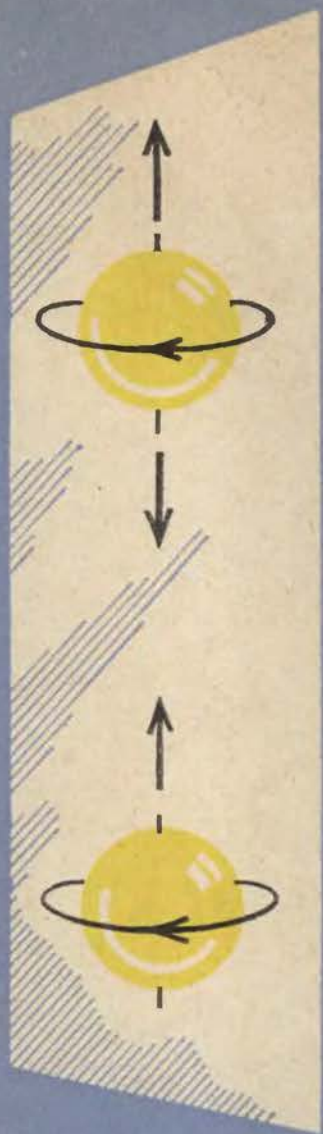


НАД ЧЕМ ДУМАЮТ ФИЗИКИ



# ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

ФМ

НАД ЧЕМ ДУМАЮТ ФИЗИКИ

---

ВЫПУСК 2

# ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Перевод с английского

М. К. ПОЛИВАНОВА, В. К. ФЕДЯНИНА  
и В. Т. ХОЗЯИНОВА

Под редакцией

Б. В. МЕДВЕДЕВА и Д. В. ШИРКОВА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1963

## АННОТАЦИЯ

Книга является сборником переводов статей из американского научно-популярного журнала «Scientific American», посвященных одной из наиболее актуальных и интересных проблем современной ядерной физики — проблеме элементарных частиц.

Статьи написаны ведущими специалистами: Сегре, Маршаком, Гелл-Манном, Дайсоном, Моррисоном и др. В них рассказывается об открытии новых элементарных частиц, создании античастиц и других крупнейших достижениях ядерной физики. Все статьи написаны на уровне, доступном для читателя со средним образованием, составлены в живой, увлекательной форме и богато иллюстрированы. Цель сборника — познакомить широкие круги советских читателей с рядом самых интересных проблем, которыми занимаются сейчас физики.

Над чем думают физики.

Выпуск 2

Элементарные частицы.

М., Физматгиз, 1963 г., 104 стр. с илл.

Редактор Б. Л. Лившиц.

Техн. редактор Н. Ф. Брудно.

Корректор Е. А. Белицкая.

Сдано в набор 28/IX 1962 г. Подписано к печати 28/I 1963 г. Бумага 70 × 108<sup>1/16</sup>. Физ. печ. л. 6,5. Условн. печ. л. 8,91. Уч.-изд. л. 8,25. Тираж 50 000 экз.  
Цена книги 25 коп. Заказ № 3403.

Государственное издательство физико-математической литературы.  
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова  
Московского городского совнархоза. Москва, Ж-54, Валовая, 28

Отпечатано с матриц в гос. типографии «Вайлдас»,  
Вильнюс, ул. Страздялю 1. Заказ № 1708.

Эта книга является вторым выпуском неперiodического сборника научно-популярных статей, выходящего 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 открывается обзорной статьей Гелл-Манна и Розенбаума, описывающей современное состояние физики элементарных частиц. Далее следует ряд статей, посвященных отдельным элементарным частицам (пионы, нейтрино, антипротон) и образуемым ими системам (позитроний, мезоатомы). В статье Ф. Моррисона подробно рассказывается об одном из наиболее интересных открытий последних лет — несохранении четности при  $\beta$ -распаде. Сборник завершается статьей крупного физика-теоретика Ф. Дайсона «Новаторство в физике», в которой дается своеобразный анализ развития физики, в значительной степени на материалах последних открытий в области физики элементарных частиц.

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

Физика элементарных частиц — чрезвычайно бурно развивающаяся область. Это, естественно, приводит к тому, что некоторые положения отдельных статей оказываются устаревшими. Там, где подобное расхождение с сегодняшними представлениями является существенным, сделаны соответствующие примечания.

Статьи «Элементарные частицы», «Пионы», «Нейтрино», «Мезоатомы» и «Ниспровержение четности» переведены В. Т. Хозяиновым; статьи «Простейший атом» и «Новаторство в физике» переведены М. К. Поливановым, статья «Антипротон» переведена В. К. Федяниным.

---



**М. Гелл-Манн и П. Е. Розенбаум**

## **ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ**

(ИЮЛЬ 1957 г.)

*Рассказ об абстрактных теоретических идеях, помогающих физикам понять материальный мир. Эти идеи позволяют установить некоторый порядок в хаотической толпе субатомных частиц.*

«Не существует истинно прекрасного  
без некоторой доли странности»

Френсис Бэкон

Этот афоризм Бэкона, без сомнения, справедлив в науке, как и в искусстве. Но разве слишком большие нарушения пропорций, странные отклонения от порядка не губят красоты? В течение многих лет одна из главнейших областей физической науки — учение о строении вещества — страдала болезнью странности. Когда физики исследовали вещество на самых малых расстояниях, оно представлялось им как произвольная смесь отдельных элементарных частиц, среди которых нельзя было заметить никакого строгого порядка. Теперь, наконец, картина начинает немного проясняться. Само слово «странность» вошло в словарь физиков, а ее «доля» уменьшилась настолько, что уже проступает красота упорядоченности.

Новые закономерности лучше всего оценить на том хаотическом фоне, из которого удалось их выделить. Для начала надо будет отправиться лет на 30 назад к одному из самых плодотворных периодов в истории науки. Теория атома была в основном завершена: почти все свойства вещества в его обычном состоянии могли быть выведены математически, исходя из понятий об отрицательно заряженных электронах, движущихся вокруг положительно заряженных ядер. Большинство проблем, над которыми билась физика и химия в течение целого столетия, были, по крайней мере в принципе, решены. Но как раз в это время физики впервые начали серьезно исследовать внутреннее строение атомных ядер.

И здесь начались их заботы. Скоро они узнали, что ядра состоят из протонов и нейтронов, однако объяснить свойства ядер только на основе этого представления не удалось. На самом деле мы и сейчас не знаем точно, как движутся эти частицы в ядре. Более того, оказалось, что при расщеплении и разрушении ядер возникают совершенно новые формы материи — удивительное разнообразие короткоживущих частиц, которые, судя по всему, не присутствуют внутри атомов вещества в обычном состоянии. Наличие некоторых из этих частиц было разумно объяснено при их появлении, другие же частицы не находили себе места в сложившейся физической схеме строения мира. Они были названы «странными» частицами.

## Первые частицы

Однако мы забежали вперед в своем рассказе. Нам следует вернуться к началу тридцатых годов, когда в атомном спектакле участвовали только четыре действующих лица: электрон, протон, нейтрон и фотон. Первые три являются строительным материалом атомов: протоны и нейтроны располагаются в ядрах, а электроны — в окружающем ядро пространстве. Фотон же есть квантовая единица излучения, т. е. иными словами, строительный кирпич электромагнитного поля.

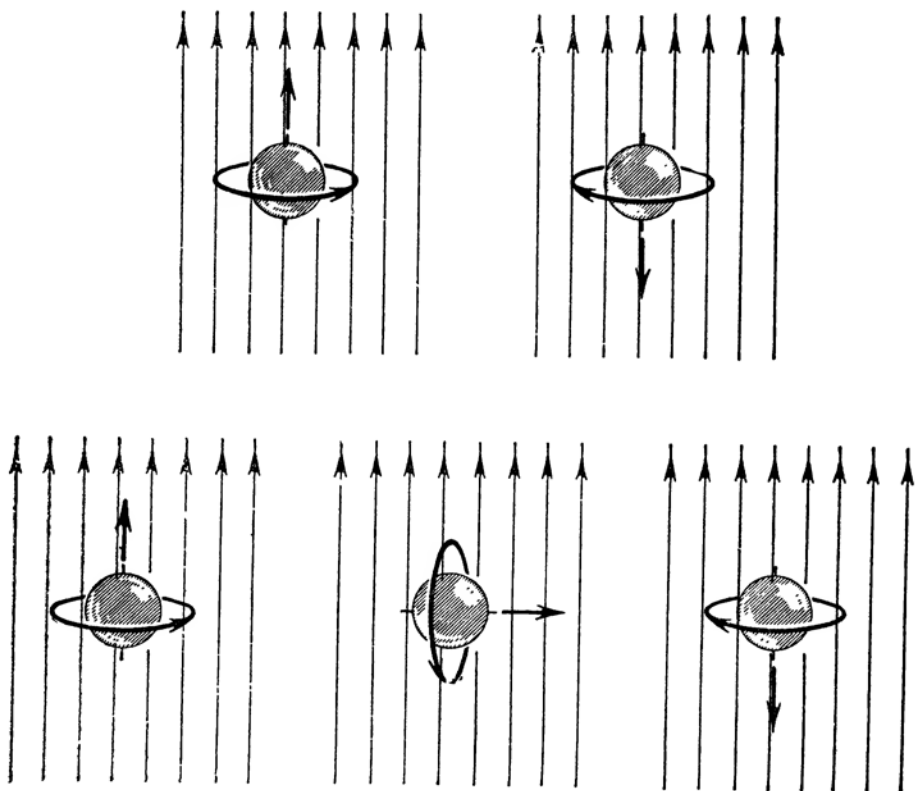


Рис. 1.1. Вращающаяся частица может принимать только некоторые фиксированные положения по отношению к внешнему магнитному полю (цветные стрелки). Частицы со спином  $\frac{1}{2}$  (вверху) могут располагать свои оси вдоль или против поля. Частицы со спином 1 (внизу) — вдоль, против и перпендикулярно к полю.

Фотон всегда движется со скоростью света (обозначаемой обычно буквой  $c$ ); он никогда не может находиться в покое. Вследствие своего движения фотон обладает энергией. Поэтому он обладает также и массой, согласно знаменитому соотношению  $E=mc^2$ . Но эта масса существует только благодаря движению. Наоборот, электрон, протон и нейтрон могут быть и неподвижными. Каждая из этих частиц, находясь в покое, имеет определенную массу, а значит, и соответствующую энергию покоя. (Находясь в движении, они, конечно, имеют дополнительную энергию и массу.) Электрон — самая легкая из обладающих массой покоя частиц, причем его масса принята за основную единицу в суб-

атомной физике. Величина отрицательного заряда электрона в свою очередь служит основной единицей электричества. В этих единицах протон обладает массой примерно 1836,1 и зарядом плюс один, нейтрон же имеет массу около 1838,6, но не обладает зарядом. Фотон, как мы уже сказали, не имеет массы покоя; не имеет он также и заряда, хотя является носителем электромагнитной энергии.

Все эти частицы вращаются вокруг своих осей, так что, будучи заряженными, они становятся маленькими магнетиками. Согласно законам квантовой теории, это вращение, или спин, имеет строго определенную величину, характерную для данной частицы. В системе единиц, используемой в квантовой теории, спин электрона, а также протона и нейтрона равен  $1/2$ ; спин фотона равен 1.

Есть и еще одно ограничение, накладываемое на вращательное движение этих частиц. Если частицы являются маленькими магнетиками, они подвержены действию внешних магнитных полей. В квантовой механике «ось вращения» каждой частицы может занимать только несколько строго определенных положений относительно внешнего поля. У частиц со спином  $1/2$  может быть только два таких положения: их спиновая ось может указывать либо вдоль, либо против направления поля. Для частиц со спином 1 допустимы уже три различных положения спиновой оси: вдоль поля, перпендикулярно к нему или же против поля (рис. 1.1).

Другим важнейшим свойством частиц, связанным также со спином, является их «статистика». Электроны, протоны и нейтроны (и все другие частицы со спином  $1/2$ ) подчиняются знаменитому принципу исключения. Он утверждает, что каждое данное квантовое «состояние» может занимать только одна частица какого-либо сорта. Например, в каждый момент времени возможен только один электрон, вращающийся в определенном направлении и движущийся по данной орбите вокруг ядра. Говорят, что частицы, подчиняющиеся принципу исключения, следуют статистике Ферми — Дирака; поэтому такие частицы называют фермионами.

Частицы, подобные фотону (и все другие частицы, спин которых выражается целым числом), не подчиняются принципу исключения. Они следуют статистике Бозе — Эйнштейна и называются бозонами.

### Взаимодействия

До сих пор мы главным образом говорили об отдельных изолированных частицах. Однако, как это будет становиться в дальнейшем все более очевидным, все частицы «связаны» одна с другой: когда частицы оказываются рядом, они взаимодействуют различным образом.

Первой из обнаруженных и изученных связей подобного рода была связь между электроном и фотоном. Именно это сродство лежит в основе квантовой электродинамики, венчающей всю атомную теорию. Много физиков приложило свои руки к развитию этой теории, в особенности П. А. М. Дирак в Англии, Вернер Гейзенберг и Вольфганг Паули в Германии. Теория объяснила поведение электронов в электромагнитных полях на основе представления о том, что каждый электрон непрерывно испускает и поглощает фотоны. Эти пульсации являются, можно сказать, «жизненными процессами» электрона; именно через них электромагнитное поле и электрон оказывают действие друг на друга.

Мы должны подчеркнуть, что только что сказанное есть не более, чем объяснение названия теории. В квантовой механике теория пред-

ставляет собой ряд математических соотношений, которые для данных взаимодействующих частиц и данных связей между ними детально предсказывают их поведение, давая вероятность каждой возможной реакции между частицами. Иногда, особенно в случае очень сильных взаимодействий, математические соотношения оказываются слишком сложными. Тогда теория ничем не может помочь. Однако в квантовой электродинамике математика еще послушна нам, и эта прекрасная теория с успехом предсказывает результат каждого фундаментального атомного эксперимента по крайней мере с той же точностью, с какой этот эксперимент может быть произведен.

Основная «реакция» квантовой электродинамики, состоящая в том, что электроны испускают и поглощают фотоны, является примером так называемого виртуального процесса. Это понятие, имеющее отношение ко всем элементарным частицам, свойственно только квантовой теории. Оно включает кажущееся нарушение закона сохранения энергии. Дело в том, что фотон, как мы видели, обладает энергией, поэтому, когда фотон самопроизвольно испускается электроном, полная энергия системы, казалось бы, внезапно увеличивается. Квантовая теория говорит тогда, — и в этом вся суть дела, — что фотон испускается и вновь поглощается столь быстро, что выигрыш в энергии, даже в принципе, не может быть наблюден. Такое явление и называют виртуальным процессом. Если фотон невозможно обнаружить, то закон сохранения энергии в действительности не нарушается, поскольку согласно квантовой механике физические законы относятся только к наблюдаемым величинам. Добавляя достаточное количество энергии извне (например, ускоряя электрон), мы можем виртуальные фотоны превратить в реальные частицы.

Виртуальные фотоны участвуют во всех взаимодействиях заряженных тел с электромагнитными полями. Положительный протон также испускает и поглощает виртуальные фотоны. Здесь, однако, теория не столь успешна; ее предсказания для протонов не так точны, как для электронов.

Для большого и важного круга явлений вышеприведенная схема была полна и вполне удовлетворительна. Взаимная связь фотона и электрона позволяла объяснить все внешние свойства атомов; протон и нейтрон были достаточны для объяснения наблюдаемых зарядов атомных ядер и, в первом приближении, их масс. Конечно, теория не содержала ничего, что могло бы объяснить, почему природа в качестве элементарных строительных единиц выбрала именно эти частицы. Но если принять этот выбор как нечто данное, тогда оказывалось, что известные частицы давали почти все, что было необходимо.

### Античастицы

Однако известных частиц все же было недостаточно. Во-первых, дираковская теория электрона предсказывала существование некоторых добавочных частиц (см. столбец II табл. 1.1). Хорошо известно, что по квантовой теории каждая фундаментальная частица обладает также свойствами волны. Когда было решено волновое уравнение Дирака для электрона, оказалось, что оно дает помимо положительной частоты также и отрицательную \*). Поскольку частота в квантовой механике пропор-

---

\*) См. статью Корбена и Бенедетти «Простейший атом» на стр. 62 этого сборника. (Прим. ред.)

Таблица 1.1

Таблица частиц отмечает увеличение их числа за последние 25 лет. Частицы, добавленные в столбцах II—IV, были вначале предсказаны теоретически. Те, которые добавлены в V и VI, были открыты опытным путем. «Обычные» частицы показаны белыми кружками, античастицы — черными кружками. Нейтральный пион и фотон сами себе античастицы. Верхняя группа включает тяжелые частицы, вторая сверху — мезоны. Красный цвет указывает на наличие сильной связи. Белая полоса между группами показывает, что тяжелые частицы сохраняются. Третья группа, на белом фоне, состоит из легких частиц. Черта над символом указывает античастицу, но это условие не проводится для пиона, мюона и электрона. Для объяснения  $K^0$  и  $K^0_s$  см. текст на стр. 17 и далее.

