

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.1

ОБНАРУЖЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНЫХ СЛАБЫХ ТОКОВ *)**Д. Клайн, А. Манн, К. Руббия**

Экспериментальное обнаружение нового типа взаимодействий элементарных частиц, не наблюдавшегося ранее, существенно подкрепляет идею о том, что имеется глубокая взаимосвязь между слабыми и электромагнитными силами.

Осознание того факта, что какие-то кажущиеся совершенно несвязанными друг с другом явления природы имеют общее происхождение, часто приводило к заметному прогрессу в познании окружающего нас мира. Классическим примером такого объединения, казалось бы, различных явлений может служить достигнутое в XIX веке понимание того, что электричество, магнетизм, свет и радиоволны могут быть описаны едиными уравнениями электромагнетизма, сформулированными Дж. Максвеллом. Вполне возможно, что сейчас мы находимся у истоков аналогичного объединения понятий в физике элементарных частиц. В настоящее время считают, что все взаимодействия вещества на субатомном уровне подразделяются на четыре разных типа: гравитационные, электромагнитные, сильные (или ядерные) и слабые. Однако поставленные недавно эксперименты придают некую уверенность в правильности выдвинутой теоретиками идеи о том, что по крайней мере два из этих видов сил — электромагнитные силы и слабые силы — на самом деле служат проявлением одной и той же силы (см. статью С. Вайнберга «Единые теории взаимодействия элементарных частиц» **)).

В этой статье мы опишем результаты нескольких экспериментов, в которых пучок нейтрин высоких энергий был использован с целью наблюдения доселе неизвестного класса слабых взаимодействий, которые носят название взаимодействий с нейтральным слабым током. Результаты, полученные недавно несколькими группами исследователей в ряде ускорительных центров и, в том числе, нашей группой в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми, служат важным подтверждением выдвинутого теоретически предположения о том, что слабые силы связаны по своей природе не только с электромагнитными силами, но, возможно, также и с сильными взаимодействиями.

*) David B. Clain, Alfred K. Mann, Carlo Rubbia, The Detection of Neutral Weak Currents, Scientific American 231 (6), 108 (December 1974). Перевод И. М. Дремина.

Д. Клайн — профессор физики Университета штата Висконсин, А. Манн — профессор физики Университета штата Пенсильвания, К. Руббия — профессор физики Гарвардского университета, США.

**) Перевод этой статьи см. в УФН 118, 505 (1976). (Прим. перев.)

□

Современное описание электромагнитных сил, действующих между двумя движущимися электрически заряженными частицами, исходит из двухступенчатой картины всего процесса: вначале фотон, или квант электромагнитного излучения, испускается одной из заряженных частиц, а затем этот фотон поглощается другой частицей (рис. 1, а). Обмениваемый фотон рассматривается как переносчик электромагнитных сил.

При другом описании того же самого процесса движение одной заряженной частицы приводит к появлению электрического тока, который

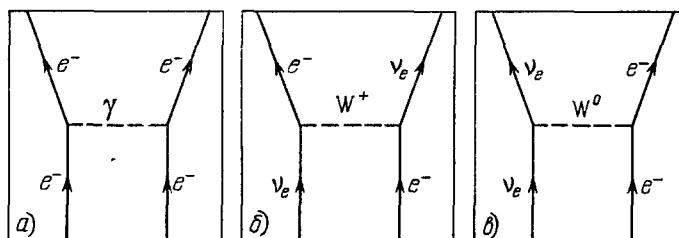


Рис. 1. Силы взаимодействия частиц аналогичны силам, действующим на два электрических тока, текущих по проводам.

Эти диаграммы Фейнмана приведены как примеры электромагнитного взаимодействия (а) и двух типов слабых взаимодействий (б и в). При электромагнитном взаимодействии двух электронов e^- они обмениваются фотоном γ . При слабом взаимодействии электронного нейтрино ν_e с электроном обмен происходит гипотетической частицей, промежуточным векторным бозоном, или W -частицей. Если обмен идет заряженной W -частицей (б), то взаимодействие вызывается заряженным током; если обмениваемая W -частица нейтральна (в), то это процесс с нейтральным током.

притягивает или отталкивает аналогичный ток, связанный с движением другой частицы. В такой картине возникающие силы рассматриваются как силы, действующие на оба тока. Такое взаимодействие двух токов аналогично взаимодействию двух проводов, по которым пропускается электрический ток.

Однако оба описания приводят к эквивалентным результатам. При этом фундаментальной чертой электромагнитного взаимодействия является строгое сохранение электрического заряда частиц до и после взаимодействия. В соответствии с этим и весь процесс описывается как взаимодействие между двумя нейтральными токами, поскольку в акте взаимодействия электрический заряд участвующих в нем частиц не изменяется.

Слабые силы были случайно обнаружены в 1896 г. Г. Беккерелем, когда он впервые заметил явление радиоактивного распада атомного ядра. На современном уровне понимания этого явления ядерное превращение, проявляющееся в виде радиоактивного распада, происходит за счет слабых сил и обычно приводит к рождению двух частиц: электрона и нейтрино. Электрон мог быть легко наблюден даже при том экспериментальном оборудовании, которое имелось во времена Беккереля, однако нейтрино, которое не обладает массой покоя и является электрически нейтральной частицей, непосредственно не детектируется. Всего лишь около 20 лет тому назад нейтрино были наконец-то наблюдены и то опосредованно, через их взаимодействия с веществом.

Начиная с эксперимента Беккереля, слабые силы стали предметом интенсивного изучения при низких энергиях. Источником получения экспериментальной информации служили события, наблюдаемые в процессах радиоактивного распада ядер. В некотором отношении эта деятельность эквивалентна изучению статического электричества. Из истории физики мы знаем, что исследование электростатики предшествовало рабо-

там по электричеству. Проводя эту аналогию, можно сказать, что изучение слабых сил при высоких энергиях с помощью нейтринных пучков соответствует этапу исследования электричества.

Так как природа слабых взаимодействий до сих пор еще пока не совсем ясна, мы не можем дать детального теоретического описания того механизма, который порождает слабые силы. Тем не менее в нашем современном понимании взаимодействий элементарных частиц одним из основных является общее правило, гласящее, что силы между двумя частицами возникают за счет обмена другими частицами. Поэтому естественно попытаться применить это правило также и к слабым взаимодействиям. Гипотетическая частица, которая была выдвинута на роль переносчика слабых сил, называется промежуточным векторным бозоном или W -частицей (рис. 1, б, в). В течение последних 20 лет неоднократно предпринимались попытки открыть W -частицу, но ни одна из них не завершилась удачно. Очевидно, что если W -частица существует, то она должна обладать очень большой массой, поскольку один из основных принципов квантовой теории гласит, что область действия любой силы обратно пропорциональна массе обмениваемой частицы.

