лептоны	нейтрино	ν_e, ν_μ	$\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$	0	стабилен
	электрон	e^-	e^+	0,51	стабилен
	мион	μ^-	μ^+	105,66	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Бозоны	фотон	γ	γ	0	стабилен
	пион	π^0	π^0	135	$2,3 \cdot 10^{-16}$
		π^+	π^-	139,6	$2,6 \cdot 10^{-8}$
	K-мезон	K^+	\bar{K}^-	494	$1,2 \cdot 10^{-8}$
K^0		\bar{K}^0	497,8	$6 \cdot 10^{-8} \quad 1 \cdot 10^{-10}$	
Барионы	протон	p^+	\bar{p}^-	938,2	стабилен
	нейтрон	n^0	\bar{n}^0	939,5	$1 \cdot 10^3$
	лямбда	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	1115,4	$2,5 \cdot 10^{-10}$
	сигма	Σ^+	$\bar{\Sigma}^-$	1189,4	$0,8 \cdot 10^{-10}$
		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	1191,5	$< 0,1 \cdot 10^{-10}$
	кси	Σ^-	$\bar{\Sigma}^+$	1196	$1,6 \cdot 10^{-10}$
		Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	1311	$1,5 \cdot 10^{-10}$
	Ξ^-	$\bar{\Xi}^+$	1318,4	$1,3 \cdot 10^{-10}$	

не менее этот опыт введет нас, хотя бы в грубых чертах, в основную идею открытия.

Представим себе экстравагантный артиллерийский снаряд, сделанный из разрывного заряда, обклеенного снаружи тремя кусками стекла, одним красным и двумя совершенно прозрачными, и поэтому невидимыми. Предположим, что этим снарядом выстрелили, притом так, что он полетел по прямолинейной траектории с постоянной скоростью, а мы в качестве наблюдателей движемся параллельно снаряду в аэроплане, перемещающемся с той же быстротой. Когда снаряд взрывается, он разваливается на три куска, из которых был сделан, но центр масс трех кусков продолжает двигаться в первоначальном направлении с первоначальной скоростью, как этого требует закон сохранения импульса. Мы тоже продолжаем двигаться в том же направлении с той же скоростью. Поэтому все происходит так, как если бы и снаряд и мы покоились в момент взрыва — мы наблюдаем в «системе центра масс» взорвавшихся осколков.

Поскольку два из трех кусков невидимы, мы сможем обнаружить после взрыва лишь красный кусок. Измерим его скорость относительно нас. Если мы поставим теперь этот опыт много раз, мы получим непрерывный спектр скоростей красного куска, простирающийся от нуля до некоторого максимума. Нулевая скорость будет соответствовать тому случаю, когда вся энергия разрывного заряда уносится двумя другими фрагментами. Такое

Таблица 5.2

Частицы типа II — это резонансные частицы. В таблицу включены только надежно установленные частицы, однако многие из приведенных чисел надо еще считать предварительными. Общепринятая терминология до сих пор еще отсутствует; в четырех случаях для обозначения резонансов использованы греческие буквы: эта (η), ро (ρ), омега (ω) и кси (Ξ^*). Способы распада указаны в скобках. Так, например, омега-частица распадается либо на три пиона, либо на пион и фотон, K^* -частица распадается на K -мезон и пион, а N^* — на пион и нуклон (т. е. протон или нейтрон) и т. д. В самом правом столбце приведены реакции, в которых рождаются эти частицы, при этом символ d означает дейтон, или ядро атома тяжелого водорода, состоящее из протона и нейтрона. В противоположность частицам типа I, резонансные частицы обладают гораздо более коротким временем жизни, порядка 10^{-23} сек.

Резонансная частица	Изотопический спин	Полный момент	Масса, Мэв	Реакция, при помощи которой получена частица
η ($\pi^+\pi^-\pi^0$)	0	0	550	$\pi^+ + d^+ \rightarrow \eta^0 + p^+ + p^+$
ρ ($\pi\pi$)	1	1	760	$p^+ + \bar{p}^- \rightarrow \rho^0 + \pi^+ + \pi^-$ $\pi^\pm + p^+ \rightarrow \rho^\pm + p^+$
ω ($\pi^+\pi^-\pi^0, \pi^0\gamma$)	0	1	790	$p^+ + \bar{p}^- \rightarrow \omega^0 + \pi^+ + \pi^-$ $\pi^+ + d^+ \rightarrow \omega^0 + p^+ + p^+$
K^* ($K\pi$)	1/2	1	880	$\bar{K}^- + p^+ \rightarrow K^* + p^+$ $\pi^- + p^+ \rightarrow K^* + \Sigma$
$K\bar{K}$?	?	1020	$\pi^- + p^+ \rightarrow \bar{K}^0 + K^0 + n^0$ $\bar{K}^- + p^+ \rightarrow \bar{K}^- + K^+ + \Lambda^0$
N^* (πN)	3/2	3/2	1237	$\pi^\pm + p^+ \rightarrow \pi^\pm + p^+$
Y^* ($\pi\Lambda, \pi\Sigma$)	1	3/2	1384	$\bar{K}^- + p^+ \rightarrow Y^* + \pi$ $\pi^- + p^+ \rightarrow Y^* + \bar{K}$
Y^{**} ($2\pi\Lambda, \pi\Sigma$)	0	1/2	1405	$\bar{K}^- + p^+ \rightarrow Y^{**} + \pi$
N^{**} (πN)	1/2	3/2	1516	$\pi^- + p^+ \rightarrow N^{**} + \pi$
Y^{***} ($\pi\Lambda, \pi\Sigma, KN$)	0	3/2	1520	$\bar{K}^- + p^+ \rightarrow Y^{***} + \pi$
Ξ^* ($\pi\Sigma$)	1/2	$>1/2$	1535	$\bar{K}^- + p^+ \rightarrow \Xi^* + K$
N^{***} (πN)	1/2	5/2	1683	$\pi^- + p^+ \rightarrow N^{***} + \pi$

произойдет не часто, но может произойти. Гораздо вероятнее примерно равное распределение энергии между всеми тремя кусками. И опять очень маловероятно, что энергия разделится между красным куском и двумя остальными так, что два последних куска полетят, не разделившись. Поэтому следует ожидать, что распределение скоростей (или энергий) красного осколка, который мы единственно можем наблюдать, будет представляться плавной кривой (рис. 5.1).

Предположим теперь, что два невидимых куска склеены друг с другом столь надежно, что этот склей не нарушается при взрыве. Тогда снаряд разорвется только на два куска, и если мы будем наблюдать скорость красного обломка, то найдем, что она всегда одна и та же, поскольку в этом случае энергия взрыва может, в силу законов сохранения энергии и импульса, распределиться между двумя кусками только одним-единственным способом. На графике энергий красного осколка появится резкая линия. Таким

образом, распределение видимого осколка по энергиям позволяет нам сказать, разорвалась ли невидимая часть при взрыве или же осталась целой.

Первый опыт с субатомными частицами, который можно сравнить с приведенным примером, был поставлен на пузырьковой камере Лоуренсовской радиационной лаборатории Калифорнийского университета летом 1960 г. Сотрудники этой лаборатории обстреливали пучком отрицательных K -мезонов высокой энергии жидкий водород в пузырьковой камере. Их наблюдения показали, что когда K -мезон ударяет по протону (p), то в небольшом числе таких соударений рождается нейтральная лямбда-частица (Λ^0) и положительный и отрицательный пи-мезоны (пионы π^+ и π^-). Реакция записывается так: $\bar{K}^- + p^+ \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+ + \pi^-$.

Бригада экспериментаторов (Маргарет Алстон, Льюис В. Альварес, П. Эберхард, Майрон Л. Гуд, В. Грациано, Гарольд К. Тичо и Стэнли Г. Войцицкий) наблюдала несколько сотен таких событий и с помощью счетной машины проанализировала распределение видимых треков пионов по энергиям. Они обнаружили распределение по энергиям с резкими пиками, указывающее, что в некоторой доле отобранных событий один из заряженных пионов (положительный или отрицательный) испытывал отдачу чаще от одной, а не от двух других частиц (рис. 5.4 и 5.5). Это означало, что другой пион и лямбда-частица не разлетались независимо, а держались вместе как единое целое по крайней мере то время, которое требовалось наблюдавшемуся пиону, чтобы «оттолкнуться» от них. Физики обозначили это единое целое символом Y^* и стали рассматривать реакцию как $\bar{K}^- + p^+ \rightarrow Y^{*\pm} + \pi^\mp$ (где двойные знаки \pm указывают, что заряд Y^* мог быть и положительным и отрицательным, оставаясь противоположным заряду наблюдавшегося пиона). Спустя очень короткое время, столь малое, что Y^* не может оставить видимого трека, происходит следующая реакция: $Y^{*\pm} \rightarrow \Lambda^0 + \pi^\pm$.

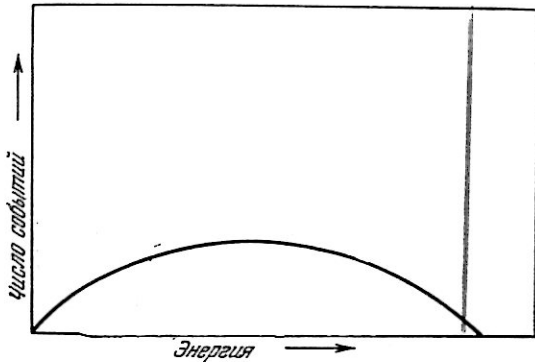


Рис. 5.1. Распределение по энергиям одного из трех осколков разрывающегося снаряда (мысленный эксперимент) для большого числа событий представляется плавной кривой. Если же, однако, два из трех осколков всегда держатся вместе, третий осколок должен, теоретически, всегда получать одну и ту же энергию, т. е. кривая распределения по энергиям превращается в вертикальную прямую.

Подсчет энергий и импульсов, фигурирующих в этих процессах, показывает, что Y^* ведет себя, как частица с массой $1384 Mэв$. Эта цифра составила из масс покоя двух частиц, на которые распадется Y^* : $140 Mэв$ от пиона, $1115 Mэв$ на лямбда-частицу плюс еще $129 Mэв$ на кинетическую энергию, с которой разлетаются пион и лямбда-частица. (Согласно знаменитому соотношению $E=mc^2$ масса и энергия — это эквивалентные величины. В физике частиц теперь принято измерять массы покоя в энергетических единицах. Масса электрона равна тогда $0,51 Mэв$, а масса протона — $938,2 Mэв$). Читатель заметит, что энергетические пики, отвечающие отдаче от Y^* , не бесконечно остры, как это получилось в нашем примере с бомбой.

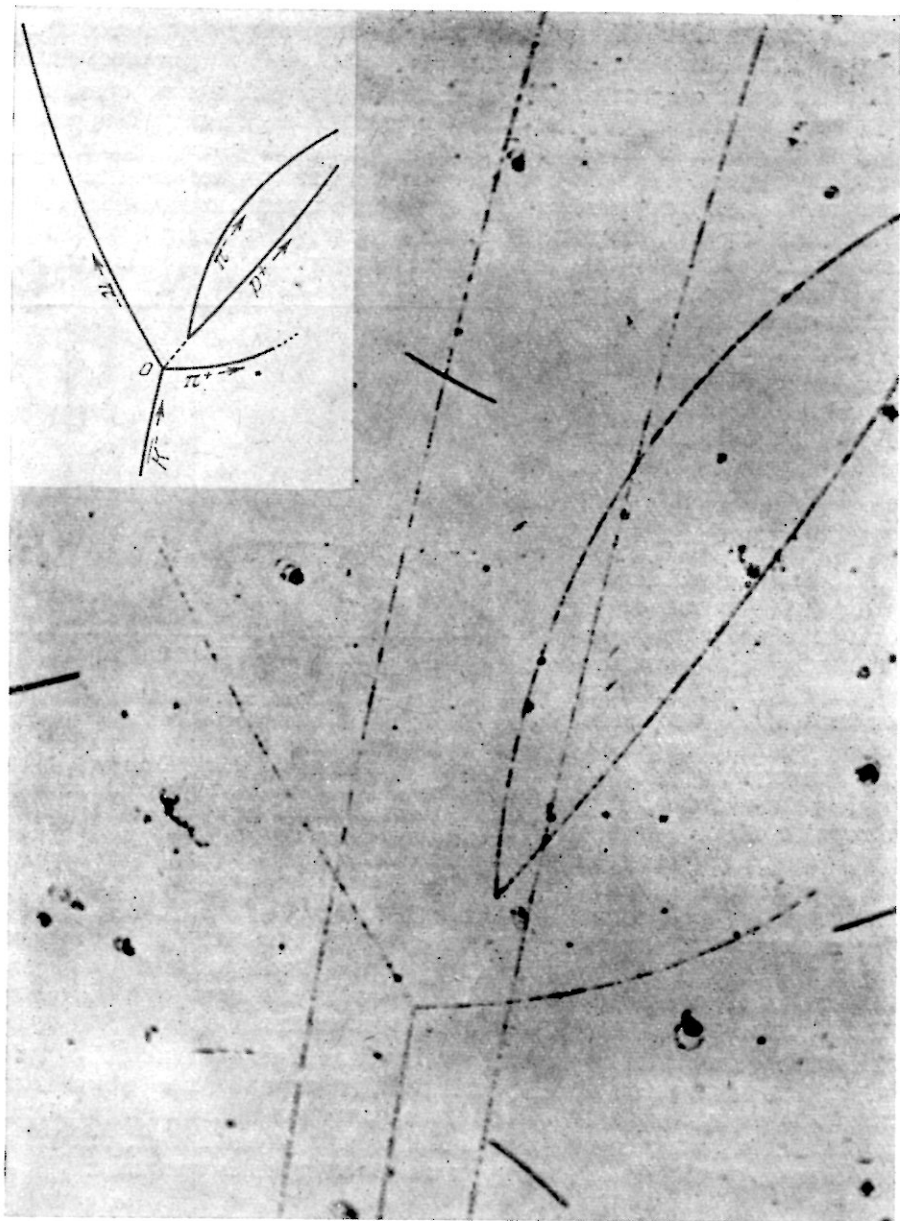


Рис. 5.2. Резонансная Y^* -частица и отрицательный пион (вылетающий из точки O на схеме вверх) родились в пузырьковой камере при соударении отрицательного K -мезона (K^-) с протоном в точке O . Резонансная частица распадается, прежде чем она сможет оставить трек, на нейтральную лямбда-частицу, тоже не оставляющую трека (пунктир на схеме), и положительный пион. Лямбда-частица в свою очередь распадается на протон (p^+) и отрицательный пион. Фотография была сделана в группе Альвареса в Лоуренсовской радиационной лаборатории.

Вместо этого они обладают конечной, вполне измеримой шириной около 60 Мэв . Эта ширина, которая возникает из-за разброса в энергиях отдельных наблюдавшихся частиц, означает неопределенность в значениях массы или энергии Y^* . Но, согласно квантовомеханическому принципу неопределенности, неопределенность в энергии обратно пропорциональна неопределенности во времени. У бесконечно острого пика неопределенность значения энергии была бы равна нулю и, следовательно, неопределенность времени равнялась бы бесконечности. Но это значит, что частица или состояние, о котором идет речь, «живет» вечно, т. е. полностью стабильно. Неопределенность же в энергии в 60 Мэв соответствует, напротив,

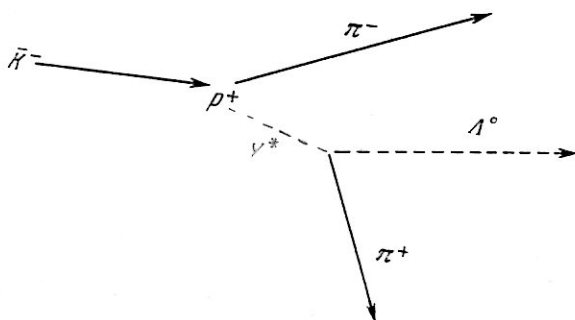


Рис. 5.3. Рождение Y^* -частицы, показанное на рис. 5.2, изображено здесь с большими подробностями. Резонансная частица была положительной, поэтому рожденный вместе с ней пион — отрицательным. Если же, напротив, частица была бы отрицательной, то рождающийся пион был бы положительным, а второй пион (возникающий от распада Y^*) оказался бы отрицательным. Расстояние, пройденное Y^* -частицей (цветной пунктир), порядка 10^{-13} см ; поэтому в пузырьковой камере создается впечатление, что π^+ вылетает прямо из точки соударения.

неопределенности во времени порядка 10^{-23} сек . Это тот промежуток времени, в течение которого Y^* может существовать как самостоятельное образование; иными словами, это мера его времени жизни.

Что же, в сущности, такое Y^* -частицы? Есть ли это просто пион и лямбда-частица, которые некоторое время летят вместе перед тем, как избрать самостоятельные пути? Или же это элементарная частица, превращающаяся в пион и лямбда-частицу примерно за 10^{-23} сек ? Никто не знает этого на самом деле. Может даже оказаться, что для таких малых времен жизни различие вообще не имеет смысла. Каким бы ни оказалось окончательное решение по этому поводу, пока принято считать Y^* резонансной частицей, причем употребление термина «резонансная» имеет следующее происхождение.

Сразу после того, как была найдена Y^* -частица, ее первооткрыватели отметили, что она очень похожа на уже известный ранее резонанс — резонанс между пионом и протоном (или нейтроном). В обычных теперь обозначениях этот резонанс следовало бы называть N^* , где N обозначает нуклон (протон или нейтрон). Он был открыт совершенно другим образом. Еще в 1952 г. Энрико Ферми и его коллеги по Чикагскому университету проводили опыты по рассеянию пучка пионов на протонах. Они, а немного позже

и другие физики технологического института Карнеги нашли, что эффективное сечение рассеяния, которое является мерой вероятности, резко возрастает, начиная с энергии пучка в 100 Мэв и вплоть до примерно 200 Мэв, наибольшей энергии пионного пучка, достижимой на существовавших в

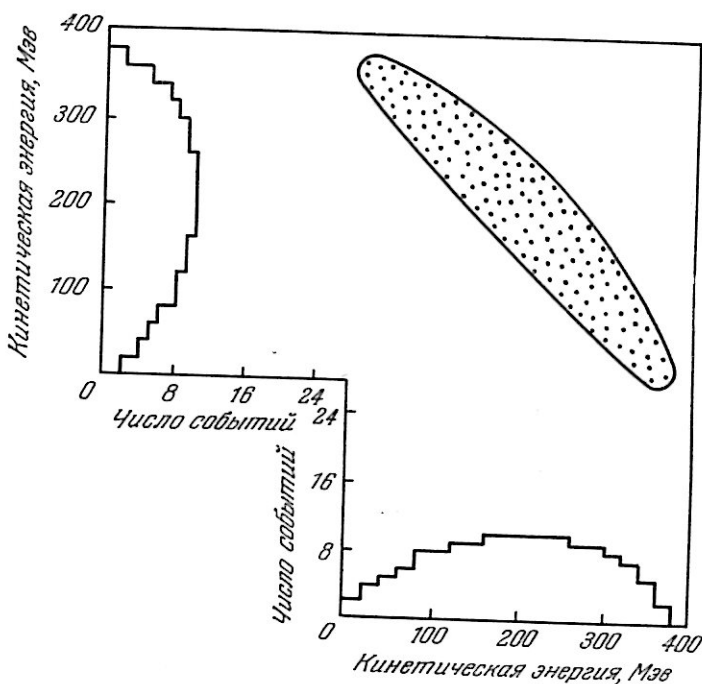


Рис. 5.4. Ожидаемая диаграмма Далитца показывает теоретическое распределение энергии между двумя пионами, рождаемыми в реакции $\bar{K}^- + p^+ \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+ + \pi^-$. Энергии положительных пионов, рождаемых в 141 случае таких реакций, нанесены на горизонтальной шкале внизу, а энергии отрицательных пионов для того же события — на вертикальной шкале слева сверху. Для большого числа событий распределение энергии между двумя пионами должно было бы быть более или менее равным, а график распределения энергий одного из продуктов должен был бы оказаться гистограммой, приближающейся к плавной кривой (рис. 5.1). Чечевицеобразная область справа сверху показывает возможные пределы, внутри которых должны попасть энергии каждого отдельного события. Внутри этих пределов распределение по энергиям (точки) равномерное.

то время ускорителях. Когда вошел в строй космотрон на 3 Гэв в Брукхейвене, Люк Ц. Л. Юэн и Сеймур Дж. Линденбаум смогли показать, что эффективное сечение достигает отчетливого максимума при энергии пионов в 195 Мэв, а затем снова, и очень резко, спадает.

Тогда Кейт А. Брюкнер из Индианского университета выдвинул предположение, что существует некоторое необычно сильное и специфическое взаимодействие между пионом и протоном, благодаря которому при этой энергии возникает резонанс. Характерным признаком для такого N^* -резонанса является фаза, или относительная синхронизация, колебаний в волне, связанной с рассеянным пионом. (В квантовой механике, конечно, всегда допустимо представлять себе частицы как волны; тогда вероятности

рассеяния пионов при различных энергиях будут связаны с изменением фазы пионной волны, когда она проходит около нуклона или сквозь него. Величины фазовых сдвигов можно вывести из наблюдений рассеяния.) Как и в других способных к резонансным колебаниям системах, которые часто встречаются в физике, фаза рассеянной пионной волны сдвигается

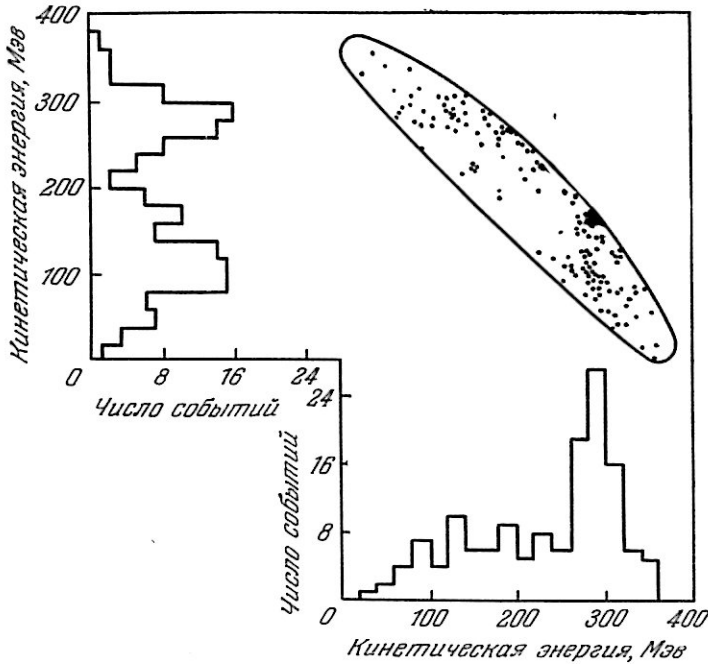


Рис. 5.5. Наблюденная диаграмма Далитца для реакции отрицательных K -мезонов с протонами основана на экспериментах с пузырьковой камерой, проведенных группой Альвареса. Распределение по энергиям внутри чевицеобразной области не однородное, а на графиках распределения по энергиям появились пики — два сравнительно заметных пика на кривой для отрицательных пионов и один очень большой пик — для положительных. Такое распределение лучше согласуется с реакцией, в которой рождается не три, а две частицы, т. е. с реакцией $\bar{K}^- + p \rightarrow Y^* + \pi$. Ширина наибольшего пика равна 60 Мэв, что соответствует среднему времени жизни Y^* -частицы, равному 10^{-23} сек. Такой способ графического анализа получил свое имя в честь Р. Х. Далитца из Чикагского университета, который развил его для изучения распада тау-мезонов.

при резонансе на четверть длины волны, или на 90° , а по обе стороны резонанса угол, измеряющий величину фазового сдвига, плавно убывает или возрастает (рис. 5.8).

Здесь тоже возникает вопрос. Как объяснить этот резонанс физически? Сливаются ли протон мишени и падающий пион на некоторое время в единую элементарную частицу — частицу N^* , — когда они сходятся достаточно близко, или же они сохраняют свою индивидуальность и только взаимодействуют (скажем, закручиваются один вокруг другого) очень сильно? В ответ опять нельзя сказать ничего определенного, и ответ опять, быть может, не имеет смысла. Так или иначе, N^* ведет себя, как частица с массой 1237 Мэв и временем жизни еще меньшим, чем даже у Y^* .

За годы с 1952 до 1960 было вложено много усилий как в исследование природы пион-нуклонного резонанса при 195 Мэв , так и в поиски других резонансов в пион-нуклонном рассеянии при больших энергиях. Несколько новых резонансов было действительно найдено, и теперь мы знаем, что их свойства отличаются от свойств первого резонанса. Чтобы понять, в чем состоит это отличие, необходимо познакомиться с двумя в известной степени техническими понятиями физики частиц.

Одно из них кажется довольно естественным, во всяком случае оно обладает аналогом в классической физике. Это — момент (или, как его обычно

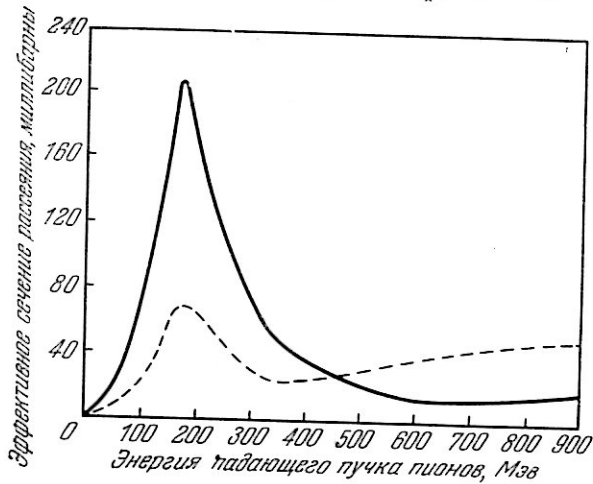


Рис. 5.6. Пион-протонный резонанс, открытый в 1952 г., был самым первым. Две кривые показывают вероятности того, что положительные (сплошная кривая) или отрицательные (пунктирная кривая) пионы рассеются на протонах. Эффективное сечение рассеяния (или вероятность), измеряемое в миллибарнах, для положительных пионов начинает резко возрастать, начиная примерно со 100 Мэв , достигает максимума немного более чем при 200 Мэв и затем почти так же резко спадает. Для отрицательных пионов резонансные эффекты примерно втрое меньше.

тальное движение вносит дополнительный вклад в момент, который тоже квантуется. Поэтому полный момент системы двух частиц складывается из спина и орбитального момента, которые, в зависимости от их взаимной направленности, могут складываться или же вычитаться друг из друга.

У пиона нет спина, спин нуклона равен $1/2$. Анализ взаимодействия пионов с нуклонами показывает, что их орбитальный момент в N^* -состоянии равен 1. Поэтому, в зависимости от их взаимных направлений, спин нуклона мог бы или сложиться с орбитальным моментом или вычесться из него, приводя к полному спину $3/2$ или $1/2$. Для пион-нуклонного резонанса при 195 Мэв они, очевидно, складываются и дают полный спин $3/2$. Если представлять себе резонанс как единую частицу, то надо считать, что обе составляющие превращаются в спин этой частицы. Если же думать о резонансе как о сложной системе, то мы имеем дело со смесью спина и орбитального момента.

называют в школьном курсе, момент количества движения). У многих элементарных частиц есть врожденный момент или, как говорят, спин. (У некоторых частиц нет спина.) Величина момента вдоль некоторого избранного направления, которую можно измерить, всегда квантована. В частных случаях она может равняться $+1/2$ или $-1/2$ единицы измерения (знак плюс соответствует одному направлению спина, а знак минус — противоположному), или $+1,0$ и -1 , или $+3/2$ и $-3/2$ единицы измерения и так далее, но никогда не может принимать иных значений, кроме целых или полужелых. Если продолжить классическую аналогию, то можно сказать, что в системе двух частиц, обращающихся друг вокруг друга, орбитальный вклад в момент, который системы двух частиц складываются или же вычитаются

Второе понятие, используемое для классификации резонансов, носит название, которое, пожалуй, может ввести в заблуждение, — оно называется изотопическим спином. Название обманчиво, поскольку слово спин использовано в нем в очень далеком переносном смысле. На самом деле

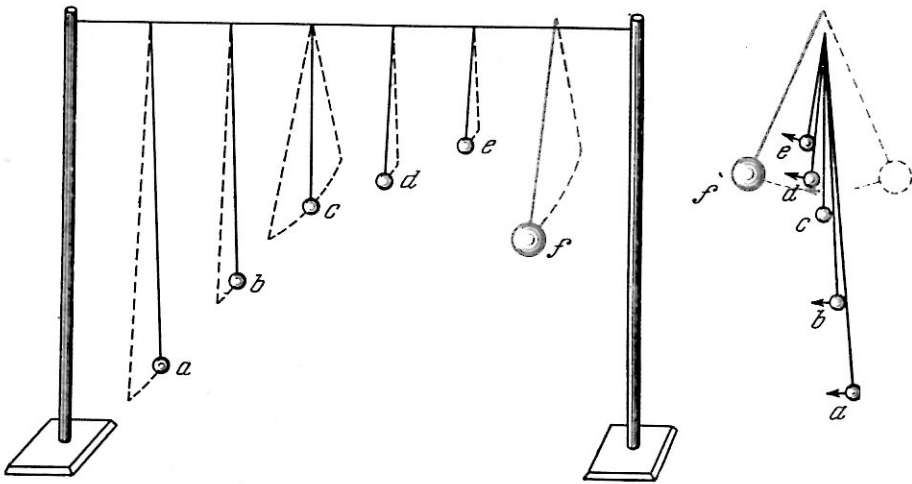


Рис. 5.7. Связанные маятники осуществляют механическую иллюстрацию резонансной системы. Частота ведущего маятника f больше, чем частоты двух первых «подневольных» маятников (a и b), совпадает с частотой третьего (c) и меньше частоты двух последних (d и e). Третий маятник колеблется, отставая от ведущего на 90° по фазе (т. е. на четверть периода). Первые два запаздывают на фазы между 90° и 180° , а два последних — на фазы между нулем и 90° . Это отставание и есть сдвиг фазы (см. рис. 5.8).