Частица					
I	II	III	IV	V	VI
$p$	$p^+$	$p^+$	$p^+$	$p^+$	$p^+$
$n$	$n^0$	$n^0$	$n^0$	$n^0$	$n^0$
$\bar{p}$	$\bar{p}^+$	$\bar{p}^+$	$\bar{p}^+$	$\bar{p}^+$	$\bar{p}^+$
$\bar{n}$	$\bar{n}^0$	$\bar{n}^0$	$\bar{n}^0$	$\bar{n}^0$	$\bar{n}^0$
$\pi^+$	$\pi^+$	$\pi^+$	$\pi^+$	$\pi^+$	$\pi^+$
$\pi^0$	$\pi^0$	$\pi^0$	$\pi^0$	$\pi^0$	$\pi^0$
$\pi^-$	$\pi^-$	$\pi^-$	$\pi^-$	$\pi^-$	$\pi^-$
$K^+$	$K^+$	$K^+$	$K^+$	$K^+$	$K^+$
$K^0$	$K^0$	$K^0$	$K^0$	$K^0$	$K^0$
$K^-$	$K^-$	$K^-$	$K^-$	$K^-$	$K^-$
$\Lambda^0$	$\Lambda^0$	$\Lambda^0$	$\Lambda^0$	$\Lambda^0$	$\Lambda^0$
$\Sigma^+$	$\Sigma^+$	$\Sigma^+$	$\Sigma^+$	$\Sigma^+$	$\Sigma^+$
$\Sigma^0$	$\Sigma^0$	$\Sigma^0$	$\Sigma^0$	$\Sigma^0$	$\Sigma^0$
$\Sigma^-$	$\Sigma^-$	$\Sigma^-$	$\Sigma^-$	$\Sigma^-$	$\Sigma^-$
$\Xi^0$	$\Xi^0$	$\Xi^0$	$\Xi^0$	$\Xi^0$	$\Xi^0$
$\Xi^-$	$\Xi^-$	$\Xi^-$	$\Xi^-$	$\Xi^-$	$\Xi^-$
$\Omega^-$	$\Omega^-$	$\Omega^-$	$\Omega^-$	$\Omega^-$	$\Omega^-$
$\bar{p}$	$\bar{p}^+$	$\bar{p}^+$	$\bar{p}^+$	$\bar{p}^+$	$\bar{p}^+$
$\bar{n}$	$\bar{n}^0$	$\bar{n}^0$	$\bar{n}^0$	$\bar{n}^0$	$\bar{n}^0$
$\bar{\pi}^+$	$\bar{\pi}^+$	$\bar{\pi}^+$	$\bar{\pi}^+$	$\bar{\pi}^+$	$\bar{\pi}^+$
$\bar{\pi}^0$	$\bar{\pi}^0$	$\bar{\pi}^0$	$\bar{\pi}^0$	$\bar{\pi}^0$	$\bar{\pi}^0$
$\bar{\pi}^-$	$\bar{\pi}^-$	$\bar{\pi}^-$	$\bar{\pi}^-$	$\bar{\pi}^-$	$\bar{\pi}^-$
$\bar{K}^+$	$\bar{K}^+$	$\bar{K}^+$	$\bar{K}^+$	$\bar{K}^+$	$\bar{K}^+$
$\bar{K}^0$	$\bar{K}^0$	$\bar{K}^0$	$\bar{K}^0$	$\bar{K}^0$	$\bar{K}^0$
$\bar{K}^-$	$\bar{K}^-$	$\bar{K}^-$	$\bar{K}^-$	$\bar{K}^-$	$\bar{K}^-$
$\bar{\Lambda}^0$	$\bar{\Lambda}^0$	$\bar{\Lambda}^0$	$\bar{\Lambda}^0$	$\bar{\Lambda}^0$	$\bar{\Lambda}^0$
$\bar{\Sigma}^+$	$\bar{\Sigma}^+$	$\bar{\Sigma}^+$	$\bar{\Sigma}^+$	$\bar{\Sigma}^+$	$\bar{\Sigma}^+$
$\bar{\Sigma}^0$	$\bar{\Sigma}^0$	$\bar{\Sigma}^0$	$\bar{\Sigma}^0$	$\bar{\Sigma}^0$	$\bar{\Sigma}^0$
$\bar{\Sigma}^-$	$\bar{\Sigma}^-$	$\bar{\Sigma}^-$	$\bar{\Sigma}^-$	$\bar{\Sigma}^-$	$\bar{\Sigma}^-$
$\bar{\Xi}^0$	$\bar{\Xi}^0$	$\bar{\Xi}^0$	$\bar{\Xi}^0$	$\bar{\Xi}^0$	$\bar{\Xi}^0$
$\bar{\Xi}^-$	$\bar{\Xi}^-$	$\bar{\Xi}^-$	$\bar{\Xi}^-$	$\bar{\Xi}^-$	$\bar{\Xi}^-$
$\bar{\Omega}^-$	$\bar{\Omega}^-$	$\bar{\Omega}^-$	$\bar{\Omega}^-$	$\bar{\Omega}^-$	$\bar{\Omega}^-$
$\mu^+$	$\mu^+$	$\mu^+$	$\mu^+$	$\mu^+$	$\mu^+$
$\mu^-$	$\mu^-$	$\mu^-$	$\mu^-$	$\mu^-$	$\mu^-$
$e^+$	$e^+$	$e^+$	$e^+$	$e^+$	$e^+$
$e^-$	$e^-$	$e^-$	$e^-$	$e^-$	$e^-$
$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$

циональна энергии, сначала трудно было понять, что может означать отрицательный ответ. Дираку, однако, удалось показать, что он имеет физический смысл и соответствует электрону с положительным зарядом. Согласно теории, если положительный электрон сталкивается с отрицательным электроном, они должны уничтожить друг друга или аннигилировать, причем их массы должны превратиться в фотоны соответствующей энергии. Наоборот, если удастся сконцентрировать достаточно энергии в маленьком объеме (что имеет место, например, при столкновении двух быстрых частиц), возможно рождение положительного и отрицательного электронов.

Эти замечательные предсказания не были на самом деле высказаны (хотя они и содержались в теории), пока Карл Д. Андерсон в Калифорнийском технологическом институте не открыл позитрон. Позитрон имел массу электрона и единственный положительный заряд; когда он встречался с отрицательным электроном, оба аннигилировали; он мог быть порожден одновременно с отрицательным электроном в столкновениях большой энергии. Позитрон называется античастицей электрона потому, что он «сокращается» с обычным электроном.

Подобные же уравнения имеются для протона и нейтрона, так что они тоже имеют свои античастицы. Эти античастицы были обнаружены только в течение последних двух лет \*). Даже фотон имеет в математическом смысле античастицу. Здесь, однако, оба решения уравнения могут быть интерпретированы совершенно одинаково, так что фотон и антифотон неразличимы. Иными словами, фотон является античастицей самому себе.

### Нейтрино

Второе необходимое дополнение к списку частиц возникло при анализе поведения нейтрона. Внутри ядра нейтрон может существовать сколько угодно долго. Но когда эта частица наблюдается вне ядра, оказывается, что она неустойчива. В среднем через 18 мин. нейтрон самопроизвольно испускает бета-частицу (электрон) и превращается в протон. Протон и электрон, вместе взятые, примерно на 1,5 электронной массы легче нейтрона; поэтому при распаде теряется 1,5 электронной массы, что эквивалентно примерно 780 000 электрон-вольт энергии. Эта энергия должна была бы проявиться как кинетическая энергия продуктов распада, но на самом деле протон и электрон крайне редко несут с собой столько энергии. Чтобы объяснить это расхождение, Паули предположил, что какая-то другая частица с нулевой массой покоя и почти неуловимая также образуется при распаде: она-то и уносит лишнюю энергию. Энрико Ферми, развивая эту идею, назвал невидимую частицу нейтрино \*\*). Проводя прямую аналогию с дираковскими процессами для электронов и фотонов, Ферми построил полную теорию бета-распада. Основной процесс в этой теории состоит в том, что нейтрон непрерывно теряет и вновь приобретает электрон и нейтрино через виртуальное испускание и поглощение. (Строго говоря, участвующее в этом процессе «нейтрино» есть в действительности антинейтрино.) Хотя реакция Ферми была записана как виртуальный процесс, но испускание (или процесс распада) может стать реальным без добавления энергии извне, так как необходимое количество энергии возникает за счет теряемой при распаде массы.

\*) См. статью Сегре и Виганда «Антипротон» на стр. 53 этого сборника. (Прим. ред.)

\*\*) См. статью Моррисона «Нейтрино» на стр. 40 этого сборника. (Прим. ред.)

## Пион

Последняя частица из тех, что нужно добавить к списку, была предсказана на основании другой аналогии с дираковским процессом. Задача состояла в том, чтобы описать силы, удерживающие протоны и нейтроны (вместе называемые нуклонами) внутри ядра. Раз электромагнитные силы были с успехом объяснены с помощью понятия о фотоне как кванте электромагнитного поля, то вполне логично было попробовать сделать то же самое для ядерных сил. Этот шаг был сделан японским физиком Хидэки Юкавой. Он предположил, что нуклоны испускают и поглощают кванты ядерного поля, названные мезонами, в точности так же, как электроны испускают и поглощают фотоны. Зная характерные свойства ядерных сил, Юкава сумел получить теоретически некоторые свойства мезона. Можно показать, что из факта действия ядерных сил только на очень коротких расстояниях следует, что мезон, в противоположность невесомому фотону, должен обладать конечной массой покоя. Были также различные соображения в пользу существования как заряженных, так и нейтральных мезонов.

Догадка Юкавы полностью подтвердилась, но только более чем 10 лет спустя. Частица, которую он предсказал, была найдена, и теперь она называется пи-мезоном, или пионом. Она весит около 270 масс электрона и существует в трех формах: положительной, отрицательной и нейтральной \*).

Испускание пионов нуклоном должно быть, конечно, виртуальным, поскольку пионы обладают энергией, включающей также и энергию, связанную с массой покоя. По идее, сила ядерных взаимодействий должна зависеть от числа квантов, находящихся вне испускающей частицы. Ядерные взаимодействия так сильны, что нуклон должен испускать пионы очень часто: в среднем одновременно вне нуклона должно быть более одного пиона. В действительности, общепринятая модель протонов и нейтронов представляет собой некоторое подобие сердцевины, окруженной пульсирующим облаком пионов. Как и в случае фотонов, если подвести достаточное количество энергии, пионы могут превратиться в реальные частицы. Масса пиона эквивалентна 135 миллионам электрон-вольт энергии, поэтому для получения одного реального пиона требуется не меньшая порция энергии.

Здесь мы подходим к концу первой части рассказа. Мы уже собрали достаточно большое число «элементарных» частиц, но существование каждой из них кажется в какой-то мере необходимым. Действительно, большинство из них было предсказано теоретически еще до того, как они были обнаружены. Как уже было указано, нейтрино имеет соответствующую античастицу. Отрицательный пион является античастицей положительного пиона, и наоборот. Нейтральный пион подобно фотону сам себе античастица. И наконец, реальные пионы, как и нейтроны, неустойчивы; в течение очень короткого времени они распадаются на другие частицы.

## Двенадцать частиц

Весь комплекс идей, изложенный выше, можно было бы назвать «теорией материи из дюжины частиц» (см. столбец IV табл. 1.1). Как мы

---

\*) См. статью Маршака «Пионы» на стр. 32 этого сборника. (Прим. ред.)

уже сказали, эта теория хорошо объясняет свойства атомов. Она оказывается довольно грубой при попытке охватить явления, происходящие в ядре, но в общих чертах все же объясняет и их. В любом явлении каждой частице находится свое место. Все они играют свою определенную роль, каждая естественным образом входит в теоретическую схему.

Более того, 12 частиц распределяются по четырем хорошо определенным группам: (1) тяжелые частицы, включающие нуклоны (протон и нейтрон) и их античастицы; (2) мезоны или частицы промежуточного веса; (3) легкие частицы, включающие электрон и нейтрино и их античастицы и, наконец, (4) фотон, сам по себе составляющий группу. Можно заметить также, что тяжелые и легкие частицы, которые являются «обычным» материалом строения вещества, имеют спин  $1/2$  и являются фермионами (табл. 1.2). Мезоны и фотоны, представляющие собой кванты полей, имеют спин нуль и единица, и поэтому входят в семью бозонов. Эти группы взаимно связаны тремя основными взаимодействиями: процесс Юкавы сочетает тяжелые частицы с мезонами, процесс Дирака — легкие частицы с фотонами, процесс Ферми — тяжелые частицы с легкими частицами (рис. 1.2).

Конечно, все эти частицы подчиняются также более общим основным законам физики. Они следуют законам сохранения энергии, импульса и момента количества движения. Кроме того, они подчиняются закону сохранения заряда. Насколько мы знаем, полная величина электрического заряда во вселенной никогда не меняется. Заряженные частицы могут порождаться только парами (частица — античастица), так что каждый новый положительный заряд уравнивается отрицательным. В каждой реакции между элементарными частицами полный заряд тел, вступающих в реакцию, должен быть равен полному заряду продуктов реакции.

Другой закон сохранения возникает из очевидной устойчивости ядерной материи. Все опытные данные указывают, что ядерное вещество никогда не исчезает и не возникает вновь; иными словами, число нуклонов должно всегда оставаться постоянным. Таким образом, протон может быть порожден в реакциях очень больших энергий, но всегда только вместе с антипротоном. Оба «сокращают» один другого как математически, так и (при столкновении) физически.

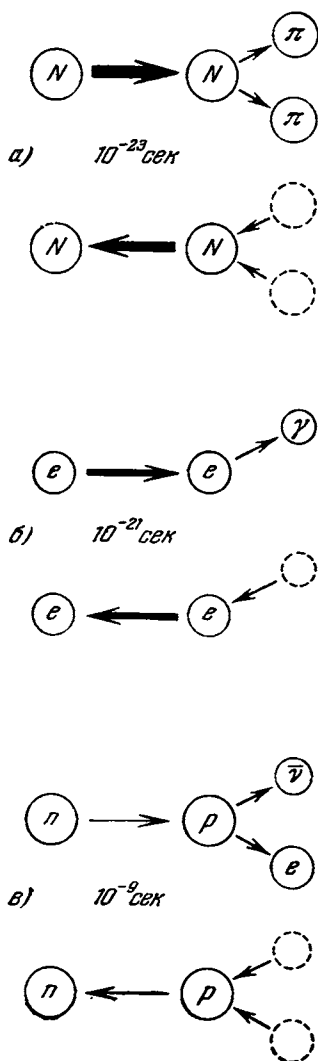


Рис. 1.2. Схема основных процессов.

В сильном взаимодействии Юкавы (рис. 1.2, а) нуклон «виртуально» испускает пионы (наверху) и поглощает их (ниже). Характерное время для процесса отмечено между двумя реакциями. В электромагнитном взаимодействии (рис. 1.2, б) электрон (или другая заряженная частица) виртуально испускает и поглощает фотоны. В слабом и гораздо более медленном взаимодействии Ферми (рис. 1.2, в) нейтрон виртуально испускает и поглощает электрон и антинейтрино.



Таблица 1.2

Свойства частиц определяются с все большей точностью. Эта таблица представляет последние экспериментальные данные. Спины  $K$ -мезонов и «странных» тяжелых частиц пока еще сомнительны. Для нестабильных частиц, имеющих более одного способа распада, таблица перечисляет все возможные продукты реакции, известные в настоящее время. Однако могут быть открыты еще и другие способы.

Частица	Спин	Масса	Время жизни, сек	Продукты распада
Кси $\Xi^-$	$\frac{1}{2}$	2585	$10^{-10}$ до $10^{-9}$	$\Lambda^0 + \pi^-$
$\Xi^0$	$\frac{1}{2}$	не обнаружена		
Сигма $\Sigma^+$	$\frac{1}{2}$	2325	$0,7 \cdot 10^{-10}$	$p + \pi^0, n + \pi^+$
$\Sigma^-$	$\frac{1}{2}$	2341	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$n + \pi^-$
$\Sigma^0$	$\frac{1}{2}$	2324	не измерено	$\Lambda^0 + \gamma$
Ламбда $\Lambda^0$	$\frac{1}{2}$	2182	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$p + \pi^-, n + \pi^0$
Протон $p$	$\frac{1}{2}$	1836,1	стабилен	
Нейтрон $n$	$\frac{1}{2}$	1838,6	$\sim 1000$	$p + e^- + \bar{\nu}$
$K$ -мезон $K^+$	0	966,5	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu, \pi^+ + \pi^0, \pi^+ + \pi^+ + \pi^-,$ $\pi^+ + \pi^0 + \pi^0, \mu^+ + \nu + \pi^0,$ $e^+ + \nu + \pi^0$
$K^-$	0	966,5	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\mu^- + \bar{\nu}, \pi^- + \pi^0, \pi^- + \pi^- + \pi^+,$ $\pi^- + \pi^0 + \pi^0, \mu^- + \bar{\nu} + \pi^0,$ $e^- + \bar{\nu} + \pi^0$
$K_1^0$	0	965	$1 \cdot 10^{-10}$	$\pi^+ + \pi^-, \pi^0 + \pi^0$
$K_2^0$	0	965	$3 \cdot 10^{-8}$ до $10^{-6}$	$\pi^+ + e^- + \bar{\nu}, \pi^- + e^+ + \nu,$ $\pi^+ + \mu^- + \bar{\nu}, \pi^- + \mu^+ + \nu,$ $\pi^+ + \pi^- + \pi^0, \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$
Пион $\pi^+$	0	273,2	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$
$\pi^-$	0	273,2	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \bar{\nu}$
$\pi^0$	0	264,2	$10^{-16}$ до $10^{-15}$	$\gamma + \gamma$
Мюон $\mu^-$	$\frac{1}{2}$	206,7	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$e^- + \nu + \bar{\nu}$
Электрон $e^-$	$\frac{1}{2}$	1	стабилен	
Нейтрино $\nu$	$\frac{1}{2}$	0	стабильно	
Фотон $\gamma$	1	0	стабилен	

### Реакции между частицами

Отметим еще две особенности реакций между элементарными частицами, которые имеют значение общих законов. Во-первых, реакции обратимы. Если одна частица распадается на две другие, то мы можем ожидать, что и обратно данная пара может соединиться, образовав первоначальную частицу. Во-вторых, испускание частицы связано с поглощением соответствующей античастицы: если мы знаем «эффективное сечение» или вероятность для одного из этих процессов, мы можем подсчитать вероятность другого процесса. Возьмем, к примеру, процесс бета-распада (см. реакции 1—3 в табл. 1.3). Поскольку нейтрон превращается в протон, испуская электрон и антинейтрино, мы можем ожидать существование обратной реакции, в которой протон поглощает электрон и антинейтрино, превращаясь в нейтрон (реакция 2). Кроме того, поскольку

## Реакции между частицами

Уравнения между частицами суммируют некоторые цепи рассуждений, обсуждаемые в тексте. Некоторые из этих цепей рассуждений оказываются ложными, на что указывает тот факт, что предсказываемые реакции не имеют места. Эти реакции заключены в прямоугольные рамки.