Конечно, могло бы оказаться, что описание слабых сил за счет переноса их из одной точки в другую некоторой частицей является неверным. Аналогично тому, как оказалось невозможным представить себе поведение движущихся электрических зарядов на основе законов электростатики, так, может быть, не удастся и понять природу слабых взаимодействий при высоких энергиях с помощью представлений, вызванных изучением явления радиоактивного распада. Именно поэтому сейчас проявляется столь большой интерес к нейтринным экспериментам при высоких энергиях. По-видимому, нам впервые удается проследить за нестатическим поведением слабых сил.

□

Еще задолго до Maxwella многие высказывали предположение о том, что должна быть связь между электричеством и магнетизмом. Точно так же в течение многих лет уже обсуждается идея о том, что существует некое основополагающее соответствие между слабыми и электромагнитными силами. Обнаружение такой связи между этими двумя силами было бы важным шагом на пути к единому описанию двух типов взаимодействий и, несомненно, означало бы существенный прогресс в нашем понимании основных сил природы. Итак, в чем же схожи эти две силы и в чем они отличаются друг от друга

Как всегда бывает в таких ситуациях, различия между слабыми и электромагнитными силами намного более очевидны, нежели их сходство. Во всех экспериментах, в которых проявилось слабое взаимодействие частиц, проведенных вплоть до 1973 г., это взаимодействие обнаруживало себя как силы между заряженными слабыми токами. Например, когда нейтрино сталкивается с электроном, их взаимодействие (известное физикам, занимающимся частицами, как процесс рассеяния), оказывается, приводит к тому, что налетающее нейтрино превращается в вылетающий электрон, а налетающий электрон вылетает в виде нейтрино (рис. 1, б). Так как нейтрино не обладает электрическим зарядом, а электрон имеет заряд, то в процессе соударения происходит обмен зарядом. С другой стороны, при электромагнитном взаимодействии (рис. 1, а) заряд налетающего электрона не меняется в процессе соударения. Таким образом, первое отличие слабых сил от электромагнитных состоит в том, что при рассмотрении этих двух типов сил с точки зрения взаимодействий тока

с током оказывалось всегда, что токи в слабых взаимодействиях были заряженными, тогда как токи в электромагнитных процессах обязательно были нейтральными.

Понятие о токах во взаимодействиях элементарных частиц может быть применено и к взаимодействиям электронов и нейтрино с адронами

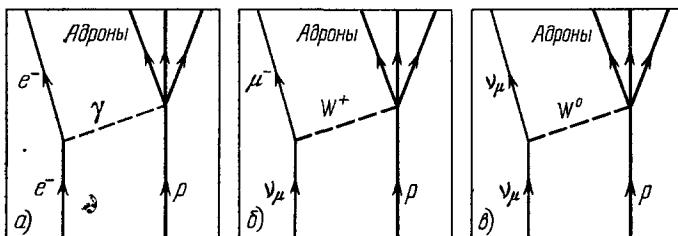


Рис. 2. Взаимодействие токов проявляется и при взаимодействиях лептонов с адронами. Когда электрон высокой энергии ударяет по протону p (а), протон превращается во множество других частиц, а электрон сохраняется в конечном состоянии. Этот процесс идет за счет электромагнитного взаимодействия с нейтральным током. Когда на протон падает поток мюонных нейтрино ν_μ , то в конечном состоянии обязательно присутствуют или отрицательно заряженный мюон μ^- , или же мюонное нейтрино (б и в). Первый случай реализуется за счет взаимодействия заряженного тока, второй — за счет нейтрального тока.

(так назван класс сравнительно тяжелых частиц, таких, как протон, которые участвуют в сильных взаимодействиях). Типичный процесс соударения нейтрино высокой энергии с протоном приводит к ливню других вновь рожденных адронов (рис. 2, б). При таком взаимодействии заряженного слабого тока с адроном налетающее нейтрино всегда превращается в мюон. Мюон не является адроном, а принадлежит к семейству лептонов (класс сравнительно легких или безмассовых частиц, не принимающих участия в сильных взаимодействиях).

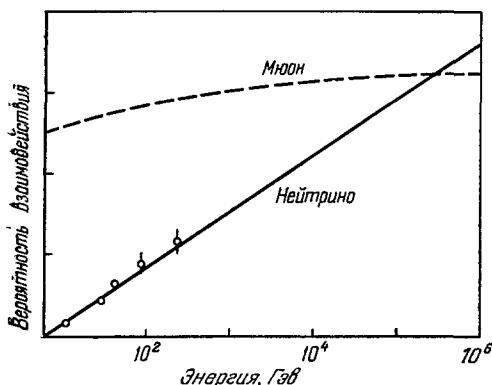


Рис. 3. Вероятность взаимодействия мюона и нейтрино с адроном растет с энергией. Взаимодействие мюона с адроном — электромагнитное; взаимодействие нейтрино с адроном — слабое. Точка пересечения двух кривых указывает энергию, начиная с которой нейтриновые взаимодействия могут стать более вероятными, чем взаимодействия с мюоном. Это означает, что слабые взаимодействия могут стать сильнее электромагнитных.

порядка секунд, минут, дней или даже нескольких лет (в зависимости от доступной при этом переходе энергии), то аналогичный электромагнитный процесс мог бы происходить в десятки миллиардов раз быстрее.

(Именно поэтому большое оживление вызвали полученные в Лаборатории Ферми свидетельства того, что величина слабых взаимодействий растет с ростом энергии. Например, в нейтриновых процессах вероятность слабых взаимодействий оказалась растущей с энергией (рис. 3). Сила

Другое отличие слабых сил от электромагнитных состоит в огромной разнице величин этих сил. Слабые силы, проявляющие себя в таких процессах, как радиоактивный распад атомного ядра, оказываются примерно в 10 миллиардов раз слабее электромагнитных сил, действующих в том же ядре. Как известно, время, необходимое для распада ядра под действием той или иной силы, определяется величиной этой силы. Поэтому если радиоактивный распад ядра происходит за время

электромагнитных взаимодействий также слегка возрастает с ростом энергии, но здесь это изменение намного слабее. Если такая тенденция сохранится и при более высоких энергиях, то величины обеих сил станут одинаковыми и таким образом будет ликвидировано одно из различий между этими силами, которое наблюдалось при низких энергиях. При очень высоких энергиях слабые силы могут даже стать сильнее электромагнитных!)

Еще одно существенное отличие слабых сил от электромагнитных состоит в том, что при слабых взаимодействиях четность не сохраняется, тогда как в электромагнитных процессах она является строго сохраняющейся величиной. Сохранение четности, когда-то считавшееся одним из нерушимых принципов физики, в действительности означает, что природа не делает различия между некоторой данной реакцией и ее зеркальным отображением. Нарушение четности теперь признано как стандартная черта всех слабых взаимодействий, вызванных заряженными токами.