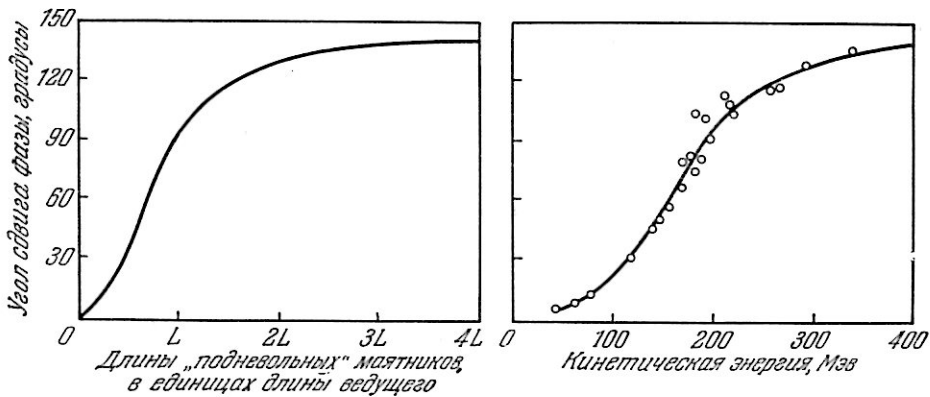


Рис. 5.8. Резонансные эффекты в рассеянии пионов на протонах ясно проявляются, если нарисовать график зависимости сдвига фазы от энергии (правая кривая). Кривая очень сильно напоминает соответствующий график зависимости сдвига фазы от длины маятника (левая кривая).

изотопический спин — это просто серия квантовых чисел, которые служат для описания возможных зарядовых состояний частиц и напоминают квантовые числа обычного спина (этим и исчерпывается сходство). Например, про такие частицы, как лямбда, которая всегда нейтральна, говорят: их изотопический спин — нуль. Нуклону, который может быть или положительным (протоном), или нейтральным (нейтроном), приписывают изотопический

спин $1/2$, и тогда значение спина $+1/2$ соответствует положительному заряду, а значение $-1/2$ — заряду, равному нулю. Некоторые частицы, например пионы, обладают тремя зарядовыми состояниями: положительным, отрицательным или нейтральным. Этим состояниям соответствуют значения изотопического спина $+1$, -1 и 0 . Когда две частицы образуют резонансное состояние, их изотопические спины «выстраиваются в линию» так, чтобы они или складывались, или вычитались. В случае пион-нуклонного резонанса при 195 Мэв пионный изотопический спин 1 складывается с нуклонным изотопическим спином $1/2$, так что полный изотопический спин равен $3/2$. Поэтому этот резонанс называют $3/2$, $5/2$ -состоянием, что указывает на изотопический спин $3/2$ и момент $3/2$.

Могло бы показаться, что изотопический спин — это не более чем арифметический «указатель» заряда. В действительности его значение гораздо важнее. Это квантовое число имеет более глубокий смысл, на который мы можем только намекнуть здесь. Дело в том, что вероятности различных реакций, эквивалентных с остальных точек зрения, существенно зависят от изотопического спина. В частности, теория предсказывает, что при N^* -резонансе сечение рассеяния положительных пионов протонами должно было бы быть втрое больше сечения рассеяния протонами отрицательных пионов. Как можно видеть из рис. 5.6, опыт приводит почти в точности к этому отношению.

Итак, обычный и изотопический спин — это два самых важных свойства частицы или резонансного состояния. Знание этих величин позволяет предсказать многие из реакций, в которых частица может участвовать. Как видно из табл. 5.2 сейчас найдено уже очень много резонансов *). Для некоторых из них удалось надежно определить обычный и изотопический спины, в то время как для других значения все еще сомнительны, а в немногих случаях даже и неизвестны.

В настоящей статье мы не претендуем на более чем феноменологическое описание резонансных состояний и не стремимся к их теоретической интерпретации. Многие теоретики стараются найти схемы, которые объясняли бы их, но мы ограничимся здесь только кратким упоминанием таких попыток.

Некоторые из резонансов были в самом деле предсказаны до того, как их удалось найти, а в самом первом случае с Y^* экспериментаторы обрабатывали свои данные именно в том направлении, которое привело к успеху, под влиянием теоретической концепции, выдвинутой М. Гелл-Манном из Калифорнийского технологического института. Гелл-Манн считал, что должна была бы существовать симметрия взаимодействий пионов с различными «барионами» — частицами той же массы, что нуклоны, или более тяжелыми. Поскольку резонанс между пионами и нуклонами уже был известен, он предсказал, что должен существовать также и резонанс между пионами и лямбда-частицей, которая является одним из барионов.

Другое направление теоретических исследований привело к открытию ряда резонансов между пионами. Первоначальным толчком к этим работам послужило недавнее изучение рассеяния электронов на нуклонах. Пионерами в этой области были Роберт Хофштадтер **) и его коллеги по Стенфордскому университету, к которым присоединились впоследствии группы Ро-

*) Со времени написания этой статьи открытие новых резонансов продолжается во все возрастающем темпе. С более полным (но не исчерпывающим) их списком читатель может познакомиться в статье Чу, Гелл-Манна и Розенфельда в настоящем сборнике. (Прим. ред.)

**) «Над чем думают физики», вып. 1, «Физика атомного ядра», Физматгиз, 1962, стр. 72.

берта Р. Вилсона из Корнельского университета и Ж. Р. Бишопа из лаборатории Французского национального центра ядерных исследований в Орсе́й. Их опыты показали, что как электрические, так и магнитные характеристики нуклонов не сосредоточены в одной точке, а размазаны по области конечных размеров. Иными словами, эти опыты нарисовали электромагнитную структуру нуклонов.

Оказалось, что эту структуру удобно разделить для анализа на три отдельные части. Прежде всего, имеется центральное ядро — маленькая центральная область положительного заряда, которая ответственна примерно за одну четверть полного заряда. Во-вторых, есть «векторная» часть, положительная для протона и отрицательная для нейтрона, которая распределена по всему нуклону и несет ответственность примерно за половину его заряда. И, наконец, в-третьих, есть положительная «скалярная» часть, также распределенная по всему нуклону и несущая примерно четверть полного заряда.

Что же касается магнитных свойств (магнитного момента), то в случае протона одна его часть непосредственно интерпретируется как момент «вращающегося» заряда; что же касается другой части, которая существует и у протона и у нейтрона, ее нельзя просто связать с каким-либо суммарным зарядом. Ее называют обычно аномальным магнитным моментом, и, как выяснилось, она тоже состоит из трех частей, подобно заряду.

Когда начала вырисовываться эта более подробная картина внутренней структуры нуклона, сразу стало ясно, что она не сможет удовлетворительно уложиться в рамки господствовавшей тогда теории нуклона. Все такие теории основываются на совершенно другом понятии, существенно специфичном для квантовой теории, — понятии испускания «виртуальных частиц». Грубо говоря, считают, что нейтрон (или протон) все время испускает и поглощает обратно виртуальные пионы. Время, которое проводит нуклон в таком виртуальном состоянии, и расстояние, на которое пион может удалиться от нуклона, определяются соотношением неопределенности. Итак, некоторую долю времени центральное ядро нуклона оказывается окруженным пионным облаком, и именно это облако ответственно за протяженные части заряда и магнитного момента.

Сначала процесс виртуального испускания рассматривали с невзаимодействующими пионами. Однако оказалось, что на этом пути объяснить результаты Хофштадтера нельзя. В 1959 г. Вильям Р. Фрэйзер и Джоз Р. Фулько из Лоуренсовской радиационной лаборатории показали, что векторную часть распределения заряда и магнитного момента можно было бы удовлетворительно объяснить, если бы нуклон испускал пары пионов, которые вступали бы в сильное резонансное взаимодействие, пока они находятся в виртуальном облаке. Иными словами, их вычисления предсказали двухпионную резонансную частицу, которая должна была бы иметь изотопический спин 1, момент 1 и массу примерно в $600 M_{\pi}$.

Эти вычисления побудили экспериментаторов поискать $600\text{-}M_{\pi}$ резонансную частицу в различных пион-пионных взаимодействиях, и указания на ее существование были вскоре независимо найдены разными группами. Один из результатов, например, состоял в том, что когда пион высокой энергии рождает другой пион в соударении с протоном, то между этими двумя пионами действует сильное притяжение. Дальнейшие опыты, аналогичные тем, которые мы рассматривали в связи с Y^* -частицей, показали, что этот резонанс, который стали называть ρ -частицей, имеет массу, примерно равную $760 M_{\pi}$, что достаточно хорошо согласуется с требованиями современной теории электромагнитной структуры нуклона.

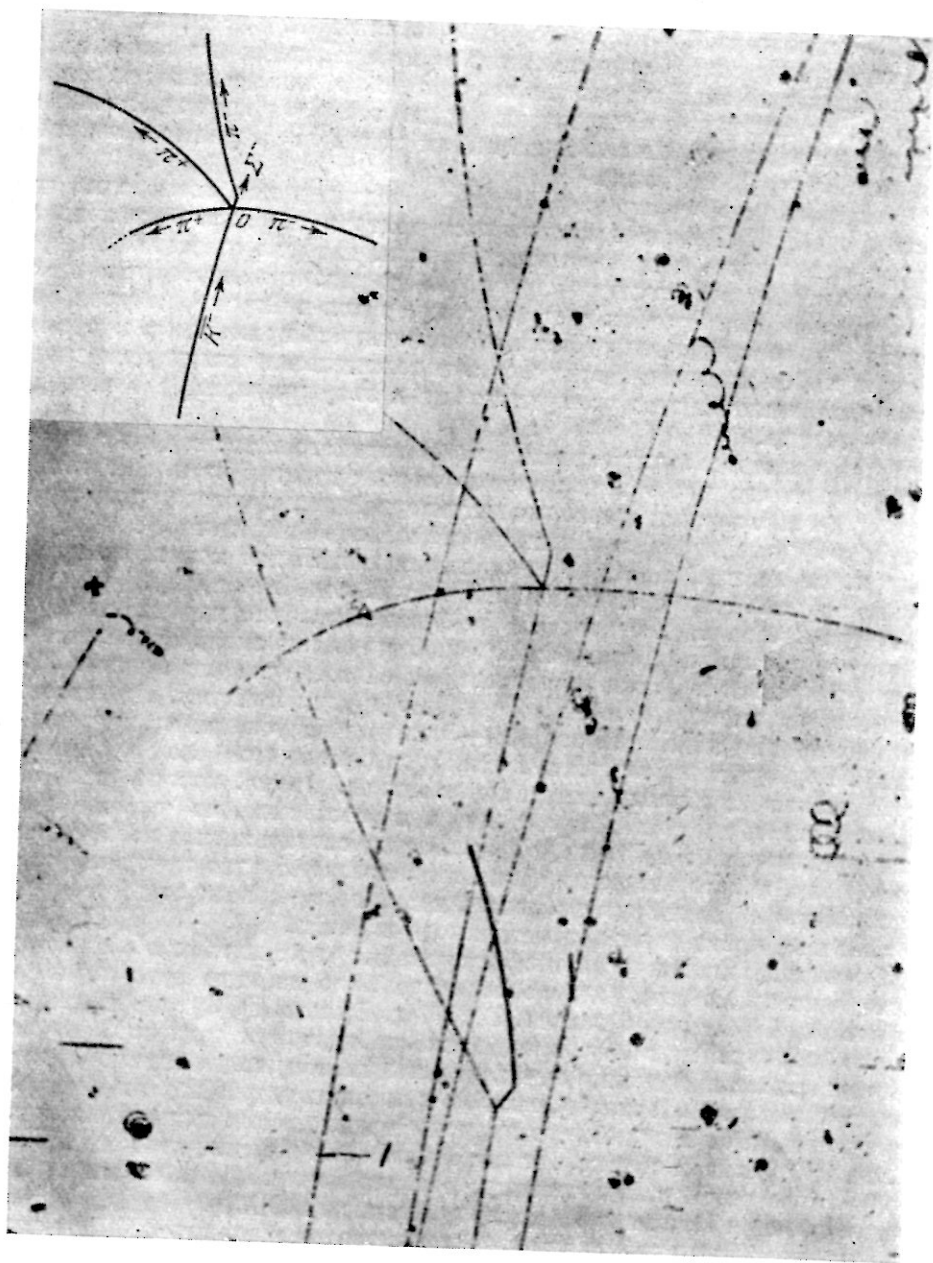


Рис. 5.9. Возможное рождение Υ^{*-} -частицы в соударении отрицательного K -мезона (\bar{K}^- на схеме) с протоном в точке O нельзя отличить от непосредственного рождения отрицательной сигма-частицы (Σ^-), одного отрицательного и двух положительных пионов (π , быть может, еще и нейтрального пиона) в этой реакции, несмотря на проведенный тщательный анализ энергий и импульсов всех участвующих частиц. Сигма-частица распадается на отрицательный пион и нейтрон, не оставляющий трека. Фотография группы Альвареса.

В том же 1959 г. Джеффри Ф. Чу из Лоуренсовской радиационной лаборатории указал, что скалярную часть электромагнитной структуры нуклона можно было бы понять, привлекая другое резонансное взаимодействие, на этот раз — трех пионов. Поскольку эта составляющая нуклонной структуры одна и та же для протона и для нейтрона, то изотопический спин резонансного взаимодействия трех пионов, требующегося для объяснения этого свойства, должен равняться нулю, т. е. у резонанса должна быть лишь одна — нейтральная — модификация по заряду. Чу решил, что было бы разумным предположить существование трехпионной резонансной частицы с примерно такой же массой, что и для двухпионного

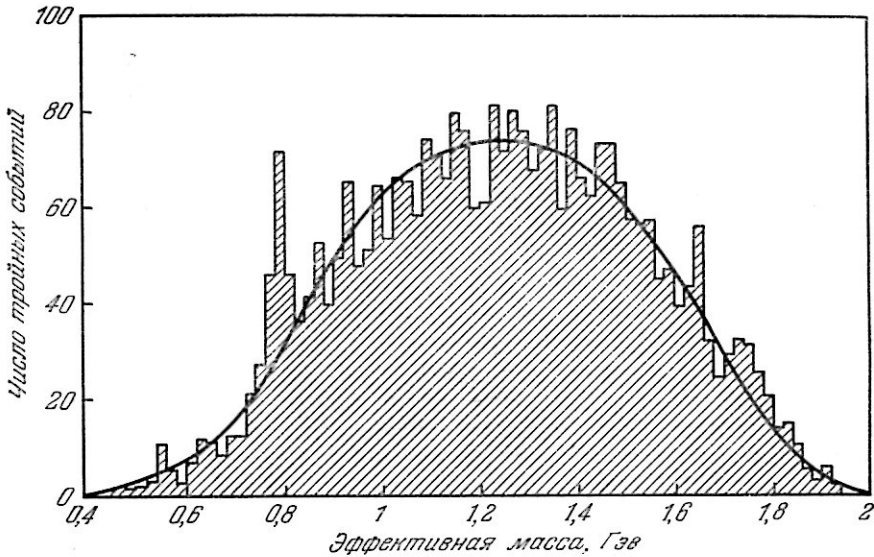


Рис. 5.10. Резонансная омега-частица — частица из трех пионов — была открыта в опытах, проведенных в Лоуренсовской радиационной лаборатории. Ее наблюдаемая масса (пик вблизи 0,8 Гэв) оказалась равной 790 Мэв. Все остальные массы стремятся усредниться к плавной кривой.

резонанса. Следовало бы заметить, что сделанное Чу указание на частицу с нулевым изотопическим спином не было первым, так как еще двумя годами ранее Ючиро Намбу из Чикагского университета предположил, что должен существовать тяжелый нейтральный мезон, который вносил бы вклад в электромагнитную структуру нуклона. Ясно, что эти идеи в немалой мере ответственны за исследования, которые привели к открытию известных теперь различных многопионных резонансов. Самым эффективным экспериментальным результатом было, пожалуй, открытие омега-частицы — того трехпионного резонанса, который предсказывали Намбу и Чу. Опыт был поставлен Б. Ц. Магличем, Л. В. Альварецем, А. Х. Розенфельдом и Л. Стивенсом из Лоуренсовской лаборатории. Они изучали аннигиляцию антипротонов, сталкивавшихся с протонами в 72-дюймовой пузырьковой камере, наполненной жидким водородом. В результате аннигиляции возникало очень большое разнообразие конечных продуктов, и экспериментаторы ограничились только теми случаями, когда получалось четыре выходящих дополнительных трека. Из 2500 событий этого типа только 800 обладали еще тем дополнительным свойством, что из соображений правильного баланса энергии и импульса в числе вылетающих частиц обязательно должен был бы

присутствовать еще один нейтральный пион. Иными словами, эти тщательно отделенные события являли собой примеры реакции $p^+ + \bar{p}^- \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + \pi^+ + \pi^-$.

Во всех этих 800 примерах выписанной реакции физики пытались найти такую область энергии, в которой для трех из пионов проявлялось бы резонансное взаимодействие. (При этом они, поскольку велись поиски нейтрального резонанса, знали, что один из пионов должен быть нейтральным, а два других — заряженными противоположно.) Для всех 800 событий был (с использованием быстродействующих электронных машин) предпринят детальный анализ динамики процесса, и в каждом событии подсчитывалась «эффективная» масса для всех возможных комбинаций трех из пяти пионов, т. е. был применен метод, аналогичный тому, который мы обсуждали в связи с открытием Y^* -частицы.

Оказалось, что только ожидавшиеся комбинации — т. е. комбинации π^+ , π^- и π^0 — приводят в значениях масс к пику, характеризующему единую частицу (рис. 5.10). В резонансном состоянии оказалось лишь очень немного — именно, 93 — пионных троек, в то время как во всех остальных случаях образовывались, по-видимому, независимые пионы. Тем не менее их было достаточно, чтобы они могли четко сгруппироваться вокруг омега-резонанса и показать, что омега-частица (ω^0) — это нейтральная комбинация (π^+ , π^- , π^0), возникающая в реакции $p^+ + \bar{p}^- \rightarrow \omega^0 + \pi^+ + \pi^-$. Наблюденная масса резонансной омега-частицы равна $790 Mэв$, а ее время жизни, найденное из ширины резонанса, равно или больше $4 \cdot 10^{-23}$ сек.

Вопрос о природе резонансных частиц до сих пор остается открытым. Как уже отмечалось, определенные теоретические идеи ведут к довольно хорошему объяснению некоторых из этих частиц, но есть и такие частицы, которым трудно приписать подобное происхождение.

Физики-теоретики, естественно, тратят немало труда на попытки создать такую общую схему, которая включила бы все резонансы. Атаки разворачивались в нескольких направлениях, которые мы можем охарактеризовать лишь немногими словами. Одно направление пыталось рассматривать некоторые из резонансных частиц как кванты определенного поля, подобно тому как фотоны являются квантами электромагнитного, а пионы — квантами поля ядерных сил. Другой подход был связан с попытками считать, что все возможные частицы связаны с представлениями математических образований, называемых группами. Третья линия атаки прибегает к новому в квантовой теории понятию полюса Редже. В этом случае все частицы понимают как в равной мере элементарные и в равной мере составные, причем каждая из них представляет динамику взаимодействия всех остальных.

После этих таинственных замечаний наша статья заканчивается. Если читатель почувствует себя мистифицированным, то в равном положении находятся и физики. Место резонансных частиц в общем порядке вещей — это один из самых запутанных вопросов в физике, и остается только надеяться, что будущее приготовит нам ответ.

Джеффри Ф. Чу, Мюррей Гелл-Манн, Артур Х. Розенфельд

СИЛЬНО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ЧАСТИЦЫ

(ФЕВРАЛЬ 1964 г.)

Сильно взаимодействующие частицы расскажут нам о развитии физики высоких энергий за последнее время. Частицы, отвечающие самому сильному из четырех известных взаимодействий, больше не кажутся нам «элементарными». Может быть, они составлены друг из друга.

Всего лишь пять лет назад можно было составить аккуратный список из тридцати субатомных частиц, которые без особых оговорок можно было назвать элементарными. Но с тех пор было открыто еще шестьдесят или семьдесят субатомных объектов, и стало совершенно ясно, что прилагательное «элементарный» нельзя применять ко всем этим частицам. По этой причине мы осторожно обошли это прилагательное в названии нашей статьи. Очень многие физики сейчас убеждены, что ни одна из тех частиц, которые главным образом рассматриваются в этой статье, не заслуживает того, чтобы ее выделять как элементарную.

То, что произошло, случилось в физике и раньше: старый способ рассмотрения, который вполне отвечал своему назначению и обнаруживал определенный порядок в ограниченном кругу явлений, наконец оказывался неудобным и не отвечающим явлению, когда расширялся круг наблюдений и увеличивалась их аккуратность. Это произошло с птолемеевой схемой эпициклов, описывавшей движение планет. В значительной мере то же самое произошло в начале этого столетия, когда спектроскописты, изучая свет, испускаемый возбужденными атомами, обнаружили огромное множество дискретных длин волн, находившихся в полном несогласии с длинами волн, предсказываемыми классической электродинамикой. Эти спектроскописты накопили такое обилие эмпирической информации, включая и множество «правил отбора», управляющих допустимыми состояниями возбужденных атомов, что это наконец позволило в 1926 г. Вернеру Гейзенбергу, Эрвину Шрёдингеру и другим сформулировать новую механику — квантовую механику, — пригодную для описания огромного большинства явлений в атомном и молекулярном масштабе.

Похожее положение сейчас, возможно, наблюдается и в физике субатомных частиц. У нас еще нет ясного представления о характере грядущего большого открытия, подобного квантовой механике, однако экспериментальные данные начинают складываться в удивительные и отчасти предсказуемые структуры. Что же можно сказать, чтобы хоть отчасти подвести итог той огромной информации о частицах, которую мы сейчас имеем?

Прежде всего, существует совершенно четкое различие между сильно взаимодействующими частицами, такими, как протон и нейтрон, и остальными частицами. Известно, что протон и нейтрон взаимодействуют посредством сильных и короткодействующих ядерных сил, благодаря которым

эти частицы связаны в атомных ядрах. Все открытые на сегодня частицы участвуют в этих сильных взаимодействиях, за исключением фотона (частицы света и других электромагнитных излучений) и четырех частиц, называемых лептонами: электрона, мюона (или мю-частицы) и двух видов нейтрино.

Другая замечательная черта сильно взаимодействующих частиц состоит в том, что ни одна из них не обладает малой массой покоя. Масса покоя — это масса, которую имела бы частица, если бы она не двигалась; это минимальная масса, которую может иметь данная частица. Сейчас больше принято выражать эту массу ее энергетическим эквивалентом, а не приводить ее значение в единицах массы электрона, как это обычно делалось прежде. Легчайшая сильно взаимодействующая частица — это пион (или пи-мезон); он имеет массу, эквивалентную примерно 137 миллионам электрон-вольт ($Mэв$). Масса же электрона равна $0,5 Mэв$, а масса фотона и обоих нейтрино считается равной нулю.

Третье общее наблюдение состоит в том, что недавно обнаруженное изобилие частиц оказывается пока чертой, присущей почти исключительно сильно взаимодействующим частицам. Но хотя это изобилие и явилось для физиков совершенно неожиданным сюрпризом, один прецедент такого рода может быть найден в обычных атомных ядрах. Хорошо известно, что все сложные ядра, начиная с простейшего ядра дейтерия (тяжелого водорода) и вплоть до ядер самых тяжелых элементов, могут существовать в разнообразных энергетических состояниях, включающих «основное» состояние и множество возбужденных состояний. Эти энергетические уровни ядер, которые могут быть обнаружены разными способами, указывают на разные значения энергии связи компонент ядра — нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре. Эта энергия связи есть, конечно, выражение сильных ядерных взаимодействий.

Довольно очевидно, что ядерные силы могут приводить также и к многочисленным подобным состояниям для тех сильно взаимодействующих частиц, которые иногда считаются элементарными. Низшие состояния будут «основными», или стабильными, «связанными» состояниями, а более высокие — только частично связанными, или нестабильными, распадающимися в ничтожные доли секунды. В результате все сильно взаимодействующие частицы должны обнаруживать спектр энергетических состояний без резкой верхней грани.

Поскольку лептоны не принимают участия в сильных взаимодействиях, то нет ничего удивительного, что их спектр состояний, начинающийся нейтрино с нулевой массой и, по всей видимости, резко обрывающийся на мюоне с массой в $106 Mэв$, совершенно не похож ни на один известный динамический спектр. За последние годы физики изучили много простых и регулярных свойств лептонов, однако им еще ничего неизвестно о том, почему эти частицы существуют.

Мы начнем дальнейшее обсуждение, рассмотрев место, которое занимают сильные взаимодействия в иерархии четырех сил, лежащих, по-видимому, в основе всех процессов, совершающихся в физической вселенной. Потом опишем новую номенклатуру, которая относит каждую сильно взаимодействующую частицу к одному из небольшого числа семейств. Каждое из последних характеризуется различными наборами свойств. Одна группа этих семейств охватывает барионы, вообще говоря, самые тяжелые частицы; вторая группа состоит из мезонов, причем первые из открытых мезонов были легче всех барионов. Новая система наименований потребует краткого обзора семи квантовых чисел, или физических величин, которые сохраняются в сильных взаимодействиях.

Дальше мы опишем, как эти величины сохраняются, когда частицы распадаются по разным «каналам», представляющим различные возможности распада частицы. Это приведет к описанию «резонансов», или нестабильных частиц, благодаря которым так обильно размножилось семейство сильно взаимодействующих частиц.

После этого мы будем готовы к описанию двух систем классификации или правил образования групп. Эти правила позволяют обнаружить глубокие фамильные связи между различными сильно взаимодействующими частицами, а также дают возможность предсказывать существование еще не открытых частиц, приближенные значения их масс и другие их свойства. Одна такая система основана на понятии «траекторий Редже», а другая называется «восьмеричный путь».

Потом мы объясним, почему слово «элементарная» попало в немилость при описании сильно взаимодействующих частиц. Дело в том, что есть основания — и число их все возрастает — для того, чтобы рассматривать все такие частицы как сложные структуры. Наконец, мы опишем гипотезу «бутстрапа»*), которая позволяет на математическом языке объяснить существование и свойства сильно взаимодействующих частиц. Согласно этой гипотезе, все такие частицы представляют собой динамические структуры в том смысле, что они осуществляют оптимальное равновесие сил; действительно, они обязаны своим существованием тем же самым силам, посредством которых они взаимодействуют между собой. С этой точки зрения нейтрон и протон не являются более фундаментальными частицами, как это считалось прежде, но оказываются просто двумя низко расположенными состояниями сильно взаимодействующей материи, имеющими природу, не отличающуюся от природы позднее открытых барионов и мезонов, а также и атомных ядер, более тяжелых, чем ядро водорода.