1. $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$	Процесс Ферми. Нейтрон расщепляется на протон, электрон и антинейтрино.
2. $p + e^- + \bar{\nu} \rightarrow n$	Обратная реакция. Протон, электрон и антинейтрино соединяются, образуя нейтрон.
3. $p + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + n$	Переносим в правую часть электрон как античастицу. Протон взаимодействует с антинейтрино, чтобы дать позитрон и нейтрон.
4. $p \xrightarrow{B} p + \pi^0$	Процесс Юкавы. Протон расщепляется (виртуально) на протон и нейтральный пион.
5. $p + \pi^0 \xrightarrow{B} p$	Обратная реакция. Протон и пион соединяются, образуя протон.
6. $\pi^0 \xrightarrow{B} p + \bar{p}$	Переносим в правую часть протон как античастицу. Пион расщепляется на протон и антипротон.
7. $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$	Протон и антипротон аннигилируют, давая фотоны.
8. $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	Окончательный результат. Нейтральный пион распадается на фотоны.
9. $p \xrightarrow{B} n + \pi^+$	Процесс Юкавы. Протон расщепляется (виртуально) на нейтрон и положительный пион.
10. $n + \pi^+ \rightarrow p$	Обратная реакция. Нейтрон и пион соединяются, образуя протон.
11. $\pi^+ \xrightarrow{B} p + \bar{n}$	Переносим нейтрон в правую часть как антинейтрино. Пион расщепляется на протон и антинейтрон.
12. $p + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + n$	Процесс Ферми. Протон взаимодействует с антинейтрино и дает позитрон и нейтрон.
13. $p + \bar{n} \rightarrow e^+ + \nu$	Переносим в другие части уравнения антинейтрино и нейтрон как античастицы. Протон взаимодействует с антинейтроном, чтобы дать позитрон и нейтрино.
14. $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu$	Окончательный результат. Положительный пион распадается на позитрон и нейтрино.
15. $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$	Гипотетический процесс. Отрицательный пион и протон взаимодействуют, чтобы дать лямбда-частицу и нейтральный пион.
16. $\Lambda^0 + \pi^0 \rightarrow \pi^- + p$	Обратная реакция. Нейтральный пион взаимодействует с лямбда-частицей, чтобы дать отрицательный пион и протон.
17. $\Lambda^0 \xrightarrow{B} \pi^0 + \pi^- + p$	Переносим нейтральный пион в правую часть (он сам себе античастица). Лямбда-частица распадается (виртуально) на нейтральный пион, отрицательный пион и протон.
18. $p + \pi^0 \rightarrow p$	Процесс Юкавы. Протон поглощает нейтральный пион.
19. $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$	Окончательный результат. Лямбда-частица быстро распадается на протон и отрицательный пион.

20. $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$	Гипотетический процесс. Пион и протон взаимодействуют, чтобы дать лямбда-частицу и нейтральный $K^0$ -мезон.
21. $\Lambda^0 + K^0 \rightarrow \pi^- + p$	Обратная реакция. Лямбда- и $K$ -частицы взаимодействуют, чтобы дать пион и протон.
22. $\Lambda^0 \xrightarrow{B} \pi^- + p + \bar{K}^0$	Переносим $K$ -частицу в правую часть как античастицу. Лямбда-частица распадается (виртуально) на пион, протон и анти- $K$ -частицу.
.....	.....
23. $p + \pi^- \rightarrow n$	Процесс Юкавы. Протон поглощает пион, превращаясь в нейтрон.
24. $\Lambda^0 \rightarrow n + \bar{K}^0$	Окончательный результат. Лямбда-частица распадается на нейтрон и анти- $K^0$ -частицу.

поглощение электрона соответствует испусканию антиэлектрона или позитрона, должна существовать и реакция, в которой протон поглощает антинейтрино и испускает позитрон, вновь превращаясь в нейтрон (реакция 3). Исторически именно с помощью этой реакции было в конце концов опытным путем обнаружено нейтрино.

Таким образом, эти правила дают нам своего рода алгебру для «решения» задач в физике элементарных частиц. Посмотрим, как это делается, на простом примере — распаде пиона. Экспериментально известно, что нейтральный пион распадается на пару фотонов за очень короткое время: около  $10^{-15}$  сек. Покажем, почему это должно быть именно так (реакция 4—8). Начнем с основной реакции с участием пионов — реакции Юкавы, в которой нуклон (например, протон) испускает виртуальный пион. Нас интересует, что будет происходить с пионом, поэтому нам надо получить уравнение, в левой части которого оставался бы только нейтральный пион. Обращая уравнение и заменяя частицы античастицами с переносом в другую часть уравнения, получаем искомое уравнение (реакция 6): пион превращается (виртуально) в пару протон — антипротон. Такая пара аннигилирует и может породить фотоны. Следовательно, мы получили желаемый результат: нейтральный пион распадается на два фотона.

Для новичка подобная цепь рассуждений может показаться простой перетасовкой символов. Не надо, однако, забывать, что перетасовка эта возникает как итог детальных (и часто очень сложных) вычислений самих вероятностей. Так что в конце концов мы приходим к разумно точному предсказанию того, что должно произойти, сколько времени это займет и т. д. Однако, с другой стороны, наши знания действительного положения дел еще столь неполны, что внешне, казалось бы, абсолютно несокрушимая цепь рассуждений может привести к совершенно ошибочным результатам.

### Мюон

Нет лучшей иллюстрации этому, чем распад заряженного пиона. Используя наши основные реакции и правила, мы можем «доказать», что положительный пион должен распадаться на позитрон и нейтрино (реакции 9—14). Однако если эта реакция и имеет вообще место, она случается столь редко, что никогда еще не наблюдалась\*). Как же положительный пион распадается на самом деле? Он дает нейтрино и совершенно новую частицу — мюон!

\*) В самое последнее время эту реакцию удалось наблюдать. (Прим. ред.)

Здесь природа сыграла с нами особенно злую шутку. Она предложила нам частицу, для существования которой не было никаких теоретических оснований и которая не приносила никакой пользы. Мюон явился подкидывшем на пороге дома, означая конец дням невинности. Положение еще более усложнилось в связи с неблагоприятной исторической обстановкой, которая в течение долгого времени делала невозможной даже самую классификацию мюона. Дело в том, что мюон был открыт ранее пиона и всеми принят за тот самый мезон, который предсказал Юкава. Однако свойства мюона совершенно не подходили для этой роли. Он явно не взаимодействовал сильно с нуклонами и поэтому никак не мог быть частицей, ответственной за поле ядерных сил. Таким образом, пока не был открыт пион, мюон имел еще меньше смысла, чем теперь.

Сейчас, когда мы знаем, чем не является мюон, посмотрим, что же он собой представляет, чтобы принять его таким, какой он есть. Он появляется и с положительным и с отрицательным зарядами (отрицательный пион распадается на отрицательный мюон и антинейтрино). Его вес около 207 электронных масс, а спин равен  $1/2$  (т. е. он является фермионом). Мюон живет около миллионной доли секунды, а затем распадается на электрон, нейтрино и антинейтрино\*). Положительный мюон может, конечно, дать положительный электрон или позитрон, а отрицательный мюон — отрицательный электрон. Каждый из этих мюонов является античастицей другого.

Хотя мюон не входит в «теорию дюжины» (скорее именно его существование показывает, что такая теория неполна, если не ошибочна), он может быть связан с другими частицами. Для того чтобы увидеть, как это делается, надо вернуться к нашим основным процессам: Дирака (электромагнитных взаимодействий), Юкавы (ядерных взаимодействий) и Ферми (или процессу бета-распада). Оказывается, что эти процессы колоссально отличаются по своей «силе». Процесс Юкавы известен как сильное взаимодействие, он лежит в основе больших сил, удерживающих нуклоны внутри ядра. Электромагнитные силы примерно в 137 раз слабее, чем ядерные. Другой характеристикой сил является вероятность того, что процесс произойдет за данный промежуток времени, т. е. средняя скорость процесса. Сильные взаимодействия столь быстры, как это только возможно. Испускание и поглощение пиона занимает всего около  $10^{-23}$  сек, что примерно является временем, необходимым световому лучу для того, чтобы покрыть расстояние, равное диаметру нуклона. Электромагнитный процесс, конечно, в 137 раз медленнее.

Как же обстоит дело с ферми-взаимодействием? Оно несравненно слабее других. Коэффициент пропорциональности равен примерно  $10^{-14}$ , следовательно, это взаимодействие в сто тысяч миллиардов раз слабее, чем сильное взаимодействие. Кроме того, все процессы, включающие нейтрино, — бета-распад и распад пионов и мюонов, — примерно одинаково слабы. Значит, мюон участвует в одном из трех основных типов взаимодействий. (Как заряженная частица, конечно, он участвует также и в электромагнитных взаимодействиях.) Поскольку он является легким фермионом, он, по-видимому, естественно попадает в одну группу с электроном и нейтрино.

Взгляд на таблицу времен жизни покажет, что распады, про которые мы сказали, будто они одинаково медленны, на самом деле имеют

\*) В настоящее время установлено, что нейтрино, возникающие при распаде мезонов, отличаются от нейтрино, возникающего при превращении нейтрона в протон. (Прим. ред.)

существенно различные времена жизни. Но ведь предполагается, что скорость процесса является характеристикой его силы? Ответ состоит в том, что скорость реакции определяется не только силой взаимодействия. Она зависит также от освобождающейся в реакции энергии. В случае нейтрона, который в среднем тратит на распад около 18 мин., эта энергия очень мала: разность между массой распадающейся частицы и полной массой продуктов распада лишь немногим больше одной электронной массы. При распадах пиона и мюона избыток энергии гораздо больше, поэтому такие процессы идут быстрее. Если в каждом случае сделать соответствующие поправки, учитывающие различие в доступной энергии, то оказывается, что «внутренняя» скорость для всех процессов слабого взаимодействия очень близка к  $10^{-9}$  сек, т. е. в  $10^{14}$  раз меньше, чем для сильного взаимодействия.

Несомненно, чрезвычайно примечательно, что все процессы слабого взаимодействия имеют одинаковую силу, и это, вероятно, не случайно. Природа старается рассказать нам здесь что-то очень существенное, но мы пока не в состоянии расшифровать это послание.

### «Странные» частицы

В истории с мюоном природа вежливо предупредила физиков, что они еще далеко не разгадали ее сокровенных секретов. А потом, около 1950 г., она бесцеремонно вывела на сцену целую процессию новых частиц. Они явились совершенно неожиданно и имели свойства, которые не могли быть объяснены на основе существовавшей в то время теории.

Новорожденные обнаружили сначала в ливнях частиц, возникающих при прохождении космических лучей высокой энергии через свинцовую пластину в камере Вильсона. Среди следов, составляющих ливень, было найдено несколько чрезвычайно любопытных двузубых или V-образных следов, происхождение которых не могло быть объяснено ни одним из известных процессов с частицами. Физики были вынуждены сделать заключение, что некоторая неизвестная нейтральная частица (не оставляющая следов в камере) распадалась на две заряженные частицы. Эта нейтральная частица, вероятнее всего, рождалась в свинцовой пластине. Как только начали систематически искать эти так называемые V-частицы, оказалось, что они встречаются довольно часто.

Когда V-события были собраны и изучены, стало ясно, что имеется по крайней мере два сорта новых нейтральных частиц. Частицы одного сорта, распадавшиеся на протон и отрицательный пион, были названы лямбда-частицами; другие же, распадавшиеся на положительный и отрицательный пионы, получили наименование K-частиц (рис. 1.3).

Оправившись от потрясения, физики попытались найти для новых частиц какое-либо место в общей схеме. По типу распада (на фермион и бозон) лямбда-частицу надо отнести к фермионам, предположительно спин  $1/2$ . Далее, эти частицы должны подчиняться закону сохранения нуклонов. Поскольку при распаде частицы возникает нуклон, то и в процессе ее образования должен принимать участие один нуклон. Например, лямбда-частица могла бы возникать при столкновении между протоном и отрицательным пионом, т. е. в процессе, обратном процессу распада. (При этом должны возникать и другие частицы, подобные нейтральным пионам, чтобы унести с собой избыток энергии.) Частота появления лямбда-частиц показывает, что здесь мы имеем дело с сильным взаимодействием. Масса лямбда-частицы оказалась равной 2182 электронным массам.

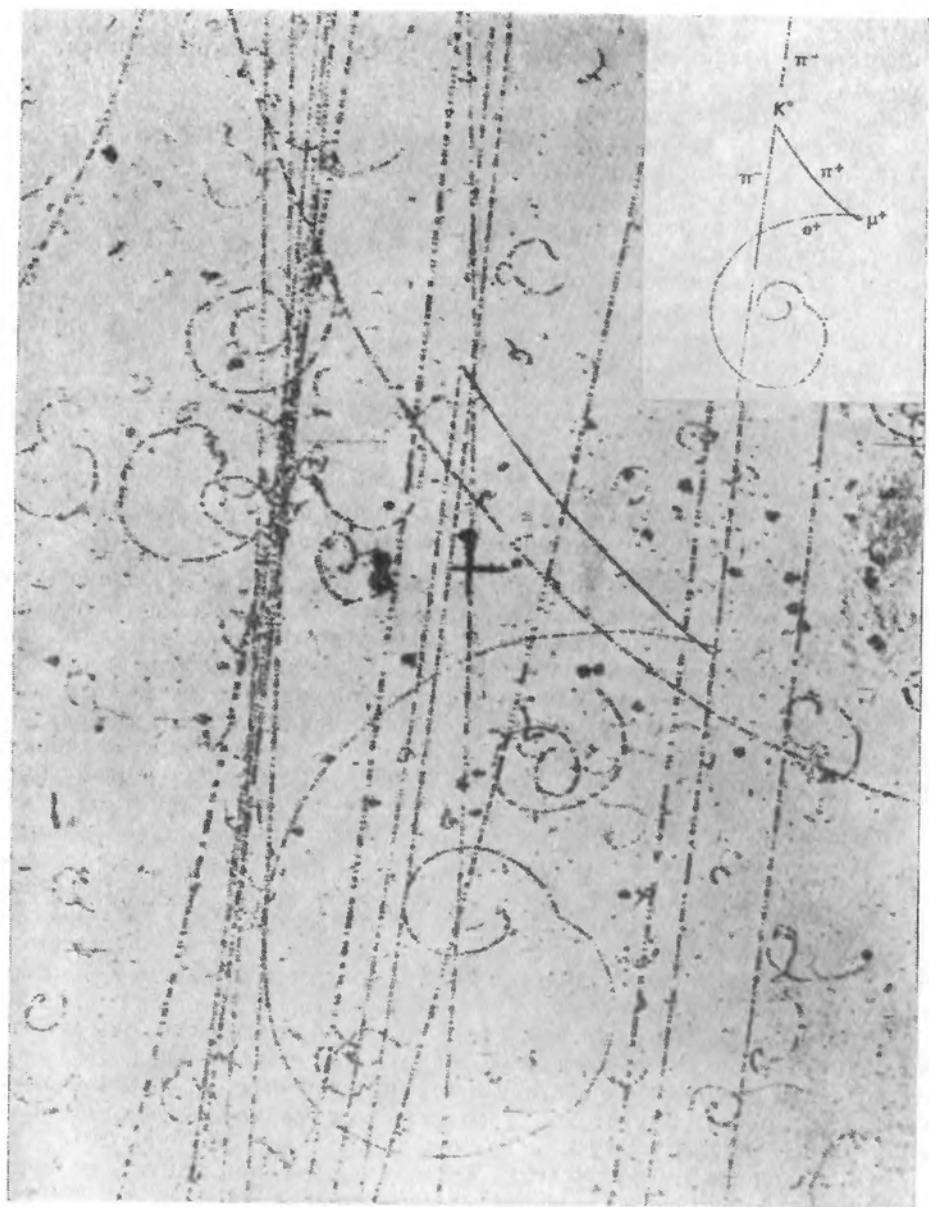


Рис. 1.3. Нейтральная  $K$ -частица, образовавшаяся при столкновении отрицательного пиона и протона, распадается на пару противоположно заряженных пионов, как это показано на схеме справа сверху.

Событие зарегистрировано на этой фотографии в виде ряда пузырьков, образованных заряженными частицами в камере с жидким пропаном. Положительный пион распадается далее на мюон и нейтрино, которое не оставляет пузырьков следов. В конце концов мюон распадается на позитрон и два невидимых нейтрино. Вероятно, вместе с  $K$ -частицей была образована нейтральная лямбда-частица, но при этом она покинула камеру, не распавшись на заряженные частицы и не оставив следов.

Исходный пион был получен на Космотроне Брукхэвенской национальной лаборатории.

*K*-частицы должны быть бозонами, потому что они распадаются на два пиона, которые являются бозонами. Их спин должен выражаться целым числом (скорее всего, нулем). Эти частицы не могут возникать из нуклонов, поскольку среди продуктов распада нуклонов нет. Однако они возникают часто, так что процесс их образования также связан с сильным взаимодействием. Масса таких частиц равна 965.

Эти первые соображения позволяют нам в какой-то степени классифицировать новые частицы. Ламбда-частицы, несомненно, принадлежат к нуклонам или тяжелым частицам. Они возникают из нуклонов и подобно им являются фермионами. С другой стороны, *K*-частицы являются бозонами; следовательно, они входят в мезонную группу вместе с пионами.

Но ламбда- и *K*-частицы были только началом. Вскоре были открыты другие частицы. К той же категории, что и ламбда-частицы, относятся сигма-частицы (рис. 1.4), заряженные и нейтральные, а также отрицательная кси-частица (рис. 1.5). В дополнение к нейтральной *K*-частице была найдена пара заряженных частиц примерно той же массы, которые были названы положительной и отрицательной *K*-частицами.

### Большие времена жизни

Само существование всех этих разнообразных типов частиц представляло сложную проблему. Но даже если принять как факт их наличие, то поведение частиц ставит нас перед еще более глубокими вопросами. Трудность возникает при объяснении процесса распада новых частиц. Времена их жизни оказываются порядка  $10^{-8}$  или  $10^{-10}$  сек, что соответствует на шкале времен слабым взаимодействиям. Но возникают эти частицы, как мы видели, в результате сильных взаимодействий с характерным временем порядка  $10^{-23}$  сек. Согласно же одному из самых главных наших принципов — закону обратимости — частицы, возникающие в сильном взаимодействии, должны и распадаться этим же путем.

Казалось бы, новые частицы имеют все возможности для распада в процессе сильного взаимодействия. Возьмем, например, нейтральную ламбда-частицу и попробуем вновь сыграть в перетасовку символов в уравнениях реакций между частицами (см. реакции 15—19 в табл. 1.3). Используя два процесса с сильным взаимодействием, один известный, а другой гипотетический, но вполне правдоподобный, мы приходим к утверждению, что ламбда-частица может превращаться в протон и отрицательный пион, как это и происходит в действительности. Что же касается энергии, то ее вполне достаточно: масса ламбда-частицы на 74 единицы больше, чем сумма масс протона и пиона, что эквивалентно энергии в 37 *Мэв*. Таким образом, мы «доказали», что ламбда-частица может распадаться столь же быстро, как она возникает. То же самое может быть сделано и для других новых частиц. Неувязка только в том, что эти частицы живут в 100 000 миллиардов раз дольше, чем это следует из наших рассуждений! Именно это огромное расхождение между ожидаемым и действительным временами жизни и побудило назвать такие частицы «странными».