Процесс взаимодействия нейтрино высокой энергии может служить наглядным примером слабого взаимодействия, нарушающего четность. Нейтрино, существующие в природе, всегда вращаются в строго заданном направлении — давайте определим его как левое для нейтрино и как правое для антинейтрино. В тех процессах соударения частиц, где четность сохраняется, вероятность взаимодействия, как можно ожидать, не будет зависеть от направления вращения (или направления спина) участвующих в этом процессе частиц. Другими словами, на субатомном уровне направление спина частицы не должно сказываться на свойствах ее рассеяния. В случае электромагнитных взаимодействий выполняется следующий принцип: вероятность взаимодействия левых и правых электронов (или мюонов) одинакова. Следовательно, говорят, что в электромагнитных взаимодействиях, в которых принимают участие пучки налетающих электронов или мюонов, четность сохраняется.

И наоборот, для процессов рассеяния с участием пучков нейтрино или антинейтрино обнаружено, что вероятность взаимодействия заряженных токов сильно зависит от направления вращения падающей частицы. Действительно, отношение вероятностей взаимодействия для антинейтрино и нейтрино близко к величине 1 : 3, что ожидалось бы в случае максимального нарушения четности. Такие взаимодействия заряженных слабых токов, нарушающие четность, были обнаружены в широком интервале энергий, простирающемся от крохотных энергий около одной десятитысячной доли электрон-вольта до огромных энергий порядка 100 миллиардов электрон-вольт. В то же время электромагнитные взаимодействия (примерно в том же интервале энергий) ни разу не нарушили четность.

И наконец, последнее отличие слабых сил от электромагнитных проявляется в тех расстояниях, на которых эти силы способны проявить себя. Подобно гравитационным силам, электромагнитные силы падают по величине обратно пропорционально квадрату расстояния. Следовательно, эти силы продолжают действовать даже на довольно больших расстояниях. Дальнодействующая природа электромагнитных сил вытекает из того обстоятельства, что эти силы переносятся фотоном, частицей с нулевой массой покоя. В то же время слабые взаимодействия проявляют себя только на малых расстояниях. Иногда даже считают, что они действуют всего лишь в точке. Таким образом, столкновение двух слабо взаимодействующих частиц напоминает столкновение двух биллиардных шаров. Как мы уже упоминали, в предположении о том, что слабые силы передаются путем обмена какой-то частицей, исключительно малая область действия этих сил приводит с необходимостью к большой массе обменяемой частицы.

□

Ну, а теперь, что можно сказать о сходстве слабых сил с электромагнитными? Более всего, пожалуй, поражает то, что вероятности взаимодействия в обоих случаях следуют одному и тому же правилу «произведения тока на ток». И на самом деле еще в 1933 г., когда Э. Ферми формулировал первую модель слабых взаимодействий, он исходил из аналогии с электромагнитными взаимодействиями. Его модель оказалась исключительно успешной для описания процессов слабых взаимодействий при низких энергиях. Другая схожая черта проявляется в универсальности этих двух взаимодействий по сравнению с ядерными (или сильными) взаимодействиями. Все частицы, включая адроны, участвуют в слабых и электромагнитных взаимодействиях, но только адроны обладают ядерными силами.

Итак, с одной стороны, форма и универсальность двух взаимодействий похожи, тогда как, с другой стороны, их величины, заряды токов, области действия сил и отношения к четности совершенно различны. Особенно озадачивающим аспектом слабых взаимодействий всегда казалась сильная зависимость слабых токов от электрических зарядов частиц. Трудно представить себе, почему слабые взаимодействия должны столь критично зависеть от электрического заряда, если только не предполагать, что существует некая глубинная связь между этими двумя видами сил.

С первого взгляда кажется, что заметные отличия слабых взаимодействий от электромагнитных перевешивают их сходство, исключая таким образом мысль о какой бы то ни было общности в происхождении этих сил. Несмотря на это, некоторые физики-теоретики предложили модели, которые описывают оба типа взаимодействий в терминах единого основополагающего взаимодействия. Первое конкретное предложение в этом направлении было выдвинуто в 1957 г. Ю. Швингером. Позднее С. Вайнберг и А. Салам независимо выдвинули новый вариант единой теории поля, основанный на принципе «калибровочной инвариантности», согласно которому предполагается наличие дополнительной, не наблюдавшейся ранее симметрии слабых и электромагнитных сил. Почти все предложенные модели исходят из того, что слабые взаимодействия передаются и нейтральными токами наравне с заряженными токами. Согласно этим моделям такой гипотетический нейтральный слабый ток должен быть аналогичен наблюдаемому нейтральному току в электромагнитных взаимодействиях, а следовательно, он обеспечит прямую связь между этими двумя типами взаимодействий.

В то время, когда эти модели были предложены, не было никакой возможности начать экспериментальные поиски нейтральных слабых токов, так как даже в самой благоприятной ситуации вероятность того, что ядро примет участие в слабом взаимодействии, обусловленном нейтральными токами, была на много порядков величины ниже вероятности соответствующего электромагнитного взаимодействия. Поэтому вопрос о существовании слабых нейтральных токов не был немедленно подвергнут экспериментальной проверке. Чтобы отделить эти два типа нейтральных токов, надо отобрать соответствующий ядерный процесс, в котором бы электромагнитные силы не принимали участия. Хотя такие процессы известны в ядерной физике, они никогда не изучались сколько-нибудь детально.

Первоначально достаточно реалистичные попытки проверить существование нейтрального слабого тока были предприняты при изучении процессов распада определенных частиц, отличающихся от других некоторым свойством, известным в физике высоких энергий под названием

«странность». Как было установлено еще раньше, странность сохраняется в процессах, которые обусловлены сильными или электромагнитными взаимодействиями. Другими словами, участвующие в реакции частицы обладают одной и той же суммарной странностью как до взаимодействия, так и после того, как оно произошло. И наоборот, было обнаружено, что в процессах с участием заряженных слабых токов полная странность участвующих в реакции частиц может как измениться, так и остаться той же самой.

Подробное исследование взаимодействий заряженных слабых токов привело к открытию универсальности, связывающей воедино распады странных частиц, нестранных частиц и даже таких лептонов, как мюон. Действительно, именно эта универсальность природы слабых взаимодействий позволила вначале классифицировать столь, казалось бы, разные группы процессов взаимодействий элементарных частиц и ядерных превращений как проявления одного и того же слабого взаимодействия. Эта универсальность, несомненно, является очень важным свойством взаимодействий заряженных слабых токов. Но, как мы уже заметили, аналогичная универсальность проявляет себя и в электромагнитных взаимодействиях.