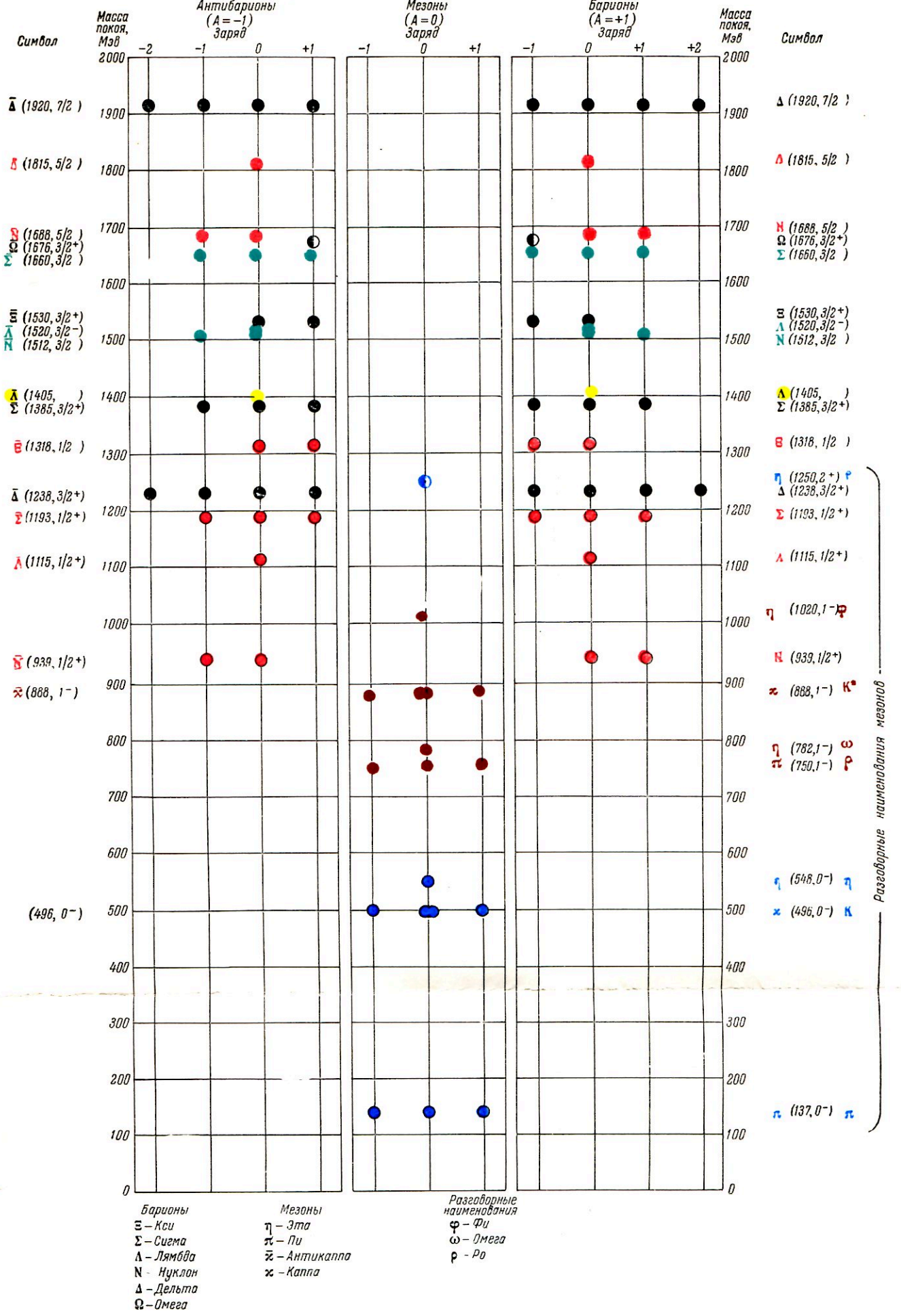
Силы и времена реакций

В современной физике понятия сил и взаимодействий употребляются на равных основаниях. Сильные, или ядерные, взаимодействия — это самые мощные из четырех основных взаимодействий, которые составляют единственную основу всех известных явлений природы совместно с космологией, представляющей сцену, где эти силы разыгрывают свои роли. Сильное взаимодействие сосредоточено в очень малой области: ее порядок 10^{-13} см; это порядок диаметра сильно взаимодействующей частицы.

Следующее по силе электромагнитное взаимодействие примерно в сто раз слабее сильного взаимодействия. Его интенсивность спадает с возрастанием расстояния между взаимодействующими частицами, как квадрат этого расстояния, но радиус действия этих сил в принципе неограничен. Эти силы действуют между всеми электрически заряженными частицами; незаряженная частица — фотон — является носителем поля электромагнитных сил. Электромагнитные силы связывают электроны с положительно заряженными ядрами, образуя атомы, они же затем связывают атомы в

*) Слово «бутстрап» (bootstrap) в буквальном переводе означает шнуровку башмаков. Происхождение термина — чисто техническое и жаргонное. Реальное содержание термина объясняется в последнем разделе статьи. Мы сочли разумным не придумывать для него русского жаргонного эквивалента, поскольку в реальной физической литературе на русском языке этим термином обычно пользуются без перевода. (Прим. ред.)

← Античастицы ————— Частицы —————→



Разговорные наименования мезонов

Барионы	Мезоны	Разговорные наименования
Ξ - Кси	η - Эта	ϕ - Фи
Σ - Сигма	π - Пи	ω - Омега
Λ - Лямбда	$\bar{\Sigma}$ - Антикаппа	ρ - Ро
N - Нуклон	κ - Каппа	
Δ - Дельта		
Ω - Омега		

молекулы и, таким образом, в своих разнообразных проявлениях ответственны в конечном счете за все химические и биологические явления.

Далее следует слабое взаимодействие, сила которого составляет всего лишь одну стотриллионную часть (10^{-14}) сильного взаимодействия. Это взаимодействие также очень короткодействующее, и оно, насколько известно, никогда не приводило к образованию связанных состояний. Но это взаимодействие управляет распадом многих сильно взаимодействующих частиц и распадом некоторых радиоактивных ядер. Его легче всего изучать на поведении четырех лептонов, не участвующих в сильных взаимодействиях.

Четвертая, самая слабая сила — это гравитационное взаимодействие, или сила тяжести, которая составляет всего лишь около 10^{-39} по отношению к сильному взаимодействию. Она определяет явления широкого масштаба, потому что она действует на больших расстояниях и всегда как сила притяжения. Однако в масштабе атомных ядер ее эффект совершенно не обнаруживается.

Многие частицы «связаны» со всеми четырьмя этими взаимодействиями. Возьмем, например, протон. Это сильно взаимодействующая частица, но, поскольку он электрически заряжен, он должен также «чувствовать» электромагнитные силы. Он может появиться в результате бета-распада нейтрона, в процессе которого нейтрон излучает отрицательный электрон и антинейтрино посредством слабого взаимодействия; значит, он участвует в слабых взаимодействиях. Наконец, подобно всей остальной материи, протон испытывает действие силы тяжести. Наименее активная частица — это нейтрино, которая непосредственно связана только со слабым и с гравитационным взаимодействиями. Нейтрино, подобно остальным лептонам, совершенно «иммунно» по отношению к сильному взаимодействию.

Важная идея, отнюдь не очевидная из предыдущего, состоит в том, что эти фундаментальные силы могут делать больше, чем просто связывать частицы друг с другом. Например, если две частицы сталкиваются и затем разлетаются в разных направлениях (это явление называется рассеянием), то они при этом взаимодействуют. Оказывается, что если летящая частица, прежде чем удариться о покоящуюся, обладала достаточно большой энергией, то в процессе столкновения может быть создана новая частица. Сталкивающиеся протон и нейтрон могут перейти в протон, нейтрон и нейтральный пион или в два нейтрона и положительный пион. В результате столкновения могут появиться и частицы, обладающие массой, большей массы любой из сталкивающихся частиц. Это фактически тот самый процесс, посредством которого ускорители производят множество новых частиц тяжелее протона и нейтрона. Таким образом, фундаментальные силы — это взаимодействия, посредством которых частицы могут рассеиваться, создаваться, уничтожаться и превращаться из одних в другие.

Наиболее интересные для физики высоких энергий взаимодействия происходят тогда, когда одна из участвующих во взаимодействии частиц движется со скоростью, близкой к скорости света, т. е. большей чем 10^{10} см/сек. Поскольку средний размер частицы составляет около 10^{-13} см, то минимальное время реакции для частицы, движущейся со скоростью света, меньше чем 10^{-23} сек. То, что мы имеем в виду, когда называем сильное взаимодействие «сильным», это то, что даже за такое короткое время эти интенсивные силы успевают привести к реакции. Электромагнитные процессы в сто раз слабее сильных, и они протекают в сто раз медленнее, т. е. в среднем за 10^{-21} сек. Процессы со слабым взаимодействием, которое в 10^{-14} раз слабее сильного, обычно протекают примерно за 10^{-9} сек.

Законы сохранения

Когда неполных семь лет тому назад один из авторов этой статьи (Гелл-Манн) писал с Розенбаумом статью для «Сайентифик Америкен» (июль 1957 г.)^{*}), в которой обсуждались свойства известных в то время частиц, то там было перечислено 30 частиц и античастиц, существование которых было надежно установлено. Среди них было 16 барионов и антибарионов, семь мезонов, шесть лептонов и антилептонов и фотон (рис. 6.2). В то время элементарными считались не только фотон и лептоны, но и сильно взаимодействующие частицы — барионы и мезоны.

Напротив, различие, которое мы теперь считаем неоправданным, проводилось между этими сильно взаимодействующими частицами и обычными атомными ядрами, содержащими два или более нуклонов, которые также являются сильно взаимодействующими образованиями. Эти ядра, такие, например, как дейтрон (ядро тяжелого водорода) и альфа-частица (ядро гелия), из-за сравнительно небольшой величины энергии связи почти с самого начала ядерной физики рассматривались как сложные образования, составленные в основном из протонов и нейтронов. Мы здесь не будем заниматься этими ядрами. Мы ограничимся обсуждением более легких частиц, но не потому, что считаем их более элементарными, чем их тяжелые собратья, а потому, что их природа пока менее несомненна. Если это действительно динамические составные системы, то их энергии связи часто оказываются огромными. И, наконец, если элементарные частицы в самом деле существуют, то в их число заведомо не входят сложные ядра.

Рис. 6.1, на котором отсутствуют фотон и лептоны, содержит 82 частицы и античастицы, которые все сильно взаимодействуют, причем мы произвольно ограничили их список барионами и мезонами с массой покоя, меньшей $2000 M_{эв}$. Большая часть из этих 82 частиц принадлежит семействам, носящим имена, похожие на те, которые они носили в списке 1957 г., но обычно менее изящные. Было бы бессмысленным ожидать, что читатель овладеет этим очень специальным словарем, отражающим главным образом то состояние смятения, в котором несколько лет назад пребывала физика высоких энергий. Поэтому мы сразу познакомим читателя с новой системой обозначений, которая образовалась совсем недавно и включает большое количество информации о каждой частице. Хотя она может показаться с первого взгляда трудной, но на самом деле ею не труднее овладеть, чем системой набора телефонных номеров.

Новая классификация основывается на том факте, что в природе многие величины (сверх энергии и импульса) сохраняются и при этом обнаруживаются разнообразные симметрии (как, например, симметрия между правым и левым). В результате группы частиц обнаруживают сходные свойства, которые, как мы увидим, могут быть выражены с помощью общих обозначений. Между симметриями и законами сохранения есть тесная связь, и в каждом частном случае можно обратиться или к симметрии, или к соответствующему закону сохранения, смотря по тому, что удобнее. Сохраняющиеся величины появляются в квантовой механике как квантовые числа, которые часто принимают лишь целые (0, 1, 2, 3, и т. д.) или полуцелые ($1/2$, $3/2$, $5/2$ и т. д.) значения.

Некоторые законы сохранения оказываются универсальными: им подчиняются все четыре фундаментальных взаимодействия. Эта непререка-

^{*}) См. «Над чем думают физики», вып. 2, «Элементарные частицы», Физматгиз, 1963, статья М. Гелл-Манна и П. Е. Розенбаума.

мая группа содержит законы сохранения энергии, импульса, углового момента (импульса, связанного с вращением) и электрического заряда. Другой точный закон сохранения удобнее описать как род зеркальной симметрии. Это — симметрия между частицей и античастицей, для которых все то, что было правым для одной, должно быть заменено на левое для другой. Каждая частица имеет свою античастицу с той же самой массой и временем жизни, но некоторые ее характеристики, такие, как электрический заряд, заменены на противоположные. Некоторые нейтральные частицы, как, например, фотон и нейтральный пион, сами являются своими античастицами.

В новой системе наименований сильно взаимодействующих частиц мы будем пользоваться пятью величинами, каждая из которых обозначается буквенным символом и которые сохраняются в сильном взаимодействии, но не обязательно сохраняются в электромагнитном и слабом взаимодействиях. Вот эти пять величин: атомное массовое число (A), гиперзаряд (Y), изотопический спин (I), спиновый угловой момент (J) и четность (P). Табл. 6.1 должна помочь читателю держать в уме эти пять квантовых чисел, пока мы обсудим подробнее их свойства. В эту таблицу включены еще два квантовых числа, которые тоже сохраняются в сильном взаимодействии, но несущественны для нашей системы наименований: электрический заряд (Q) и величина, обозначаемая буквой G , принимающая всего два значения $+1$ и -1 и приписываемая только лишь мезонам с гиперзарядом, равным нулю.

Первые три квантовых числа — A , Y и I — образуют основу системы наименований. По существу, эти три квантовых числа определяют расположение частиц на рис. 6.3 и 6.4. На этих рисунках видно, что мезоны и барионы складываются в «зарядовые мультиплеты», или семейства состояний, отличающихся своим электрическим зарядом. Число частиц и их заряды укладываются в различные структуры: синглеты, дублеты, триплеты и квадруплеты. На сегодня известно или предсказано только десять различных структур, причем каждая структура представляет различные наборы значений A , Y и I . Каждая из этих десяти групп обозначается греческой буквой, как это будет объяснено ниже.

Теперь мы опишем физическое содержание A , Y , I , J и P , однако для удобства обсудим их в несколько ином порядке, для того чтобы подчеркнуть некоторые связи между ними. A — это просто массовое число, давно известное в физике ядра. Его называют также барионным числом. Подобно электрическому заряду A может принимать значения 0 , ± 1 , ± 2 , ± 3 и т. д. Для урана-235 A равно 235; это значит, что ядро этого изотопа содержит 235 нейтронов и протонов, для каждого из которых A равно 1. Нейтроны и протоны — это барионы, и, по определению, барионами называются все частицы, для которых $A=1$. Частицы с $A=-1$ называются антибарионами. Мезоны имеют $A=0$ (так же как лептоны и фотон). Закон сохранения барионов утверждает, что полное значение A не изменяется ни в каких процессах, подобно тому как всегда сохраняется электрический заряд. Барионы не могут создаваться или уничтожаться, за исключением случаев аннигиляции бариона и антибариона или одновременного рождения такой пары.

Вторая сохраняющаяся величина — это J , спиновый момент, мера скорости вращения частицы вокруг своей оси. Фундаментальное свойство квантовой теории состоит в том, что спин частицы может быть только целым или полуцелым кратным постоянной Планка. (Эта постоянная \hbar связывает энергию кванта излучения с его длиной волны: энергия $= 2\pi \times$ частота $\times \hbar$.)

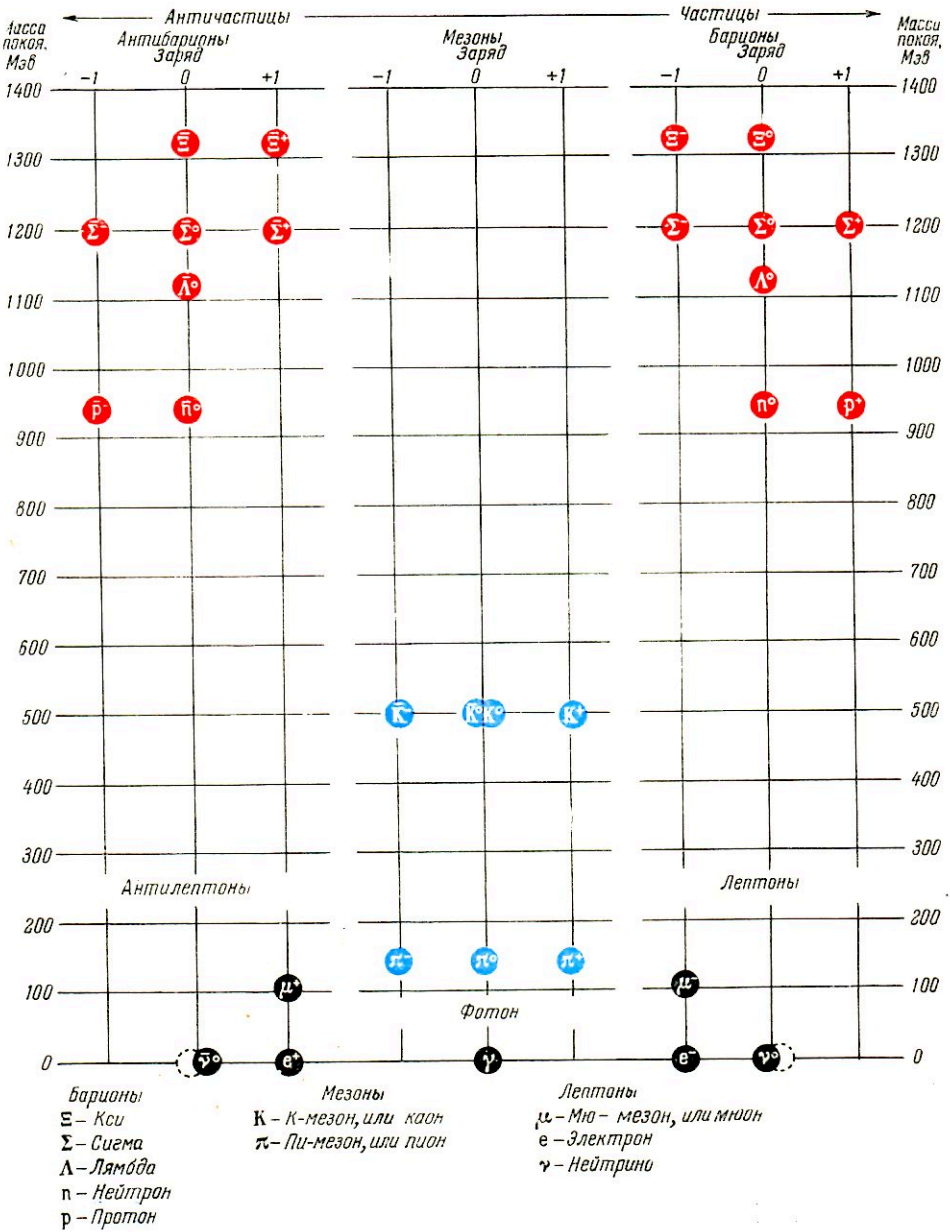


Рис. 6.2. Тридцать частиц, известных в 1957 г., составляли 16 барионов и антибарионов, семь мезонов, шесть лептонов и антилептонов и фотон (барион, мезон, лептон обозначают, соответственно, тяжелые, средние и легкие частицы). Сильно взаимодействующие частицы, которые «чувствуют» сильные, или ядерные взаимодействия, отмечены цветными кружками. Частицы в черных кружках не «чувствуют» этих сил. Именно частиц первого рода за последние годы стало очень много, как это видно из рис. 6.1. Число лептонов и антилептонов за то же время увеличилось всего на две частицы: мы теперь знаем, что есть два типа нейтрино, каждое со своей античастицей (они помечены пунктирными кружочками рядом с двумя частицами, уже известными в 1957 г.). Есть, по-видимому, еще одна нейтральная частица нулевой массы, не показанная здесь: это гравитон, носитель гравитационных сил. Гипотетический носитель слабого взаимодействия тоже здесь не показан, он должен иметь значительную массу и единичный электрический заряд. Сейчас предпринимаются попытки убедиться в его существовании.

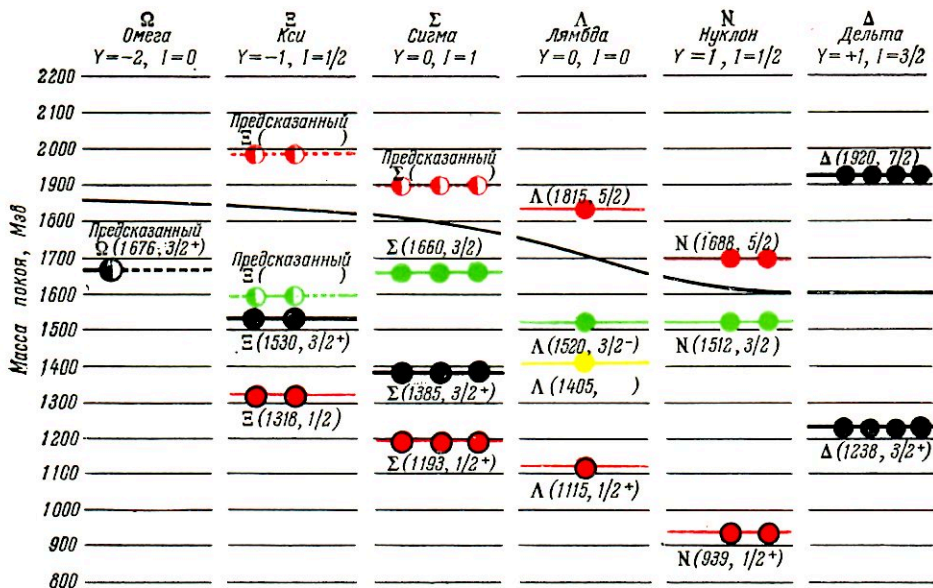


Рис. 6.3. Барронные мультиплеты с одними и теми же значениями гиперзаряда (Y) и изотопического спина I сведены в колонки. Сейчас известно только шесть комбинаций Y и I , каждая из них обозначается большой греческой буквой. Символы частиц и смысл цветной раскраски — те же, что на предыдущих рисунках. Частицы, расположенные выше граничной линии, проведенной через все колонки, — это возвращения соответствующих нижележащих состояний.

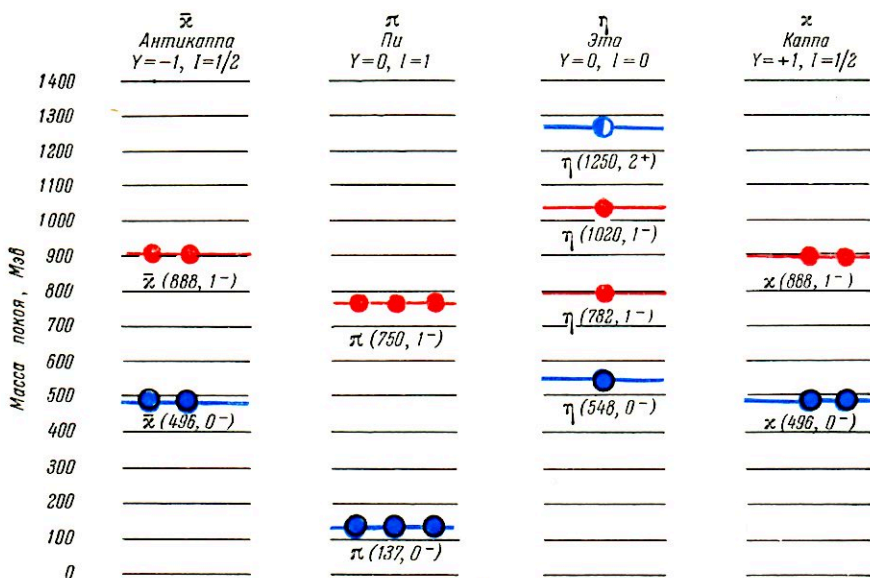


Рис. 6.4. Мезонные мультиплеты с одинаковыми значениями Y и I сведены в колонки. Четыре комбинации Y и I обозначаются маленькими греческими буквами. Мезонные возвращения пока не наблюдались. Первое предсказанное возвращение — это триплет пионов с массой примерно 1700 МэВ.

Таблица 6.1

Сводка квантовых чисел, включающая семь величин, сохраняющихся в сильных взаимодействиях, но не обязательно сохраняющихся в электромагнитных и слабых. Три величины, выделенные жирным прифтом (A , Y , I), легко устанавливаются экспериментально и служат той основой, на которой частица приписывается тому или иному семейству. Пока известно только десять комбинаций A , Y и I ; каждая из них обозначается определенной греческой буквой.

Сохраняющаяся величина	Символ	Наблюдаемые значения	Пояснение	Примеры	
				протон	отрицательный пион
Электрический заряд	Q	$0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$	Представляет собой электрический заряд частицы или атомного ядра, выраженный в единицах положительного заряда протона. Зарядовым мультиплетам, таким, как нейтронно-протонный дублет или пионный триплет, можно приписать средний заряд \bar{Q}	$Q = +1$ $\bar{Q} = \frac{1}{2}$	$Q = -1$ $\bar{Q} = 0$
Массовое число или барионное число	A	$0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$	Представляет собой хорошо известное массовое число, уже давно используемое при описании ядер. Для урана-235, например, $A=235$. Для барионов $A=+1$, для антибарионов $A=-1$, для мезонов $A=0$	$A = +1$	$A = 0$
Гиперзаряд (просто связанный со средним зарядом \bar{Q} и странностью S)	Y	$-2, -1, 0, 1$	Определяется как удвоенный средний заряд \bar{Q} мультиплета. Странность S определяется как разность гиперзаряда и массового числа: $S = Y - A$	$Y = +1$ $S = 0$	$Y = 0$ $S = 0$
Изотопический спин (связанный с мультиплетностью M)	I	$0, 1/2, 1, 3/2$	Группа ядерных состояний, объединенных в мультиплеты, различные члены которых отличаются только по величине электрического заряда. Число зарядовых состояний, или, иначе, мультиплетность M , связано с числом I соотношением $M = 2I + 1$	$I = 1/2$ $M = 2$	$I = 1$ $M = 3$
Спиновый момент импульса (спин)	J	$1/2, 3/2, 5/2, \dots$ $0, 1, 2, 3, \dots$	Указывает, насколько быстро частица вращается вокруг своей оси; выражается в единицах постоянной Планка \hbar	$J = 1/2$	$J = 0$

Сохраняющаяся величина	Символ	Наблюдаемые значения	Пояснение	Примеры	
				протон	отрицательный пион
Четность	P	$-1, +1$	Внутреннее свойство, связанное с симметрией по отношению к левому и правому	$P = +1$	$P = -1$
G	G	$-1, +1$	Внутреннее свойство, проявляемое только мезонами, обладающими равным нулю гиперзарядом	не определено	$G = -1$

Для барионов J всегда полуцелое ($1/2, 3/2, 5/2$ и т. д.), а для мезонов всегда целочисленное ($0, 1, 2$ и т. д.).

Третья сохраняющаяся величина, тесно связанная с J , — это P , или внутренняя четность. Четность сохраняется, если природа не делает различия между правым и левым. Поскольку такая симметрия наблюдается в сильном взаимодействии, квантовая механика позволяет нам приписать значение внутренней четности, равное $+1$ или -1 , каждой сильно взаимодействующей частице. В случае слабых взаимодействий природа различает между правым и левым, и эта симметрия нарушается.

«Бухгалтерия», связанная с четностью, не так проста, как в случае электрического заряда и барионного числа. Значения внутренней четности с обеих сторон уравнения реакции не обязаны быть одинаковыми. Причина в том, что на полную четность влияет не только внутренняя четность, но и спиновые моменты. Вследствие тесной связи между спиновым моментом J и внутренней четностью P удобно при описании частиц записывать эти числа вместе. Например, для протона J равно $1/2$, а P равно $+1$, что удобно записывать как J^P равно $1/2^+$. Для пиона $J=0$, а $P=-1$, так что пишут $J^P=0^-$. (Система калькуляции для J на самом деле составляет одну из сложных глав квантовой механики, но мы не будем здесь вдаваться в эти детали.)

Четвертая величина, сохраняющаяся в сильных взаимодействиях, — это I , или изотопический спин. Это квантовое число не имеет ничего общего со спином, кроме того, что квантовомеханические правила исчисления для него похожи на правила исчисления для спина. Понятие изотопического спина было введено в квантовой механике для описания двух зарядовых состояний, в которых может находиться нуклон: одного с положительным зарядом (протон) и другого нейтрального (нейтрон). Пока рассматриваются только сильные взаимодействия, эти два состояния ведут себя совершенно одинаково: они связаны друг с другом симметрией изотопического спина. Если бы эта же симметрия наблюдалась и в случае электромагнитного взаимодействия, то протон и нейтрон имели бы одинаковую массу. Как раз потому, что изотопическая симметрия нарушается электромагнитным взаимодействием, масса нейтрона на $1,3 \text{ Мэв}$ (т. е. на $0,14\%$) больше массы протона.

Набор частиц или их состояний (мы считаем эти термины равноправными), связанных изотопической симметрией, составляет изотопический мультиплет, и им дается одно и то же название. Так, нуклонный дублет состоит из двух зарядовых состояний: положительного и нейтрального. Пионный триплет состоит из отрицательного, нейтрального и положительного зарядовых состояний. Число разных зарядовых состояний в мультиплете называется его мультиплетностью (M) и непосредственно связано с изотопическим квантовым числом I уравнением $M=2I+1$. Для нуклона $M=2$, а $I=1/2$; для пиона $M=3$, а $I=1$.

Пятая сохраняющаяся величина известна под тремя разными названиями: средний заряд (\bar{Q}), гиперзаряд (Y) или странность (S). Эти три величины связаны друг с другом простым образом. Средний заряд представляет собой буквально то, что означает его название, т. е. средний электрический заряд мультиплета. Так, для нуклона это $1/2 \left(\frac{0+1}{2} = \frac{1}{2} \right)$, для пиона это нуль. Удвоенный — для того чтобы он был всегда целым числом — средний заряд называется гиперзарядом ($Y=2\bar{Q}$). Странность определяется как разность гиперзаряда и барионного числа ($S=Y-A$). Ясно, что все три величины, по существу, эквивалентны.

Представление о странности и ее сохранении возникло всего лишь 11 лет назад. В начале 50-х годов впервые наблюдали некоторые частицы — такие, как K , сигма и кси — и вследствие их необычного поведения их называли «странными частицами». Большинство этих частиц имело сравнительно большие времена жизни, и это указывало на то, что они распадаются посредством слабого, а не электромагнитного или сильного взаимодействия. Однако, с другой стороны, эти частицы появлялись при высокоэнергетических соударениях «обычных» частиц (пионов и нуклонов), а это говорило о том, что «странные частицы» участвуют и в сильных взаимодействиях. После того как такая картина неизменно и много раз наблюдалась, физики заподозрили, что здесь работает некоторый закон сохранения (или симметрия).

Один из авторов этой статьи (Гелл-Манн) и независимо японский физик Казукио Нишиджима предположили, что существует некая величина (странность или гиперзаряд), о которой не догадывались прежде и которая сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях, но не сохраняется в слабых взаимодействиях. Эта гипотеза позволила предсказать существование и свойства нескольких странных частиц, которые впоследствии были открыты.

Новая систематика

Теперь мы можем рассказать, как пять квантовых чисел, о которых говорилось выше, позволяют найти основу для новой системы наименований. При помощи соответствующего выбора трех из этих пяти чисел мы можем немедленно охарактеризовать любую частицу, указав, мезон это или барион, сколько членов содержит мультиплет и каково для него значение странности. Три квантовых числа, задающих эту информацию, — это массовое (или барионное) число A , гиперзаряд Y и изотопический спин I . (Напомним, что странность непосредственно связана с гиперзарядом, а мультиплетность — с изотопическим спином.)