### Совместное порождение

После примерно двухлетнего размышления над положением вещей ряд теоретиков и, в частности А. Пайс из Принстонского института передовых исследований, предложили возможное толкование парадокса. Идея состояла в том, что странные частицы возникают только группами

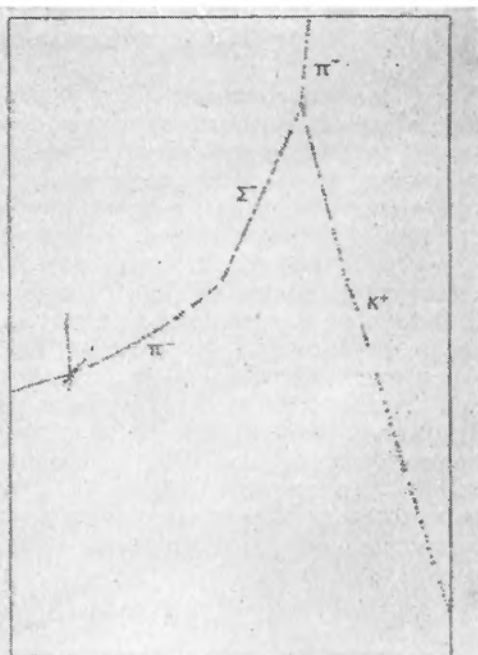


Рис. 1.4. Сигма и  $K$ -частицы образовались одновременно, когда пион ударил по протону в пузырьковой камере. Сигма-частица распалась на пион и невидимый нейтрон. Пион затем попал в ядро углерода и образовал «звезду» (см. схему справа).

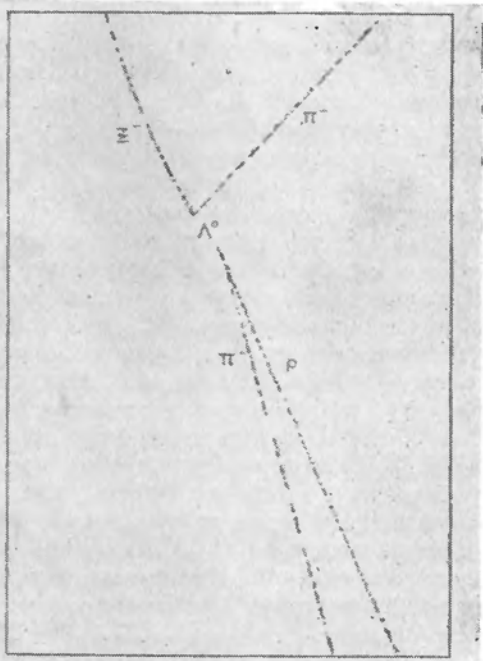
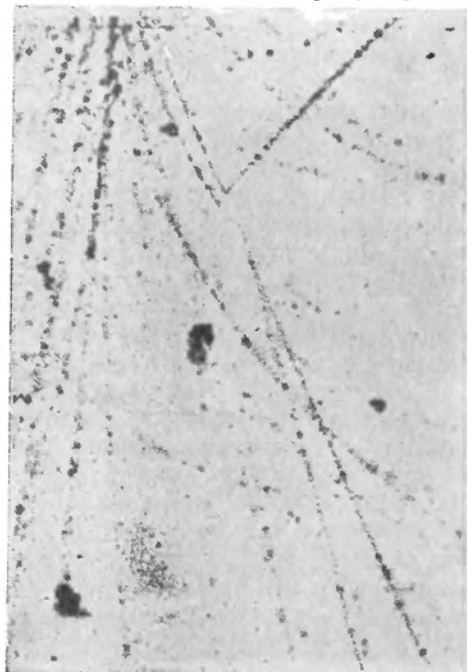


Рис. 1.5. Отрицательная кси-частица распадается на нейтральную лямбда-частицу и отрицательный пион. Лямбда-частица распадается затем на протон и второй отрицательный пион.

Кси-частица была получена при столкновении высокоэнергичной космической частицы с ядром в пластине свинца. Фотография показывает треки в камере Вильсона под пластиной.



по две и более за раз (рис. 1.6). Это представление известно теперь под именем концепции совместного порождения. Предполагается, что сильное взаимодействие, образующее странную частицу, может каким-то образом производить их только более одной одновременно. Фокус в том, что процесс с сильным взаимодействием такого рода не будет обратимым ввиду недостатка энергии.

Для примера предположим, что лямбда- и  $K$ -частицы образуются при столкновении отрицательного пиона с протоном. Применим наши правила составления реакций к этому процессу, чтобы предсказать судьбу лямбда-частицы (реакции 20—24 в табл. 1.3). Мы приходим к выводу, что она «распадается» на нейтрон и анти- $K^0$ -частицу. Но это, конечно, невозможно, потому что две дочерние частицы имеют общую массу, большую, чем масса первоначальной частицы. Тщательный анализ показывает, что всякий возможный случай совместного порождения ведет к тому же результату для сепаратного распада каждой из получающихся странных частиц. Возможные пути распада каждый раз оказываются закрытыми вследствие нехватки энергии. Таким образом, разлетаясь в стороны друг от друга сразу после рождения, странные частицы оказываются спасенными от быстрой гибели в процессе с сильным взаимодействием и живут до тех пор, пока их существование не прерывается гораздо менее вероятным слабым процессом.

Вначале почти совсем не было экспериментальных доказательств существования такого совместного порождения. Однако, когда Космотрон в Брукхэвенской национальной лаборатории позволил получать нужное количество странных частиц, оказалось, что это правило аккуратно выполняется. Действительно, первая же открытая реакция как раз и состояла в столкновении пиона с протоном, что вело к совместному порождению лямбда- и нейтральной  $K$ -частицы.

Возник вопрос: что же все-таки означает совместное порождение? Может ли это правило быть связано с другими принципами? Оно утверждает, что реакции с сильным взаимодействием, в которых участвует только одна странная частица, запрещены. Когда природа исключает какое-либо явление, ее запрет часто принимает форму некоторого закона сохранения: «То-то и то-то не может случиться, потому что нечто должно сохраняться».

Простой пример состоит в том, что мы никогда не видим, чтобы частица распалась на две другие частицы, сумма масс которых больше массы первоначальной. Этому мешает закон сохранения энергии.

Как только было найдено правило совместного порождения, естественно возник вопрос, какой закон сохранения скрывается за ним. Если бы такой закон был найден, мы могли бы узнать гораздо больше нового относительно странных частиц.

Правило совместного порождения утверждает, что они могут возникать только группами больше одной сразу. Но все ли комбинации возможны или некоторые исключаются? Закон сохранения должен был ответить на это.

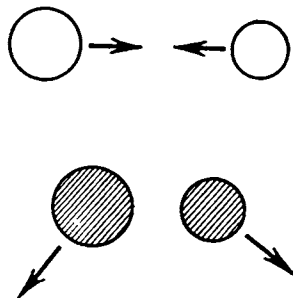


Рис. 1.6. Совместное порождение. Две обыкновенные частицы сталкиваются (вверху), образуя пару «странных» частиц (внизу), которые немедленно разлетаются.

### Изотопический спин

Оказалось, что такой закон можно найти, и мы знаем теперь некоторые правила, согласно которым возникают странные частицы. Для того чтобы понять, в чем состоит этот закон и правила, мы должны вернуться к «старым» частицам и к одному понятию, о котором мы до сих пор не упоминали. Это — понятие «изотопического спина».

Вначале сделаем несколько замечаний по поводу обычного спина. Пусть мы имеем пару изолированных электронов, которые можно себе представить как две маленькие крупинки. Насколько мы знаем, они совершенно идентичны. Мы знаем, что они вращаются, но «крупинки» столь малы, что мы не можем обнаружить их движение. Поместим теперь эти крупинки в магнитное поле. Подчиняясь законам квантовой механики, их спиновые оси расположатся вдоль или против направления поля. Предположим, что ось одной частицы будет направлена по полю, а второй — против поля (рис. 1.7). Тогда эти частицы будут иметь различные энергии, и мы сможем их отличить одну от другой. Этот воображаемый эксперимент подчеркивает тот факт, что электрон в отношении своих магнитных свойств является «дублетом». Он может находиться в одном из двух возможных энергетических состояний. Но без внешнего магнитного поля нет никакой возможности разделить эти состояния: они «вырождаются» в неразличимые.

В ранний период развития современной ядерной физики — вскоре после открытия нейтрона — возникла ситуация, похожая на это магнитное «вырождение». Опыты по рассеянию движущихся протонов и нейтронов другими протонами и нейтронами вскрыли неожиданное обстоятельство; оказалось, что ядерное или сильное взаимодействие между нуклонами одинаково, независимо от типа участвующей в опыте частицы. Силы, действующие между двумя протонами, двумя нейтронами или протоном и нейтроном, одинаковы. Это явление, названное зарядовой независимостью, означает, что, коль скоро дело идет о сильном взаимодействии, нейтрон и протон выглядят как одна и та же частица. Их можно различить только за счет электромагнитного взаимодействия. Представим себе, что электромагнитные силы могут быть «выключены» подобно магнитному полю в лабораторном опыте. Тогда протон и нейтрон выродятся в неразличимые частицы. Поэтому нуклон можно рассматривать как «зарядовый дублет», в котором одно состояние представляет протон, а другое — нейтрон.

Эта идея пришла в голову Гейзенбергу, который приступил к ее математическому воплощению. Он построил математическое описание нуклона, которое содержало переменную, способную принимать только два значения: одно из этих значений представляет протон, другое — нейтрон. Эта математическая схема очень похожа на ту, которую предложил Паули для описания спина электрона. Поэтому Гейзенберг назвал свою величину изотопическим спином. Слово «изотопический» выражает тот факт, что в некотором смысле протон и нейтрон являются изотопами: они имеют почти одинаковую массу, но различный заряд. Слово «спин» возникло из чистой аналогии и отчасти даже вводит в заблуждение. Оно просто отражает сходство с математическим описанием реального спина. Изотопический спин, таким образом, есть математическое понятие, отличающее протон от нейтрона; физически они отличаются разным отношением к электромагнитному полю.

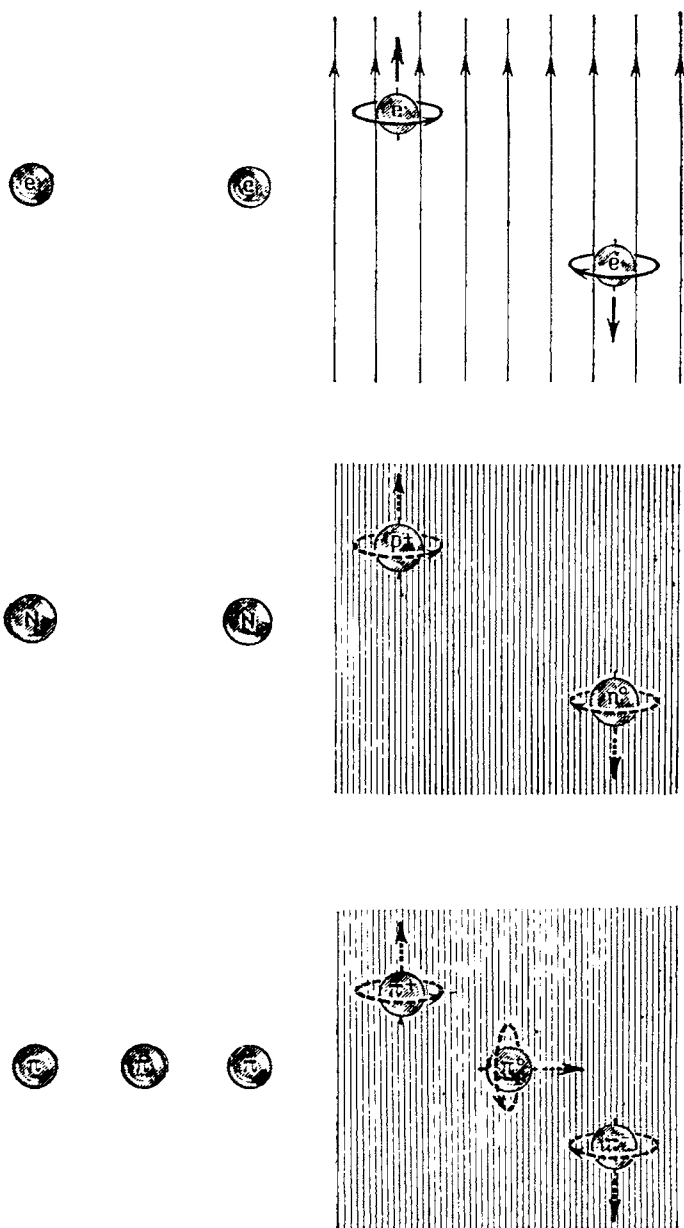


Рис. 1.7. Разные состояния частицы можно различить только в результате некоторого, взаимодействия.

Два вращающиеся в противоположные стороны электрона (вверху) будут совершенно одинаковы в отсутствие внешнего поля (слева). Когда поле (цветные стрелки) включено, электроны разделяются на разные энергетические состояния (справа). Аналогично в отсутствие электромагнитного взаимодействия все нуклоны (в середине) неразличимы, как и все пионы (внизу). Когда эти взаимодействия (частые цветные стрелки) принимаются во внимание, изотопический «спин» (пунктирные стрелки) разделяет нуклоны на протоны и нейтроны, а пионы — на три различных типа по заряду.

Аналогия с реальным электронным спином очень близка: изотопический спин нуклона также равен  $1/2$ . Как и настоящий спин, он имеет компоненты  $+1/2$  и  $-1/2$  по отношению к данному или выделенному направлению. В квантовой электродинамике обычно принято помещать частицу в систему координат, ось  $z$  которой параллельна внешнему магнитному полю. Поэтому выделенное направление для изотопического спина также выбирается вдоль оси  $z$  и компоненты спина обозначаются символом  $I_z$ . Было принято, что  $I_z$ , равное  $+1/2$ , представляет протон, а  $I_z$ , равное  $-1/2$  — нейтрон.

В математической теории Гейзенберга зарядовая независимость становится законом сохранения. Когда нуклоны взаимодействуют, полный изотопический спин сохраняется. Можно показать, что это утверждение означает, что силы, действующие между протоном и протоном, нейтроном и нейтроном, а также протоном и нейтроном, одинаковы. Подчеркнем, что пока в нашем рассказе идея изотопического спина является только формальностью. Она ничего не добавляет к понятию зарядовой независимости, а есть просто другой удобный способ ее математического выражения.

### Зарядовые мультиплеты

Когда Юкава объяснил ядерные силы на основе представления об испускании и поглощении пионов, изотопический спин приобрел несколько более широкое значение. Английский физик Кеммер первый понял, что это понятие приложимо также и к пионам. Его рассуждения были таковы: ядерные силы, включающие виртуальный обмен пионами, зарядово независимы; следовательно, пионы тоже должны быть зарядово независимы и к ним можно применить понятие изотопического спина.

Напомним, что пион может иметь три заряда: плюс, минус и нуль. Значит, он составляет зарядовый «триплет», который, если выключить заряд, также вырождается в неразличимые состояния. В случае настоящего спина треплет означает, что частица имеет спин 1, поскольку при этом возможны три различные ориентации по отношению к полю, когда  $z$ -компоненты равны  $+1, 0$  и  $-1$ . Таким образом, мы приписываем пиону изотопический спин 1 и говорим, что его компоненты по отношению к выделенному направлению равны  $+1, 0$  или  $-1$ .

Группировка частиц в зарядовые дублеты или триплеты (вместе называемые мультиплетами) дает удобный способ классификации. Если мы говорим, что пион есть триплет с центром, соответствующим заряду нуль (табл. 1.4), это означает, что заряды равны  $+1, 0$  и  $-1$ , изотопический спин есть 1, причем  $I_z$  равны  $+1, 0, -1$ . Аналогично, сказать, что нуклон есть дублет с центром, соответствующим заряду  $+1/2$ , означает, что заряды равны 1 и 0, изотопический спин  $1/2$ , а компоненты  $I_z$  равны  $+1/2$  и  $-1/2$ . Как видно на схеме, антинуклон является другим дублетом с центром, соответствующим заряду  $-1/2$ . Его изотопический спин есть  $1/2$ , а  $I_z$  равны  $-1/2$  и  $+1/2$ .

Заметим, что представление об изотопическом спине и зарядовых мультиплетах дает нам возможность по-иному различать нуклоны и пионы. Нуклоны представляются дублетом с центром  $+1/2$ , в то время как пионы — триплетом с центром в нуле.

Обратимся теперь к странным частицам. Очевиден вопрос: являются ли их взаимодействия зарядово независимыми и сохраняется ли при этом изотопический спин. Например, положительные сигма-частицы во всем

ли похожи на отрицательные и нейтральные за исключением своих электрических свойств? Пока нет прямых опытных доказательств этому, но кажется вполне разумным предположить, что зарядовая независимость приложима к сильным взаимодействиям новых частиц, как это имеет место при сильном взаимодействии Юкавы. Это будет означать, что странные частицы — зарядовые мультиплеты. Если так, то обычно предполагалось, что они должны следовать той же классификации, что нуклон и пион. Поскольку тяжелые странные частицы, по-видимому, связаны с нуклонами (они возникают из нуклонов и распадаются обратно на нуклоны), их обычно рассматривали как дублеты, имеющие изотопический спин  $1/2$ , с центром в плюс или минус  $1/2$ . С другой стороны,  $K$ -частицы, очевидно, близки пионам, поэтому предполагалось, что они разбиваются на триплеты с изотопическим спином  $1$  и центром в нуле.

Около пяти лет назад один из авторов статьи (Гелл-Манн) и японский физик Кацухико Нишиджима независимо друг от друга пришли к мысли, что странные частицы могут и не следовать такому порядку. Более того, именно отклонение от предполагаемого порядка может объяснить странность их поведения. Что касается автора этих строк, можно сказать, что открытие к нему пришло в результате простой оговорки. Обсуждая однажды свойства тяжелых странных частиц, он упомянул о них как о частицах, имеющих изотопический спин  $1$ , но сразу поправился, заметив: «Я хотел сказать, конечно, половина». Но чем более он думал потом об этой своей «ошибке», тем более ему начинало казаться, что никакой ошибки вовсе не было.