□

Поиски нейтральных токов в распадах странных частиц начались с изучения положительно заряженных K -мезонов (рис. 4). Если нейтральные слабые токи существуют и если они подчиняются тому же универсальному закону, что и заряженные слабые токи, то можно было ожидать,

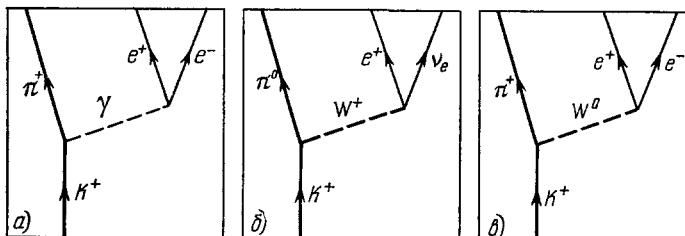


Рис. 4. Положительно заряженный K -мезон (K^+) обладает квантовым свойством, известным под названием «странность».

В электромагнитных взаимодействиях странность сохраняется, т. е. она не может меняться, а потому распад частицы на положительно заряженный пион π^+ и электрон-позитронную пару (а) запрещен, так как ни одна из этих частиц не является странной. Однако странность может изменяться в процессах слабых взаимодействий (б и в). Распад положительно заряженного K -мезона на нейтральный пион π^0 , позитрон e^+ и электронное нейтрино ν_e является примером события с нейтральным слабым током. По неведомым причинам события с нейтральным слабым током появляются здесь в 100 000 раз менее часто, чем события с заряженным слабым током.

что эффекты, вызванные нейтральными токами, удастся наблюдать именно в распаде K -мезонов. Экспериментальный поиск таких распадов был предпринят в 1962 г. одним из нас (Клайн) с сотрудниками. В результате было установлено, что вероятность взаимодействия нейтральных слабых токов меньше одной стотысячной доли от соответствующей вероятности для заряженных слабых токов. Стало абсолютно ясно, что либо нейтральных токов вообще нет, либо их проявление в распадах положительных K -мезонов весьма маловероятно. Последовавшие затем детальные поиски в распадах других странных частиц оказались столь же безрезультатными. Эти результаты поколебали уверенность в столь желаемой связи слабых и электромагнитных взаимодействий.

Примерно в то же время, когда проходили эти тщательные поиски нейтральных слабых токов в распадах странных частиц, были начаты первые эксперименты с нейтринными пучками высоких энергий в Брукхейвенской национальной лаборатории и в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН). Достаточно интенсивные пучки нейтрино и антинейтрино рождаются во вторичных взаимодействиях на больших ускорителях протонов. Как нейтрино, так и его античастицы взаимодействуют с веществом только при помощи слабых сил. Уже самые первые нейтринные эксперименты в Брукхейвене показали, что в природе существуют нейтрино двух типов: мюонное нейтрино, которое при взаимодействии с веществом порождает мюон, и электронное нейтрино, которое в результате взаимодействия превращается в электрон. На протонных ускорителях мюонные нейтрино образуются примерно в 100 раз чаще, нежели электронные нейтрино.

Нейтринные взаимодействия предоставляют в наше распоряжение другой путь поисков нейтральных слабых токов, когда не нужно беспокоиться о том, чтобы исключить эффекты, вызванные электромагнитными взаимодействиями, и нет усложнений, связанных со странностью. Эти эксперименты весьма просты по своему замыслу. Взаимодействие мюонного нейтрино при помощи заряженного слабого тока всегда приводит к рождению заряженного мезона среди огромного количества вторичных рожденных частиц. Вместо этого при участии нейтрального слабого тока в конечном состоянии будет рождаться нейтрино. Таким образом, все, что остается на долю экспериментатора, — суметь отличить одну реакцию от другой. Конечно, это не столь уж просто, и в результате первый цикл нейтринных экспериментов в Брукхейвене и ЦЕРНе не привел к обнаружению событий, вызванных нейтральными токами. В некоторых случаях даже утверждалось, что нейтральные токи весьма маловероятны. В сочетании с безрезультатными экспериментами с распадами странных частиц эти выводы, казалось, подтверждали полное отсутствие нейтральных слабых токов. Как следствие этого, в конце 60-х годов считалось практически достоверным, что либо нейтральных слабых токов совсем нет в природе, либо они проявляют себя в исключительно редких случаях.

□

Однако в 1973 г. были поставлены два эксперимента (использующих совершенно разную методику), которые показали, что нейтрино могут взаимодействовать с веществом так, что в конце тоже остается нейтрино. При этом вероятность таких взаимодействий составляет заметную долю от вероятности процессов, в которых в результате нейтринных взаимодействий образуются заряженные лептоны. Один из этих экспериментов был проведен в ЦЕРНе. В качестве мишени и одновременно детектора нейтринных взаимодействий была использована пузырьковая камера, наполненная жидким фреоном (CF_3Br). Протоны высоких энергий из протонного синхротрона в ЦЕРНе, попадая на металлическую мишень, порождали, помимо других частиц, также и заряженные мезоны, которые можно было сфокусировать при помощи магнитов. Затем эти мезоны распадались на лету. В результате распадов получался поток нейтрино или антинейтрино в зависимости от заряда распадающегося мезона.

Было проанализировано около 80 000 фотографий, сделанных в пузырьковой камере с нейтринным пучком, и более 200 000 фотографий с антинейтринным пучком. Всего было найдено 102 нейтринных события без мюонов в конечном состоянии при 428 нейтринных событиях, в кото-

рых образовывались мюоны. Соответствующие числа антинейтринных событий равны 64 и 148. Пример события без мюонов показан на рис. 5.

Другой эксперимент был поставлен в Лаборатории Ферми группой физиков из Гарвардского, Пенсильванского и Висконсинского университетов, а также из этой лаборатории. В эксперименте протоны высокой

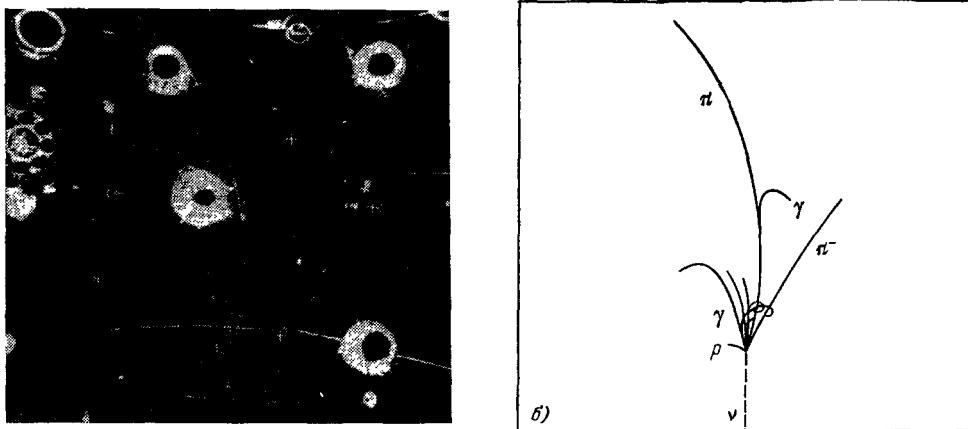


Рис. 5. Событие, приведенное на фотографии, полученной в большой пузырьковой камере в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН), видимо, обусловлено взаимодействием нейтрального тока *a*).