Теперь — отчасти из мнемонических соображений, отчасти из уважения к старым названиям частиц — мы введем буквенные символы для обозначения различных комбинаций A , Y и I . Для обозначения всех

известных мезонов, частиц, для которых A равно нулю, достаточно четырех маленьких греческих букв: η (эта), π (пи), κ (каппа) и $\bar{\kappa}$ (антикаппа или каппа с чертой). Табл. 6.2 содержит значения Y и I для каждого из этих символов. Хотя мультиплетность M может быть легко найдена, если известно $I(M = 2I + 1)$, но для простоты она тоже указана отдельно.

Для обозначения барионов, для которых A равно 1, мы воспользуемся следующими большими буквами: Λ (лямбда), Σ (сигма), N (обозначает нуклон и читается как «эн», а не как «ню»), Ξ (кси), Ω (омега) и Δ (дельта). Значения Y , I и M для барионов также приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Символами для обозначения мезонов и барионов служат греческие буквы. Для мезонов массовое число $A=0$, для барионов $A=1$. Десять букв соответствуют десяти известным комбинациям массового числа A , гиперзаряда Y и изотопического спина I . Мультиплетность легко определяется через I .

Мезоны	Y	I	M	Барионы	Y	I	M
η	0	0	1	Λ	0	0	1
π	0	1	3	Σ	0	1	3
κ	+1	1/2	2	N	+1	1/2	2
$\bar{\kappa}$	-1	1/2	2	Ξ	-1	1/2	2
				Ω	-2	0	1
				Δ	+1	3/2	4

Эти десять символов охватывают все мезонные и барионные состояния, известные на сегодня. Другими словами, каждая из 82 частиц на рис. 6.1 обозначается одним из этих десяти символов. Различие между старой системой наименований и новой должно теперь стать понятным. В прежней системе, приведенной на рис. 6.2, символ π , например, употреблялся для обозначения только семейства из трех частиц с массой покоя $137 Mэв$. В новой системе π обозначает как прежнюю группу, так и новую группу из трех частиц с теми же самыми значениями A , Y и I , но с массой покоя $750 Mэв$. Точно так же в прежней системе N обозначало нуклонный дублет с массой $939 Mэв$. В новой системе N обозначает помимо нуклонного дублета еще два более высоких энергетических состояния (тоже дублет): одно с массой $1512 Mэв$ и другое с массой $1688 Mэв$. Таким образом, старые названия частиц теперь обозначают классы частиц с одинаковыми значениями A , Y и I .

Разные члены одного и того же класса можно различать, приписывая в скобках значение массы соответствующей частицы, например: π (137) и π (750), или же указывая в скобках значение момента J и четности P , например: π (0^-) и π (1^-). При желании можно указывать и то и другое: π (137, 0^-) и π (750, 1^-).

В дальнейшем символом без скобок будет обозначаться низшее состояние в данном классе. Эта новая система классификации приведена в таблице барионов и мезонов на рис. 6.3 и 6.4.

Стабильность частиц

Мы уже отмечали выше, что частицы могут распадаться одним из трех путей: посредством сильного, электромагнитного или слабого взаимодействий. Несколько частиц (фотон, оба нейтрино, электрон и протон) абсолютно стабильны, если только они не соприкасаются со своими античастицами и не аннигилируют. Частицы, которые распадаются в электромагнитном или в слабом процессах, называются метастабильными. Те же, которые распадаются в процессе сильного взаимодействия, называются нестабильными; это частицы с очень короткими временами жизни — порядка 10^{-23} сек. Но это еще заметное время, если его сравнивать с промежутками менее 10^{-23} сек — характерным временем столкновения между быстрыми (высокоэнергетическими) частицами.

Нестабильные частицы — это частицы, которые при достаточной энергии могут распадаться на две или три сильно взаимодействующие частицы без нарушения законов сохранения, которые соблюдаются в сильных взаимодействиях. Некоторые нестабильные частицы имеют только один способ распада, другие — более чем один. Пример первого рода — это $\Xi(1530)$, распадающаяся только на Ξ и π . С другой стороны, $\Lambda(1520)$ распадается на Σ и π , или на N и \bar{K} , или на Λ и два π (рис. 6.5).

Как можно объяснить существование нескольких способов распада? На этот вопрос можно ответить, вводя понятие «сообщающихся состояний». Некоторое ядерное состояние может быть или единой частицей, или комбинацией двух или более частиц. Мы видели, что каждая частица имеет определенные значения сохраняющихся квантовых чисел A, Y, I, J, P и, когда это имеет смысл, G . Сильное взаимодействие допускает переходы, или сообщения, только между состояниями с одними и теми же значениями всех сохраняющихся квантовых чисел.

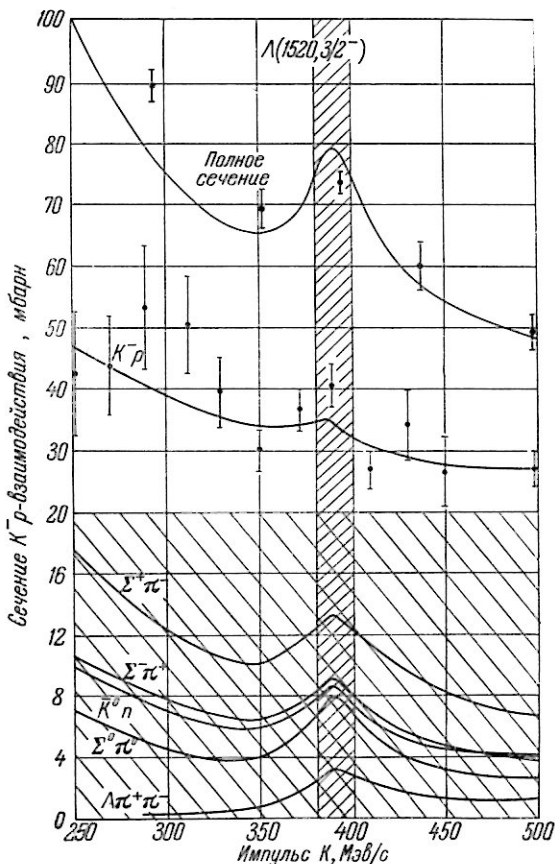


Рис. 6.5. Несколько способов распада $\Lambda(1520, 3/2^-)$ указывают, что барион Λ связан с шестью открытыми каналами. Λ создается при рассеянии K^- -мезонов [$\bar{K}^-(496)$] на протонах. Полное сечение взаимодействия имеет пик, соответствующий образованию $\Lambda(1520, 3/2^-)$, которая быстро распадается по одному из шести указанных каналов. Таким образом, кривая, обозначенная K^-p , представляет полную реакцию: $K^-p \rightarrow \Lambda \rightarrow K^-p$. Тысячи «событий» в пузырьковых камерах дали данные для этих кривых. Экспериментальные точки показаны только на верхних двух кривых.

Теперь можно выписать множество ядерных состояний из двух или более частиц, которые в целом имеют те же самые квантовые числа, что и любая определенная нестабильная частица. Но для того, чтобы распад реально мог произойти, нестабильная частица должна иметь массу покоя, по крайней мере равную пороговой энергии (т. е. сумме масс покоя) тех частиц, на которые она предположительно может распасться. Иными словами, энергия должна сохраняться. Различные состояния, в которые частица по энергетическим соображениям может распасться, называются открытыми

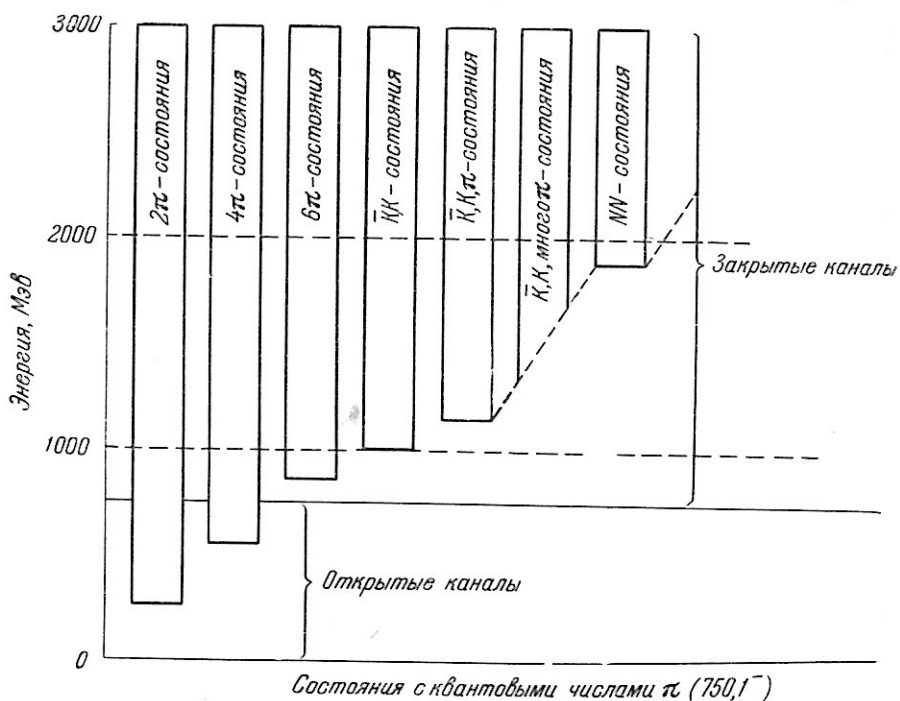


Рис. 6.6. «Сообщающиеся каналы» (вертикальные полоски) — это ядерные состояния, которые имеют такие же квантовые числа, что и некая исходная частица, в данном случае $\pi(750, 1^-)$. Если энергия частицы достаточна для того, чтобы распасться по какому-либо каналу, то эти каналы называются «открытыми». Каналы, для которых исходная энергия недостаточна, называются «закрытыми». Пороговая энергия, необходимая для того, чтобы пройти в данный канал, есть сумма масс покоя (в $M_{\text{эв}}$) различных частиц, из которых состоит этот канал.

каналами. Сообщающиеся состояния с пороговой энергией, большей энергии нестабильной частицы, называются закрытыми каналами; распад по этим каналам разрешен всеми законами, кроме закона сохранения энергии. На рис. 6.6 схематически изображены некоторые из каналов, сообщающихся с состоянием $\pi(750, 1^-)$.

Мы приходим, таким образом, к понятию «резонанса»; этот термин сначала применялся к нестабильным частицам. Первый «резонанс» был открыт Энрико Ферми и его сотрудниками в 1952 г. в Чикагском университете. В то время никто не подозревал, что их откроют множество.

В эксперименте Ферми пионы из циклотрона Чикагского университета рассеивались на протонах (в жидком водороде) и измерялись сечения рассеяния для разных энергий пучка пионов. Под рассеянием подразумева-

ется изменение направления при столкновении двух частиц; сечение рассеяния — это вероятность того, что рассеяние произошло. Если вероятность велика, то две частицы как бы очень велики и имеют большие поперечные сечения.

Для пионного пучка определенной энергии каждый раз подсчитывается «эффективная» масса системы пион — протон. Эффективная масса — это сумма масс покоя и кинетических энергий частиц системы (в системе центра масс). Если по одной из осей графика откладывать эффективную массу, а по другой — сечение рассеяния, то оказывается, что эффективное сечение имеет острый пик при эффективной массе системы около 1238 Мэв. Благодаря этому пику и был обнаружен резонанс. Ниже мы обсудим связь между пиком в сечении рассеяния и резонансом, или нестабильной частицей, которую мы теперь называем Δ (1238).

Циклотрон Чикагского университета не мог создавать пион-протонных систем с энергией много большей, чем 1300 Мэв. Впоследствии при помощи более сильных ускорителей было найдено, что пион-протонная система обнаруживает целую серию резонансов. На рис. 6.7 показаны два резонанса, возникающие при рассеянии положительных пионов протонами, и на отдельной кривой — четыре резонанса при рассеянии отрицательных пионов протонами. Первые два резонанса — это $\Delta(1238, 3/2^+)$ и $\Delta(1920, 7/2)$. Эти же два резонанса должны проявляться в рассеянии отрицательных пионов, но в действительности на экспериментальной кривой для отрицательных пионов более высокий резонанс $\Delta(1920, 7/2)$ едва ли можно заметить. Зато хорошо видны два других резонанса $N(1512, 3/2)$ и $N(1688, 5/2)$, которые не могут появляться в рассеянии положительных пионов на протонах. (Отсутствие «+» или «-» после полупцелого значения J в скобках указывает, что четность этих частиц еще не установлена.)

Хотя $\Delta(1238)$ распадается по большей части на пион и нуклон, вышние резонансы могут распадаться на два или более пионов и нуклон. Большинство резонансов может распадаться более чем одним путем; они сообщаются с несколькими открытыми каналами (см. рис. 6.6).

Чтобы объяснить, как нестабильная частица может сообщаться с несколькими открытыми каналами, нам кажется полезным провести аналогию между нестабильной частицей и резонансными полостями, такими, например, как органичные трубы или электромагнитные резонаторы. Резонаторами последнего указанного типа (как, например, магнетрон, применяемый

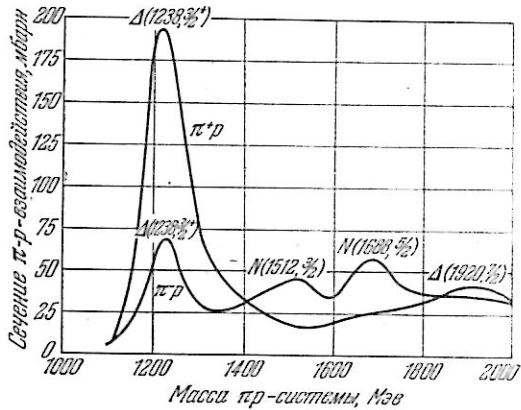


Рис. 6.7. Первый резонанс — нестабильная частица, названная $\Delta(1238, 3/2^+)$, — был открыт Энрико Ферми и его сотрудниками в 1952 г. Этот резонанс появляется при бомбардировке протонов высокоэнергетическими пионами. Когда мы наносим на график «сечение» взаимодействия при различных эффективных массах пион-протонной системы, то обнаруживается пик при 1238 Мэв. Этот пик гораздо больше для π^+p -взаимодействия, чем для π^-p -взаимодействия. Другие резонансы появляются при 1512, 1688 и 1920 Мэв, и каждый пик соответствует нестабильной частице.

в радиолокаторах) в электронике пользуются для создания интенсивных электромагнитных колебаний с заданной частотой — резонансной частотой полости. Каждая резонансная полость имеет свое характерное «время жизни» — время, за которое электромагнитное излучение «вытекает» из полости.

В квантовой механике частицы и волны — это дополнительные понятия, и порция энергии, связанная с частицей или с ядерным состоянием, может быть выражена через соответствующую частоту. Другими словами, энергия пропорциональна частоте. Сказать, что Δ -частица появляется в рассеянии пиона протоном при некоторой энергии — резонансной энергии, — это то же, что сказать, что она появляется при некоторой частоте. Так что резонансную энергию в физике частиц можно сравнить с резонансной частотой акустической или электромагнитной полости. Но что такое «полость» в физике частиц? Это чисто воображаемая структура: каждому набору квантовых чисел, сохраняющихся в сильном взаимодействии, соответствует некоторая «полость» со своими специальными свойствами.

Аналогия между нестабильными частицами и резонансными свойствами электромагнитных полостей может быть продолжена. К электромагнитной полости можно приделать длинные трубки, которые называются волноводами и обладают свойством эффективно передавать электромагнитные волны высокой частоты, но не передавать волн низкой частоты. Если длина электромагнитной волны несколько больше характерных размеров волновода, то волновод перестает пропускать эти электромагнитные волны. В этом смысле волновод действует подобно каналу в теории частиц, который становится открытым только выше своей характерной пороговой энергии. Теперь, если к полости присоединены несколько волноводов с различными характерными размерами, то высокочастотное излучение может входить в полость по одному волноводу и выходить через тот же или другие волноводы.

Подобным образом энергия может входить в область ядерного взаимодействия через один канал и выходить через какой-то другой или несколько открытых каналов. По мере возрастания энергии (частоты) каналы открываются один за другим, становятся возможными новые реакции, и энергия уходит через любой из открытых каналов. Допустим теперь, что частота возрастает и в какой-то момент проходит через резонансную частоту ядерной полости. В этот момент полость активной поглощает и излучает энергию. Другими словами, резонансное состояние полости соответствует нестабильной частице, такой, например, как Δ или $\pi(750)$.

Совершенно так же, как электромагнитная резонансная полость, находясь вблизи резонанса, удерживает электромагнитную энергию в течение длительного времени, нестабильная частица распадается за время обычно несколько большее, чем характерное время, составляющее менее 10^{-23} сек. Если энергия накапливается в полости, входя через какой-либо волновод, удерживается там на какое-то время вследствие резонанса и затем покидает полость через тот же самый волновод, то это соответствует процессу рассеяния, в котором две $\pi(137)$ -частицы сталкиваются и рождают нестабильную $\pi(750)$ -частицу, распадающуюся затем опять на те же две частицы. Но может случиться так, что энергия уходит по другому волноводу, отвечающему случаю, когда $\pi(750)$ распадается на четыре $\pi(137)$ -частицы. Разумеется, это всего лишь два примера из числа очень многих. Аналогия с резонансной полостью и волноводами иллюстрируется рис. 6.8.

Волноводной аналогией можно пользоваться не только при описании нестабильных частиц, а применить ее и к стабильным частицам. Стабиль-

ная частица — это просто частица с такой малой массой, что все каналы сообщения для нее закрыты. Для электромагнитной полости это условие будет соответствовать резонансной частоте полости, которая ниже пороговой частоты всех волноводных выходов. Если заполнить, таким образом, электромагнитным излучением полость, то оно не сможет из нее уйти. Конечно, реальная полость будет постепенно терять излучение благодаря утечке через стенки и в стенки полости. Эта утечка соответствует распаду метастабильных частиц через электромагнитные и слабые взаимодействия. Абсолютно стабильные частицы действительно должны жить вечно.

Читатель, незнакомый с явлением электромагнитного резонанса в полостях, должен, конечно, усомниться, облегчили ли мы ему понимание, введя эту электромагнитную аналогию. Может быть, так же просто было бы объяснить явления резонанса непосредственно в физике частиц? Может быть. Но привлекая внимание к одинаковому поведению в двух, на первый взгляд разных, явлениях, мы хотели проиллюстрировать единство физической картины, которое, мы надеемся, позволит воспринять как менее мистические некоторые черты поведения частиц. Значение этой аналогии состоит в том, что она помогла теоретикам понять более глубокие свойства резонансов в физике частиц. Об этих свойствах мы здесь не имеем возможности рассказать.

Траектории Редже

По мере того как умножалось число сильно взаимодействующих частиц, физики стали искать какие-нибудь модели, которые позволили бы обнаружить новые связи между ними. В частности, они старались отыскать такие классификации, на основе которых можно

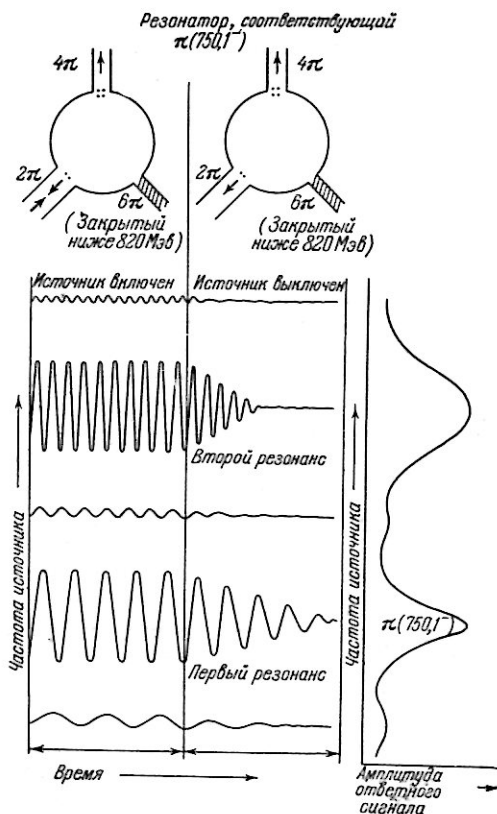


Рис. 6.8. Аналогия с резонансной полостью позволяет понять появление нестабильных частиц, называемых резонансами. Наверху нарисована «полость» для $\pi(750,1^-)$, слева — с включенным источником энергии, справа — с выключенным. Энергия, обозначенная стрелкой, поступает в полость через один канал и покидает полость через один или несколько открытых каналов. Канал 6π закрыт, так как для того, чтобы попасть в него, требуется более высокая частота (т. е. большая энергия), чем та, которой обладает $\pi(750,1^-)$. Синусоидальные кривые показывают, что при некоторых частотах полость начинает резонировать, и, когда источник энергии отключается, резонанс продолжает существовать еще в течение нескольких периодов. Первый резонанс соответствует самой $\pi(750,1^-)$. Может существовать и второй резонанс с теми же квантовыми числами. График справа изображает амплитуду резонансной волны в зависимости от изменяющейся частоты; амплитуда источника (входная) при этом постоянна.

было бы предсказывать существование новых частиц, исходя из уже известных. Первая система, оказавшаяся в этом отношении эффективной, развилась на основе идеи, введенной в физику частиц в 1959 г. итальянским физиком Туллио Редже. Эта идея уже имела к тому времени применения в квантовой физике, а именно при изучении атомных и ядерных энергетических уровней.

Было замечено, что при возрастании массы частиц у них обычно (но не всегда) оказывается более высокий спиновый момент J . Редже указал, что во многих важных случаях существует математическое соотношение, связывающее значение J с массой частицы. Он показал, что некоторые из характеристик частицы могут рассматриваться как «гладкие» функции J , т. е. математические функции, непрерывно меняющиеся с изменением J . Но поскольку в квантовой механике J имеет только целые и полуцелые значения, то эти функции имеют прямой физический смысл только при этих разрешенных значениях аргумента. Гладкая математическая кривая значений физической массы, отвечающих разным значениям J , называется «траекторией Редже».

Пояснить понятие траектории Редже нам, может быть, поможет аналогия с космическими кораблями. Предположим, что на почти круговые орбиты, по которым движутся девять солнечных планет, мы поместили по спутнику весом в одну тонну. Чем ближе такой спутник находится к Солнцу, тем сильнее он «чувствует» гравитационное притяжение Солнца и тем сильнее он связан с ним. Соответствующая энергия связи больше всего у спутника на орбите Меркурия и меньше всего на орбите Плутона. (Энергия связи — это то количество энергии, которое нужно затратить, чтобы «оторвать» спутник от удерживающего его Солнца.)

Каждый из спутников характеризуется еще одной величиной, которая также изменяется с расстоянием от Солнца, — моментом импульса. В физике часто случается, что при равенстве прочих характеристик, чем больше энергия связи, тем меньше момент. В нашем примере это означает, что, чем больше расстояние от Солнца, тем больше момент. Можно нарисовать график, где на вертикальной оси будут откладываться моменты каждого из девяти спутников, а на горизонтальной — соответствующие энергии связи (рис. 6.9). Кривая, проведенная через полученные таким образом точки, — аналог траектории Редже.

Предположим теперь, что законы квантовой механики управляли бы явлениями в макроскопическом масштабе — масштабе спутников и орбит в солнечной системе. Предположим тогда, что момент спутника на орбите Меркурия представляет собой элементарный квант спина. Если бы это было так, то спутник весом в одну тонну мог бы занимать только те орбиты, на которых момент (выраженный в единицах момента на орбите Меркурия) принимает целое значение. Это утверждение равносильно утверждению о том, что однотонный спутник на круговой орбите может существовать только на определенных энергетических уровнях. Тогда траектория Редже космического корабля была бы «физической» только в этих точках. Другая траектория Редже может быть нарисована для двухтонного спутника. На каждой данной круговой орбите его энергия связи и момент будут в два раза больше соответствующих величин для однотонного космического корабля.

Хотя физики и не пользовались этими идеями до последнего времени, но понятие траектории Редже применимо к давно знакомым задачам атомной физики. Хорошо известно, например, что электрон и протон, составляющие атом водорода, могут существовать в различных возбужденных

состояниях. Электрон может занимать разные орбиты, окружающие протон, подобно тому как космический корабль может занимать разные орбиты вокруг Солнца. Квантование орбит электрона очевидно. Если фиксировано значение некоторого квантового числа n_r (так называемое радиальное квантовое число, характеризующее энергию движения), то значения энергии связи в различных состояниях водородного атома убывают с возрастанием момента J . Если провести гладкую кривую через разрешенные значения момента J , то получится траектория Редже,

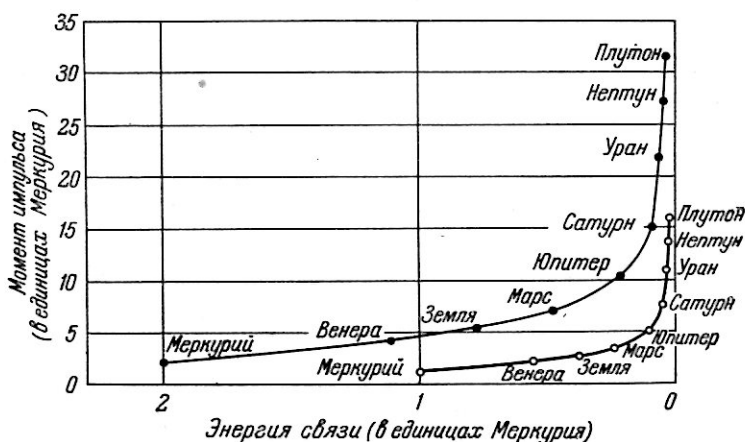


Рис. 6.9. Траектории Редже — важное для предсказания «возвращений» (новых частиц) понятие — можно пояснить при помощи аналогии с космическими кораблями. Если расположить космические корабли весом в одну тонну на круговых орбитах вокруг Солнца на расстояниях, равных расстояниям от него каждой из девяти планет, то они имели бы указанные энергии связи и угловые моменты. Нижняя кривая, проведенная через эти точки, и есть траектория Редже. Верхняя кривая — это траектория Редже для кораблей весом в две тонны.

подобная траектории для спутника на разных орбитах (рис. 6.9 и 6.10). Каждому значению J для водородного атома отвечает своя траектория, так же как это было для спутников с разными массами.

В случае водородного атома каждому пересечению траектории Редже с разрешенным значением J (0, 1, 2 и т. д.) соответствует появление связанного состояния. С экспериментальной точки зрения каждое появление связанного состояния отвечает разным «частицам» с разными массами. Серия появлений заканчивается всякий раз, когда энергия возбуждения становится столь большой, что электрон отрывается от протона (атом диссоциирует). Этот энергетический предел отделяет стабильные состояния от нестабильных.

Точно так же, как строятся траектории Редже для гравитационных сил (пример с космическими кораблями) и для электромагнитного взаимодействия (пример с атомом водорода), можно построить траектории для сил, управляющих сильным взаимодействием. В этом случае траектории не будут кончатся на границе между стабильными и нестабильными состояниями, но будут непрерывно проходить дальше, продолжая пересекать следующие целые значения J (рис. 6.11). Пересечения в области

стабильности отвечают стабильной или метастабильной частице. Пересечения в области нестабильности указывают на существование резонансов, или нестабильных частиц. Можно показать, что для сильно взаимодействующих частиц на одной траектории Редже лежат либо только состояния с четным J , либо только состояния с нечетным J , но не оба набора значений. Значит, между двумя состояниями на одной траектории расстояние составляет две полных единицы J . Нижнее состояние на траектории

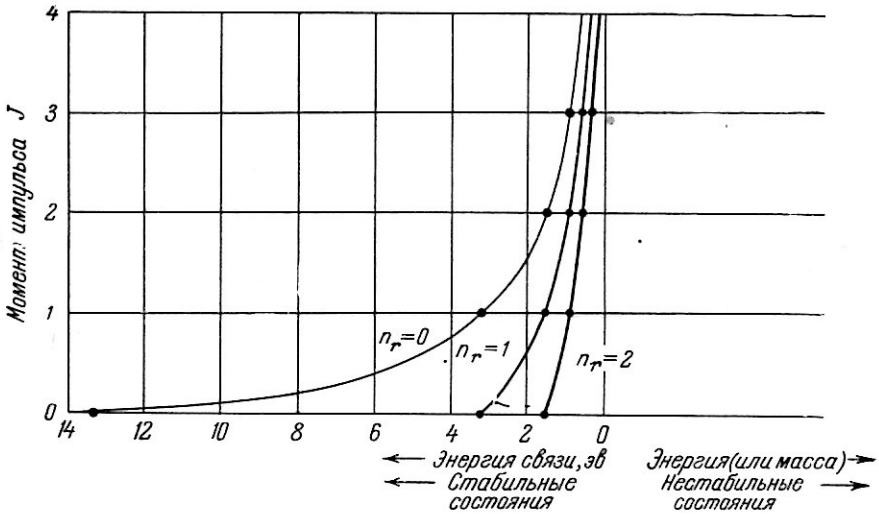


Рис. 6.10. Траектории Редже для водорода напоминают траектории для космических кораблей. Атом водорода, который состоит из электрона, «окружающего» протон, может находиться в разных состояниях возбуждения. При каждом значении некоторого квантового числа (n_r) энергии связи состояний водорода уменьшаются с возрастанием момента (J). Гладкая кривая, проходящая через эти состояния (каждое из которых является новой «частицей»), есть траектория Редже.