Откуда мы знаем, что тяжелые частицы являются дублетами с изотопическим спином  $1/2$ ? Частицы эти выглядят имеющими отношение к нуклонам, поэтому для порядка и простоты считалось, что они действительно связаны с ними. Но если они и были членами этой семьи, они были ее странными членами. Может быть, именно в изотопическом спине и заключается их странность? Предположим, что тяжелые частицы, вместо того чтобы подобно нуклонам быть дублетами с изотопическим спином  $1/2$ , являются триплетами с изотопическим спином  $1$  или даже синглетами с изотопическим спином  $0$ . (Частица с нулевым изотопическим спином имеет только одно возможное состояние и потому является синглетом.) Предположим также, что  $K$ -частицы вместо того, чтобы подобно пионам быть триплетами, являются дублетами. (В то время таблица странных частиц еще только заполнялась в результате экспериментальных работ. Не было даже известно, например, существуют ли заряженные  $K$ - или лямбда-частицы.)

Повозившись некоторое время с этой идеей, автор начал понимать, что она может содержать в себе как раз тот необходимый закон сохранения, который нужен для объяснения совместного порождения и удивительно больших времен жизни странных частиц. Сейчас мы попробуем показать, хотя бы приблизительно, как это получается. Но вначале продолжим немного далее развитие этой идеи.

### Смещенные мультиплеты

Напомним, что простой способ описания группы частиц состоит в указании их зарядового центра, а также мультиплетности (дублет или триплет). Нуклон есть дублет с центром в  $+1/2$ , пион — триплет с центром в нуле и т. д. Представим себе теперь, что среди тяжелых частиц

имеется синглет с зарядом 0 (см. табл. 1.4). Может ли он каким-либо образом быть нейтральной лямбда-частицей? Если да, то заметим, что центр этого «мультиплета» (синглет — это мультиплет из одного члена) находится в нуле, т. е. на половину зарядовой единицы ниже центра нуклонного дублета. Первоначальное предположение состояло в том, что центры мультиплетов всех тяжелых частиц лежат в точке  $+1/2$ . Следовательно, лямбда-частица «смещена» на  $-1/2$  зарядовой единицы. Может быть, это смещение является главной физической характеристикой частицы, которая и выражает ее «странность». Допустим, что это так, и введем новую физическую величину, которую назовем странностью. В целях математического удобства будем считать странность равной удвоенной величине смещения. Значит, странность нашей предполагаемой лямбда-частицы в два раза больше ее смещения  $-1/2$ , т. е. равна  $-1$ . (Странность нуклона, конечно, равна 0. Зарядовый центр нуклона дает точку отсчета, от которой отсчитываются смещения других тяжелых частиц.)

Далее заметим, что в нашей системе классификации по мультиплетам антинуклоны образуют дублет, являющийся зеркальным отражением нуклонного дублета относительно линии нулевых зарядов (см. табл. 1.4). Таким образом, любой другой тяжелой частице тоже должна отвечать своя античастица в соответствующем мультиплете. Согласно этому, мы поместим в нашу таблицу одну антилямбда-частицу, которая находится также в нуле. Ее смещение равно  $+1/2$  (от «нормального» зарядового центра антинуклона), следовательно, ее странность равна  $+1$ .

Теперь попробуем что-либо иное, скажем, триплет с центром в нуле. Его странность должна равняться  $-1$ . Если существует такой триплет, должны существовать три странные частицы: положительная, отрицательная и нейтральная — все примерно одной массы. В то время, когда возникла теория странности, такой триплет не был известен. Теперь он, по-видимому, найден в виде сигма-частицы ( $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$ ). И вновь мы ожидаем наличия соответствующего мультиплета античастиц.

Другой возможностью является наличие дублета тяжелых частиц, смещенного на целую зарядовую единицу, от  $+1/2$  до  $-1/2$ , т. е. со странностью  $-2$ . Это будет означать существование пары частиц с зарядами  $-1$  и 0. Теперь мы думаем, что отрицательный член этой пары есть кси-частица ( $\Xi^-$ ). Нейтральный член ( $\Xi^0$ ) до сих пор не был обнаружен, но общий успех теории странности дает нам значительную уверенность в том, что он в конце концов появится \*).

K-частицы могут быть дублетами подобно нуклону и антинуклону. Это будет означать, что  $K^+$  и  $K^0$  составляют один дублет с зарядовым центром в точке  $+1/2$ . Так как эти частицы группируются вместе с пионами, чей «естественный» зарядовый центр находится в нуле, их смещение равно  $+1/2$ , а странность  $+1$ . Тогда  $K^-$  является членом дублета вместе со второй нейтральной K-частицей, анти- $K^0$ , которая есть античастица по отношению к первой. Центр этого дублета находится в точке  $-1/2$ , его смещение  $-1/2$ , а странность  $-1$ . Пион играет ту же роль в мезонной группе, что и нуклон в группе тяжелых частиц: его зарядовый центр дает начальную точку при отсчете странности, и, значит, его собственная странность равна нулю.

\*) См. примечание редакторов на стр. 30.

Таблица 1.4

Странность иллюстрируется в форме таблицы. Частицы (белые кружки) и античастицы (черные кружки) сгруппированы в мультиплеты, причем заряды указаны вертикальными окрашенными линиями. Сплошные окрашенные треугольники отмечают зарядовые центры каждого мультиплета. Белые треугольники отмечают «ожидаемое» положение зарядовых центров ( $1/2$  для тяжелых частиц,  $-1/2$  для тяжелых античастиц и 0 для мезонов). Горизонтальные окрашенные стрелки показывают смещение каждого центра от ожидаемого положения. Странность равна удвоенной величине этого смещения.

Частица	Изотопический спин	Странность	Заряд				
			-1	-1/2	0	+1/2	+1
Нуклон	$\frac{1}{2}$	0			$p^0$		$p^+$
Антинуклон	$\frac{1}{2}$	0	$\bar{p}^-$		$\bar{p}^0$		
Ламбда	0	-1			$\Lambda^0$		
Антиламбда	0	+1			$\bar{\Lambda}^0$		
Сигма	1	-1	$\Sigma^-$		$\Sigma^0$		$\Sigma^+$
Антисигма	1	+1	$\bar{\Sigma}^-$		$\bar{\Sigma}^0$		$\bar{\Sigma}^+$
Кси	$\frac{1}{2}$	-2	$\Xi^-$		$\Xi^0$		
Антикси	$\frac{1}{2}$	+2			$\bar{\Xi}^0$		$\bar{\Xi}^+$
Пион	1	0	$\pi^-$		$\pi^0$		$\pi^+$
К	$\frac{1}{2}$	+1			$K_1^0$ $K_2^0$		$K^+$
Анти-К	$\frac{1}{2}$	-1	$\bar{K}^-$		$\bar{K}^0$		

### Сохранение странности

Мы приписали странность всем сильно взаимодействующим частицам. В чем гвоздь этого упражнения? Исходя из принципа зарядовой независимости, можно показать, что странность должна сохраняться в сильных и электромагнитных взаимодействиях. Иначе говоря, в любой реакции этих двух типов полная странность частиц, вступающих в реакцию, должна быть равна полной странности продуктов реакции. Мы покажем, что этот закон сохранения объясняет наблюдаемое поведение странных частиц.

Для начала заметим, что он очевидным образом «объясняет» совместное порождение. Странные частицы возникают при столкновениях обычных частиц. Странность последних есть нуль. Следовательно, полная странность продуктов реакции тоже должна равняться нулю. Это означает, что должны возникать по крайней мере две странные частицы, чтобы их индивидуальные странности могли погасить друг друга. Посмотрим уже упоминавшийся нами случай: рождение лямбда- и нейтральной  $K$ -частиц при столкновении пиона и протона. Лямбда-частица имеет странность  $-1$ , а странность  $K^0$ -частицы есть  $+1$ , следовательно, полная странность равна нулю.

Как мы видели, совместное порождение объясняет, почему странные частицы не распадаются путем сильных взаимодействий. Однако они должны обладать невосприимчивостью также и по отношению к электромагнитным процессам, ибо их времена жизни находятся в области, соответствующей слабым взаимодействиям.

Закон сохранения странности показывает нам, каким образом частицы избегают распада электромагнитным путем, так же как и путем сильных взаимодействий.

Здесь мы можем только в достаточно грубой форме указать, каким образом это происходит. Можно показать, что сохранение странности математически эквивалентно сохранению  $z$ -компоненты изотопического спина  $I_z$ . Последняя величина является, по существу, мерой заряда: в любом мультиплете чем больше  $I_z$ , тем больше и заряд. (Например, в нуклонном дублете значения  $I_z: -1/2$  и  $+1/2$  соответствуют зарядам 0 и 1; в пионном триплете значения  $I_z: -1, 0$  и  $+1$  соответствуют зарядам  $-1, 0$  и  $+1$  и т. д.) Известно, что электромагнитные взаимодействия зависят только от заряда. На основе общего правила квантовой механики это означает, что они должны сохранять  $I_z$  (которая пропорциональна заряду). Но сохранение  $I_z$  — все равно, что сохранение странности. Следовательно, изолированная частица, странность которой не есть нуль, не может распадаться на частицы с нулевой странностью путем электромагнитного процесса.

В конце концов, конечно, странная частица распадается на обыкновенные частицы, но за промежутки времени, которые соответствуют слабым взаимодействиям. Поэтому, судя по всему, распады странных частиц входят в этот большой класс процессов. Значит, в слабых взаимодействиях не сохраняется странность. Недавно было сделано открытие, что в этих взаимодействиях нарушается также другой закон сохранения, — закон сохранения четности, который имеет дело с симметрией в природе между правым и левым \*).

\*) См. статью Моррисона «Ниспровержение четности» на стр. 77 этого сборника. (Прим. ред.)



Существует ли глубокая связь между двумя этими законами, а также их нарушением, ещё не известно. Во всяком случае ясно, что природа запрятала некоторые из своих самых важных секретов в процессы со слабыми взаимодействиями и что одной из самых главных задач, стоящих перед физикой сегодня, является открытие законов, управляющих этими процессами.

### Отбор частиц

Когда мы начинали поиски закона сохранения, который мог бы объяснить правило совместного порождения, мы делали это в надежде, что такой закон поможет нам узнать гораздо больше о рождении и смерти странных частиц. Так и получилось. Например, правило совместного порождения разрешало бы реакцию, в которой два нейтрона, сталкиваясь, образовывали пару лямбда-частиц. Действительно, эта реакция казалась одной из самых вероятных, но тем не менее никогда не наблюдалась.

Сохранение странности говорит нам, что практически она и не будет никогда наблюдаться. Странность нейтрона — нуль, а странность лямбда-частицы есть  $-1$ . Значит, столкновение нейтронов, если оно дает лямбда-частицу, должно также приводить к образованию другой частицы со странностью  $+1$ , такой, как нейтральная  $K$ -частица (например,  $n + n \rightarrow \Lambda^0 + n + K^0$ ).

Вернемся еще раз к случаю сигма- и  $K$ -частиц. Сигма-частица есть триплет со странностью  $-1$ .  $K$ -частицы образуют пару дублетов: пара, включающая  $K^+$ , имеет странность  $+1$ , в то время как пара, включающая  $K^-$ , обладает странностью  $-1$ . Следовательно, возможно совместное порождение  $\Sigma^-$  (странность  $-1$ ) и  $K^+$  (странность  $+1$ ), но не  $\Sigma^+$  и  $K^-$ , каждая из которых имеет странность  $-1$ . Первая реакция была открыта в столкновениях пионов с протонами ( $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+$ ).

Помимо закона сохранения странности, ничто не мешает осуществлению также и реакции  $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^+ + K^-$ . Однако эта реакция не была найдена и принцип сохранения странности говорит нам, почему ее не удалось обнаружить.

В качестве другого примера эффективности правила странности можно взять распад нейтральной сигма-частицы. Триплет сигм имеет ту же странность ( $-1$ ), что и лямбда. Кроме того, сигма-частица примерно на 150 электронных масс тяжелее. Следовательно, должен быть возможен как с точки зрения закона сохранения энергии, так и закона сохранения странности распад сигма-частицы с превращением в лямбда-частицу. Иными словами, сигма-частица не должна ждать для окончания своего существования процесса со слабым взаимодействием. Однако в случае заряженной сигма-частицы для сохранения заряда среди продуктов распада должна содержаться какая-то другая заряженная частица. Она может быть пионом ( $\Sigma^+ \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+$ ). Странность пиона равна нулю, так что баланс странности не нарушается. Но зато масса пиона равна 270, т. е. на 120 электронных масс больше допустимой по балансу энергии. Нейтральная же сигма-частица при распаде вовсе не обязана порождать какой-либо другой заряженной частицы. Излишняя энергия может быть унесена фотоном ( $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ ). Такая реакция действительно наблюдается. Это — электромагнитный процесс (поскольку в нем участвуют фотоны) и потому он лишь ненамного медленнее, чем процессы с сильными взаимодействиями.

Как видно, странность дает нам правила для отбора возможных странных частиц и их распадов. Действительно, несколько частиц было предсказано таблицей странности еще до того, как они были открыты. Единственной до сих пор еще недостающей частицей является нейтральная кси-частица \*).

### Нейтральные $K$ -частицы

Перед тем как оставить эту «периодическую таблицу» странных частиц, надо сделать одно заключительное замечание.  $K^0$ -частица и ее античастица внесены в таблицу также и в виде другой пары частиц, названных  $K_1^0$  и  $K_2^0$ . Предсказание этой ситуации явилось одним из самых поразительных успехов теории странности. Рассуждения, с помощью которых было получено это предсказание, слишком сложны для того, чтобы их здесь излагать. Здесь мы имеем дело с замечательным процессом перетасовки в природе.  $K^0$ - и анти- $K^0$ -частицы возникают в различных процессах. В дальнейшем каждая из них может распадаться двумя различными путями, один из которых занимает несколько больше времени, чем другой. Квантовая теория показывает, что только половина частиц каждого типа может следовать одному из способов распада. Таким образом, в наличии два различных процесса порождения и два различных процесса распада, а между ними имеет место перемешивание или перетасовка. Природа разделяет нейтральные  $K$ -частицы одним способом на основе процесса рождения и другим способом — на основе процесса их распада. Она производит  $K^0$ - и античастицы. Но затем, после их возникновения, половина этих частиц «становится»  $K_1^0$ -частицами, а другая половина —  $K_2^0$ -частицами. Это выясняется по способу их распада.

В теории странности, таким образом, содержится способ классификации странных частиц. Теория находится в согласии с фундаментальными идеями о наличии четырех групп частиц и трех типов взаимодействий. Мы по-прежнему имеем только тяжелые частицы (некоторые из них странные), мезоны (некоторые из них странные), легкие частицы и фотон. Связи же между частицами могут быть сильными, электромагнитными или слабыми.

В настоящее время уровень наших знаний в этой области соответствует примерно уровню знаний Менделеева, который открыл только наличие некоторых регулярностей в свойствах существовавших химических элементов. Нашей целью является уровень понимания, достигнутый Паули, чей принцип исключения показал, почему существуют эти регулярности, а также создателями квантовой механики, которые сделали возможными полные и детальные предсказания, касающиеся атомных систем.

Мы хотели бы знать законы движения частиц, предсказывать, помимо прочего, как они будут взаимодействовать при столкновениях, как будут рассеиваться одни частицы на других вследствие этих взаимодействий.

В то время, когда пишется эта статья, много физиков упорно работают над теориями, которые, как они надеются, дадут эти законы. Время явится судьей.

Но еще более фундаментальными являются вопросы, ответ на которые кажется значительно более отдаленным. Являются ли все частицы, о

---

\*) В самое последнее время получены предварительные указания на открытие нейтральной кси-частицы. (Прим. ред.)

которых мы упоминали, на самом деле элементарными, или же некоторые из них — только компоненты других частиц? Если это так, то какие из частиц элементарны, а какие нет? Почему природа выбрала именно этот ряд частиц для строительства всего материального мира? Почему заряды элементарных частиц ограничиваются только значениями  $+1$ ,  $-1$  и  $0$ ? Эти и многие другие загадки находятся совершенно вне области возможностей наших современных теорий. Узнаем ли мы когда-нибудь ответ на эти вопросы? Каждый физик убежден, что да. Однако это потребует, вероятно, совершенно новых идей. Во всяком случае, многие теоретики думают, что современные представления могут оказаться совершенно неприменимыми на очень малых расстояниях — порядка размеров самих частиц. Имеется подозрение, что здесь эти представления становятся внутренне противоречивыми.

Пройдет еще немало времени, прежде чем физик, занимающийся природой элементарных частиц, окажется без работы.

---

**Р. Е. Маршак**

## **ПИОНЫ**

(ЯНВАРЬ 1957 г.)

*Эти частицы, известные также под именем пи-мезонов, являются важным строительным материалом в атоме. Они представляют собой цемент, скрепляющий протоны и нейтроны в атомном ядре.*

**Ц**ементом, связывающим миры вселенной в единое целое, являются силы тяготения. Внутри атома эту роль играет электромагнитное взаимодействие. Но силы, удерживающие от распада ядро атома, остаются загадкой, несмотря на все наши успехи в познании физического мира. Эти силы, «склеивающие» атомные ядра, столь непохожи на все другие известные нам, что трудно подыскать слова для их описания. Но ключ к этой загадке мы все-таки держим в руках и знаем, что он называется пи-мезонами, или пионами. Каким-то пока еще неизвестным образом пионы, несомненно, участвуют в ядерных взаимодействиях. Поэтому теперь, когда эти частицы можно получать бомбардировкой вещества в ускорителях больших энергий, свойства пионов тщательно исследуются. Что же удалось узнать о них?