Как показано на поясняющей фото диаграмме (*b*), вначале нейтрино (которое не оставляет следа в камере) соударяется с протоном. Основные продукты реакции — положительный пион, отрицательный пион, нейтральный пион (который также не оставляет трека). Все эти частицы являются адронами. Отсутствие такого заряженного лептона, как отрицательный мюон, указывает на то, что это взаимодействие вызвано нейтральным слабым током.

энергии, падая на мишень, порождали вторичные адроны, которые, распадаясь, приводили к появлению пучков нейтрино и антинейтрино (рис. 6).

В качестве мишени-детектора нейтринных взаимодействий использовался большой ионизационный калориметр, состоящий из 16 сегментов,



Рис. 6. Один из экспериментов, в которых удалось обнаружить нейтральные слабые токи, был проведен в Национальной Ускорительной лаборатории им. Ферми в Батавии (штат Иллинойс).

Протоны, ускоренные до энергии 30 миллиардов электрон-вольт, падали на мишень и порождали поток других частиц. Адроны (частицы, участвующие в сильных взаимодействиях) распадались вскоре за мишенью. Мюоны (члены семейства лептонов, т. е. частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях) отфильтровывались с помощью защиты, представляющей собой длинную земляную насыпь. В результате получался чистый пучок нейтрино и антинейтрино, который и применялся в эксперименте по обнаружению нейтральных слабых токов.

наполненных жидкостью, которая сцинтилирует, когда через нее проходит высокоэнергичная частица. У каждого сегмента было по 12 фотумножителей, с помощью которых определялась полная энергия, затраченная в жидкок сцинтилляторе продуктами реакции, вызванной нейтрино или антинейтрино. Большинство энергии каскада частиц, возникающего в процессе такого взаимодействия, остается внутри объема ионизационного калориметра. В промежутки между четырьмя сегментами калориметра были помещены оптические искровые камеры, в которых был непосредственно виден весь каскад вторичных частиц.

Сразу же за ионизационным калориметром помещался мюонный детектор, состоявший из четырех больших спиритуационных счетчиков и тороидальных магнитов, перемежаемых оптическими искровыми

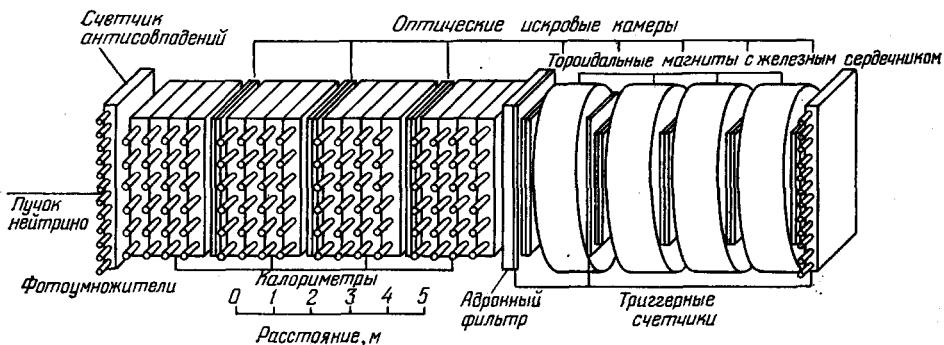


Рис. 7. Нейтринные взаимодействия наблюдались в Лаборатории им. Ферми с помощью установки, состоявшей из набора калориметров, искровых камер и магнитов.

Калориметры были наполнены жидкостью, которая сцинтилирует при попадании в нее заряженной частицы. Сцинтилляции детектировались фотоумножителями (по 12 в каждом калориметре). Треки заряженных частиц прослеживались в искровых камерах.

камерами. Это позволяло идентифицировать мюоны и измерить их импульс (рис. 7).

Установка запускалась в момент попадания в нее частиц с энергией, превышающей некоторое минимальное значение. После сигнала о запуске

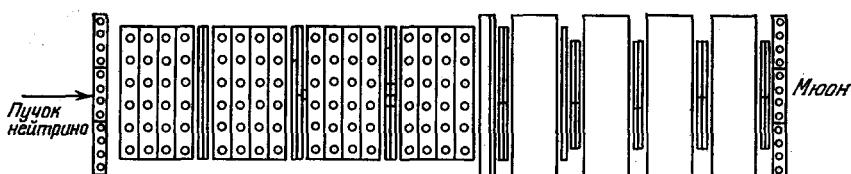


Рис. 8. Событие с заряженным током оставляло характерный трек в искровых камерах установки.

Многочисленные треки в левой части установки оставлены адронами, рожденными в этом событии. Одиничный трек справа оставлен мюоном.

записывались по отдельности электрические сигналы со всех четырех сегментов ионизационного калориметра и со счетчиков, идентификаторов мюонов. Все искровые камеры участвовали в работе. В типичных

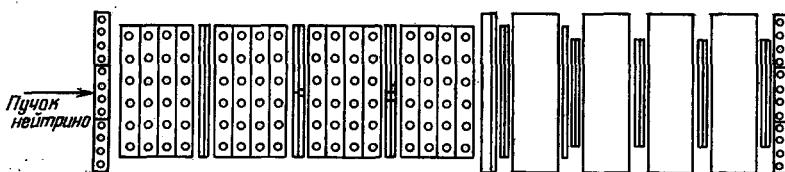


Рис. 9. Событие с нейтральным током характеризуется треками, среди которых нет следов от мюона.

Расстояние между первой и последней искровыми камерами равно примерно 50 футам (~ 15 м). но на фотографиях треки были подведены ближе с помощью системы зеркал.

нейтринных событий (рис. 8), наблюдавшихся в детекторе, в конечном состоянии имеется мюон, который проходит через мюонный детектор и отклоняется в магните. Поиск нейтральных токов (рис. 9) состоял в том, чтобы зарегистрировать события, в которых нет мюона среди вторичных

частич. Любое такое событие с большой долей вероятности представляет собой пример взаимодействия с нейтральным током.

Всего в нескольких сеансах было зарегистрировано 4181 событие при разных смесях нейтринно-антинейтринных пучков. Из них полезными оказалось 991 событие. В 220 событиях не было мюонов в конечном состоянии, а в 771 событии мюон появлялся. Важная поправка к первичному материалу была сделана для того, чтобы учесть мюоны, вылетающие под большими углами, которые не попадают в зону регистрации мюонов.