называется «появлением», а последующие могут быть названы «возвращениями» на траектории Редже. Они образуют серию возбужденных вращательных состояний.

Как можно убедиться в существовании таких траекторий? По аналогии с примерами спутников или водородного атома нужно отложить по одной оси момент J , а по другой массу (в $Mэв$) для всех частиц с одинаковыми значениями всех квантовых чисел, кроме J . Тогда можно увидеть, укладываются ли частицы в группы, лежащие на возрастающей кривой. Если они ложатся на такие кривые, то это указывает на существование траекторий Редже. Эти траектории для барионов приведены на рис. 6.12.

Правило говорит, что только состояния, различающиеся на две целых единицы по J , могут лежать на одной траектории. Пока это условие может быть выполнено только для трех пар состояний: двух N -состояний $N(939, 1/2^+)$ и $N(1688, 5/2)$; двух Λ -состояний $\Lambda(1115, 1/2^+)$ и $\Lambda(1815, 5/2)$ и двух Δ -состояний $\Delta(1238, 3/2^+)$ и $\Delta(1920, 7/2)$. (Спины высших Λ - и Δ -состояний точно не установлены, они могут оказаться выше чем $5/2$ и $7/2$ соответственно.)

На рис. 6.12 эти три пары состояний соединены наклонными пунктирными линиями. Сплошными линиями обозначены предполагаемые траек-

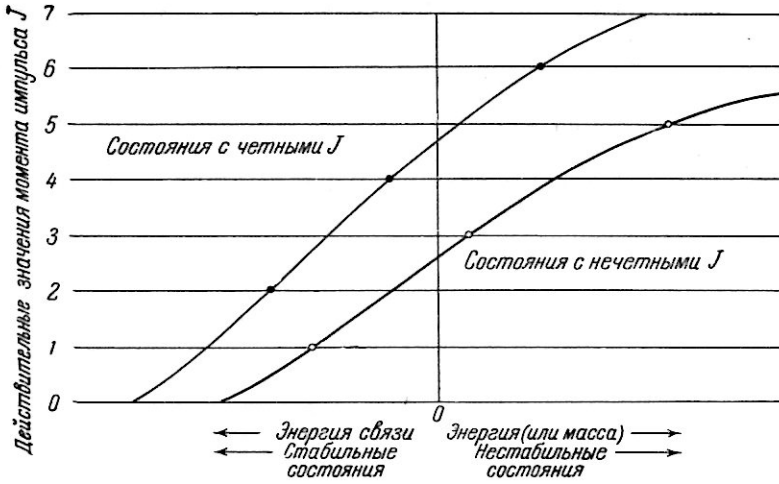


Рис. 6.11. Траектории Редже для сильно взаимодействующих частиц похожи на уже знакомые нам, с той только разницей, что они проходят и через нестабильные состояния. Пересечение с J в стабильной области указывает на существование стабильной или метастабильной частицы. Пересечение в нестабильной области указывает на существование нестабильной частицы. Траектории связывают между собой состояния этой частицы, отличающиеся на две целые единицы J . Нижнее состояние — это «попадение»; высшие состояния — это «возвращения» Редже.

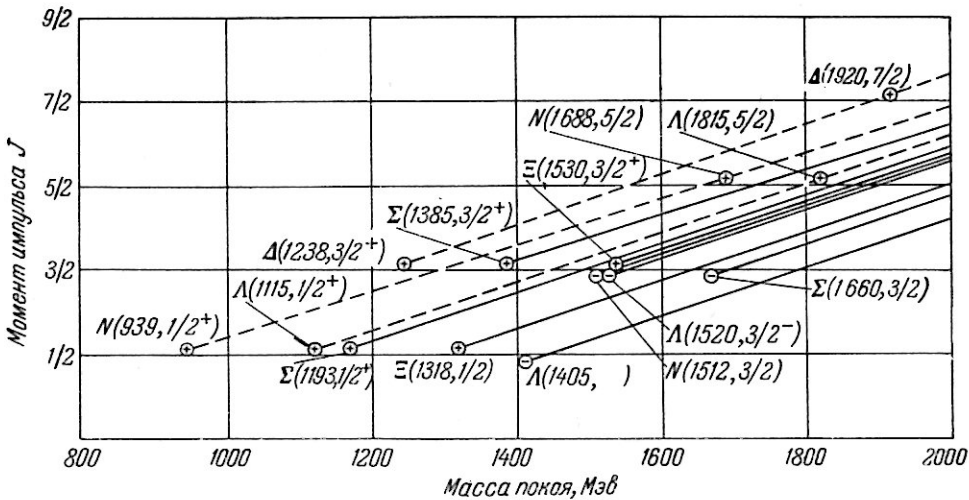


Рис. 6.12. Траектории Редже для барионов построены для четырнадцати барионов, существование которых хорошо установлено. Наклонные пунктирные линии соединяют три появления с их реджевскими возвращениями. Спиновый момент для барионов полуцелый ($1/2, 3/2, 5/2$ и т. д.). Возвращения должны иметь спин на $2, 4, 6$ и т. д. единиц больший, чем их основное состояние (появление) с наименьшей массой. Спины $\Lambda(1815, 5/2)$ и $\Delta(1920, 7/2)$ точно не установлены, но, вероятно, они удовлетворяют этому условию. Наклонные сплошные линии обозначают вероятные траектории Редже для стабильных барионов. Символы в кружочках указывают четность; если она еще твердо не установлена, то представляется предсказанное значение.

тории, на которых пока определенно наблюдается только одно появление. Эти предполагаемые траектории полезны, потому что они подсказывают экспериментатору, где следует искать барионы с высшими моментами.

Такой же график на рис. 6.13 показывает траектории Редже для мезонов. Квантовая механика говорит, что для мезонов по горизонтальной оси нужно откладывать квадраты массы, а не сами массы. Из графика

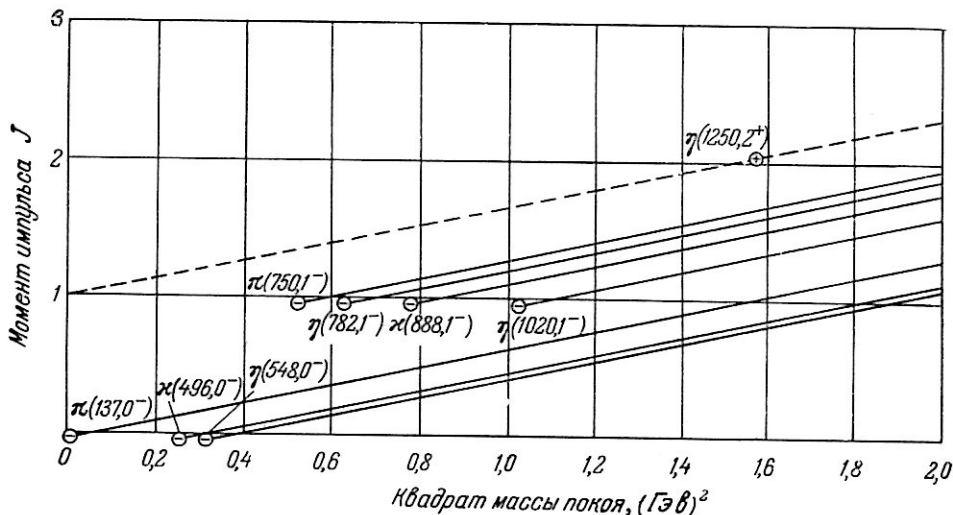


Рис. 6.13. Траектории Редже для мезонов построены для восьми частиц, существование которых точно установлено. Все эти частицы — основные состояния; пока не найдено ни одного возвращения. Можно показать, что высшая η -траектория (это траектория с $Y=0$ и $I=0$) должна иметь нефизическое пересечение в точке $J=1$ и с массой, равной нулю. Пунктирная линия, проведенная через эту точку, указывает вероятный наклон траекторий Редже для мезонов. Параллельные ей сплошные линии — это другие гипотетические траектории. Их пересечения со значениями $J=2$ и $J=3$ предсказывают точки вероятного появления реджевских возвращений. Возвращением с наименьшей массой должен быть $\pi(2^-)$ с массой около $1700 M_{\pi}$.

видно, что пока еще не открыто ни одного возвращения на траектории Редже, возможно потому, что мезонные состояния с высокими массами еще пока не изучались достаточно тщательно.

Лучшее доказательство существования траекторий Редже для мезонов основано на некоторых аргументах, в силу которых частная траектория Редже для мезонного состояния с Y , равным нулю, и I , равным нулю, должна проходить через нефизическую точку с $J=1$ и массой покоя, равной нулю. Следующее более низкое состояние с $J=0$ могло бы быть физическим, но у него оказывается отрицательный квадрат массы, что бессмысленно. Поэтому низшее реальное состояние на этой траектории Редже может появиться на две единицы выше нуля, т. е. при $J=2$. В действительности мезон с J , равным двум, обозначаемый как $\eta(1250, 2^+)$, по-видимому, открыт в последние полтора года. Его квантовые числа пока еще не очень определены. Если, однако, провести траекторию Редже через $\eta(1250, 2^+)$ и нефизическую точку этой траектории с $J=1$ и массой покоя, равной нулю, то можно получить приблизительное указание на угол

наклона других траекторий Редже для мезонов, которые на рисунке показаны сплошными линиями. Сейчас делаются настойчивые экспериментальные попытки обнаружить новые члены этих мезонных семейств со значениями J , равными двум или трем.

Восьмеричный путь

Обратимся теперь к другой схеме классификации, которая оказалась способной предсказывать существование еще не открытых частиц. Мы видели, каким образом понятие траектории Редже позволяет объединить в семейства частицы с различными значениями J и одинаковыми значениями остальных квантовых чисел. Теперь мы хотим описать связи, которые, по-видимому, существуют между частицами с одинаковыми значениями J и четности P , но с разными массами, гиперзарядом Y и изотопическим спином I .

Выше мы упомянули, что разница масс внутри зарядового мультиплетта, например в нуклонном дублете (нейтрон и протон), может рассматриваться как «расщепление», вызванное несохранением изотопического спина в электромагнитном взаимодействии, в котором принимают участие частицы, имеющие электрический заряд. Это нарушение приводит к различиям в массе до $12 M_{\pi}$ в максимальном случае Σ -триплетта.

Замечательный факт состоит в том, что четыре главных члена семейства барионов N , Λ , Σ и Ξ отделены друг от друга разностями масс в среднем всего лишь в 10 раз большими, чем разности масс внутри мультиплетта. Промежутки между средними массами, отделяющие эти четыре барионных мультиплетта, составляют всего лишь 77, 75 и $130 M_{\pi}$. Более того, эти четыре бариона, по-видимому, имеют одно и то же значение J^P ; оно равно $1/2^+$. (На самом деле спин Ξ не твердо установлен, а его четность до сих пор не измерена.)

Если разница в массах внутри мультиплетта вызвана нарушением сохранения изотопического спина I , то не может ли оказаться, что несколько большая разница в массах между соседними мультиплеттами вызвана нарушением сохранения какого-либо другого квантового числа? Нам нужно найти решение такого рода, чтобы Y и I строго сохранялись сильным взаимодействием, но какие-то другие законы сохранения нарушались каким-то аспектом или какой-то частью того же самого сильного взаимодействия. Если бы такое частичное нарушение нового принципа симметрии было разрешено, то можно было бы сгруппировать барионные мультиплеты в «супермультиплеты» с различными значениями Y и I , но с одними и теми же J и P . Эта новая система симметрии так же связывала бы между собой частицы с различными значениями Y и I , как изотопический спин объединяет частицы с различными значениями электрического заряда. Та часть сильного взаимодействия, которая нарушает новую симметрию, — отражаемую новым квантовым числом, — расщепляла бы каждый супермультиплет в зарядовые мультиплеты с различной массой, в значительной мере точно так же, как электромагнитное взаимодействие вызывает расщепление масс внутри мультиплетта, нарушая изотопическую инвариантность. Масштаб расщепления масс внутри супермультиплетта был бы, однако, гораздо крупнее масштаба расщепления внутри мультиплетта, поскольку расщепление супермультиплетта вызывалось бы какой-то заметной частью сильного взаимодействия, которое гораздо интенсивнее электромагнитного.

В начале 1961 г. полковник израильской армии и инженер, ставший физиком, Ю. Нееман и один из авторов этой статьи (Гелл-Манн), работая независимо, предложили некоторую частную систему объединения симметрий и частный способ ее нарушений, который делал правдоподобным предположение о существовании супермультиплетов. Новая система симметрии стала называться «восьмеричным путем», поскольку она оперирует восемью квантовыми числами и в память об известном высказывании, приписываемом Будде: «И вот, о братья, благородная истина, которая ведет к прекращению страдания: вот благородный восьмеричный путь: правильные взгляды, правильные намерения, правильная речь, правильные действия, правильная жизнь, правильные усилия, правильное расположение ума, правильное сосредоточение».

Математическую основу восьмеричного пути нашли в группах Ли и в алгебрах Ли. Это алгебраические системы, развитые в XIX веке норвежским математиком Софусом Ли. Простейшая алгебра Ли говорит об отношениях между тремя компонентами, каждая из которых есть операция симметрии как раз такого рода, какие встречаются в квантовой механике. Изотопический спин состоит из трех таких компонент (I_+ , I_- , I_z), связанных правилами этой простейшей алгебры. Эта алгебра соответствует группе Ли, которая называется $SU(2)$, что означает специальную унитарную группу матриц размерности 2×2 ; между этими матрицами есть одно соотношение, которое уменьшает число независимых компонент с четырех до трех (потому группа и называется «специальной»).

Операции симметрии, являющиеся компонентами восьмеричного пути, удовлетворяют соотношениям следующей по сложности алгебры Ли, имеющей восемь независимых компонент. Эта группа Ли называется $SU(3)$, т. е. специальной унитарной группой матриц размерности 3×3 ; опять специальное условие сводит число компонент с девяти до восьми. Восемь сохраняющихся величин восьмеричного пути состоят из трех компонент изотопического спина, гиперзаряда Y и четырех новых симметрий, которые еще не имеют специальных названий. Две из этих новых операций симметрии уменьшают или увеличивают Y на единицу, не меняя электрического заряда; остальные две симметрии меняют одновременно на единицу как Y , так и электрический заряд (рис. 6.14). Нарушение всех четырех новых симметрий частью сильного взаимодействия изменяет массы мультиплетов, образующих супермультиплет. Пример супермультиплета (октет) — это N , Λ , Σ и Ξ , если только действительно все эти состояния имеют один и тот же момент $1/2$ и ту же положительную четность, т. е. если для всех них $J^P = 1/2^+$.

Способ нарушения симметрии, предложенный восьмеричным путем, приводит к правилу, позволяющему найти массы расщепленного супермультиплета, если только нарушение не слишком сильное. Правило для N , Λ , Σ и Ξ состоит в том, что $1/2$ массы N плюс $1/2$ массы Ξ равно $3/4$ массы Λ плюс $1/4$ массы Σ . Подставляя действительные массы четырех состояний, мы получим в левой части уравнения 1129 Мэв , а в правой части 1135 Мэв . Поразительно хорошее согласие с приближенным правилом масс!

Этот явный успех побудил искать и другие октеты. В начале 1961 г. единственными твердо известными мезонными мультиплетами были π , η и $\bar{\eta}$ — все с J^P , равным 0^- . Они как раз укладываются в октет, если к ним добавить один нейтральный синглетный мезон с массой 563 Мэв , вычисленной по октетной модели. (Массы рассчитываются так же, как и для барионов, за исключением того, что для мезонов подставляются в соотношения

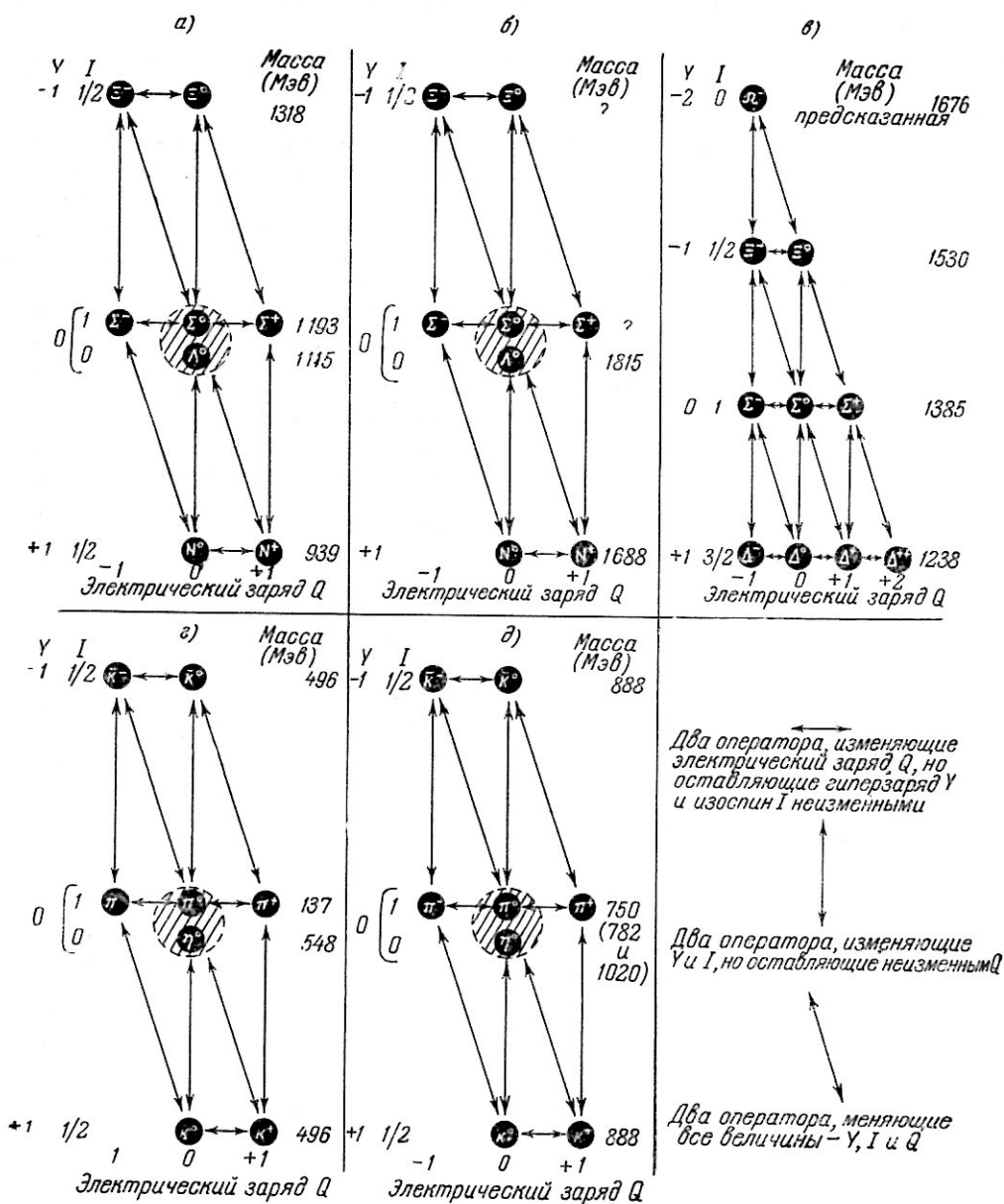


Рис. 6.14. «Восьмеричный путь» привлекает новую систему симметрий для того, чтобы сгруппировать мультиплеты частиц в «супермультиплеты». Термин «восьмеричный» относится к специальной алгебре, описывающей отношения между восемью элементами, в данном случае между восемью сохраняющимися величинами. Новая система симметрий (вертикальные и наклонные стрелки) связывает различные значения гиперзаряда (Y) и изотопического спина (I), подобно тому как изотопическая симметрия (горизонтальные стрелки) связывает различные значения электрического заряда. Четыре схемы (а, б, в, г) изображают супермультиплеты с восемью членами; другая группа (д) состоит из десяти членов. Восьмеричный путь предсказывает существование нескольких новых частиц и, в частности, $\Omega(1676, 3/2^+)$, которая входит в схему д (обратите внимание, что η -мезон на схеме д имеет два значения массы, что приводит к «кризису тождественности», описанному в тексте).

На схемах г) и д) буква K — это просто иное написание греческой буквы κ .

не массы, а квадраты масс.) В конце 1961 г. этот η -мезон был открыт, и его масса оказалась равной $548 M_{\text{эв}}$. Позднее было определено, что J^P этого мезона 0^- , как и следовало ожидать.

Тем временем появились мезоны с J^P , равным 1^- : триплет $\pi(750, 1^-)$ и дублеты $\kappa(888, 1^-)$ и $\bar{\kappa}(888, 1^-)$. Опять появилась еще одна октетная структура, и было предсказано существование нейтрального синглета с массой около $925 M_{\text{эв}}$. Скоро экспериментаторы открыли $\eta(1^-)$ -мезон, но его масса оказалась только $782 M_{\text{эв}}$. Массовое правило, столь успешно работавшее до тех пор, таинственным образом спасовало.

Однако через некоторое время тайна несколько проявилась. Октет — это только один из нескольких супермультиплетов, допускаемых восьмеричным путем. Другая допускаемая возможность — это один нейтральный синглет с Y и I , равными нулю. Допустим, что существует такой мезон с $J^P = 0^-$, который мы назовем $\eta'(1^-)$. Если бы его масса была близка к массе $\eta(1^-)$, то только нарушение симметрии восьмеричного пути позволяло бы различать эти две частицы. В таких условиях квантовая механика предсказывает наступление некоторого «кризиса тождественности», в результате которого один из мезонов приобретает, в какой-то мере, черты другого. Более того, и массы мезонов подвергаются влиянию этого обобщения свойств, и один из них будет иметь большую, а другой меньшую массу по сравнению с простым случаем, когда должно выполняться простое правило масс для октета. Значит, предсказанное значение квадрата массы для $\eta(1^-)$, т. е. $(925)^2$, должно лежать приблизительно посередине между действительными значениями квадратов масс $\eta(1^-)$ и $\eta'(1^-)$. Поскольку в действительности масса $\eta(1^-)$ равна $782 M_{\text{эв}}$, то можно было ожидать, что найдется другой мезон с массой приблизительно около $1045 M_{\text{эв}}$. Действительно, в 1962 г. такой мезон с правильными значениями Y и I (оба равны нулю) и с массой в $1020 M_{\text{эв}}$ был открыт независимо двумя группами физиков. На самом деле нет ясной возможности определить, какой из двух мезонов — $\eta(782)$ или $\eta(1020)$ — принадлежит к октету, а какой является синглетом. Мы предполагаем, что природа здесь так же становится в тупик, как и мы.

Вернемся снова к барионам. Какие же еще супермультиплеты удалось найти, кроме первоначального, содержащего N , Λ , Σ и Ξ ? $\Lambda(1405)$, по-видимому, синглет; его J^P еще точно не установлено. $N(1688, 5/2^-)$ — первое реджевское возвращение нуклона — должен, так же как и нуклон, принадлежать октету, в который входят реджевские возвращения Λ , Σ и Ξ . Λ -членом этого возбужденного октета может быть $\Lambda(1815)$, если эта частица действительно имеет J^P , равное $5/2^+$. Σ - и Ξ -члены сейчас разыскиваются; если одну из этих частиц удастся найти, то массу другой можно предсказать приближенно, пользуясь октетным массовым правилом.

$N(1512, 3/2^-)$ может также принадлежать октету. Другой вероятный член этого октета уже найден — это $\Lambda(1520, 3/2^-)$. Возможно, что $\Sigma(1660)$ имеет значение J^P , равное $3/2^-$. Если это правильно, то октетное правило предсказывает существование Ξ -мультиплета с массой около $1600 M_{\text{эв}}$. Здесь, однако, экспериментальная ситуация очень неопределенна.

Теперь перейдем к $\Delta(1238)$, нестабильному бариону, открытому в 1952 г. Поскольку это квартет, то он не может принадлежать ни к октетной структуре, ни к синглетной. Простейший супермультиплет, допускаемый восьмеричным путем, в который он может уложиться, это 10-членная группа, или декаплет, состоящий из квартета Δ , триплета Σ , дублета Ξ и синглета Ω (см. рис. 6.14, в). Для декаплетов массовое правило предсказывает приблизительно равные промежутки по массе между всеми членами

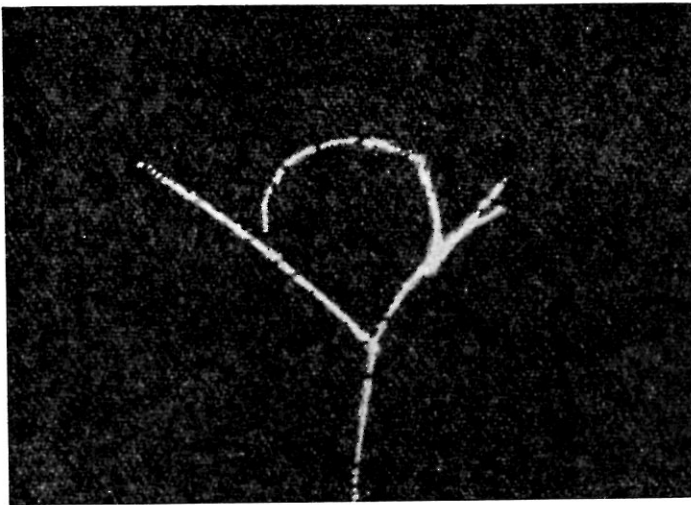
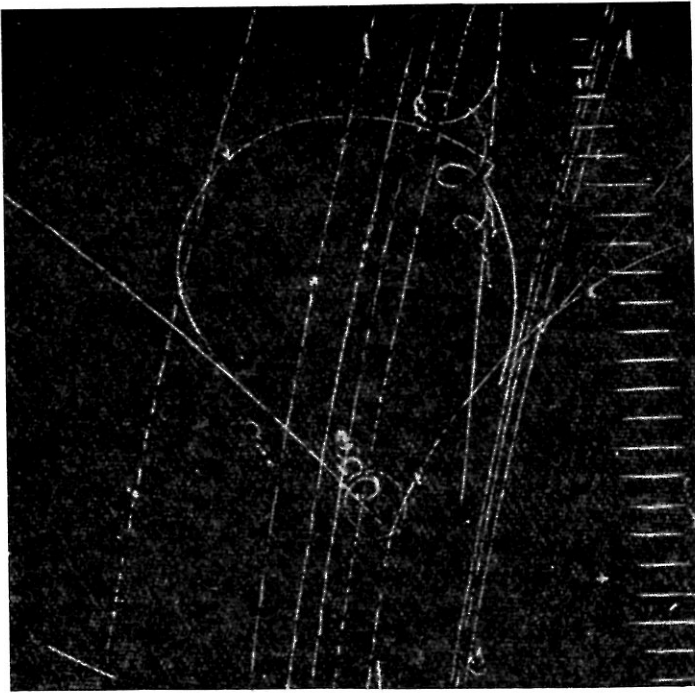


Рис. 6.15. Событие в пузырьковой камере (верхний снимок) — одно из более чем 300 000 событий, измеряемых ежегодно в Лоуренсовской лаборатории излучений Калифорнийского университета в Беркли. Многие события измеряются и изучаются с помощью сканирующего и промеряющего проектора. Это устройство, связанное с вычислительной машиной, инструктирует шаг за шагом наблюдателя на основании анализа предыдущего измерения и воспроизводит уже измеренную часть на экране катодной трубки (снимок внизу). Эта фотография показывает K^- -мезон, который входит снизу в 72-дюймовую пузырьковую камеру и сталкивается с протоном. В реакции возникают K^0 -мезон, протон и π -мезон. Магнитным полем, в котором помещена камера, след протона заворачивается налево, а π^- -мезона — направо. K^0 -мезон не оставляет следа, но, пройдя около 10 см, он распадается на π^+ и π^- . π^+ заворачивается против часовой стрелки и останавливается. По истечении 10^{-8} сек он распадается, появляется μ^+ , который проходит всего около одного сантиметра и останавливается. После 10^{-6} сек μ^+ распадается на e^+ , нейтрино и антинейтрино. Длинная кривая на верхнем снимке, воспроизведенная также на осциллокопе, показывает путь e^+ .

супермультиплета. Поскольку считается, что J^P для $\Sigma(1385)$ имеет значение $3/2^+$, он, конечно, может принадлежать к декаплету вместе с $\Delta(1238)$. Правило равных промежутков предсказывает Ξ -частицу примерно при $1532 Mэв$. Открытие $\Xi(1530)$ с вероятным значением $J^P = 3/2^+$ представляется ярким подтверждением этого предсказания. Массовое правило далее предсказывает существование Ω -частицы с массой около $1676 Mэв$, которая должна быть единственной частицей, представляющей собой отрицательно заряженный синглет. Эта частица должна быть стабильной по отношению к сильным и к электромагнитным взаимодействиям, потому что у нее недостает энергии для распада ни по одному из каналов, с которыми она сообщается. Значит, время ее жизни должно быть больше, чем 10^{-10} сек, и она подвержена только слабому распаду. Ее сейчас настойчиво разыскивают. Если она будет найдена, то это будет ярким подтверждением правильности восьмеричного пути *).