### **«Виртуальные» пионы**

Прежде чем углубиться в эту новую и необычную область физики, напомним кратко на примере хорошо знакомых теперь электромагнитных сил те ступени, по которым физики поднялись сюда. Рассматривая различные проявления этих сил в макроскопическом мире: электричество, магнетизм, свет и т. д., Майкл Фарадей и Джеймс Максвелл развили понятие силовых полей, пронизывающих все пространство. Когда физики начали исследовать микроскопический мир атома, они убедились, что здесь можно принять то же представление о поле, т. е. допустили, что силы, действующие между двумя электронами или между электроном и положительно заряженным ядром, подчиняются законам классического электромагнитного поля. Однако вскоре стало ясно, что многие свойства атомов и электронов могут быть объяснены только в том случае, если предположить, что поле внутри атома квантовано. Другими словами, на основе квантовой теории физики пришли к выводу, что электромагнитное взаимодействие между заряженными телами осуществляется обменом квантами или порциями энергии. Эти кванты и суть фотоны — не имеющие массы покоя порции энергии. Таким образом, поле вокруг, например, электрона состоит из фотонов, которые непрерывно испускаются и поглощаются электроном (рис. 2.1). Когда один электрон отталкивает другой, происходит обмен фотонами: фотоны испускаются одной частицей и

поглощаются другой. Как мы видим, квантовая теория, о которой часто говорят, что она порывает с конкретными физическими моделями, на самом деле дает более конкретную картину электромагнитного взаимодействия, чем классическая. Два заряженных тела действуют друг на друга не через неуловимое и неосоздаемое поле, а перебрасываясь маленькими «дробинками» — фотонами.

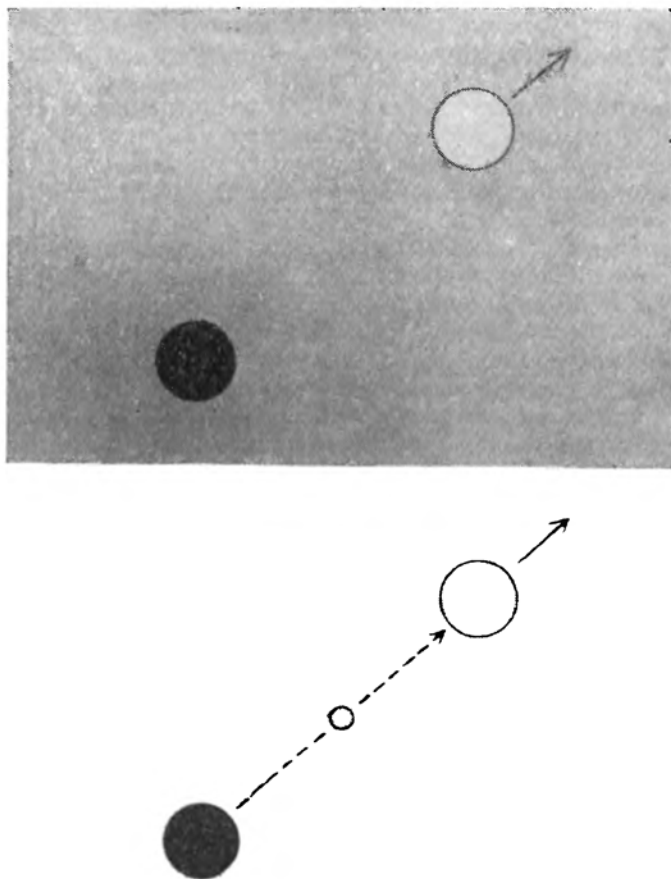


Рис. 2.1. Электромагнитное поле вокруг заряженной частицы, такой как электрон (черный круг), схематически показано согласно классической теории (вверху) и квантовой теории (внизу).

Серое затемнение на верхнем рисунке представляет непрерывное классическое поле, через которое частица осуществляет свое действие на второй электрон (белый круг). Маленький светлый кружок на нижнем рисунке показывает квант или фотон, с помощью которого взаимодействие осуществляется согласно квантовой теории.

Эти представления оказались столь плодотворными при объяснении и расчете сил, действующих в масштабах атома, что японский физик Хидэки Юкава принял их за основу в своей попытке разрешить проблему таинственных ядерных сил. Он предположил, что силовое поле в ядре, как и во внешней к нему части атома, квантовано. Иначе говоря, взаимо-

действие, удерживающее вместе протоны и нейтроны (нуклоны), осуществляется постоянным обменом квантами энергии.

Но если у кванта электромагнитной энергии (фотона) нет массы покоя, то, как было найдено Юкавой, чтобы объяснить свойства сил притяжения в ядре и, в частности, их малый радиус действия, нужно предположить, что ядерный квант должен обладать определенной массой покоя. По расчетам Юкавы, эта масса должна лежать где-то между 200 и 300 масс электрона. Для того чтобы объяснить большую силу ядерного взаимодействия, Юкава предположил, что обмен квантами происходит очень часто.

Блестящая интуиция Юкавы была вознаграждена спустя 12 лет (в 1947 г.) открытием тех самых квантов или частиц, существование которых он предполагал. Действительно, пи-мезон, или пион, обладает как раз свойствами, предсказанными Юкавой. Масса этой частицы равна 270 электронным массам.

Надо, однако, сказать, что гипотеза о взаимодействии нуклонов путем обмена пионами немедленно вызывает целый ряд вопросов. Например, если нуклон непрерывно испускает пионы, то как обстоит дело с законом сохранения массы? В самом деле, испускание пиона, обладающего заметной массой, должно было бы уменьшать массу нуклона, однако все наши эксперименты показывают, что масса нуклона остается постоянной. Ответ заключается в том, что испускание и поглощение пионов происходит так быстро, что мы не можем этого заметить. Поскольку всякое явление, которое нельзя обнаружить, не может считаться реальным в физическом смысле, мы должны говорить о «виртуальном» испускании и «виртуальном» обмене пионами.

Чтобы немного лучше понять, что это означает, и представить себе, сколь кратковременным должно быть «появление» пиона, обратимся к знаменитому принципу неопределенности. Этот принцип утверждает, например, что если мы точно измерим положение электрона, то тем самым мы уничтожим всякую возможность измерения его импульса, и наоборот. Если же мы хотим знать одновременно и положение, и импульс электрона, то мы будем вынуждены ограничиться лишь их приближенными значениями. Принцип неопределенности квантовой теории указывает максимальную точность, которую мы можем надеяться получить: произведение неопределенности в положении частицы и неопределенности в ее импульсе не может быть меньше, чем величина постоянной Планка.

Другой парой величин, подпадающих под действие принципа неопределенности, являются энергия и время. Всякий эксперимент, имеющий целью измерение энергии системы, требует для своего выполнения определенного времени. Всякий такой эксперимент, кроме того, изменяет энергию системы. Оказывается, чем короче время измерения, тем больше влияние эксперимента на энергию системы. Другими словами, чем более точно мы знаем время, в течение которого измерялась энергия, тем менее точно мы знаем значение энергии. И вновь произведение двух неопределенностей никогда не может быть меньше, чем  $h$ .

Энергетический эквивалент массы пиона равен 135 миллионам электрон-вольт. Расчет, учитывающий величину постоянной  $h$ , показывает, что неопределенность в энергии нуклона будет порядка 135  $M_{\pi} \text{эв}$ , если время измерения будет равно  $5 \cdot 10^{-24} \text{ сек}$ . Поэтому, если пион испускается и вновь поглощается за время такого порядка, его нельзя будет обнаружить; такой пион и будет «виртуальным». За это время пион, двигаясь практически со скоростью света, может пройти расстояние

около  $1,4 \cdot 10^{-13}$  см от центра нуклона. Но это расстояние как раз порядка наблюдаемого радиуса действия ядерных сил! Такое совпадение является замечательной поддержкой теории, согласно которой именно пионы являются носителями ядерных сил.

Это представление о пионе объясняет также и другое явление, наблюдаемое в экспериментах. При бомбардировке водорода пучком быстрых нейтронов наблюдается вылет большого числа протонов (ядер водорода) вперед по направлению пучка со скоростями, примерно равным скоростям падающих нейтронов, причем соответствующее число почти неподвижных нейтронов оказывается внутри мишени. Совершенно невероятно,

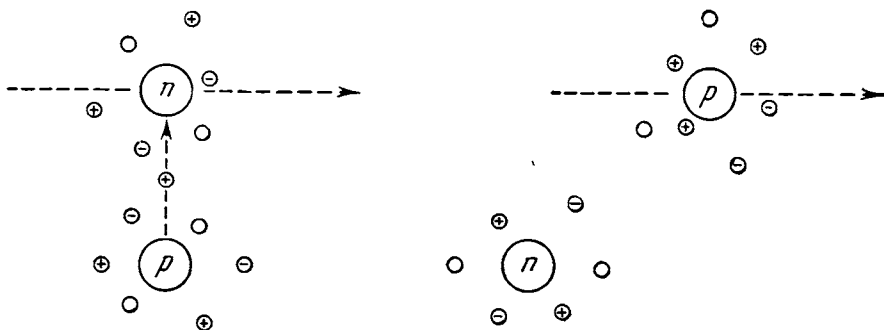


Рис. 2.2. Поле ядерных сил состоит из облаков «виртуальных» пионов (маленькие кружки), окружающих каждый нуклон. Движущийся слева нейтрон (вверху) проходит близко к неподвижному протону (внизу) и захватывает положительный пион (пунктир). Движущаяся частица становится при этом протоном, а покоящаяся — нейтроном. Взаимодействие может осуществляться также передачей нейтральных пионов, не сопровождающейся обменом зарядов.

чтобы такое большое число нейтронов целиком передавало бы свой импульс ранее покоившимся протонам в результате лобовых ударов. Гораздо правдоподобнее, что вылетающие частицы являются не чем иным, как нейтронами, превратившимися в протоны во время прохождения через мишень. Такое превращение может произойти, если нейтрон захватит положительно заряженный пион; при этом нейтрон станет протоном, а протон, потерявший свой положительный заряд, превратится в нейтрон. Следовательно, нейтрон, пролетая через протонную мишень, захватывает от протона пион и оставляет за собой нейтрон (рис. 2:2).

Взаимодействие между нуклонами в ядре атома (если это только не водород, ядро которого состоит из одного нуклона) может происходить путем такого обмена пионами. Для того чтобы связать между собой протоны с протонами, протоны с нейтронами и нейтроны с нейтронами должны существовать положительные, отрицательные и нейтральные пионы.

### Реальные пионы

Каким же образом призрачные «виртуальные» пионы обнаруживаются в качестве реальных частиц? Если считать пионы порциями энергии, нетрудно представить себе те условия, при которых такое явление станет возможным. Предположим, что мы как-то сообщим нуклону энергию, эквивалентную массе пиона. Тогда пион может освободиться от нуклона и быть зарегистрирован до того, как он будет захвачен другим нуклоном (рис. 2.3). Впервые пионы были найдены в осколках ядерных столкновений

в космических лучах, а затем получены в ускорителях больших энергий при бомбардировке ядер.

Были обнаружены все три сорта пионов: положительные, отрицательные и нейтральные (рис. 2.4). Масса нейтрального пиона равна 264 массам электрона. Заряженный пион вследствие наличия энергии взаимодействия с электромагнитным полем имеет немного большую массу; она равна 273 массам электрона. Пионы жадно поглощаются ядрами. Они неустойчивы. Заряженный пион распадается на более легкую частицу (называемую мю-мезоном) и нейтрино со временем полураспада, равным нескольким стомиллионным долям секунды. Нейтральный пион распадается гораздо быстрее (время полураспада около  $10^{-15}$  сек) на два гамма-кванта.

При бомбардировке таких мишеней как углерод, формируются в пучки пионы, используемые для исследования ядер. Результаты опытов

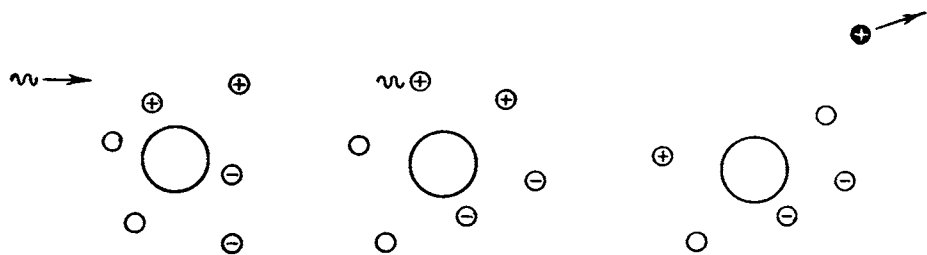


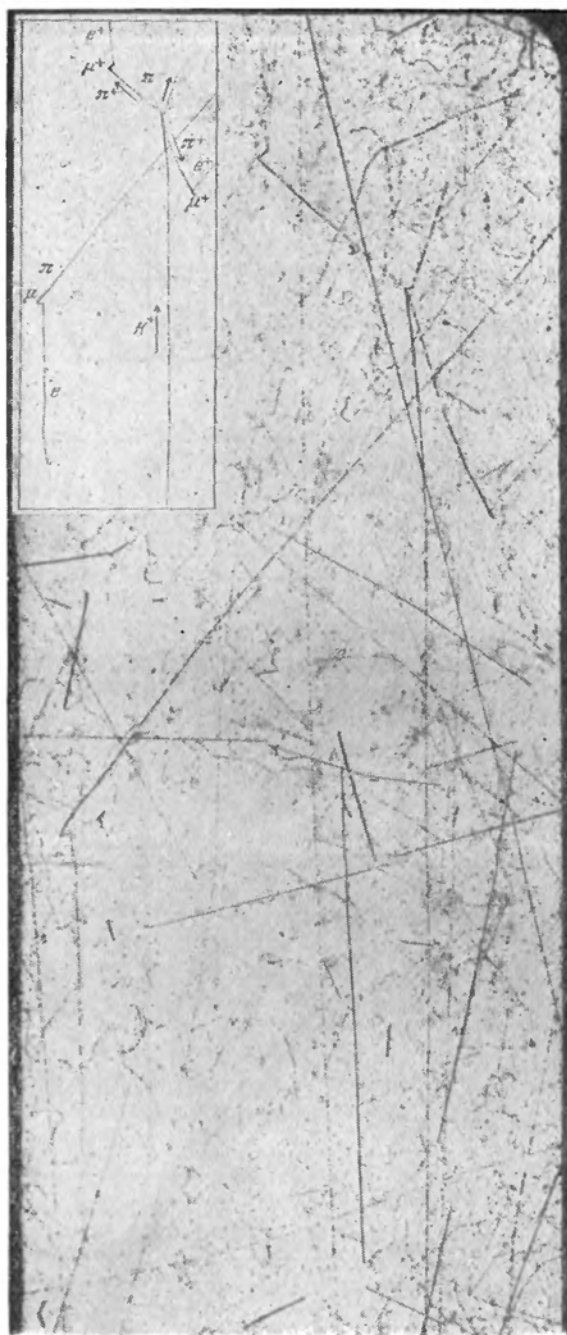
Рис. 2.3. «Виртуальный» пион материализуется, если системе сообщается энергия, превосходящая 135 Мэв. На рисунке гамма-квант большой энергии (волнистая линия) входит в мезонное облако и ударнет виртуальный положительный пион (светлый кружок). Энергия гамма-кванта поглощается, а виртуальный пион превращается в реальный (темный кружок). Теперь он может покинуть нуклон.

по отклонению и рассеянию пучка реальных мезонов ядрами мишени позволяют судить, как пионы взаимодействуют с полем ядерных сил. Простейшими и в то же время дающими наибольшую информацию являются эксперименты на отдельных нуклонах. Протоны можно исследовать непосредственно, бомбардируя мишень из водорода (рис. 2.5). Нейтроны изучаются путем бомбардировки тяжелого водорода или дейтерия, ядра которого содержат один протон и один нейтрон. Если при этом вычесть известное уже действие протонов, то остаток даст взаимодействие пиона с нейтроном.

Изучение этих экспериментов дает нам картину, которая хотя и является в значительной степени еще не ясной, однако уже обладает внутренней согласованностью. Например, исследователи ядерных сил заинтересовались тем обстоятельством, что сила притяжения между нуклонами выглядит совершенно одинаковой, вне зависимости от того, заряжены они или нет (т. е. являются ли они протонами или нейтронами). Это, конечно, совершенно чуждо всем нашим опытам в мире вне атомного ядра (рис. 2.6). Рассматривая предполагаемые вклады заряженных и нейтральных пионов в эти взаимодействия, ученые подсчитали, что нуклоны должны испускать и поглощать заряженные пионы в два раза чаще, чем нейтральные. Иначе говоря, нуклон взаимодействует с полем заряженных пионов в два раза сильнее, чем с полем нейтральных пионов. Эксперименты по рассеянию реальных пионов подтвердили это предположение.

Силы ядерного притяжения очень велики. Если они переносятся пионами, то нуклон должен испускать виртуальные пионы очень интен-





**Рис. 2.4.** Следы пионов отмечены цепочкой крошечных пузырьков в камере с жидким пропаном.

Эта фотография была сделана в момент облучения камеры пучком тяжелых мезонов на Брукхэвском Космотроне. Как указано на сопровождающей схеме, одна серия следов связана с  $K^+$ -мезоном ( $K^+$ ), входящим снизу и распадающимся на два положительных пиона ( $\pi^+$ ) и отрицательный пион ( $\pi^-$ ). Положительные пионы превращаются в мю-мезоны ( $\mu^+$ ), которые в свою очередь превращаются в позитроны ( $e^+$ ). Другой пион входит в камеру справа сверху и превращается в мю-мезон слева внизу. Эксперимент проведен Глезером и его сотрудниками из Мичиганского университета.

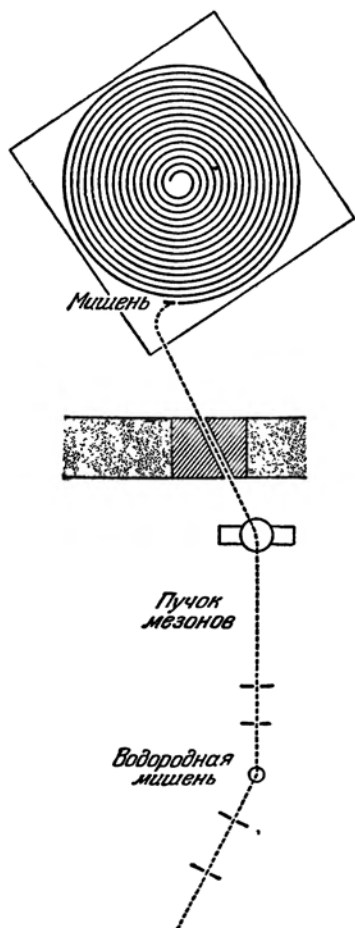


Рис. 2.5. Схема опытов по рассеянию пионов.

Пучок мезонов от циклотрона (вверху) направляется с помощью магнита на мишень из водорода. Счетчики, расположенные до и после мишени, регистрируют число частиц, отклоняющихся на разные углы.