Естественно, первый вывод, который был сделан на основе результатов этих экспериментов, состоял в том, что, в отличие от более ранних экспериментов по рассеянию нейтрино, здесь удалось получить заметное число нейтринных (и антинейтринных) событий, в которых не появлялись заряженные мюоны среди конечных продуктов реакции. Важно отметить, что этот позитивный результат был получен в обоих экспериментах, несмотря на то, что использованные при этом экспериментальные методики заметно отличались одна от другой. Более того, средние значения первичной энергии в событиях, зарегистрированных в этих двух экспериментах, были неодинаковы: в эксперименте, поставленном в ЦЕРНе, эта энергия составляла примерно 3 миллиарда электрон-вольт, тогда как в Лаборатории Ферми изучались события с энергией около 40 миллиардов электрон-вольт. Вскоре после этого были проведены и проанализированы еще три эксперимента разными группами физиков из Аргонской национальной лаборатории. Результаты, полученные этими группами, подтверждают сделанные ранее выводы.

Существование нейтральных слабых токов, возможно, говорит о тесной связи между слабыми и электромагнитными взаимодействиями, но сейчас форма этой связи пока еще не достаточно ясна. Возможно, нейтральные слабые токи обладают и другими свойствами электромагнитных взаимодействий, что еще сильнее отличает их от заряженных слабых токов. Например, нейтральный слабый ток наподобие электромагнитных сил может взаимодействовать, сохраняя четность, что еще сильнее сближает эти взаимодействия. В этом случае должно проявиться различие во внутренних свойствах заряженных и нейтральных слабых токов. Прямая проверка выполнения закона сохранения четности или же нарушения его во взаимодействиях с участием нейтральных токов может быть проведена путем непосредственного сравнения вероятностей взаимодействия нейтрино и антинейтрино (рис. 10). Результаты экспериментов

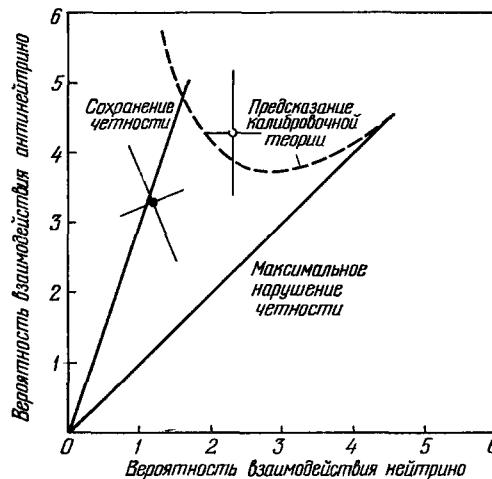


Рис. 10. Кривые на рисунке показывают теоретические предсказания зависимости вероятности взаимодействия нейтрино с адронами посредством нейтральных слабых токов от аналогичной вероятности в случае антинейтрино.

Результат эксперимента, поставленного в Лаборатории им. Ферми, показан темным кружком, а результат эксперимента ЦЕРН — светлым кружком. Калибровочная теория предсказывает, что экспериментальные данные должны лежать выше вогнутой кривой. Поскольку экспериментальные результаты лежат по разные стороны от этой кривой, они не дают однозначного вывода о правильности калибровочной теории. Однако, поскольку они лежат ближе к прямой слева, нежели к прямой справа, можно считать, что во взаимодействиях нейтральных слабых токов четность не может быть максимально нарушена. Цифры по осям — условны.

Брукхейвена и Лаборатории Ферми. Результаты, полученные этими группами, подтверждают сделанные

ЦЕРНа и Лаборатории Ферми дают основания считать, что во взаимодействиях нейтрального тока, видимо, четность нарушается не столь сильно, как в случае заряженных токов, когда такое нарушение максимально. Более детальные экспериментальные результаты, которые будут вскоре получены, смогут проверить такую возможность *).

Другая гипотеза состоит в том, что нейтральный слабый ток представляет собой естественную составную часть калибровочных теорий, которые были предложены с целью единого описания слабых и электромагнитных взаимодействий. Дальнейшее экспериментальное изучение реакций с нейтральными токами, возможно, прояснит вскоре основы такого объединения двух типов сил. Остается еще множество сложных вопросов, которые требуют своего решения. Среди них вопросы о том, почему слабые взаимодействия нарушают четность и почему области действия слабых и электромагнитных сил столь сильно отличаются друг от друга. Тем не менее открытие нейтральных токов вызвало огромный интерес именно благодаря самой возможности единого описания этих сил независимо от того, в какой форме это удастся сделать в конце концов. Во всяком случае, несомненно, что нейтральные токи окажут нам большую помощь в дальнейшем исследовании множества новых свойств элементарных частиц.

□

Наряду с намечающимся объединением слабых и электромагнитных взаимодействий изучение процессов слабых взаимодействий сыграло важную роль в новом подходе к пониманию природы сильных взаимодействий. Это необходимо, поскольку изучение слабых взаимодействий тесно связано с исследованием слабых распадов сильно взаимодействующих частиц. При этом, конечно, не удается избежать трудностей, связанных с природой сильного взаимодействия, которое играет основную роль при взаимной связи таких частиц и определяет их внутреннее строение. Несколько ироничным может показаться тот факт, что посредством слабых взаимодействий можно получить новые сведения о свойствах сильных взаимодействий. Нейтральные слабые токи, без сомнения, помогут расширить наши знания об этих свойствах. Наиболее прямым проявлением сильных взаимодействий в слабых распадах служат так называемые правила отбора, которые были обнаружены при изучении процессов с заряженными токами. Одно из таких правил гласит (в упрощенной формулировке), что при изменении странности в ходе процесса распада на единицу заряд также должен измениться ровно на единицу. Другое хорошо установленное правило требует, чтобы полное изменение странности при реакции не превышало единицы. Оба этих правила наблюдались в процессах с заряженными токами, но теперь их можно проверить и на нейтральных токах **). Хотя причины появления таких правил отбора неизвестны, вряд ли можно сомневаться в том, что они тесно связаны с фундаментальными свойствами внутренней структуры адронов и что они сыграют важную роль при полном описании этих частиц.

Нейтральные слабые токи сыграют также важную роль и в исследовании чисто лептонных слабых взаимодействий (рис. 11). Хотя в природе лептоны встречаются очень часто, изучение слабых взаимодействий,

*) Новые данные свидетельствуют в пользу малости (или отсутствия) нарушения четности в нейтральных токах. (Прим. перев.)

**) Переходы за счет нейтральных токов с изменением странности сильно подавлены. Поэтому и проверка связи изменений странности и заряда затруднена. (Прим. перев.)