Мы закончим этот раздел замечанием, что «игра симметрий» для сильно взаимодействующих частиц, возможно, еще не закончена. Например, может быть, существует какое-то еще не открытое квантовое число, сохраняющееся в сильных взаимодействиях и равное нулю для всех известных сейчас частиц. До того как были открыты странные частицы, в таком положении было квантовое число странности (эквивалентное Y). Эксперименты при очень высоких энергиях, выполненные с помощью нового поколения ускорителей, могут привести к подобной ситуации по отношению к какому-то совершенно новому квантовому числу.

Составные частицы

Смысл слов «элементарная частица» менялся очень сильно по мере того, как картина физической вселенной становилась все более детальной. За последние несколько лет становится все более неудобным рассматривать несколько десятков частиц в качестве элементарных. По-видимому, на очереди пересмотр самого понятия элементарной частицы.

Начнем с вопроса: почему мы уверены в том, что некоторые частицы, как, например, атом водорода, не элементарны? Ответ состоит в том, что хотя эти частицы и имеют свойства качественно такие же, как и свойства протонов, нейтронов или электронов, но их можно теоретически объяснить, предположив, что они составлены из других частиц.

Как раз атом водорода представляет собой великолепный пример того, что мы имеем в виду, говоря о составной частице, потому что его свойства могут быть теоретически описаны с огромной точностью. Но важно представить себе, что атом водорода вовсе не просто составлен из одного протона и одного электрона. Точнее будет сказать, что он большую часть времени состоит из протона и электрона. Низшее состояние атома водорода — это стабильная «частица», которая сообщается (посредством сильного, электромагнитного и слабого взаимодействий) со множеством закрытых каналов, из которых самый важный — это состояние протона и электрона. Согласно квантовой механике, каждое состояние часть времени проводит во всех состояниях, сообщающихся с исходным. Например, некую малую долю времени основное состояние водородного атома, помимо ожидаемых электрона и протона, содержит еще пару электрон и позитрон. Влияние этого канала на энергию атома ничтожно, но оно может

*) Частица Ω^- уже обнаружена в Брукхейвенской национальной лаборатории. (Прим. ред.)

быть подсчитано и измерено, причем согласие получается превосходное. Есть еще бесконечно много каналов, которые оказывают влияние на структуру водородного атома, но, к счастью, их влияние пренебрежимо мало.

В сильно взаимодействующих системах сложные каналы оказывают большое влияние. Так, например, свойства дейтона ($A = 2$) были предсказаны исходя из того, что эта частица составлена из протона и нейтрона, но в этом случае точность предсказаний гораздо хуже, чем для водородного атома, потому что влияние дополнительных каналов (включающих, скажем, пионы) здесь очень существенно. Тем не менее все считают, что поскольку простейший канал уже дает объяснение значительной части наблюдаемых свойств дейтона, то, в конечном счете, здесь возможно последовательно улучшать описание, систематически учитывая все большее число каналов. То же самое можно сказать и о всех остальных ядрах, более тяжелых, чем дейтон, и потому нет никаких оснований считать какие-либо из этих сложных ядер «элементарными».

Сомнения относительно различия между сложными и элементарными частицами возникают, когда мы обращаемся к частицам с A , равным 0 или 1 (мезоны и барионы), потому что здесь редко можно при близких энергиях выделить один доминирующий канал. Рассмотрим один из худших случаев — пион. Сообщающийся с ним канал с самой низкой энергией порога — это конфигурация из трех пионов; некоторые следующие каналы с более высокими порогами — это 5π , π плюс π плюс π , N плюс \bar{N} и Ξ плюс $\bar{\Xi}$. Значит, часть времени пион проводит в состоянии 3π , часть времени — в состоянии π , π и π и т. д.

Все существенные пороги лежат много выше массы пиона, и многие довольно сложные закрытые каналы оказывают очень заметное влияние на пионное состояние. В результате даже грубый расчет основных свойств пиона до сих пор не удается сделать. Более удачный случай — это π (750), где 2π -канал считается доминирующим; но даже и здесь достаточно взглянуть на рис. 6.6, чтобы убедиться, что есть еще много соседних каналов, которые необходимо принимать во внимание.

Тем не менее мы можем принять такое «рабочее» определение: частица не элементарна, когда все ее свойства *в принципе* могут быть предсказаны, если рассматривать ее как сложную. Подсчет при этом должен дать значения различных вероятностей для разных закрытых каналов, и, зная энергии связи в этих каналах, мы смогли бы вычислить и истинную массу частицы.

Задача учета всех существенных каналов в большинстве случаев слишком сложна, однако допустим, что нам удалось как-то провести этот расчет. Получим ли мы тогда корректное описание каждой частицы? Получатся ли в результате правильные значения ее массы и других квантовых чисел? До недавнего времени почти все считали, что несколько сильно взаимодействующих частиц (среди них нуклон) не могут быть трактованы на такой основе. В современной теории электронов и фотонов, дающей превосходное описание электромагнитных явлений, свойства электрона и фотона не могут быть получены на основании динамики. Причина состоит в том, что известные здесь силы слишком слабы, чтобы образовывать связанные состояния с такими малыми массами, как у электрона и фотона.

Рассуждая по аналогии, теоретики считали нужным сохранить и для нуклонов такой специальный статус, подобный статусу электрона. И это налагало запрет на попытки трактовать нуклон как сложную частицу.

Постепенно, однако, этот привилегированный статус стал оказываться все более сомнительным. И когда, наконец, победив внутреннее сопротивление, теоретики попытались рассчитать свойства нуклона, исходя из рассмотрения соответствующих сообщающихся каналов, то оказалось, что качественный успех такого расчета тот же самый, что для дейтона или $\Delta(1238)$ -частицы, которые многие годы считаются сложными лишь потому, что они впервые наблюдались в опытах по рассеянию пионов на протонах.

Исходя из современного развития науки, в котором важную роль играет понятие траектории Редже, нам представляется, что во всех подобных динамических расчетах не следует делать никакого различия между участвующими в расчете состояниями ни на основе момента, ни на основе каких-либо других квантовых чисел. Если нет нужды в аристократии среди сильно взаимодействующих частиц, то не попробовать ли обойтись демократией?

Динамическая картина «бутстрапа»

Сложные частицы обязаны своим существованием силам, действующим в каналах, с которыми эти частицы сообщаются. Как возникают эти силы и как они могут быть рассчитаны?

Ключевое понятие, на котором строится этот расчет, — это понятие «кроссинга». Рассмотрим следующий процесс, в котором участвуют четыре частицы:

$$a + b \leftrightarrow c + d.$$

Эта схема говорит, что канал a, b связан с каналом c, d . Вероятность того, что этот процесс пойдет (в любом направлении), математически выражается через квадрат абсолютной величины «амплитуды реакции (процесса)», которая зависит от энергий всех четырех частиц. Принцип кроссинга утверждает, что та же самая амплитуда описывает еще две «кроссинг-реакции», в которых *приходящие* частицы заменяются на *уходящие* античастицы (отмечаемые черточкой над буквой), т. е.

$$a + \bar{c} \leftrightarrow \bar{b} + d,$$

$$a + \bar{d} \leftrightarrow \bar{b} + c.$$

Эти разные реакции различаются знаками энергетических переменных, которые положительны или отрицательны, в зависимости от того, входит или выходит частица; однако если нам известна амплитуда любой из этих трех реакций, то мы можем получить амплитуды двух других реакций, выбирая нужные знаки энергий.

Примером кроссинг-реакций может служить следующая пара реакций, в которых участвуют нейтрон и протон (рис. 6.16):

$$a) \quad n + p \leftrightarrow n + p,$$

$$б) \quad n + \bar{n} \leftrightarrow p + \bar{p}.$$

Обе реакции описываются одной и той же амплитудой, существенное свойство которой можно изобразить диаграммой, приведенной на рис. 6.16. Первый способ расстановки стрелок относится к реакции *a*), а второй — к реакции *б*). Обе фигуры различаются, конечно, только направлением, в котором они читаются: или снизу вверх, или слева направо, как указывают стрелки.

Мы интерпретируем первый рисунок, говоря, что в процессе рассеяния нейтрона и протона они «обмениваются» мезоном, и можно показать, что этот обмен является способом описания сил, действующих между этими двумя барионами. Интерпретация второй реакции состоит в том, что мезон, который сообщается с обоими каналами — p, \bar{p} и n, \bar{n} , — оказывается средством соединения этих двух каналов реакции. Таким образом, одна и та же диаграмма соответствует одновременно силе в одной реакции и промежуточной частице в кроссинг-реакции. Следовательно, можно сказать, что силы, действующие в данном канале, возникают, вообще говоря, из-за обмена промежуточными частицами, которые сообщаются с кроссинг-каналами.

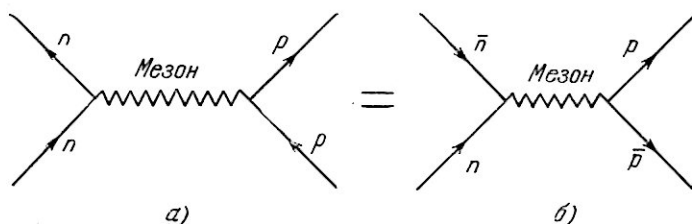


Рис. 6.16. «Кроссинг-сопряженные реакции» иллюстрируют тесную связь между понятием силы и понятием частицы. Реакция *a*), которая читается снизу вверх, изображает столкновение и рассеяние нейтрона и протона. Мезон, которым они «обмениваются», изображает сильное взаимодействие между двумя барионами. Реакция *б*), которая читается слева направо, кроссинг-сопряжена реакции *a*). Она показывает, что мезон выступает как промежуточная частица в процессе перехода нейтрона и антинейтрона в протон и антипротон. Эти две реакции эквивалентны.

Взяв это за основу, мы возвращаемся к идее, упомянутой во введении к этой статье, о том, что все сильно взаимодействующие частицы суть динамические структуры, которые обязаны своим существованием тем же самым силам, благодаря которым они взаимодействуют друг с другом. Мы называем это гипотезой «бутстрапа». Она была сформулирована одним из авторов этой статьи (Чу) совместно с Фраучи в Калифорнийском университете в Беркли.

Согласно гипотезе бутстрапа, всякая сильно взаимодействующая частица считается связанным состоянием тех каналов, с которыми она сообщается, и целиком обязана своим существованием силам, вызванным обменом сильно взаимодействующими частицами, которые сообщаются с кроссинг-каналами. Каждая из этих последних частиц существует благодаря силам, порождаемым первой частицей. Другими словами, каждая частица участвует в порождении других частиц, которые в свою очередь порождают ее. В этой взаимной и резко нелинейной картине легко представить себе ситуацию, в которой не остается никаких произвольных или свободных параметров (кроме одного какого-либо, нужного, чтобы фиксировать масштаб энергии), а единственный самосогласованный набор параметров — тот, который осуществляется в природе.

Напомним читателю, что в теории электромагнетизма несколько отдельных частиц (лептоны и фотон) не рассматриваются как связанные (или сложные) состояния, причем их массы и постоянные связи остаются

свободно выбираемыми параметрами. Принятая картина электродинамики, насколько мы представляем, не имеет ничего общего с бутстрапом.

Рано еще утверждать с уверенностью, что в сильном взаимодействии действительно отсутствуют свободные параметры, но нам все-таки хотелось бы закончить эту статью оптимистической нотой, и поэтому укажем одну заманчивую возможность, которая могла бы достойно увенчать гипотезу бутстрапа. Если система сильно взаимодействующих частиц в самом деле единственным образом определяется сама через себя с помощью обсуждавшегося динамического механизма, может оказаться, что специальные симметрии сильных взаимодействий не накладываются, так сказать, снаружи, но появляются в качестве необходимых условий самосогласованности. Очень характерно и довольно загадочно, что изотопическая симметрия, странность, а теперь и более обширные симметричные свойства восьмеричного пути никогда не соотносились с другими физическими симметриями. Может быть, мы поймем, что является их источником тогда же, когда поймем структуру масс и спинов сильно взаимодействующих частиц. И эта структура, и загадочные симметрии могут возникнуть из одного источника — динамики бутстрапа.

Дж. Броновский

ПАРАДОКС ЧАСОВ

(ФЕВРАЛЬ 1963 г.)

Это знаменитое следствие специальной теории относительности состоит в том, что двое часов, движущихся друг относительно друга, идут с разными скоростями. В основе эффекта не что иное, как пифагорова теорема.

Работа, в которой юный Альберт Эйнштейн изложил в 1905 г. специальную теорию относительности, столкнула лицом к лицу здравый смысл с некоторыми новыми и совершенно неожиданными идеями. Она упразднила эфир и показала, что материя и энергия эквивалентны. Эти новые идеи были производными от центральной концепции относительности, заключающейся в том, что течение времени неодинаково для разных наблюдателей. Эта дерзкая идея составляет теперь суть современной физики — от атома до космоса. Но она все еще трудна для понимания, и парадоксы, ею порождаемые, продолжают приводить в замешательство и стимулировать все новые поколения физиков. Самый волнующий парадокс — это парадокс двух тождественных часов, которые пространственно разделяются, участвуя в различных перемещениях. Как сравнивать время на двух часах при их передвижениях? А если часы встречаются снова, то смогут ли они показать разное время? Это знаменитый парадокс часов, к анализу которого я перехожу.

Замечательная работа Эйнштейна начинается с двух аксиом. Одна из них заключается в том, что два наблюдателя, каждый из которых представляется другому движущимся прямолинейно, с постоянной скоростью, не могут сказать, кто из них движется. Вторая аксиома утверждает, что когда оба наблюдателя измеряют скорость света, то они получают один и тот же ответ.

Ни одна из этих аксиом не была новой сама по себе. Первая аксиома, что, грубо говоря, всякое равномерное движение относительно, долго входила неявно в законы механики. Вторая аксиома, что (говоря снова грубо) скорость света оказывается одной и той же в любом эксперименте, начала восприниматься как естественное толкование открытия А. А. Майкельсона и Е. В. Морли в 1887 г. Это открытие состояло в том, что скорость света (186 000 миль, или $3 \cdot 10^8$ км/сек) не изменяется вследствие движения Земли или же (что то же) вследствие движения лаборатории, в которой она измеряется.

Что было новым в анализе Эйнштейна, так это ни та, ни другая аксиомы порознь, а сопоставление обеих. Они образуют два принципа относительности не по отдельности, а вместе. Так совокупно и представляет их Эйнштейн в начале своей работы.

Из этих двух аксиом, взятых вместе, сразу же следует, что мы должны пересмотреть традиционную идею времени. По традиции мы принимаем

на веру, что время одно и то же везде и для всех. Почему бы нет? На каком это основании мы могли бы заподозрить, что время может протекать по-

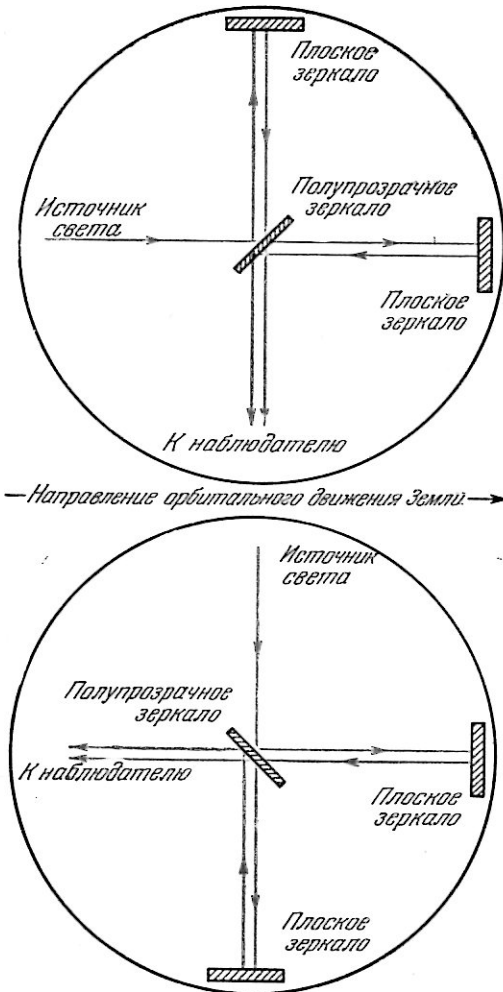


Рис. 7.1. Эксперимент Майкельсона — Морли, выполненный в 1887 г., имел целью измерение скорости Земли относительно эфира с помощью измерения разности скоростей двух пучков света, падающих под прямым углом друг к другу. На путь, который свет проходит параллельно орбитальному движению Земли, требуется больше времени, чем на путь, перпендикулярный этому движению. Поэтому поворот установки на 90° мог бы привести к заметному сдвигу в узоре интерференционных колец, образованных двумя пучками. Никакого сдвига обнаружено не было. Повторные эксперименты подтвердили вывод, что скорость света постоянна. Это один из двух принципов, лежащих в основе специальной теории относительности.

разному для меня, пишущего за своим столом, и для вас, читающего это в поезде? Естественно, казалось бы, предположить, что время — это «теперь», общее для всех путешественников в любом месте Вселенной.

Но аллюр времени не может быть одинаковым для двух наблюдателей, один из которых движется относительно другого, если им предстоит получить одну и ту же скорость, засекая время пучка света, движущегося вместе с одним из них. Путь пучка света выглядит неодинаково для этих двух наблюдателей. Так как он движется вместе с одним из них, то другому его путь кажется более длинным; а если скорость должна остаться той же, то на более длинный путь должно пойти больше времени. Наблюдателю, которому путь пучка кажется более длинным, должно казаться более длинным и время, нужное пучку для преодоления пути: для него время должно идти быстрее.

Давайте конкретизируем ситуацию. Представим себе движущуюся лабораторию как-либо попроще — пусть это будет вагон поезда. Вы находитесь в вагоне сбоку и наблюдаете за вспышкой спички у противоположной стенки. Вам кажется, что свет от спички приходит по прямой поперек вагона. Но человеку, мимо которого поезд проходит, путь света, дошедшего до вас, представляется более длинным. Он видит вас движущимся вдоль полотна, а свет — пересекающим вагон наискосок от той точки, где спичка была зажжена, до той точки, куда вы прибываете, когда свет до вас доходит. Оба пути — путь,



Юный Эйнштейн позировал фотографу, когда он был студентом Федерального института технологии в Цюрихе. Эйнштейн закончил его в 1900 г. и пять лет спустя опубликовал свою специальную теорию относительности, которая привела к парадоксу часов.

который видите вы, и путь, который видит сторонний наблюдатель, — можно описать словами из ваших первых учебников геометрии. Для вас путь света от спички к вам — это высота треугольника, а для стороннего наблюдателя — это гипотенуза того же треугольника, основанием которого будет путь поезда за то время, за которое свет доходит до вас. Так как скорость света должна быть одинаковой для вас обоих, то отсюда следует, что стороннему наблюдателю свет кажется более медлительным, чем вам. Для стороннего наблюдателя время идет быстрее, чем для путешественника.

Мало того, мы можем даже оценить отношение темпов, с которыми время идет для них обоих, не пользуясь ничем хитрее того же школьного

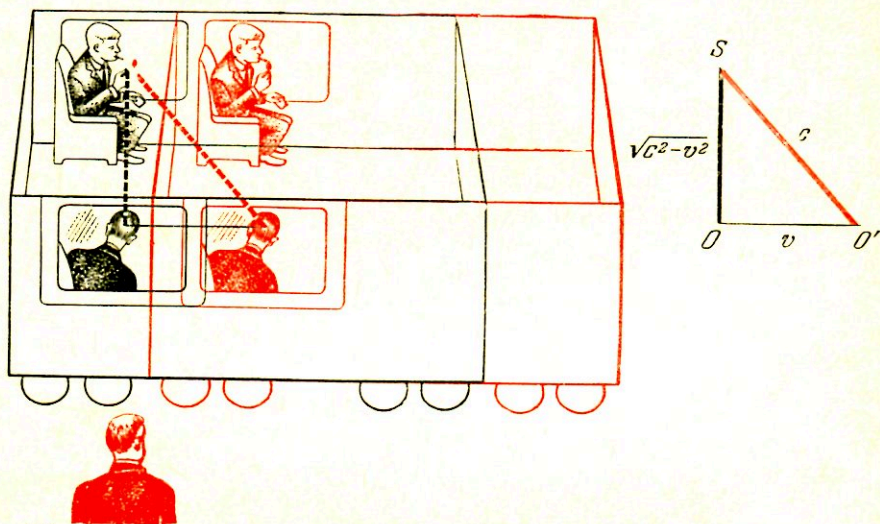


Рис. 7.2. Время течет по-разному для двух наблюдателей, когда один движется относительно другого. Мысленный эксперимент, показанный здесь, подробно обсуждается в тексте. Путь луча от спички к наблюдателю внутри вагона кажется короче (черная пунктирная линия), чем наблюдателю, стоящему снаружи (цветная пунктирная линия). Скорость света одинакова для обоих наблюдателей; следовательно, время идет медленнее для движущегося наблюдателя в отношении более короткого пути к более длинному. Это соотношение можно выразить геометрически, как это сделано на треугольнике справа, где c изображает скорость света, v — скорость поезда, а O и O' — положения путешественника, когда до него доходит свет, в соответствии с представлениями путешественника (O) и стороннего наблюдателя (O').

учебника геометрии. Поскольку путешественник и наблюдатель находят скорость света одинаковой, то для путешественника время идет медленнее, чем для наблюдателя, как раз в отношении расстояний, проходимых светом по их наблюдениям, т. е. в отношении высоты к гипотенузе. Это и есть классическая формула относительности: время идет медленнее для путешественника в отношении $\sqrt{c^2 - v^2} : c$. В этой формуле c — гипотенуза треугольника, v — основание, а корень — высота, вычисленная по теореме Пифагора. В этих обозначениях c означает также скорость света, а v — скорость поезда (рис. 7.2).

Не было никаких особых оснований приводить эту формулу здесь, так как нас занимает лишь тот факт, что для путешественника время идет медленнее, а не тот — насколько медленнее. Но я не смог удержаться от

вывода формулы из-за простоты ее идеи: она основана не на чем ином, как на теореме Пифагора. Фундаментальная формула относительности восходит к Пифагору!

Вполне понятно воодушевление, с которым Эйнштейн рассказывает в своей автобиографии о том, как он почувствовал впервые мощь математики, когда сам доказал, в возрасте 10 или 11 лет, теорему Пифагора, о которой рассказал ему дядя. Сам же Пифагор, когда открыл свою теорему, пожертвовал музам 100 быков.

Время идет медленнее для путешественника, чем для зрителя, — это необходимое следствие из двух аксиом относительности. Я должен подчеркнуть, что здесь время конкретно — это смена физических событий, так же ощутимых, как ход стрелок часов. Мы сейчас оставляем в стороне неосознаваемое чувство — нетерпение путешественника, когда он рвется вперед и ему кажется, что все движется слишком медленно. Ход времени в относительности измеряется физическими процессами: вращение колесиков в часах, движение атомов, распад нестабильных частиц. Из наблюдений мы знаем, сколько проживет покоящийся мезон какого-нибудь вида от момента его образования до распада. Из наблюдений мы также знаем, сколько он проживет, двигаясь с большой скоростью. Путешествующий мезон живет по нашему времени дольше, чем покоящийся. Конечно, движущийся мезон не сознает, что он путешествует и что для нас время идет быстрее.

Это свидетельство неоспоримо: физические процессы в объектах идут медленнее, когда эти объекты перемещаются с большой скоростью. В 1905 г., когда писал Эйнштейн, в этом никак нельзя было убедиться, но новые открытия в физике (такие, как мезоны) полностью подтвердили его пророчества.

Это утверждение, что время — т. е. смена событий в физическом процессе — протекает для путешественника медленнее, чем для зрителя, включает в себе, однако, досадную двойственность. Знает ли путешественник на самом деле, что он путешествует? Знает ли зритель, что он стоит неподвижно? Ведь вы же, находясь в вагоне, можете заблуждаться: поезд может стоять, а человек снаружи может двигаться. Мезон, который нам кажется движущимся с большой скоростью, на самом деле, может быть, покоится, а именно мы в своей лаборатории проносимся мимо него. Действительно, есть ли смысл в разговоре о том, что один неподвижен, а другой движется, как если бы какое-то из этих описаний было абсолютным? Первая аксиома несомненно говорит, что мы не можем сказать, кто из нас двух путешественник, а кто зритель. Не должно ли отношение между двумя наблюдателями быть полностью симметричным?

Первая аксиома относительности, строго говоря, этого не утверждает; приведенные же возражения будут иметь силу лишь в том случае, если совершенно точно выполнять ее требования. Первая аксиома говорит, что если два наблюдателя движутся прямолинейно с постоянной скоростью друг относительно друга, то ни один из них не может сказать, кто движется, а кто стоит на месте. Отношение между двумя наблюдателями симметрично тогда и только тогда, когда каждому из них кажется, что другой движется прямолинейно с постоянной скоростью.

Два таких наблюдателя — например, вы в вашем вагоне и человек, наблюдающий, как проносится поезд, — на самом деле находятся в странном отношении друг к другу. Когда вы в вашем вагоне ставите эксперимент по измерению скорости света, то человек, наблюдающий за поездом, будет видеть путь света более длинным, чем вы; поэтому ему кажется, что

ваши часы идут медленнее его часов. Но если он в своей лаборатории ставит эксперимент по измерению скорости света, то условия обращаются. Вам, проезжающему в поезде, кажется, что движется его лаборатория, путь света в его лаборатории кажется вам более длинным, чем ему, и вы должны будете заключить из этого, что его часы идут медленнее. Это ясно и симметрично: каждый считает, что часы другого идут медленнее. Но такая ситуация тоже очень необычна. Как же это может случиться, что когда на ваших часах прошло два часа, вам кажется, что на часах человека у полотна прошел лишь один час, — и тем не менее, когда на его часах прошел час, ему кажется, что на ваших часах прошло лишь полчаса?

Такое забавное положение вполне возможно — и совершенно реально, — потому что вы и человек у полотна никогда больше не встретитесь! Вы можете поставить рядом ваши и его часы один и только один раз; после этого вы расстанетесь навсегда. Это и есть основное условие первой аксиомы относительности: каждый из вас движется по прямой линии с постоянной скоростью относительно другого, и поэтому вы можете встретиться один и только один раз. Когда вы встречаетесь, вы с физической точки зрения в состоянии поставить на ваших часах одно и то же время. Но после этого вы можете сравнивать ваши часы с его часами, только посылая друг другу сигналы. Любой сигнал этого рода подобен, по существу, лучу света: каждый из вас считает, что он проделал путь разной длины, и каждый из вас думает поэтому, что на него понадобилось разное время. Сравнивая ваши часы, каждый из вас должен делать скидку на кажущееся время путешествия сигнала. Так как вы делаете неодинаковые скидки, то и сравнение дает вам разные ответы.

Повторяю, что это не делает нереальным различие в течении времени. Очень быстрый мезон в моем мире распадается медленнее, чем неподвижный мезон; это физический факт. Этот факт не будет фальсифицирован, если мы осознаем, что в мире, связанном с очень быстрым мезоном, медленнее будет распадаться тот мезон, который для меня неподвижен. Конечно, это так и есть: в движущемся мире он сам перемещается с большой скоростью.

Мир физической реальности устроен просто и здраво. Всякий процесс состоит из последовательности событий: движение стрелок часов, колебания атома, распад нестабильной частицы. В моем мире существует много объектов, участвующих в одном и том же процессе: много часов, много атомов, много мезонов. В моем мире эти объекты перемещаются с разными скоростями. Значит, физической реальностью в моем мире будет то, что каждый процесс протекает тем медленнее, чем с большей скоростью объект движется. Чем быстрее продвигается путешественник сквозь мой мир, тем медленнее его пульс. Такой закон природы каждый наблюдатель обнаруживает в своем мире.

До сих пор я обсуждал случай наблюдателей, удаляющихся друг от друга, из-за чего их временные шкалы нельзя было сравнивать в одном месте; они оказываются в одном и том же месте одновременно лишь один раз. Но, разумеется, позволительно обсудить и такой случай, когда наблюдатели сначала расстаются, а затем снова встречаются. Они смогут дважды, в начале и конце своей поездки, расположить свои часы рядом и оба раза сличать их непосредственно. Что же покажут эти часы? Если на них было одно и то же время при отъезде, то смогут ли они показывать разное время после встречи в одном и том же месте?

На первый взгляд могло бы показаться, что два наблюдателя, расстающиеся, а затем снова встречающиеся, необходимо должны оказаться в одинаковом положении друг относительно друга. Какую бы поездку

каждый ни совершил, это, в конце концов, относительно; поэтому, казалось бы, каждый наблюдатель вправе заявить, что он вовсе и не путешествовал, а все путешествие сделано другим. Действительно, возникает вопрос: разве не об этом говорит первая аксиома относительности? Разве первая аксиома не утверждает, что два наблюдателя не в состоянии сказать, кто из них двигался, а кто оставался на месте?

Нет, не утверждает. Повторяю — то, о чем говорит первая аксиома относительности, есть нечто гораздо более определенное, нечто гораздо более ограничительное и точное. Первая аксиома гласит, что если каждый из двух наблюдателей представляется другому движущимся с постоянной скоростью по прямой линии, то они не могут сказать, кто из них движется. Но эта аксиома ничего не говорит о наблюдателях, движущихся произвольно. Она ничего не говорит о них, когда они не движутся по прямым линиям, ничего не говорит о них также, когда они не движутся с постоянными скоростями.