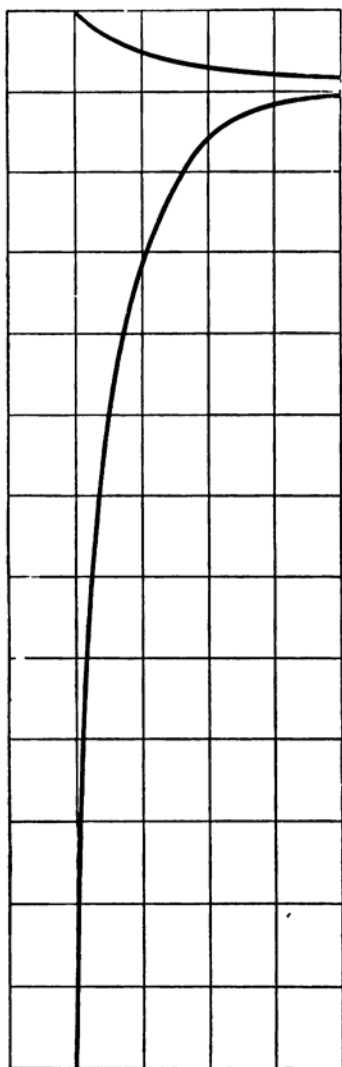


Рис. 2.6. Напряженности поля в случае электромагнитных и ядерных сил.

Верхняя кривая представляет электромагнитное поле вокруг протона (которое отталкивает другой протон). Нижняя кривая есть ядерное поле протона (которое притягивает другой протон). По горизонтальной оси отложено расстояние от центра протона в единицах  $1,4 \cdot 10^{-13}$  см. Вертикальная шкала произвольная.

сивно и быть на малых расстояниях окруженным целым облаком таких частиц. Из этого следует, что в случаях, когда хватает энергии, от нуклона может оторваться больше одного пиона. Это действительно оказалось верным. Космотрон Брукхэвенской национальной лаборатории (энергия 3 *Бэв*) производит в среднем два пиона на столкновение. Беватрон на 6 *Бэв* в Беркли дает в среднем более трех пионов. В первичных космических лучах, где встречаются частицы с энергиями в 10 000 *Бэв*, наблюдаются случаи рождения до 20 реальных пионов при одном столкновении.

### Как же «устроен» нуклон?

Таким образом, протон и нейтрон, ранее считавшиеся первичными строительными кирпичиками вещества, оказываются не столь уж монолитными. Каждый состоит из сердцевины, окруженной изменчивым облаком пионов, что несколько напоминает атом с его ядром и планетарными электронами. Эксперименты по рассеянию пионов показывают в настоящее время, что нуклоны подобно атомам могут обладать возбужденными состояниями. Возбуждение, возникающее, когда пион с большой силой ударяет нуклон, выражается во временном увеличении заряда нуклона. Очевидно, что такое возбужденное состояние связано с некоторой перестройкой мезонного облака, однако детали этих явлений пока еще не известны.

Внутренняя область вблизи сердцевины нуклона, где мезонное облако наиболее плотно, остается заколдованным царством. Мы можем, конечно, зондировать ее очень быстрыми частицами: чем быстрее движутся метательные снаряды, тем глубже они проникают. Однако наши знания в теории мезонного поля пока еще слишком неопределенны, чтобы можно было рассчитывать получить уравнения, объясняющие эксперименты по рассеянию или предсказывающие количество пионов, возникающих при бомбардировке частицами данной энергии.

Главная трудность состоит в том, что мы имеем здесь дело с целым роем пионов. В то же время существующие математические методы позволяют нам рассматривать не более одного пиона одновременно. Далее вещи становятся слишком сложными. Эта проблема имеет фундаментальный характер и только совершенно новые идеи могут помочь нам разрешить ее. Итак, пион, давая нам замечательную возможность бросить беглый взгляд в мир ядерных взаимодействий, служит в то же время показателем нашего невежества.

---

Филипп Моррисон

## НЕЙТРИНО

(ЯНВАРЬ 1956 г.)

*Целых 25 лет теоретическая физика допускала существование элементарной частицы, которая не была действительно обнаружена \*).*

Полный триумф классической механики наступил в одну ясную ночь конца 1846 г. В эту ночь немецкий астроном Иоганн Галле направил телескоп Берлинской обсерватории в заранее указанную ему точку неба и там впервые увидел бледный диск планеты, которую теперь называют Нептуном. Это открытие явилось поистине великолепным подтверждением закона тяготения Ньютона и вычислений математика Урбана Леверье, который по возмущениям в движении планеты Уран предсказал, что новая планета должна находиться именно там, где ее нашел Галле.

Физика в наши дни ждет другого подобного открытия. Существует свой Нептун среди ее элементарных частиц — удивительная частица, упоминаемая физиками в любом обзоре, свойства и параметры которой хорошо известны, хотя до сих пор она еще не была «открыта». Частица эта называется *нейтрино*. Физики почти так же уверены в существовании нейтрино, как и чего-либо другого физически «истинного», однако они

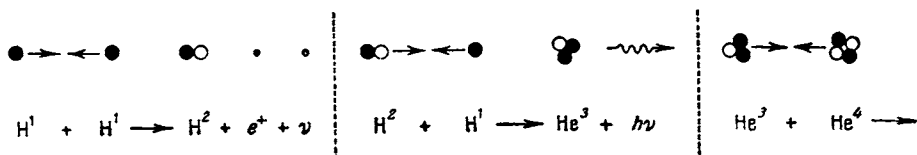


Рис. 3.1. Протон — протонный цикл — один из двух ядерных процессов

В первой реакции цикла два протона (ядра водорода-1 или  $\text{H}^1$ ) сталкиваются и образуют дейтрон, сталкивается с протоном, образуя гелион (ядро гелия-3 или  $\text{He}^3$ ) и  $\gamma$ -квант  $h\nu$ . В третьей реакции гелион-3 сталкивается с отрицательным электроном ( $e^-$ ) и дает литий-7 ( $\text{Li}^7$ ). В пятой реакции бериллий-7 сталкивается с нейтроном и дает литий-7 и нейтрон.

не склонны признавать, что эта частица действительно открыта, до тех пор, пока она не заявит о своем присутствии с помощью какого-нибудь следа или щелчка в нашем приборе.

Недавно один из физиков Лос-Аламоса, разрабатывавших хитроумные планы поймки нейтрино, презентовал своим коллегам рождественский подарок. Под праздничной оберткой они обнаружили красиво рас-

\*) Эта статья помещена в настоящем сборнике, чтобы познакомить читателей с драматической историей открытия нейтрино. Данные, окончательно подтвердившие существование этой удивительной частицы, были получены в описанных в статье экспериментах вскоре после ее опубликования (см. по этому поводу статью того же автора «Ниспровержение четвосты» в конце сборника). (Прим. ред.)

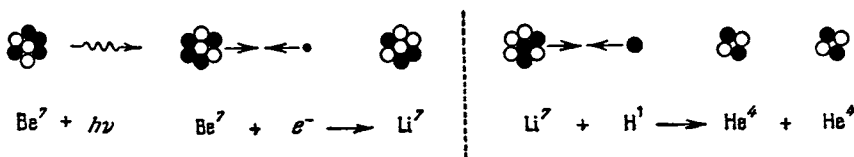
крашенную спичечную коробку со следующей надписью: «Заведомо содержит по крайней мере 100 нейтрино». Посмотрев внутрь, друзья убедились, что коробка пуста, и не успокоились, пока подаривший не объяснил смысла подарка. Надпись была совершенно точна. Любой такой объем на Земле, занят ли он спичечной коробкой, вашей рукой или чашечкой, полной воды, содержит нейтрино. Нейтрино движутся сквозь него по прямым линиям со скоростью света.

Нейтрино в нас и вокруг нас происходят из глубин Солнца, где они рождаются в тех же самых ядерных реакциях, которые заставляют Солнце светить (рис. 3.1 и 3.2). В отличие от других частиц, возникающих в этих реакциях, нейтрино легко проходят через огромные пласты вещества на Солнце, которые оказываются более прозрачными для них, чем самый чистый воздух для золотистого солнечного луча у нас на Земле, и вырываются в окружающее пространство. Они уносят примерно 6—8 процентов всей энергии, излучаемой Солнцем. Это излучение проходит без каких-либо изменений или воздействий и сквозь звезду, и сквозь окружающее ее пространство, и сквозь планеты. Даже ночью поток нейтрино приходит к нам от скрытого за горизонтом Солнца, путешествуя прямо сквозь толщу Земли, как будто бы ее вовсе и не существует. Поток нейтрино от Солнца несет в 40 000 раз больше энергии, чем лунный свет, и тем не менее мы никогда его не видели и не ощущали его присутствия.

В нашей статье будет рассказано, как эта парадоксальная частица ставила в затруднение физиков в течение десятилетий и каким образом предполагается ее наконец изловить.

### Закон сохранения

Краеугольным камнем физики является закон сохранения энергии. Однако уже три десятилетия в ядерной физике известно тщательно изученное явление, которое всякий строгий и непредубежденный наблюдатель назовет с первого взгляда противоречащим знаменитому закону.



на Солнце, которые, как полагают, являются источниками нейтрино.

(ядро водорода-2 или  $\text{H}^2$ ), положительный электрон ( $e^+$ ) и нейтрино ( $\nu$ ). Во второй реакции дейтрон лийон сталкивается с  $\alpha$ -частицей (ядро гелия-4 или  $\text{He}^4$ ) и дает бериллий-7 ( $\text{Be}^7$ ) и  $\gamma$ -квант. В четвертой и последней реакции цикла литий-7 сталкивается с протоном и дает две  $\alpha$ -частицы. Протоны представ- ны — белыми кружками того же размера.

Это противоречие заключено в странном исчезновении энергии при испускании электрона нейтроном — явлении, называемом  $\beta$ -распадом.

Большое число разнообразных данных указывает на то, что незаряженный нейтрон, как и его заряженные собратья — протон и электрон, имеет строго определенную массу. Однако нейтрон, хотя он и является строительным кирпичиком для атомных ядер, неустойчив. Он самопроизвольно распадается на протон и электрон. Время полураспада свободного, удаленного из ядра нейтрона равно примерно 12 минутам. Это означает, что если 1000 нейтронов изолировать от всякого взаимодействия с внешним миром, то через 12 минут только 500 из них по-прежнему останутся нейтронами, а через 24 минуты — только 250.

Согласно принципу взаимосвязи массы и энергии полная энергия, заключенная в неподвижном покоящемся нейтроне, равна энергетическому эквиваленту его массы. Однако сумма масс продуктов распада нейтрона (протона и электрона) не достигает начальной массы нераспав-

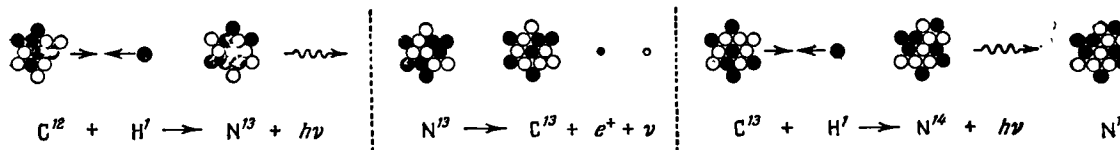


Рис. 3.2. Углеродный цикл — второй ядер

В первой реакции цикла углерод-12 ( $C^{12}$ ) сталкивается с протоном, давая азот-13 ( $N^{13}$ ) и  $\gamma$ -квант. Во второй реакции азот-13 распадается на углерод-13 ( $C^{13}$ ) и  $\beta$ -частицу и нейтрино. В третьей реакции углерод-13 сталкивается с протоном, что дает азот-14 ( $N^{14}$ ) и  $\gamma$ -квант. В четвертой реакции азот-14 распадается на углерод-12 ( $C^{12}$ ) и  $\beta$ -частицу и нейтрино. В пятой реакции углерод-12 распадается на азот-12 ( $N^{12}$ ), положительный электрон и нейтрино. В шестой реакции азот-12 распадается на углерод-12 ( $C^{12}$ ) и  $\beta$ -частицу и нейтрино. Цикл создает, таким образом,  $\alpha$ -частицу, два

нейтрона. Недостающая масса связана с кинетической энергией двух возникших частиц, разлетающихся в разные стороны после распада нейтрона.

Закон сохранения энергии говорит, что кинетическая энергия продуктов распада нейтрона (львиная доля этой энергии приходится на

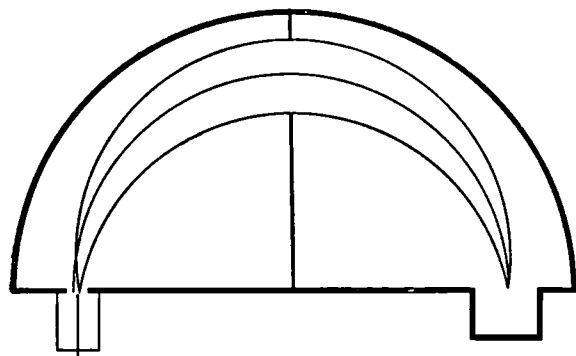


Рис. 3.3. Схема спектрометра, который используется для измерения энергии  $\beta$ -частиц.

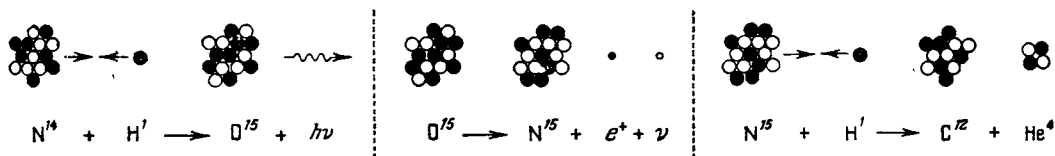
Прибор помещается в магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны к плоскости рисунка. Частицы, испускаемые маленьким радиоактивным образцом справа, описывают криволинейные пути и «подсчитываются» слева. Частицы одной энергии обладают одним общим фокусом. Таким образом, счетчик может быть использован для выделения частиц различных энергий, что осуществляется изменением силы магнитного поля.

да пробегают все значения в интервале от нуля до 780 000 электрон-вольт. В среднем, когда нейтрон (или другое радиоактивное атомное ядро) расщепляется в процессе  $\beta$ -распада, выделяется только часть ожидаемой максимальной энергии (рис. 3.4).

Что же происходит с недостающей энергией? В свое время физики пришли к наиболее вероятному предположению, согласно которому эта энергия должна уноситься какой-то до сих пор незамеченной частицей. Они напряженно работали, стараясь уловить невидимую частицу в своих лучших счетчиках, задержать ее в пластинах свинца толщиной более полуметра. Но этого сделать не удалось. Тогда-то и возникла мысль о возможном несохранении энергии в этом элементарном ядерном процессе.

легкий электрон) должна быть совершенно точно равна энергетическому эквиваленту теряемой при распаде массы. Эта кинетическая энергия продуктов распада была измерена, причем наибольшее ее значение оказалось равным примерно 780 000 электрон-вольт (рис. 3.3). Однако многочисленные измерения показали, что эта энергия достигается сравнительно редко. Иногда же полная кинетическая энергия протона и электрона составляет всего несколько тысяч электрон-вольт. Оказалось, что наблюдаемые энергии распада

После многих достижений квантовой теории, которая не в меньшей степени, чем классическая физика, основана на законе сохранения энергии, Вольфганг Паули первый указал, а Энрико Ферми детально рассчитал свойства предполагаемой частицы, участие которой в процессе



ный процесс, способный породить нейтрино.

второй реакции азот-13 самопроизвольно распадается на углерод-13 ( $\text{C}^{13}$ ), положительный электрон В четвертой реакции азот-14 сталкивается с протоном, давая кислород-15 ( $\text{O}^{15}$ ) и  $\gamma$ -квант. В пятой реакции азот-15 ( $\text{N}^{15}$ ) сталкивается с протоном, чтобы дать исходный углерод-12 ( $\text{C}^{12}$ ) и  $\alpha$ -частицу, электрона, три  $\gamma$ -кванта и два нейтрино.

$\beta$ -распада необходимо для сохранения энергии. Нетрудно усмотреть, каковы должны быть эти свойства.

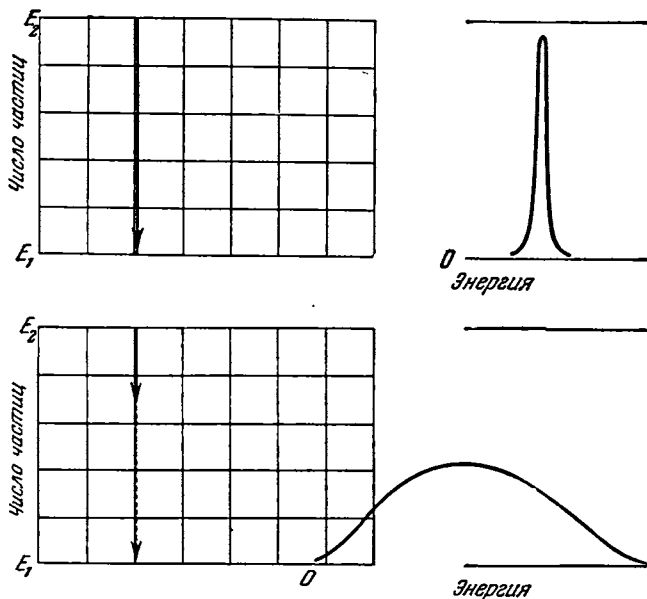


Рис. 3.4. Альфа- и бета-распады сопровождаются переходом ядра на другой энергетический уровень.

Верхний левый рисунок изображает энергетические уровни типичного  $\alpha$ -радиоактивного изотопа до распада (уровень  $E_2$ ) и после распада (уровень  $E_1$ ), кривая вверх справа показывает распределение частиц, испускаемых изотопом, по энергиям. Тот факт, что частицы группируются в узком интервале энергий, показывает, что разность между начальной энергией ядра ( $E_2$ ) и конечной энергией ( $E_1$ ) соответствует энергии  $\alpha$ -частицы (стрелка). Рисунок внизу слева изображает уровни энергии типичного  $\beta$ -активного изотопа до и после распада. Кривая внизу справа показывает распределение частиц по энергиям. Тот факт, что частицы разбросаны по широкому интервалу энергий, указывает, что разность между начальной и конечной энергиями редко соответствует энергии  $\beta$ -частицы (сплошная стрелка); недостающая энергия (пунктирная стрелка), вероятно, уносится нейтрино.

Во-первых, частица должна быть незаряженной, чтобы при распаде нейтрона сохранялся заряд (положительный протон и отрицательный электрон в сумме дают нулевой заряд).