в которых принимают участие одни лептоны, только еще начинается. Согласно современным представлениям, лептоны обладают менее сложной внутренней структурой, нежели адроны, и их можно считать практически точечными частицами. Классическим примером чисто лептонной реакции служит процесс распада мюона на электрон и два нейтрино, одно из которых является мюонным, а другое — электронным. С получением очень интенсивных пучков нейтрино высоких энергий стал доступным для

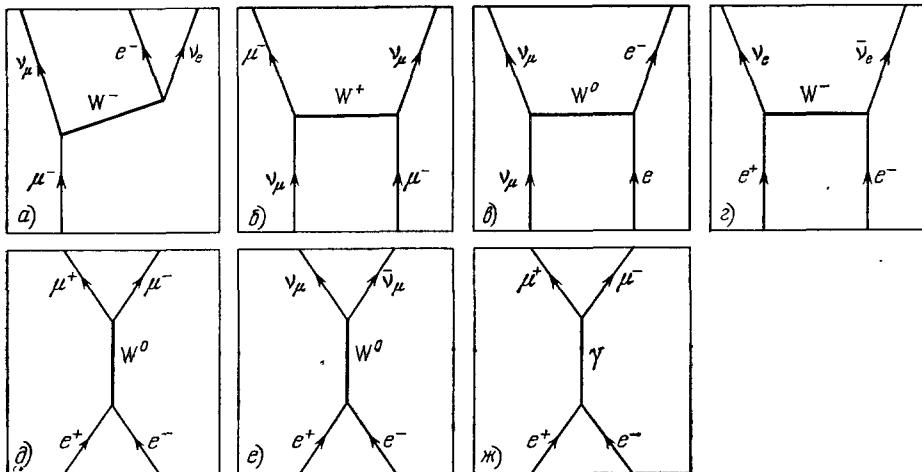


Рис. 11. Примеры взаимодействий между лептонами приведены на диаграммах Фейнмана.

В качестве первого примера (а) выбран распад мюона μ^- на мюонное нейтрино ν_μ , электрон e^- и электронное нейтрино ν_e . Другой процесс (б и е) — рассеяние нейтрино мюонами и электронами. Третьим примером (а — е) служит электрон-позитронное рассеяние посредством слабых сил. Четвертый пример (ж) — электрон-позитронное рассеяние за счет электромагнитного взаимодействия. До обнаружения нейтральных слабых токов считалось, что некоторые из этих процессов (а, б и е) не могут иметь места. Их появление поможет исследовать слабые взаимодействия лептонов.

изучения новый лептонный процесс. Эта реакция проявляется через взаимодействие заряженных токов, когда мюонное нейтрино рассеивается на статическом электрическом поле атомного ядра и превращается в результате этого в два мюона и мюонное нейтрино.

Наличие нейтральных токов позволяет исследовать другие реакции с участием только лептонов и тем самым существенно расширяет область изучения лептонных процессов. Например, возможно существование процесса взаимодействия мюонного нейтрино с электроном посредством нейтральных токов. Уже есть некоторые экспериментальные указания на появление такого процесса в ЦЕРНовском эксперименте *). Другой привлекательной возможностью является обнаружение эффектов слабых взаимодействий в электрон-позитронных столкновениях при высоких энергиях. Слабое взаимодействие электрона с позитроном, приводящее к образованию пары электронных нейтрино и антинейтрино, конечно, существует, но его не удается обнаружить ни одним из известных сейчас методов, потому что в конечном состоянии среди продуктов реакции нет никаких других частиц, кроме нейтрино. С другой стороны, реакция взаимодействия электрона с позитроном, в которой рождается два мюона (положительно и отрицательно заряженный), дает прекрасную возможность изучать взаимодействия нейтральных слабых токов в лептонных

*) Сейчас известно три события такого типа. (Перев. перев.)

процессах. Но эта реакция может идти как за счет слабых взаимодействий, так и путем электромагнитного взаимодействия.

Можно ожидать, что слабое взаимодействие будет здесь интерферировать с электромагнитным взаимодействием так, что проявится способность слабых взаимодействий нарушать четность. В результате будет заметна асимметрия «вперед — назад» в рождении положительно и отрицательно заряженных мюонов. Вследствие этого вперед, в направлении движения налетающего позитрона, будет

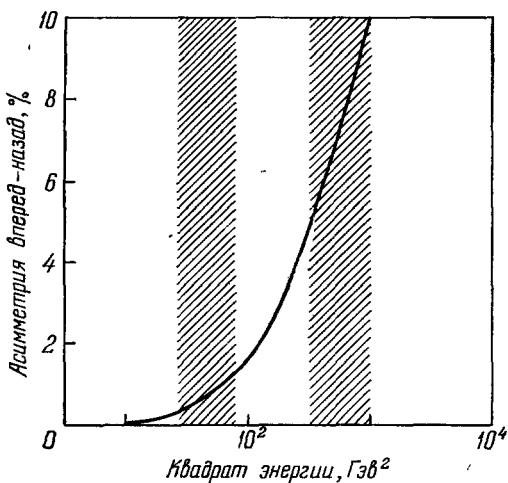


Рис. 12. Отношение числа частиц, рассеянных вперед, к числу рассеянных назад частиц в некоторых экспериментах послужит мерой интерференции нейтральных электромагнитных и нейтральных слабых токов.

В таких экспериментах сталкиваются с электронами и позитронами, лежащими навстречу друг другу, что приводит к рождению положительно и отрицательно заряженных мюонов. Кривая на графике показывает предсказываемую, в случае наличия интерференции, асимметрию числа мюонов, рассеянных вперед и назад. Вертикальная полоса слева показывает область энергий, доступную в экспериментах, проводимых со встречными пучками на Стенфордском линейном ускорителе. Полоса справа указывает область энергий, которые станут доступны при вводе в строй нового ускорителя, проект которого разработан физиками из Стенфорда и Калифорнийского университета в Беркли.

Исследование слабых взаимодействий между лептонами высоких энергий будет гигантским шагом на пути к познанию слабых взаимодействий.