Здесь и возникает затруднение. Два наблюдателя, разъезжающиеся и снова встречающиеся, не могут удовлетворять условиям первой аксиомы относительности в течение всей такой поездки. Предположим, что один из них остается в покое. Тогда другой может двигаться по прямой линии как при отъезде, так и при возвращении. Но если он поступает так, то он обязан в какой-то точке повернуть назад, т. е. он обязан где-то изменить свою скорость. Путешественник может двигаться и с постоянной скоростью, но в этом случае он не может двигаться по прямой линии: он вынужден двигаться по кривой, если хочет вернуться в исходную точку. Два наблюдателя, разъезжающиеся и затем встречающиеся, могут, если пожелают, выполнить одно из условий первой аксиомы относительности, но не смогут выполнить оба условия.

И сразу же, как только путешественник нарушит условия первой аксиомы, он почувствует, что он движется. Он ощутит внешние силы, вызывающие изменение движения. Если он перемещается по прямой линии и должен остановиться, он почувствует физически, что он замедляется; имея при себе акселерометр, он сможет сказать это, взглянув на него. На деле ему достаточно иметь с собой только ведро воды: если поверхность

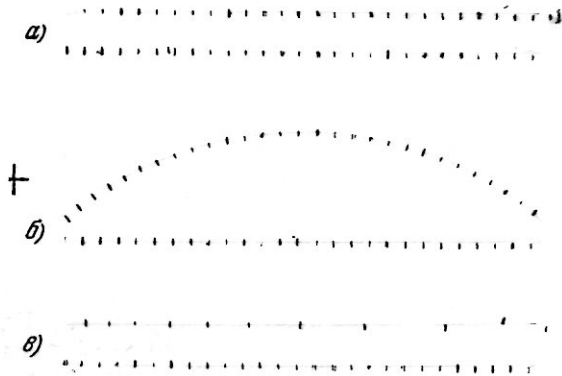


Рис. 7.3. Три типа относительного движения, обсуждаемые в тексте, представлены здесь крайне схематично. Лишь один из них (а) удовлетворяет условиям первой аксиомы относительности: два наблюдателя не могут сказать, кто из них движется, если каждый представляется другому движущимся прямолинейно (стрелка) и с постоянной скоростью (расстояние между каждой парой вертикальных черточек изображает какую-то произвольную единицу времени), и они никогда не встретятся опять. Два наблюдателя, которые разъезжаются и съезжаются снова, в состоянии сказать, кто из них движется, а кто остается на месте, но они не могут удовлетворить сразу обоим требованиям первой аксиомы. Принимая за стандартную систему систему отсчета одного наблюдателя (нижняя стрелка на б и на в), который поэтому находится «в покое», мы видим, что траектория путешественника должна изгибаться, если его скорость постоянна (б), или если он движется по прямой линии, то он должен повернуть в какой-то точке обратно, что заставит его сначала замедлиться (в).

начинает наклоняться, то он знает, что его скорость изменяется. Точно так же, если путешественник описывает кривую, то он может сказать, что движется, по испытываемому им ускорению, захватив с собой тот же акселерометр или ведро воды. Мы не можем обнаружить постоянную скорость вдоль прямой линии: это и есть первая аксиома относительности. Но мы можем обнаружить любое ускоренное движение: это есть физический закон, в котором всех убеждает опыт. Лежа темной ночью в спальном купе, мы можем оказаться не в состоянии утверждать, что поезд движется. Но мы можем это утверждать, когда поезд тормозит или идет по закруглению пути. Мы уверены в своем движении, потому что нас толкает, мы действуем сами, как акселерометр.

Поэтому, если я остаюсь дома, а вы уезжаете и возвращаетесь, то отношение между нами не симметрично. Вы можете сказать, что совершили путешествие, даже если вы путешествовали в поезде без окон, — вы можете сказать это, взяв с собой акселерометр. А я могу сказать, что оставался дома, так как мой акселерометр не зарегистрировал никакого изменения ни скорости, ни направления. Путешественника, совершающего поездку с возвращением, можно отличить от того, кто оставался дома.

Посмотрим теперь, что случится с вашими часами, т. е. с часами путешественника. Вообразим себе, что ваша круговая поездка разбита на ряд коротких прямолинейных участков, вдоль каждого из которых вы можете свою скорость сохранять постоянной. Тогда вдоль каждого короткого участка мне будет казаться, что ваши часы идут медленнее моих. Когда вы возвратитесь, ваши часы будут отставать от моих как раз на сумму этих отставаний: вы бы состарились меньше, чем я. Может ли так быть? Может — и так оно и есть. Разница в нашем счете времени не противоречит никакой симметрии, которую вы могли бы предположить в этой ситуации. Это не противоречит и вашим наблюдениям, что вдоль коротких участков мои часы кажутся вам отстающими по сравнению с вашими. Ваши наблюдения не складываются потому, что вы не остаетесь верны первой аксиоме относительности: ваше представление о моем времени меняется при каждом резком движении от одного прямолинейного участка к другому. И только лишь мое представление о ваших потерях времени постоянно накапливается, потому что я остаюсь верен первой аксиоме относительности в течение всего времени.

Все это предвидел Эйнштейн в своей работе по специальной теории относительности. Вот что он писал в 1905 г.: «Если в точке A имеется пара синхронизованных часов и если один из них движется вдоль замкнутой кривой с постоянной скоростью v , пока не вернется назад в A , на что, предположим, понадобится t секунд, то последние часы, возвратясь в A , будут иметь потерю в $\frac{1}{2} t \left(\frac{v}{c}\right)^2$ секунд по сравнению с часами, которые оставались на месте. Отсюда мы выводим, что часы, закрепленные на земном экваторе, будут отставать на очень малую величину от тождественных часов, закрепленных на одном из полюсов». Никто не смог бы предположить в 1905 г., что это предсказание может быть подвергнуто практической проверке. Тогда должно было казаться невероятным, что такую малую величину можно измерить — разность в одну десятимиллионную долю секунды за день между часами на экваторе и часами у одного из полюсов согласно мысленному эксперименту Эйнштейна. И все же такие малые величины за последние годы стали доступны эксперименту. Был осуществлен эксперимент, в точности соответствующий эйнштейновской модели кругового путешествия.

В этом эксперименте круговое турне очень мало по масштабу в сравнении с грандиозными спекуляциями с космическими путешествиями, на которые ссылаются для иллюстрации этого принципа. Благодаря открытию немецкого физика Р. Л. Мёссбауэра оказалось возможным настроить радиоактивный источник гамма-фотонов в резонанс с поглотителем этих фотонов в очень узком интервале частот. Экспериментальная установка, основанная на эффекте Мёссбауэра, состоит из алюминиевого вращающегося столика, на оси которого смонтирован излучатель фотонов, радиоактивный изотоп железа (железо-57). На периферии вращающегося столика смонтирован резонирующий поглотитель, сделанный из того же самого изотопа железа.

Поглотитель играет роль движущихся часов; каждый поглощенный фотон — это одно тиканье часов, настроенных в унисон. За пределами

периферии находится стационарный счетчик, регистрирующий те фотоны, которые проходят через поглотитель. Каждый фотон, прошедший через поглотитель и зарегистрированный, — это то тиканье, которое пропущено движущимися часами. Эффект Мёссбауэра настолько чувствителен, что эта установка позволяет сравнивать разницу в «тиканье» поглотителя (когда он движется с различными скоростями) с точностью до 10^{-12} . Число зарегистрированных фотонов было на самом деле существенно различным, когда столик, диаметром всего в шесть дюймов, вращался со скоростью 50 и 500 оборотов в секунду, каждый раз в течение 30 минут. (При таких оборотах «часы» на периферии движутся со скоростью примерно 50 и 500 миль/час.) Формула Эйнштейна предсказывает в условиях этого

эксперимента замедление в $\frac{1}{2} \cdot 10^{-9}$ сек при первом и втором числе оборотов.

Это в точности та величина, которую нашли Дж. Дж. Хэй и его коллеги в центре атомных исследований в Харуэлле в Англии.

Значит, нет сомнений, что парадокс часов отвечает истине. В массе радиоактивных атомов на периферии вращающегося столика произошло меньше распадов, чем в идентичной массе атомов, оставшихся в покое. Оказывается, что часы, участвовавшие в круговом путешествии, обнаруживают по возвращении отставание относительно часов, которые я оставил дома. Близнец при круговом путешествии стареет меньше в нормальном смысле физического старения, чем близнец, оставшийся дома.

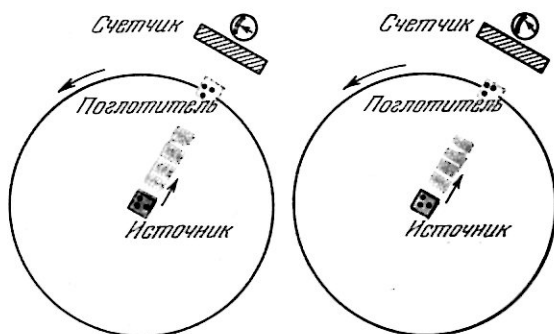


Рис. 7.4. Релятивистские эффекты движения были обнаружены с помощью экспериментальной установки, приблизительная схема которых показана на рисунке. Источник радиоактивных ядер железа-57 излучал гамма-фотоны резко определенной частоты. Резонирующий поглотитель, содержащий ядра железа-57, сильно поглощал фотоны, которые были в резонансе. Неподвижный счетчик регистрировал фотоны, падающие на него непосредственно от поглотителя (т. е. испущенные поглотителем), а также любые фотоны, которые могли пройти прямо от источника сквозь поглотитель. Отношение показаний было больше, когда диск вращался со скоростью 500 оборотов в секунду, чем в том случае, когда эта скорость была 50 оборотов (слева). Расстройка резонанса позволяла большему числу фотонов проходить от источника непосредственно сквозь поглотитель к счетчику.

Давайте подытожим сказанное. В парадоксе часов сравнивается время, истекшее для путешественника при круговом путешествии, с временем, истекшим для его двойника, оставшегося дома. Время течет медленнее для путешественника: он стареет меньше, чем остающийся дома. Это кажется парадоксом потому, что мы спрашиваем, как можно отличить путешественника от оставшегося дома, после того как они снова вместе. Парадокс разрешается, когда мы показываем, что их можно отличить друг от друга: путешественник при круговой поездке подвергался ускорениям, которые он наблюдал и регистрировал, и это-то и отличает его от оставшегося дома. Только лишь в том случае, если путешественник сохраняет верность первой аксиоме относительности, между ним и оставшимся дома будет симметрия. Это значит, что путешественник должен двигаться с постоянной скоростью по прямой линии. Но если он сделает так, то он никогда не вернется домой; круговая поездка не состоится.

Мы достаточно поговорили об этом парадоксе и о его решении. И все же мы не можем полностью удовлетвориться этим. Остается вопрос: почему специальная теория относительности выделяет из всех возможных видов движения движение по прямой линии с постоянной скоростью? Почему путешественник не может сказать, находится он в таком состоянии движения или находится в состоянии покоя? И почему он сразу может сказать, что он находится в любом другом состоянии движения?

Насколько мы знаем, в мире нет никаких других причин для этого, кроме того, что мир так устроен. Эмпирический факт природы состоит в этом и ни в чем другом; наша система механики «работает» на этой основе, а не на какой-нибудь другой. Так, когда мы анализируем парадокс двух часов, мы приходим к выводу, что в центре его лежит важнейший постулат о нашем физическом мире: движение по прямой линии с постоянной скоростью есть, в каком-то смысле, основное состояние. В учении об относительности это не ново; напротив, это было формально установлено в законах движения, выдвинутых Ньютоном в XVII столетии. Законы Ньютона утверждают, что тело продолжает пребывать в покое или в состоянии равномерного прямолинейного движения, пока на нем не сказываются внешние воздействия. Это уже эквивалентно первой аксиоме относительности: покой нельзя отличить от равномерного прямолинейного движения.

Но ньютоновы законы в свою очередь только выразили в явном виде то, о чем философы начали говорить уже за 300 лет до этого. Перелом намечился еще до Ньютона в среде парижских философов XIV столетия. До этого времени физика Фомы Аквинского следовала за греками, и особенно за Аристотелем, утверждая, что стрела продолжает свой полет лишь потому, что воздух толкает ее от точки к точке. Впервые против этого возразил Жан Буридан и другие парижские философы XIV столетия, когда они провозгласили доктрину об «импетусе», (силе движения) — доктрину, что стрела переносится при своем полете своим первым импульсом. Они первыми поняли, что движение, полет стрелы, продолжает быть само по себе.

Современная физика основана на этом принципе: естественное и продолжающееся состояние вещей есть равномерное прямолинейное движение. В противоположность этому греки считали, что естественное состояние — это движение по кругу. В нашей физике, если часы движутся по кругу, то их движение является вынужденным, они испытывают ускорение и в результате отстают при поездке с возвращением. Таким образом, парадокс часов делает наглядным различие между нашими представлениями о естественном мире и представлениями греков.

П. А. М. Дирак

ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ ПРИРОДЫ

(МАЙ 1963 г.)

Рассказ о том, как физическая теория развивалась в прошлом и чего, в свете этого развития, можно ждать от нее в будущем.

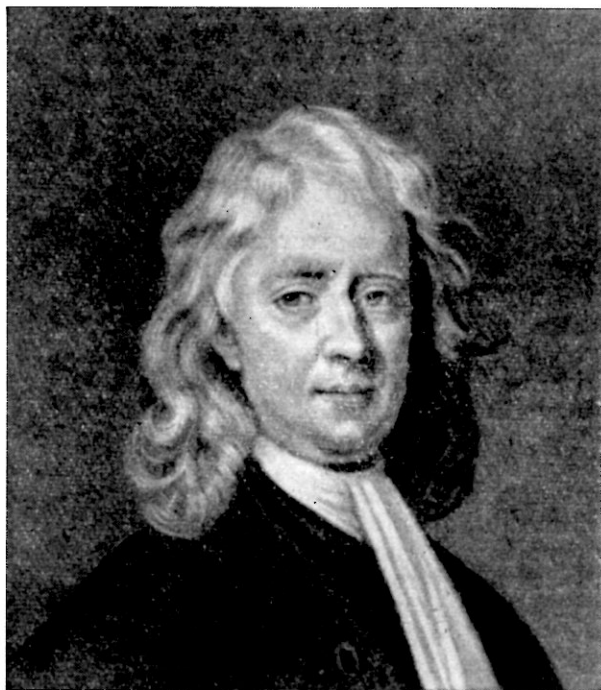
В этой статье мне хотелось бы рассказать о видоизменении общей физической теории: как она развивалась в прошлом и чего от нее можно ожидать в будущем. Это непрерывное развитие можно рассматривать как процесс эволюции, который продолжается уже несколько столетий.

Первый важный шаг в процессе этой эволюции был сделан Ньютоном. До Ньютона люди, по существу, рассматривали мир как нечто двумерное, ибо человек мог передвигаться по двум направлениям: направление «вверх — вниз» рассматривалось как нечто совсем иное. Ньютон показал, что физические законы природы обладают такой симметрией, что направление «вверх — вниз» можно рассматривать наравне с двумя другими направлениями, если ввести силу тяготения. Этим Ньютон выяснил, какую роль играет сила тяготения в физической теории. Именно поэтому можно считать, что Ньютон позволил нам перейти от картины мира с двумерной симметрией к картине мира с трехмерной симметрией.

Следующий шаг в этом направлении был совершен Эйнштейном, который показал, как можно перейти от картины мира с трехмерной симметрией к картине с четырехмерной симметрией. Эйнштейн ввел время в физическую картину мира и показал, насколько его роль во многих отношениях симметрична трем пространственным измерениям. Но эта симметрия оказалась уже не столь полной. Эйнштейновская картина заставляет нас думать о мире с четырехмерной точки зрения, но эти четыре измерения не полностью симметричны, ибо в этой картине имеются некоторые преимущественные направления. Такими особыми направлениями являются так называемые «нулевые направления», вдоль которых могут двигаться лучи света. Следовательно, четырехмерная картина не является полностью симметричной. И все же четырехмерный мир в достаточной степени симметричен. Неполнота его симметрии проявляется лишь в том, что в уравнениях физики время имеет знак минус, тогда как три пространственные координаты имеют знак плюс (см. верхнее уравнение, стр. 128).

Итак, развитие шло от трехмерной картины к четырехмерной. Это вряд ли обрадует читателя, поскольку его сознанию мир представляется все-таки трехмерным. Можно ли совместить эту очевидную трехмерную картину с четырехмерной, которую, по Эйнштейну, должен требовать физик?

Ответ состоит в том, что нашему сознанию фактически представляется «трехмерное сечение четырехмерной картины». Чтобы из картины Эйнштейна получить то, что представляется нашему сознанию, в данный момент времени следует взять трехмерное сечение, а в более поздний момент мы получим другое трехмерное сечение. Задача физика состоит, главным образом, в увязывании событий в одном таком сечении с событиями в другом подобном сечении, относящемся к более позднему времени, т. е. — в предсказании. Таким образом, картина с четырехмерной симметрией не позволяет понять всю ситуацию. Эта неполнота становится особенно



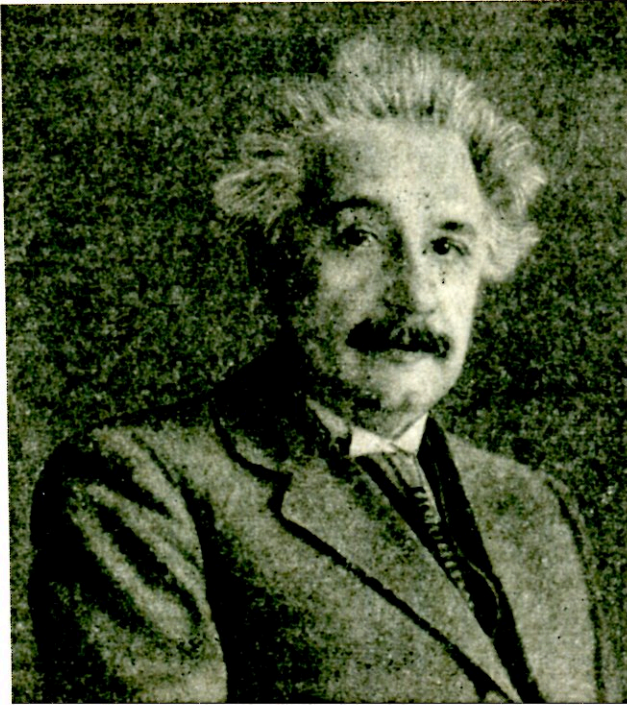
Исаак Ньютон (1642—1727), открыв закон тяготения, позволил нам перейти от физической картины мира с двумерной симметрией к картине с трехмерной симметрией.

существенной, если учесть особенности, обнаруженные с появлением квантовой теории. Квантовая теория учит, что необходимо учитывать процесс наблюдения, а наблюдения, как правило, требуют рассмотрения трехмерных сечений четырехмерной картины Вселенной.

Выдвинутая Эйнштейном специальная теория относительности требует, чтобы мы облакали любые физические законы в такую форму, которая обладала бы четырехмерной симметрией. Однако когда мы пытаемся использовать эти законы для предсказания результатов измерений, то нам приходится чем-то дополнять законы четырехмерной симметрии, поскольку для описания нашего восприятия Вселенной в определенный момент времени требуется производить трехмерное сечение.

Эйнштейну принадлежит еще один важный вклад в развитие физической картины: он создал общую теорию относительности, с точки зрения которой мы должны считать физическое пространство искривленным. До

Эйнштейна физики всегда имели дело с плоским пространством — с трехмерным плоским пространством Ньютона. Затем пространство обобщили до четырехмерного плоского пространства специальной теории относительности. Общая теория относительности внесла поистине важный вклад в эволюцию наших представлений, совершив в нашей физической картине переход к искривленному пространству. Общие утверждения этой теории означают, что все законы физики могут быть сформулированы в искривленном четырехмерном пространстве и что эти законы должны проявлять симметрию по отношению к его четырем измерениям. Но опять-таки, когда



Альберт Эйнштейн (1879—1955), создав специальную теорию относительности, позволил нам перейти от физической картины мира с трехмерной симметрией к картине с четырехмерной симметрией.

мы хотим учесть процесс наблюдения, как этого требует квантовая теория, нам приходится рассматривать сечение этого четырехмерного пространства. Искривленность четырехмерного пространства вызывает определенное искривление и любого его сечения, поскольку, вообще говоря, плоскому сечению искривленного пространства нельзя придать определенного смысла. Но тогда мы приходим к картине, в которой мы должны производить искривленные трехмерные сечения искривленного четырехмерного пространства и рассуждать о наблюдениях в этих сечениях.

В течение нескольких последних лет физики пытались применить квантовые идеи к гравитации, а также к другим физическим явлениям. Развитие теории привело к неожиданностям: когда результаты гравитационной теории рассматривают с точки зрения сечений, то обнаруживают,

что из теории выпадают некоторые степени свободы. Дело в том, что гравитационное поле представляет собой тензорное поле с 10 компонентами. Уже шести этих компонент достаточно для описания всего физически интересного; остальные четыре компонента можно в уравнениях опустить. Нельзя, однако, выхватить шесть физически важных компонент из полной системы 10 компонент, не нарушив при этом четырехмерную симметрию теории. Но если настаивать на неизменности четырехмерной симметрии уравнений, то теорию тяготения невозможно приспособить к тем физическим представлениям об измерениях, которые неизбежно следуют из квантовой теории, не описывая при этом явление намного сложнее, чем



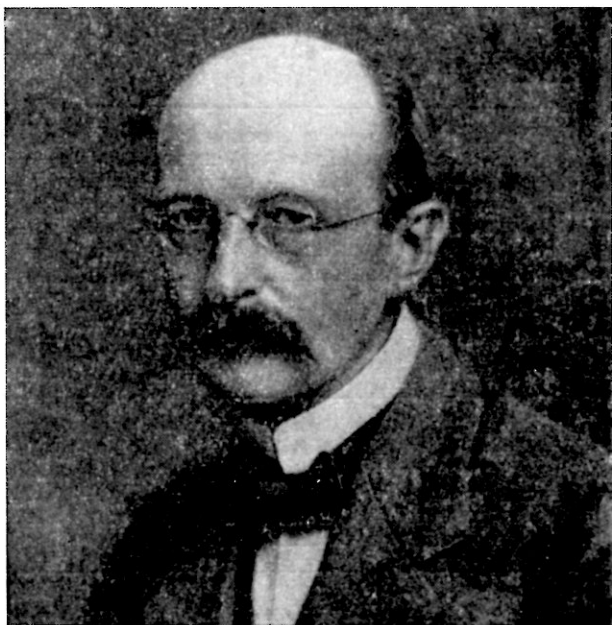
Нильс Бор (1885—1962) предложил идею, согласно которой электрон движется вокруг ядра по вполне определенным орбитам.

этого требуют физические условия. Такой результат заставляет меня поставить вопрос о том, насколько фундаментальным является в физике требование четырехмерной симметрии. Несколько десятилетий назад не было сомнений в том, что всю физику следует выражать в четырехмерной форме. Однако теперь кажется, что четырехмерная симметрия не столь необходима, поскольку при отказе от нее в некоторых случаях описание природы упрощается.

Теперь мне хотелось бы проследить за тем развитием теоретической физики, которое было вызвано квантовой теорией. В квантовой теории рассматриваются чрезвычайно малые объекты, и именно эта теория привлекала главное внимание физиков за прошедшие 60 лет. В этот период физики накопили весьма большое количество эмпирической информации и разработали соответствующую ей теорию. Эта комбинация теории и эксперимента повлекла за собой существенные изменения физической картины мира.

Квант был впервые открыт, когда Планк обнаружил необходимость предположить, что энергия электромагнитных волн существует только в значениях, кратных некоторой единице, зависящей от частоты волн. Иначе нельзя было объяснить закономерности излучения черного тела. Затем Эйнштейн открыл, что существование такой же единицы энергии проявляется в фотоэлектрическом эффекте. В этих ранних работах по квантовой теории приходилось просто постулировать единицу энергии, оставив физическую картину неизменной.

Первой новой физической картиной была модель атома Бора. В картине, принятой Бором, электроны двигались по вполне определенным



Макс Планк (1858—1947) предположил, что электромагнитное излучение состоит из квантов, или частиц.

орбитам, совершая случайные перескоки с одной орбиты на другую. По этой картине нельзя судить о том, каким образом происходят эти перескоки. Мы просто должны их постулировать как некоторого рода разрывы непрерывности. Боровская картина атома, в сущности, пригодна лишь для решения частных задач, в которых представляет интерес поведение только одного электрона. Следовательно, такая картина неполна и примитивна.

Большой успех квантовой теории принес 1925 год, когда была открыта квантовая механика. Этот успех был достигнут независимо двумя физиками: сначала Гейзенбергом, а затем — Шредингером, который подошел к проблеме с несколько иной точки зрения. Работа Гейзенберга была тесно связана с известными к тому времени экспериментальными данными о спектрах. Гейзенберг сумел записать эту экспериментальную информацию в виде формальной схемы, известной в настоящее время под названием матричной механики. В схему матричной механики прекрасно укладывались все известные экспериментальные спектроскопические данные, а

это повлекло за собой совершенно иную картину атомного мира. Исходная точка зрения Шредингера была более математической: он пытался найти красивую математическую теорию для описания атомных явлений. В этих поисках помощь ему оказали идеи де Бройля о волнах, определенным образом связанных с частицами. Шредингеру удалось обобщить идеи де Бройля и получить весьма изящное уравнение, известное под названием «волнового уравнения Шредингера», описывающего атомные процессы. Шредингер вывел это уравнение путем «чистого мышления», в поисках некоторого изящного обобщения идей де Бройля, а не придерживаясь возможно ближе экспериментальной информации, как поступал Гейзенберг.

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Четырехмерная симметрия, введенная в специальной теории относительности, оказалась не совсем полной. Это уравнение дает выражение для интервала в четырехмерном пространстве. Здесь s — интервал, c — скорость света, t — время, x , y и z — три пространственные координаты; ds является дифференциалом. Неполнота симметрии заключается в том, что в уравнениях физики время имеет знак ($c^2 dt^2$), противоположный знаку трех пространственных координат ($-dx^2$, $-dy^2$ и $-dz^2$).

$$\left(\frac{i\hbar}{2\pi c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{e^2}{cr} \right)^2 \Psi = \left[m^2 c^2 - \frac{\hbar^2}{4\pi^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \right] \Psi$$

Первое волновое уравнение Шредингера оказалось противоречащим опыту, так как в нем не учитывался спин электрона, который был тогда еще неизвестен. Это уравнение является обобщением уравнения де Бройля для движения свободного электрона. Здесь e — заряд электрона, \hbar — постоянная Планка, r — расстояние от ядра, Ψ — волновая функция Шредингера, m — масса электрона. Уравнение является уравнением в частных производных.

$$\left(E + \frac{e^2}{r} \right) \Psi = - \frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi$$

Второе волновое уравнение Шредингера — приближенный вариант первого, не учитывающий тонких эффектов теории относительности.

Здесь уместно изложить историю, услышанную мной от самого Шредингера. Когда Шредингер впервые пришел к идее о таком уравнении, он сразу же применил его к электрону в атоме водорода, но это привело к результату, противоречившему опыту. (Такое противоречие возникло из-за того, что в то время был неизвестен спин электрона.) Это, конечно, было огромным разочарованием для Шредингера, и он несколько месяцев воздерживался от продолжения своих исследований. Затем он заметил, что если ограничиться грубо приближенным вариантом теории, не учитывая тонкие эффекты теории относительности, то достигается согласие с результатами наблюдений. И он опубликовал в своей первой статье лишь это грубое приближение. Именно так увидело свет волновое уравнение Шредингера. Конечно, позднее, когда физики научились правильно учитывать спин электрона, смысл расхождения между решениями релятивистского уравнения Шредингера и экспериментами был полностью выяснен.

Эта история, я думаю, имеет свою мораль, а именно: красота уравнений важнее их согласия с экспериментом. Если бы у Шредингера было больше убежденности в своей теории, то он решился бы опубликовать на несколько месяцев раньше более точное уравнение. Такое уравнение известно в настоящее время под названием «уравнение Клейна — Гордона», хотя на самом деле оно было открыто Шредингером еще до того, как он опубликовал свою нерелятивистскую теорию атома водорода. По-видимому, если глубоко проникнуть в сущность проблемы и работать, руководствуясь критерием красоты уравнений, тогда можно быть уверенным, что находишься на верном пути. Если же нет полного согласия между результатами теории и экспериментом, то не стоит слишком разочаровываться, ибо это расхождение вполне может быть вызвано второстепенными факторами, правильный учет которых будет ясен лишь при дальнейшем развитии теории.

Именно так была открыта квантовая механика. Она привела к такому значительному перевороту в наших представлениях о физической картине мира, которого, по-видимому, еще не знала история физики. Сущность этого переворота заключалась в вынужденном отказе от веры в детерминизм, которым всегда наделяли картину мира. Мы пришли, таким образом, к теории, которая не предсказывает события с достоверностью, а дает информацию только о вероятности осуществления различных событий. Такой отказ от детерминизма представляется весьма спорным и вызывает категорические возражения некоторых физиков, к которым, например, относился Эйнштейн. Хотя Эйнштейну принадлежит крупнейший вклад в развитие квантовой механики, он всегда неприязненно относился к той форме квантовой механики, которая была развита при его жизни и сохранилась до сих пор.

Возражения против отказа от детерминистской картины сводятся к аргументам, выдвинутым в работе Эйнштейна, Подольского и Розена. В этой работе излагается трудность создания непротиворечивой картины, которая, с одной стороны, обладает наглядностью, а с другой — дает результаты, соответствующие законам квантовой механики. Сами законы квантовой механики вполне определены. И физики знают, как по этим законам вычислять нужные величины и как сравнивать результаты расчетов с экспериментом. Все согласны с математическим аппаратом теории, ибо этот формализм настолько хорош, что нет оснований не соглашаться с ним. Споры ведутся лишь о той картине, которая скрывается за этим формализмом.

Мой совет — не слишком мучаться в таких спорах. Я чувствую глубокую уверенность в том, что состояние, достигнутое физикой в настоящее время, является переходным, т. е. представляет собой лишь одну из ступеней эволюции нашей картины природы, и следует ожидать, что эта эволюция не остановится, подобно тому как не остановится биологическая эволюция. Нынешняя стадия физической теории представляется просто очередной ступенью к лучшему пониманию природы. Можно быть совершенно уверенным в том, что и в физике наступят лучшие времена. Такую уверенность внушает уже сам факт существования нынешних трудностей физики.

Теперь мне хотелось бы немного остановиться на трудностях современной физики. Читателю неспециалисту может показаться, что из-за всех этих трудностей теоретическая физика находится в бедственном состоянии и что квантовая теория не слишком хороша. Я хотел бы исправить такое впечатление и скажу, что квантовая теория представляет собой чрезвычайно хорошую теорию. Эта теория находится в удивительном согласии

с наблюдениями над весьма широким диапазоном явлений. Нет никаких сомнений, что эта теория правильна. Единственной причиной многочисленных дискуссий о ее трудности является то, что именно трудности больше всего интересуют физиков. Успехи этой теории уже мало кого волнуют. Ведь вы не узнаете ничего нового о теории, узнавая только об успехе за успехом, в то время как преодоление трудностей теории сулит определенные надежды на прогресс.

Квантовая теория испытывает трудности двоякого рода. К первому роду трудностей мы отнесем те, которые я уже упоминал: какая непротиворечивая физическая картина соответствует законам современной квантовой теории? Такие трудности не слишком беспокоят физиков. Если физик умеет вычислить необходимые результаты и сравнивать их с экспериментом, то при согласии с экспериментом он вполне счастлив, потому что именно этого он хотел. Трудности первого рода волнуют только философов, жаждущих получить удовлетворительное описание природы.

Кроме того, существуют трудности второго рода, которые возникают, когда выводы современной квантовой теории бывают недоброкачественными. Если законы современной квантовой теории применять к явлениям в экстремальных условиях (весьма высокие энергии или очень малые расстояния), то иногда получаются либо неоднозначные результаты, либо результаты, вообще не имеющие физического смысла. В таких случаях, очевидно, достигнуты пределы применимости теории и необходимо ее дальнейшее развитие. Для физиков важны именно трудности второго рода, ибо они указывают на границы квантовой теории, за которыми ее уже нельзя сопоставлять с экспериментом.

Я хотел бы еще немного остановиться на трудностях первого рода. Мне кажется, что эти трудности не должны вызывать особого беспокойства, ибо они характерны лишь для современной стадии развития физической картины мира и при будущем развитии теории почти наверняка уступят место другим трудностям. По-моему, существует веский аргумент, определенно говорящий о возможном преодолении этих трудностей. Дело состоит в том, что в природе есть несколько фундаментальных постоянных: заряд электрона e , постоянная Планка (которую обычно делят на 2π и обозначают через \hbar), скорость света c . Из этих фундаментальных постоянных можно построить безразмерное выражение $\hbar c/e^2$, это выражение, согласно экспериментальным данным, равно 137 или близко к этому. Неизвестно, почему это выражение имеет именно такое, а не иное значение. Физики выдвигали по этому поводу различные идеи, однако общепринятого объяснения до сих пор нет. Но нет никаких сомнений, что когда-нибудь физики решат эту задачу и объяснят, почему это число имеет именно такое значение. Законы физики будущего окажутся справедливыми (в отличие от нынешних) только при значении $\hbar c/e^2$, равном 137, а при других значениях они справедливы не будут.

В физике будущего, конечно, не все три величины \hbar , e и c будут фундаментальными. Из этих величин лишь две могут быть фундаментальными, а третья должна выводиться из этих двух. Почти наверное одной из этих двух фундаментальных величин будет c . Скорость света c представляет собой очень важную величину для четырехмерной картины мира, и ее роль в специальной теории относительности весьма существенна (она связывает между собой единицы длины и времени), поэтому она должна быть фундаментальной постоянной. Тогда мы оказываемся перед выбором: из двух величин, \hbar и e , одна фундаментальная, а другая производная. Если бы фундаментальной была \hbar — постоянная Планка, то величина элемен-

тарного заряда e должна выражаться как корень квадратный из \hbar . Однако трудно поверить, что какая-то фундаментальная теория выражает элементарный заряд в виде квадратного корня, поскольку квадратные корни никогда не входят в основные уравнения. Гораздо более вероятно, что постоянная e будет фундаментальной и что \hbar выразится через e^2 . Тогда в основных уравнениях теоретической физики квадратный корень не появится. По-моему, можно вполне определенно предсказать, что мы достигнем такого развития физики, что в картине мира фундаментальными



Луи де Бройль (род. в 1892 г.) выдвинул идею о том, что каждой частице соответствует волна.

постоянными будут элементарный заряд e и скорость света c , а постоянная Планка будет «производной» величиной.

Если же \hbar будет величиной производной, а не фундаментальной постоянной, то изменится все наше понимание принципа неопределенности Гейзенберга: \hbar — представляет собой ту фундаментальную величину, при помощи которой связывают неопределенность положения с неопределенностью импульса. Тогда соотношение неопределенностей утратит свою фундаментальную роль, поскольку в теории сама величина \hbar перестанет быть фундаментальной постоянной. По-моему, можно без риска предсказать, что соотношение неопределенностей в его современном виде «не выживет» в физике будущего.

Конечно, никакого возврата к детерминизму классической физики не будет. Эволюция не идет вспять. Она пойдет вперед. Но развитие может быть настолько неожиданным, что гадать о нем невозможно, однако от классических идей мы отойдем еще дальше. Вместе с тем точка зрения на

соотношение неопределенностей полностью изменится. И когда это произойдет, физики обнаружат, что бесполезно столько спорить о роли наблюдения в теории, ибо они обретут гораздо более ясную точку зрения, с которой они будут рассматривать все явления. Поэтому следует заметить, что если удастся найти способ описания соотношения неопределенностей и индетерминизма современной квантовой механики, удовлетворяющий нашим философским идеям, то мы сможем считать себя вполне счастливыми. Однако если мы не в состоянии найти такой способ, то реального повода для беспокойства все-таки нет. Просто в таком случае следует понять, что современная физическая теория находится в переходном состоянии, в котором, по-видимому, просто невозможно достичь удовлетворительной физической картины.

Я отстранился от трудностей первого рода, подчеркнув, что они не настолько существенны, чтобы преодоление их могло осчастливить физиков-теоретиков, а невозможность преодоления — принималась близко к сердцу. Трудности второго рода действительно серьезны. Они возникают главным образом на следующем пути. Когда мы применяем квантовую теорию к полям, учитывая требования специальной теории относительности и записывая законы движения для трехмерных сечений (как я это уже упоминал), то получаем уравнения, которые на первый взгляд не вызывают сомнений. Однако при попытке решать эти уравнения оказывается, что решений вообще не существует. В подобных случаях следовало бы сказать, что теория несостоятельна. Однако здесь физики проявили огромную изобретательность и смогли достичь некоторого успеха, несмотря на эти неприятности. Они обнаружили, что решению уравнений мешает то, что определенные величины, которые должны оставаться конечными, оказываются бесконечными. Возникают интегралы, которые не могут иметь конечных значений. Но физики отыскали определенные правила обращения с этими бесконечностями, позволяющие получать конечные результаты. Эти правила известны под названием «метода перенормировки».

Я объясню на словах идею метода перенормировки. Мы исходим из теории, включающей в себя некоторые уравнения. В эти уравнения входят определенные параметры: заряд электрона e , масса электрона m и т. д. Затем оказывается, что эти величины, входящие в первоначальные уравнения, не равны измеряемым на опыте значениям заряда и массы электрона. Измеряемые значения отличаются от них определенными поправочными членами: Δe , Δm и т. д., так что в итоге заряд составляет $e + \Delta e$, а масса $m + \Delta m$. Эти изменения в заряде и массе обуславливаются взаимодействием элементарной частицы с другими объектами. Затем утверждается, что интерес представляют только эти наблюдаемые значения $e + \Delta e$ и $m + \Delta m$. Первоначальные e и m объявляются всего лишь математическими параметрами; они ненаблюдаемы и являются лишь формальным средством для получения величин, сравниваемых с наблюдениями; эти параметры отбрасываются после использования. Все это выглядело бы вполне корректно, если бы поправки Δe и Δm были малы (или хотя бы не малы, но конечны). Однако, в соответствии с современной теорией, поправки Δe и Δm бесконечны. Несмотря на это, можно применять формальный аппарат теории и получать результаты, в которые входят величины $e + \Delta e$ и $m + \Delta m$. Эти результаты можно интерпретировать, считая, что первоначальные e и m должны быть такими бесконечно большими отрицательными величинами, которые нужным образом компенсируют бесконечно большие поправки Δe и Δm . Это позволяет использовать теорию для получения результатов, которые можно сравнивать с опытом, в частности —

для квантовой электродинамики. Особенно удивительно то, что в случае электродинамики таким методом получены результаты, чрезвычайно хорошо согласующиеся с экспериментом. Результаты согласуются до таких порядков, что для сравнения можно сослаться лишь на астрономию.



Эрвин Шредингер (1887—1961), обобщив идею де Бройля, предложил уравнение, известное под названием «волнового уравнения», описывающее движение электронов вокруг ядра.

Именно из-за этого прекрасного согласования физики придают известное значение теории перенормировок, несмотря на то что с логической точки зрения она совершенно несостоятельна.

Представляется совершенно невозможным математически строго обосновать эту теорию. Было время, когда физическая теория целиком строилась на вполне строгом математическом фундаменте. Я вовсе не утверждаю, что физики всегда пользуются строгими математическими утверждениями: в выкладках они часто употребляют различные приближения. Однако в прежние времена они вели себя подобным образом, если так можно выразиться, просто из-за лени. Они хотели как можно быстрее и без излишних усилий получить результат. И строгий математик всегда мог, иногда ценою введения громоздких обозначений и других приемов, которые желательны для большей математической строгости, но не влияют на физические идеи, довести теорию до математического совершенства. Математики былых времен всегда умели наводить такого рода порядок в теории. Однако теория перенормировок не поддается никаким усилиям

математиков сделать ее строгой. Я склонен к мысли, что перенормировочная теория не выживет в будущем, а замечательное согласие ее результатов с опытом следует рассматривать как счастливое совпадение.

Это совпадение, однако, не должно вызывать слишком сильного удивления, поскольку подобные счастливые находки случались и в прошлом. Боровская теория электронных орбит очень хорошо согласовалась с опытом, пока ограничивалась одноэлектронными задачами. Теперь физик, я думаю, скажет, что это согласие было счастливой удачей, поскольку основные идеи орбитальной теории Бора были заменены совершенно иными идеями. Успех перенормировочной теории, по-моему, очень сходен с успехом теории боровских орбит в одноэлектронных задачах.

Перенормировочная теория устранила некоторые трудности второго рода, если не говорить о крайне нелогичном способе отбрасывания бесконечностей, однако она не устранила всех трудностей. Частицы создали множество проблем, которые не рассматриваются в квантовой электродинамике; эти проблемы относятся к новым частицам — мезонам различного вида и нейтрино. Теория этих частиц все еще крайне примитивна. Можно совершенно определенно утверждать, что эти проблемы будут решены только после сильнейших изменений в наших фундаментальных идеях.

К этим проблемам относится упомянутая мною выше задача объяснения числа 137. Другие проблемы касаются попытки ввести в физику каким-то естественным способом фундаментальную длину, попытки объяснить отношения масс элементарных частиц и другие свойства частиц. По-моему, для решения столь различных проблем требуются и различные идеи, так что эти проблемы будут решены одна за другой в ходе дальнейшей эволюции физики. В этом вопросе мое мнение расходится с мнением большинства физиков, которые склонны верить в некую руководящую идею, открытие которой разрешит сразу все эти проблемы. Мне кажется, что тем самым возлагаются чересчур большие надежды на того, кто мог бы решить сразу все эти проблемы. Следовало бы, напротив, как можно тщательнее разделить эти проблемы и пытаться решить их порознь. И я верю, что развитие физики будет состоять из отдельных успехов в области каждой проблемы и что после разрешения каждой проблемы будет оставаться по-прежнему великой загадкой вопрос о том, как поступить с остальными проблемами. Я могу, пожалуй, изложить и свои собственные идеи о том, как можно решить некоторые упомянутые проблемы. Ни одна из этих идей не является достаточно разработанной, и ни на одну из них я не возлагаю слишком больших надежд. Тем не менее я думаю, что на этих идеях все же стоит кратко остановиться.

Одна из этих идей состоит во введении в физическую теорию некоторого аналога светового эфира, столь популярного среди физиков XIX столетия. Я уже говорил о том, что развитие физики не идет вспять. Когда я говорю о возвращении к эфиру, то речь не идет об эфире XIX века, а имеется в виду введение в физическую картину мира нового представления об эфире, которое соответствует современным идеям квантовой теории. Суть возражений против старой идеи об эфире состояла в следующем. Если эфир представлять в виде жидкости, заполняющей все пространство, то в любой точке эта жидкость должна иметь определенную скорость. Однако такая скорость нарушала бы четырехмерную симметрию, т. е. противоречила бы специальному принципу относительности Эйнштейна. Специальная теория относительности уничтожила такое представление об эфире.

Однако, согласно современной квантовой теории, мы не можем приписывать вполне определенную скорость какому-либо физическому

объекту, ибо скорость подчиняется соотношению неопределенностей. По этому соотношению, чем меньше масса рассматриваемого объекта, тем менее определена его скорость. Безусловно, масса частиц эфира должна быть чрезвычайно малой, и применение к нему соотношения неопределенностей имело бы существенные следствия. Применение этого соотношения к эфиру должно давать чрезвычайно сильную неопределенность скорости эфира в любом данном месте: эта скорость в широком диапазоне значений может быть любой. Именно это позволяет устранить возражения против эфира, выдвинутые специальной теорией относительности.



Вернер Гейзенберг (род. в 1901 г.) создал матричную механику, которая, как и теория Шредингера, относится к движению электрона.

Однако это вызовет важное изменение в наших представлениях о вакууме. Мы сейчас склонны считать вакуум полностью симметричным по отношению ко всем четырем измерениям пространства — времени, как это требуется специальной теорией относительности. Если же в вакууме существует эфир, подчиняющийся соотношению неопределенностей, то упомянутая симметрия, вообще говоря, нарушается. Можно, правда, предположить, что скорость эфира с одинаковой вероятностью может быть любой в достаточно широком диапазоне. Тогда вакуум с известной степенью точности будет обладать четырехмерной симметрией. Мы не можем перейти строго к пределу, при котором допустимы любые скорости — от плюс до минус скорости света, — хотя именно такой разброс скоростей должен быть при полной симметрии (в смысле специальной теории относительности). Поэтому вакуум должен считаться таким состоянием, которое недостижимо. Бряд ли это можно считать физическим аргументом

против предлагаемой теории вакуума. Просто вакуум представляет собой состояние, к которому мы можем сколь угодно близко подойти, никогда его не достигая. По-моему, это вполне удовлетворило бы физика-экспериментатора. Но это означало бы отказ от концепции вакуума в обычной квантовой теории, которая исходит из вакуумного состояния, обладающего полной симметрией, требуемой специальной теорией относительности.

Такова одна из идей, развитие которой привело бы к изменению нашего представления о вакууме в физике будущего, причем такое изменение нельзя считать неприемлемым для физика-экспериментатора. Детальная разработка такой теории встречается с трудностями, обусловленными сложностью математической формулировки соотношения неопределенностей для эфира. Поэтому удовлетворительная теория такого эфира еще не создана. В случае ее появления в теоретической физике появилась бы теория нового поля и можно было бы надеяться на объяснение свойств некоторых элементарных частиц.

Мне хотелось бы упомянуть и другую возможную физическую картину, которая относится к вопросу о том, почему все электрические заряды, наблюдаемые в природе, должны быть кратными одному элементарному заряду e ? Почему нигде в природе заряд не распределяется непрерывно? Я предлагаю физическую картину, представляющую собой развитие старой идеи о фарадеевских силовых линиях. Фарадеевские силовые линии — это наглядный образ электрических полей. Если в некоторой области пространства имеется электрическое поле, то, по Фарадею, мы можем изобразить его в виде системы линий, направление которых в каждой точке совпадает с направлением электрического поля. Густота силовых линий определяет силу электрического поля: чем ближе сходятся линии, тем сильнее поле, и наоборот. Фарадеевские силовые линии дают нам превосходную картину электрического поля с точки зрения классической теории.

Переход к квантовой теории должен повлечь за собой определенную дискретность основной физической картины. Можно предположить, что все непрерывное множество силовых линий классической теории Фарадея заменяется немногими дискретными силовыми линиями, между которыми никаких силовых линий уже нет.

Более того, силовые линии в фарадеевской картине оканчиваются на зарядах. Поэтому квантование фарадеевских силовых линий подразумевало бы, что с концом каждой линии, если такой конец существует, связан заряд, абсолютная величина которого всегда совпадает с зарядом электрона, т. е. составляет либо $-e$, либо $+e$. Каждой линии приписывается вполне определенное направление, так что концы линии неодинаковы. Если на одном конце заряд $-e$, то на другом заряд $+e$. Такие силовые линии, конечно, могут уходить в бесконечность (или быть замкнутыми), и тогда они не связаны с зарядами.

Если предположить, что эти дискретные силовые фарадеевские линии представляют собой нечто фундаментальное в физике и что на их основе должна строиться вся картина электромагнитного поля, тогда мы получаем ответ на вопрос, почему заряды всегда оказываются по своей величине кратными e . Объяснение состоит в том, что поскольку каждой частице соответствует конец силовой линии, то число силовых линий должно быть целым. Таким образом, мы приходим к физической картине, которая естественно весьма удовлетворительна.

Предположим, что эти линии могут двигаться. Некоторые из них, образующие замкнутые петли или просто простирающиеся от минус до

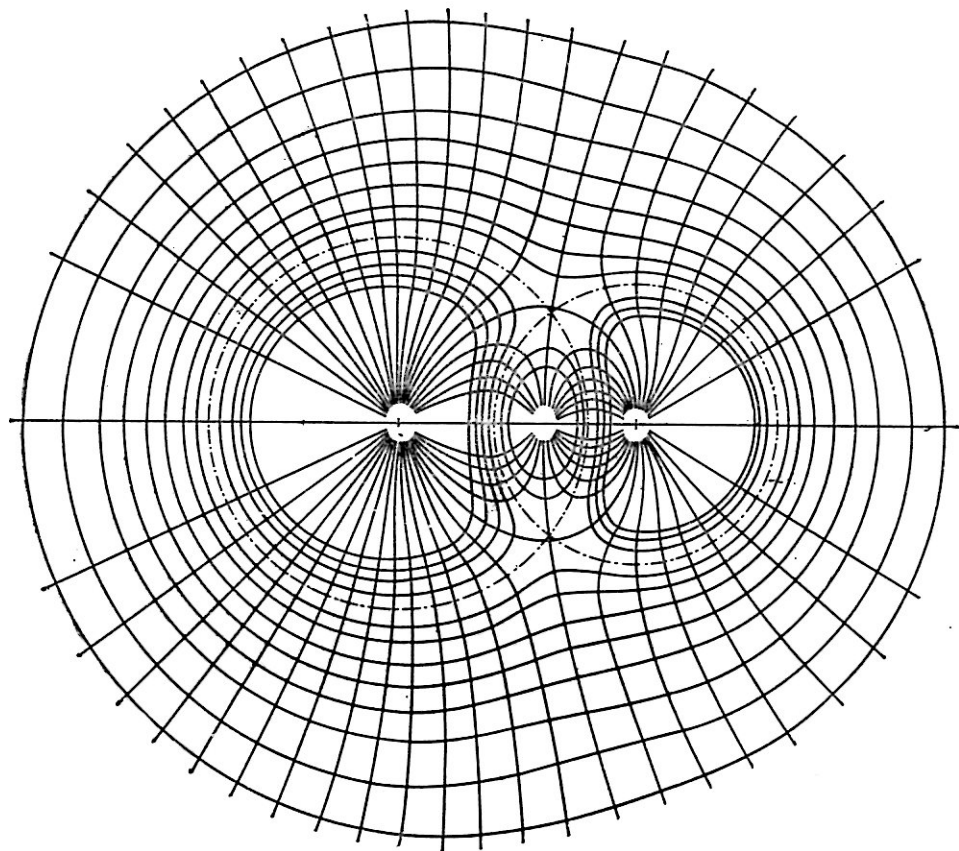
плюс бесконечности, будут соответствовать электромагнитным волнам. У других будут концы, и эти концы будут зарядами. Иногда может происходить разрыв силовой линии. Когда это происходит, то появляются два конца, которые должны представлять собой заряды. Такой процесс разрыва силовой линии можно было бы представлять себе как картину рождения пары электрон ($-e$) — позитрон ($+e$). Подобная картина вполне разумна, и если бы ее удалось разработать, то это дало бы теорию, в которую заряд e входил бы в качестве фундаментальной величины. Я не смог пока найти какой-либо разумной системы уравнений для движения этих силовых линий, и эту идею я выдвигаю просто в качестве возможного физического образа. Особенно привлекательна одна черта предлагаемой картины. В ней совершенно меняются все рассуждения о перенормировке. С перенормировкой приходится иметь дело, поскольку в нынешней квантовой электродинамике исходят из того, что физики называют «голым» электроном — электроном без заряда. На определенной стадии в теорию вводят заряд и приписывают его электрону, заставляя его тем самым взаимодействовать с электромагнитным полем. Но это приводит к появлению возмущений, в результате которых уравнения дают изменение массы электрона на величину Δm , которую следует добавить к первоначальной массе электрона. Такой теоретический метод представляется слишком приближенным, ибо он исходит из мало понятной физически концепции «голового» электрона. В улучшенной физической теории, по-видимому, «голового» электрона не будет вообще.

Такое положение дел совпадает с тем, что мы имеем, используя дискретные силовые линии. Мы можем изображать эти силовые линии в виде натянутых струн. Электрон тогда изображается концом струны. Сама струна представляет собой кулоновскую силу вокруг электрона. «Голый» же электрон соответствовал бы электрону, не окруженному кулоновским полем. Такой электрон с точки зрения нашей картины непостижим, подобно тому как трудно представить себе конец струны без самой струны. Это, по-моему, один из путей, по которому можно развивать физическую картину природы. Мы должны привлекать к созданию этой картины идеи, доводящие до абсурда концепции, которые нам нежелательно иметь в физической картине мира. И на этом пути возникает картина, которая выглядит разумно, но и здесь мне не удалось найти уравнения, соответствующие этой картине.

Можно упомянуть и третью картину, которой я занимался в последнее время. Она подразумевает отказ от представления об электроне как о точке. В этой картине электрон представляет собой что-то вроде сферы конечного размера. Сама идея об электроне как о сфере, конечно, не нова. Однако прежде возникали трудности при рассмотрении ускоренного и нерегулярного движения этой сферы. Такие движения приводили к искажениям сферы, с которыми не знали, что делать. Я предполагаю, что электрон, вообще говоря, может обладать любой формой и размером. Некоторым формам и размерам будет соответствовать меньшая энергия, чем другим. Это заставляет предполагать, что электрон с наименьшей энергией имеет сферическую форму определенного размера.

Представление о протяженном электроне стимулировано открытием мю-мезона, или «мюона» — одной из новых частиц. Мюон удивителен тем, что он почти ничем не отличается от электрона, за исключением того, что его масса примерно в 200 раз больше массы электрона. В остальном мюон удивительно похож на электрон, обладая, как доказано с очень высокой точностью, таким же спином и таким же отношением магнитного момента

к массе, как у электрона. Это дает повод предполагать, что мюон можно считать возбужденным электроном. Если электрон представляет собой точку, то довольно затруднительно представить его возбужденное состояние наглядно. Но если электрон представляет собой наиболее устойчивое состояние объекта, обладающего конечными размерами, тогда мюон можно представлять в виде следующего наиболее устойчивого колебательного состояния этого объекта. Именно к этому сводится идея, которая занимает меня в настоящее время. Разработка этой идеи встречает трудности, в особенности при попытке ввести нужное значение спина.



Силловые линии электромагнитного поля, если считать их дискретными в квантовой теории, показывают, почему все электрические заряды всегда кратны заряду электрона. По идее Дирака, когда силовая линия имеет два конца, то одному из них соответствует заряд $-e$ (электрон), другому $+e$ (позитрон). Когда происходит разрыв силовой линии, рождается пара электрон — позитрон.

Мною упомянуты три возможных пути, по которым, на мой взгляд, могло бы пойти развитие физической картины мира. Нет никаких сомнений в том, что другие физики думают о других путях. Некоторые физики надеются, что рано или поздно кто-нибудь найдет идею, верно ухватывающую суть дела и приводящую к быстрому развитию теоретической физики. Я довольно пессимистично настроен на этот счет и склонен полагать, что ни одна из таких идей не окажется достаточно хорошей. Будущее измене-

ние основ физики, т. е. изменение, которое приведет к подлинному решению какой-либо фундаментальной проблемы, вроде проблемы фундаментальной длины или вычисления отношений масс элементарных частиц, потребует нескольких коренных изменений нынешней физической картины природы. Но это означает, что нынешние попытки представить себе новую физическую картину порочны, ибо они основаны на соображениях, которые используют несоответствующие физические концепции. Но если это так, то на какой прогресс в будущем можно вообще рассчитывать?

У теоретической физики есть еще один верный путь развития. Природе присуща та фундаментальная особенность, что самые основные физические законы описываются математической теорией, аппарат которой обладает необыкновенной силой и красотой. Чтобы понять эту теорию, нужно обладать необычайно высокой математической квалификацией. Вы можете спросить: почему природа устроена именно так? На это можно ответить только одно: согласно нашим современным знаниям, природа устроена именно так, а не иначе. Мы должны просто принять это как данное. Наши жалкие математические усилия позволяют пока понять во Вселенной лишь немного. Но развивая все более совершенные математические методы, мы можем надеяться и на лучшее понимание Вселенной.

Такая методология указывает нам еще один путь к возможному прогрессу теоретической физики. Именно математические исследования дают надежду угадать, каким будет аппарат будущей теоретической физики. Математические основы квантовой теории разрабатываются многими физиками, которые прилагают усилия для лучшего понимания теории и для придания ей большей силы и большей математической красоты. Если кто-либо сможет напасть на правильный путь, ведущий к такому развитию физики, то это приведет к дальнейшим успехам: сначала будут открыты искомые уравнения, а затем, после анализа этих уравнений, будут постепенно выясняться способы их применения. До некоторой степени такая картина развития соответствует истории открытия волнового уравнения Шредингером. Вся простота открытия Шредингера обусловлена именно поисками уравнения, обладающего математической красотой. После открытия такого уравнения физики убедились, что оно в определенных задачах приводит к правильным ответам, однако общие принципы применения этого уравнения были разработаны лишь двумя-тремя годами позже. Вполне может оказаться, что следующий решающий успех в физике придет именно так: сначала удастся открыть уравнения, и только спустя несколько лет выяснятся физические идеи, лежащие в основе этих уравнений. Я убежден, что следует полагаться именно на такой путь, а не на попытки угадать правильную физическую картину.

Может оказаться, конечно, что даже и этот путь не приведет к успеху. Тогда останется только экспериментальный путь. Трудности теории не останавливают работу экспериментаторов, накапливающих все большую и большую информацию. И рано или поздно появится новый Гейзенберг, способный уловить существенные особенности этой информации и открыть метод её использования, подобно тому как Гейзенберг использовал экспериментальные данные по спектрам для построения матричной механики.

Совершенно несомненно, что продвижение физической науки будет обеспечено в конце концов даже одним этим путем, но может случиться, что нам придется довольно долго ждать переломных успехов, если физики-теоретики не смогут внести свежие идеи, которые обеспечат необходимое развитие теории.

СОДЕРЖАНИЕ

От издательства	3
<i>Дж. Фейнберг и М. Голдхабер</i> , Законы сохранения в физике	5
<i>С. Трейман</i> , Слабые взаимодействия	20
<i>Ш. Пенман</i> , Мюон	35
<i>Л. Ледерман</i> , Двухнейтринный эксперимент	51
<i>Р. Хилл</i> , Резонансные частицы	68
<i>Дж. Чу, М. Гелл-Мани, А. Розенфельд</i> , Сильно взаимодействующие частицы	83
<i>Дж. Броновский</i> , Парадокс часов	113
<i>П. Дирак</i> , Эволюция физической картины природы	123

Цена 43 коп.

Настоящий сборник научно-популярных статей является третьим выпуском неперодической серии под общим названием «Над чем думают физики». Каждый сборник этой серии посвящается какому-либо важному разделу современной физики. Статьи написаны известными учеными, крупными специалистами в своей области, в статьях рассказывается об интересных и важных открытиях, сделанных непосредственно самими авторами, исследованиях, ведущихся ими сейчас, о новых замыслах и предположениях. Эти сборники помогут читателю оказаться на переднем крае современной физики, познакомят его с сегодняшними и завтрашними проблемами.

В данный сборник включены статьи по различным проблемам физики элементарных частиц. Все статьи взяты из американского научно-популярного журнала «Scientific American».