Как мы уже указывали, наличие нейтральных слабых токов подразумевает глубинную связь слабых взаимодействий с электромагнитными. Возможно также, что здесь кроется тайна новой загадки о природе всех взаимодействий элементарных частиц. Привычная классификация взаимодействий на четыре категории — гравитационные, электромагнитные, сильные и слабые — основана, прежде всего, на относительной силе их проявлений. Некоторое представление об этих взаимодействиях можно получить, рассмотрев распад гипотетической частицы, называемой нейтральной дельта-частицей. Хотя ее пока еще не обнаружили, имеются другие частицы (например, эта-мезон) с теми же свойствами, кроме единственного отличия в массе покоя этих частиц. Считается, что гипотетическая нейтральная дельта-частица обладает настолько большой массой покоя, что может распадаться на целые группы частиц с меньшей массой: мезоны, электроны, нейтрино и т. п. Предполагается, что странность-

налетающего позитрона, будет двигаться больше положительно заряженных мюонов. Наблюдение этой асимметрии послужит дополнительным свидетельством существования нейтральных слабых токов. При этом асимметрия, как можно ожидать, будет расти с возрастанием сильы слабых взаимодействий (рис. 12). Группа физиков из Пенсильванского и Висконсинского университетов ищет эту асимметрию в электрон-позитронных взаимодействиях на встречных пучках с линейного ускорителя в Стенфорде. Так как слабые взаимодействия становятся сильнее с ростом энергии, асимметрия, видимо, станет относительно-большой при более высоких энергиях, которые будут достигнуты на ускорителях следующего поколения, где на огромных скоростях будут сталкиваться встречные пучки электронов и позитронов. Один из таких ускорителей, названный *PEP*, предложен Стенфордским и Калифорнийским (Беркли) университетами. Вряд ли кто-либо сомневается в том, что исследование слабых взаимодействий высоких энергий будет

нейтральной дельта-частицы равна нулю. В таблице приведены возможные моды распада этой частицы и вероятности соответствующих каналов. Так, например, вероятность того, что нейтральная дельта-частица примет участие в процессе сильного взаимодействия, примерно в 10 000 раз выше вероятности участия ее в электромагнитных процессах. В то же время вероятность слабых взаимодействий с участием такой частицы, как видно из таблицы, существенно зависит от тех свойств (квантовые числа и свойства симметрии), которые претерпевают изменение в ходе реакции, и от того, принимают ли участие в реакции заряженные или же нейтральные токи.

Гипотетические процессы		Изменение свойств за счет взаимодействия		Вероятность распада
$\delta^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$	Сильные взаимодействия	Странность не меняется	Сохраняет четность	Очень вероятен
$\delta^0 \rightarrow \gamma\gamma$	Электромагнитные взаимодействия	Странность не меняется	Сохраняет четность	10^{-4}
$\delta^0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e$	Слабые взаимодействия (заряженный ток)	Странность не меняется	Нарушает четность	10^{-10}
$\delta^0 \rightarrow \pi^0 \nu_e \bar{\nu}_e$	Слабые взаимодействия (нейтральный ток)	Странность не меняется	Не известно	10^{-11}
$\delta^0 \rightarrow K^+ e^- \bar{\nu}_e$	Слабые взаимодействия (заряженный ток)	Странность меняется	Нарушает четность	$\sim 10^{-12}$
$\delta^0 \rightarrow K^0 \nu_e \bar{\nu}_e$	Слабые взаимодействия (нейтральный ток)	Странность меняется	Не известно	$< 10^{-19}$
$\delta \rightarrow \pi^+ \pi^-$	Слабые взаимодействия	Странность меняется	Нарушает четность, время инвариантно	$< 10^{-20}$

Распад нейтрального дельта-мезона (δ^0), новой гипотетической частицы, показывает, что появление нейтральных слабых токов в качестве подкласса слабых взаимодействий вскрывает глубокую связь слабых сил с электромагнитными. Вместе со многими другими фактами это обстоятельство может указывать на существование каких-то новых сил, помимо четырех, уже хорошо известных. Считается, что масса гипотетической частицы настолько велика, что при ее распаде рождаются целые группы частиц с меньшими массами. Разные каналы распада указаны в левом столбце. Роль различных взаимодействий, изменения свойств за счет взаимодействий и соответствующие вероятности распада обсуждаются в статье.

Обычно считают, что сила того или иного взаимодействия непосредственно связана с количеством свойств, изменяющихся в процессе этого взаимодействия. Так, например, иногда говорят, что сильные взаимодействия сильны именно потому, что ни одно свойство системы при этом не меняется, а слабые взаимодействия слабы как раз из-за того, что они меняют многие свойства системы. На примере распада нейтральной дельта-частицы видно, что в рамках подкласса слабых взаимодействий различие в силе взаимодействия (т. е. различие в вероятностях протекания соответствующих процессов) зависит от количества свойств, изменяющихся при данной реакции. Если развивать эту мысль дальше, то можно было бы представить себе, что в природе на самом деле число фундаментальных взаимодействий больше четырех. Например, вполне возможно, что существуют новые «сверхслабые» силы, которые вызывают превращения

нейтральной дельта-частицы, протекающие с нарушением закона инвариантности относительно обращения времени. Пока еще слишком мало известно о том, какие свойства нарушаются при взаимодействиях элементарных частиц посредством нейтральных слабых токов. Так что рано делать какие-либо определенные заключения.

□

Наличие нейтральных слабых токов разрешает также ряд важных проблем космологии. Вселенная наполнена нейтрино. Важным источником этих нейтрино служит процесс аннигиляции электрона с позитроном, который, как считают, играл заметную роль на ранних этапах эволюции Вселенной. Прежде считалось, что эти нейтрино должны нести на себе электронное «клеймо». Однако теперь за счет взаимодействий нейтральных слабых токов становится возможным такой процесс аннигиляции электронов с позитронами, при котором рождаются нейтрино с мюонным «клеймом». А это может в принципе заметно изменить состав нейтринных потоков во Вселенной. В частности, если мюонное нейтрино обладает даже небольшой массой, то во Вселенной могут оказаться «запрятанными» огромные количества добавочной энергии. Существующие экспериментальные ограничения на массу мюонного нейтрино слишком слабы, чтобы исключить такую возможность. Реакции образования новых нейтрино играют важную роль в процессе остывания звезд, потому что нейтрино, будучи рожденны в недрах звезды, легко выходят из нее, унося при этом энергию. Недавно было выдвинуто предположение, что выходящие из недр звезды нейтрино могут, за счет взаимодействий посредством нейтральных слабых токов, привести к появлению огромных сил, действующих на поверхность звезды и срывающих таким образом ее оболочку. Может быть, именно этот процесс мы и наблюдаем в форме взрыва сверхновых.

Эти примеры касаются лишь небольшого числа приложений, которые может получить открытие нейтральных токов, к тем явлениям природы, где существенную роль играют слабые взаимодействия. Сейчас физики весьма оптимистично смотрят на возможность того, что это открытие и связанные с ним результаты приведут к единому описанию слабых и электромагнитных взаимодействий. Конечно, впереди еще много препятствий, но нам кажется, что решающий шаг уже сделан.

ЛИТЕРАТУРА

- L. M. Lederman, in: *High Energy Physics*, v. 2, Ed. E. H. Burhop, N. Y., Academic Press, 1967.
- D. H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, Reading, Mass., Addison-Wesley, 1972.
- B. C. Barish, *Scientific American* 229 (2), 30 (August 1975).