Во-вторых, согласно тщательным измерениям соотношений между энергиями и массами различных участвующих в процессе частиц эта частица должна быть практически невесомой. Для простоты считают, что масса ее равна нулю.

В-третьих, частица должна обладать собственным моментом количества движения, т. е. спином. Спин нейтрона равен половине квантовой единицы; при распаде появляются две частицы, каждая из которых имеет спин, равный половине единицы; следовательно, для сохранения углового момента невидимая частица должна обладать спином, также равным половине.

Существование такой частицы, не обладающей зарядом, лишенной массы покоя, со спином, равным половине, возникающей только при  $\beta$ -распаде, было постулировано Паули и Ферми. Она стала известна под именем нейтрино — «маленькая нейтральная» или «нейтрончик» на прекрасном родном языке Ферми \*).

Однако теперь мы оказываемся на тонком льду. Поставленные перед фактом несостоятельности закона сохранения энергии, физики отказались признать этот факт, но при этом они постулировали существование некоторой не наблюдавшейся и, может быть, не наблюдаемой частицы — нейтрончика, так ловко придуманной, что она не имеет других свойств, кроме тех, которые нужны для выполнения законов сохранения. Чем же это отличается от прямого и открытого признания непригодности закона сохранения энергий?

### Вызов

При первой попытке найти ответ было тщательно обследовано место преступления. Частицы, вылетающие из распадающегося нейтрона или атомного ядра, вместе с энергией обладают еще и импульсом; благодаря этому они испытывают взаимную отдачу, совершенно так же, как выстрел снарядом приводит к отдаче пушки. Если при распаде нейтрона возникают только протон и электрон, то сохранение импульса требует их движения в противоположных направлениях вдоль одной прямой линии (рис. 3.5). Но если при этом вылетает и несущее импульс нейтрино, то две другие частицы должны испытать отдачу и от него, так что их пути — треки — образуют букву V.

Большое число изящных экспериментов по  $\beta$ -распаду различных ядер и нейтрона доказали, что треки протона и электрона имеют именно эту форму.

Критики могут по-прежнему сказать: импульс и энергия тесно связаны, так что ваши эксперименты по отдаче не доказывают ничего, кроме одновременного исчезновения как энергии, так и импульса. Пока вы не сумеете как-нибудь обнаружить пропавшие энергию, импульс и все остальное, вы просто подводите в своих книгах баланс по фиктивным данным.

Есть только один верный ответ на эту критику. Пропавшую энергию, а с ней и нейтрончик, надо поймать. Энергия, которую он несет, должна быть как-то измерена. В противном случае нейтрино, хотя и пользующееся всеобщим признанием, осталось бы все же примером невежества физиков.

Конечно, нейтринную теорию ни в коем случае нельзя считать неплодотворной. Она дала основу для интерпретации различных наблю-

---

\*) Энрико Ферми родился и долгое время работал в Италии. (Прим. перев.)



даемых свойств тройного распада, для предсказания приближенных времен жизни  $\beta$ -активных ядер и т. д. Мы не могли бы сейчас отказаться от постулата нейтрино без того, чтобы не разрушить весь крепко сбитый остов ядерной физики. Тем не менее задача прямого обнаружения нейтрино остается вызовом человеческому разуму.

Поведение физиков, поставленных перед этим вызовом, может показаться недостойным. В течение жизни целого поколения мы удовлетворялись тем, что использовали нейтринную теорию и исследовали ее многочисленные ответвления, но не спешили утвердить само нейтрино как

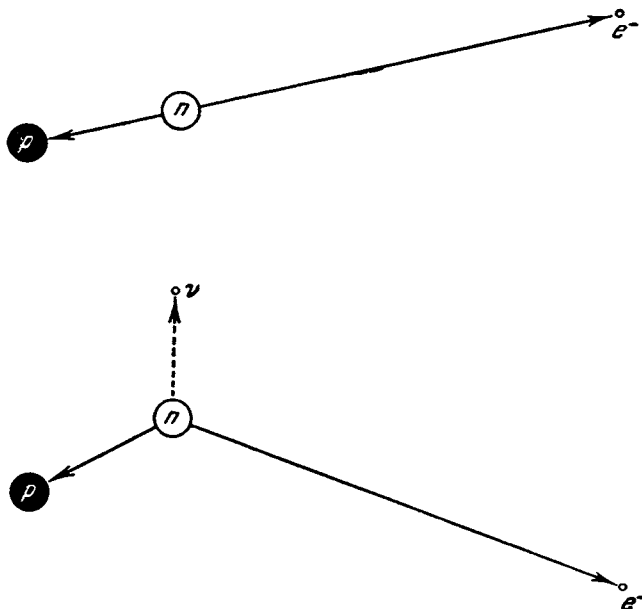


Рис. 3.5. Радиоактивный распад нейтрона требует участия нейтрино.

Если нейтрон ( $n$ ) распадается на протон ( $p$ ) и отрицательный электрон ( $e^-$ ), то сохранение импульса требует, чтобы возникающие частицы разлетались в точно противоположных направлениях (верхний рисунок). В действительности они разлетаются под углом один к другому (нижний рисунок). Это и указывает, что недостающий импульс уносится нейтрино (пунктирная стрелка).

законного члена семьи элементарных частиц, а не просто бухгалтерскую увертку. Почему же мы были столь тяжелы на подъем в прямых поисках нейтрино?

Ответ очень прост и в некоторых отношениях удивителен. В сравнении с другими ядерными событиями  $\beta$ -распад — фантастически медленный процесс, а поэтому и очень редкий. Нейтрону требуется в среднем около 18 минут, чтобы испустить электрон, в то время как испускание  $\gamma$ -кванта той же энергии занимает всего миллионную часть одной миллиардной доли секунды. Необыкновенно медленный  $\beta$ -процесс имеет значительно меньшую вероятность, чем любой другой способ ядерного распада.  $\beta$ -распад — явление, в ядерных масштабах времени более редкое, чем смерть человека в результате бомбардировки Земли метеоритами. Лишь то счастливое обстоятельство, что некоторые ядра бессмертны, т. е. устойчивы

по отношению ко всем процессам распада, кроме  $\beta$ -процесса, и дает нам возможность вообще наблюдать это явление.

Но медленность распада означает, что и обратный процесс, т. е. захват пролетающего нейтрино ядром, также является медленным и редким. Гамма-лучи, заведомо слабо взаимодействующие с ядрами, должны пройти в среднем от 2,5 до 3 метров свинца, пока произойдет такое взаимодействие. Нейтрино же, чтобы провзаимодействовать с ядром, должно путешествовать в среднем через 50 световых лет твердого свинца! Защитная стена, способная существенно ослабить пучок нейтрино, должна быть толщиной в сто миллионов звезд! В действительности нейтрино совершенно не замечает вещества. Нейтрино почти неуловимы и в этом главная трудность.

### Вызов принят

Отпугнутые логикой вещей, физики и не начинали думать всерьез об охоте за нейтрино, пока большие массы радиоактивных веществ не стали производиться как продукты деления в урановых реакторах. Теперь же с поистине необыкновенными усилиями физики стремятся поймать неуловимое нейтрино.

Из реакторов высокой мощности исходят потоки нейтрино, способные соперничать с солнечным. Они проходят через защитные стены и летят по абсолютно прямым линиям от места рождения во внешнее пространство. Обследуя эти мощные пучки вблизи их источника, физики надеются при случае захватить неудачливое нейтрино. В прошедшем месяце группа исследователей начала дозорную службу, поместив свои нейтринные детекторы в пучок от мощного реактора в Саванна-Ривер.

В наиболее эффектно из двух способов обнаружения нейтрончика используется техника счета сцинтилляций. Неутомимые фотоэлементы будут осуществлять непрерывное наблюдение за большим резервуаром, полным чистой сцинтиллирующей жидкости, регистрируя вспышки света, которые сигнализируют о происходящих в ней процессах ионизации. Счетчик Гейгера может отмечать случаи ионизации, происходящие всего лишь в нескольких миллиграммах газа; схема, включающая сцинтиллирующий резервуар, позволяет одновременно следить за тоннами вещества.

Однако захват нейтрино — это действительно чрезвычайно редкое явление, а когда вы собираетесь обнаружить крайне маловероятное событие, вы должны быть готовы к тому, что вам встретится много других событий, вероятных и маловероятных, не имеющих никакого отношения к тому, что вы ищете. В тоннах сцинтиллирующей жидкости будет много разных вспышек — от следов радиоактивных загрязнений в самой жидкости, от космических лучей, от других отличных от нейтрино частиц, способных вылететь из реактора. Не так-то просто следить за всеми вспышками. Необходимо уметь различать те из них, которые обязаны своим происхождением захвату нейтрино, от тех, которые возникают по другим редким, но менее интересным причинам.

Группа исследователей в Лос-Аламосе, руководимая Кованом, Гаррисоном и Райнесом, изобрела и виртуозно разрабатывает остроумный план решения этой проблемы. Ход их мыслей таков.

Поскольку захват нейтрино можно рассматривать как случай, обратный его испусканию, должен иметь место процесс, прямо противоположный  $\beta$ -распаду:

протон плюс электрон плюс нейтрино плюс энергия соединяются, чтобы образовать нейтрон.

Однако существует другой тип реакции  $\beta$ -распада, в котором вместо захвата отрицательного электрона испускается положительный электрон или позитрон. Суммарный электрический заряд в обоих случаях совершенно одинаков, но во втором случае положительный протон становится нейтральной частицей, не поглощая соответствующий отрицательный заряд, а отдав свой собственный положительный заряд в форме позитрона. Наличие таких реакций было подтверждено экспериментом. Мы можем поэтому переписать уравнение захвата нейтрино так, что протон плюс нейтрино плюс энергия могут соединиться, чтобы дать нейтрон и позитрон.

Группа из Лос-Аламоса надеется обнаружить этот процесс по его продуктам — нейтрону и позитрону.

### Тонкий опыт

Энергия, необходимая для превращения протона в нейтрон, доставляется падающим нейтрино. Нейтрино, испускаемые продуктами деления в реакторе, как правило, должны иметь примерно на миллион электрон-вольт энергии больше, чем это требуется для превращения. Лишняя энергия перейдет в кинетическую энергию возникающих частиц (нейтрона и позитрона), причем позитрон, как более легкая частица, унесет большую часть энергии.

Заряженный позитрон на своем пути ионизует атомы и, таким образом, создает заметную вспышку в сцинтиллирующей жидкости. Пройдя один или два сантиметра, на что потребуется не более сотой части одной миллиардной доли секунды, позитрон остановится, истратив всю свою кинетическую энергию.

Вспышка от ионизации движущимся позитроном есть только первый видимый сигнал о происшедшем захвате нейтрино. В момент, когда позитрон останавливается, он соединяется с электроном (а их кругом много). Возникшая пара частиц немедленно аннигилирует, и энергия, соответствующая ее массе покоя, излучается в виде двух  $\gamma$ -квантов, каждый с энергией примерно в полмиллиона электрон-вольт, распространяющихся в противоположных направлениях от источника. Пролетев около полуметра, каждый  $\gamma$ -квант порождает ионизирующий электрон, который в свою очередь вызывает вспышку в счетчике. Таким образом, каждый захват нейтрино, создающий энергичный позитрон, должен сопровождаться тремя почти одновременными вспышками в сцинтиллирующей жидкости — вспышкой от ионизации движущимся позитроном и парой вспышек в разных местах от  $\gamma$ -квантов.

Новорожденный нейтрон движется медленно с малой кинетической энергией. Его движение не отмечается вспышкой, поскольку нейтральная частица не может ионизовать. Он блуждает, как обычно, по жидкости, замедляясь постепенно до тепловых скоростей. В конце концов он захватывается каким-либо ядром. Но ловкий экспериментатор может добавить к своему жидкому сцинтиллятору немного кадмия, который обладает ярко выраженным сродством к медленным нейтронам. Ядро кадмия захватывает нейтрон очень энергично, причем в этом процессе испускается несколько  $\gamma$ -квантов. Благодаря этому поглощаемый нейтрон заявляет о своем присутствии вспышкой, как это ранее уже сделал позитрон. Сигнал от нейтрона приходит со значительным опозданием, поскольку до момента захвата он пропутешествовал один или два метра с относительно малой скоростью. Это запаздывание оказывается порядка 10 или более

микросекунд и может быть точно измерено с помощью электронных устройств.

План эксперимента в Саванна-Ривер таков. Слой жидкости, содержащей протоны, с добавлением некоторого количества кадмия, помещается подобно начинке бутерброда между двумя толстыми сцинтиллирующими слоями, чувствительными к  $\gamma$ -лучам. Фотоумножители ведут тщательное наблюдение за всем устройством. Когда нейтрино захватывается протоном, рождение позитрона немедленно отмечается вспышкой в среднем слое — «начинке» бутерброда. Практически одновременно, в течение отрезка времени, слишком короткого для измерения, происходят вспышки в двух крайних («хлебных») слоях бутерброда, производимые двумя  $\gamma$ -квантами, рожденными при аннигиляции позитрона. Спустя несколько миллионных долей секунды захват блуждающего нейтрона кадмием приводит к испусканию  $\gamma$ -квантов, вспышки от которых видны во всех трех слоях. Короче говоря, каждый захват нейтрино сопровождается двумя сериями вспышек во всех трех слоях, причем одна серия следует за другой через вполне определенное время (рис. 3.6). Кроме того, сама величина энергии вспышки, происходящей от аннигиляции позитрона, помогает выявить это событие: она должна быть порядка одного миллиона электрон-вольт.

Конечно, возможны и случайные комбинации различных событий, симулирующие описанную выше последовательность, но они оказываются слишком редкими, чтобы служить помехой. Их ложность может быть и будет установлена с помощью контрольных экспериментов. Причиной ложных событий могут прежде всего явиться частицы космических лучей (они серьезно мешали в ранних вариантах этого эксперимента). Эти быстрые заряженные частицы могут вызвать вспышки во всех трех слоях и в дополнение к тому освободить нейтрон, который даст необходимый по схеме запаздывающий импульс. Однако энергия, передаваемая этими частицами каждому слою, велика, а значит, первая вспышка будет слишком яркой, что и поможет выявить ложный характер события.

Весь прибор обладает внушительными размерами. Если в большинстве экспериментов этого рода используют полдюжины фотоумножителей и связанных с ними усилителей, то охотники за нейтрино используют их около пяти сотен. Если обычно сцинтилляционные счетчики считаются большими, когда содержат несколько литров жидкости, то в этом эксперименте используется 10—12 тонн жидкости. Потребности проекта привели к целому комплексу остроумных технических решений, стоивших немалого труда. Химическая фирма, производящая сцинтиллирующую жидкость, обычно имела дело с литрами этой жидкости, теперь же ей пришлось изготавливать и очищать тонны вещества. Была построена специальная цистерна для перевозки драгоценной жидкости в инертной атмосфере от завода к месту эксперимента. Цистерна должна была содержаться в абсолютной чистоте без всяких следов кислородных загрязнений. Резервуар, в котором осуществляется эксперимент, был облицован специальным глянцевито-белым слоем, чтобы практически не поглощать света. К сцинтиллирующей жидкости было добавлено специальное химическое вещество, чтобы придать вспышкам цвет, который лучше всего отражается стенками резервуара. Вспышки, несущие всю информацию, которую собственно и ищут охотники за нейтрино, слишком слабы, чтобы увидеть их невооруженным глазом. Поэтому нельзя жалеть сил на то, чтобы добиться уверенности, что все они регистрируются чувствитель-

ными фотоумножителями. Требуется сотни фотоумножителей и великое множество других электронных приборов. Сам резервуар детектора заключен в свинцовую оболочку и глубоко захоронен в защитных стенах большого реактора в Саванна-Ривер.

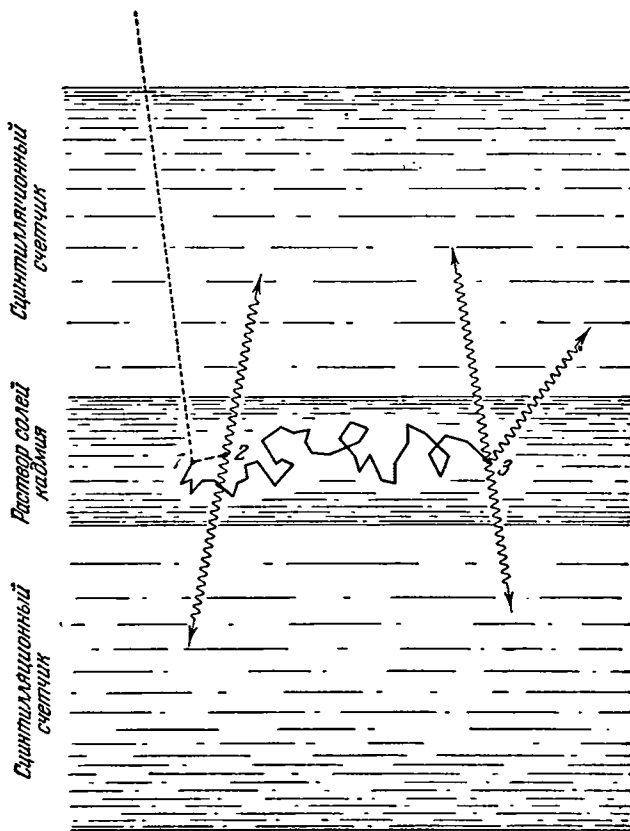


Рис. 3.6. На этом рисунке изображены события, которые должны помочь Ковану, Гаррисону и Райнесу обнаружить нейтрино.

Нейтрино (пунктирная линия) встречает протон в точке 1, вызывая его превращение в нейтрон (зигзагообразная линия — путь нейтрона) и положительный электрон. Проходя через раствор солей кадмия (пунктир вправо от точки 1), положительный электрон дает импульс ионизации. Далее он аннигилирует при встрече с отрицательным электроном в точке 2. Это приводит к образованию двух  $\gamma$ -квантов (волнистые линии), один из которых дает импульс в верхнем сцинтиллирующем счетчике, другой — в нижнем счетчике. Нейтрон блуждает несколько микросекунд, пока не поглощается ядром кадмия в точке 3. При этом возникают три  $\gamma$ -кванта. Таким образом, нейтрино считается обнаруженным, если два последовательных импульса, разделенные интервалом в несколько микросекунд, регистрируются и в растворе кадмия и в сцинтилляционных счетчиках.

После изготовления и проверки всего оборудования экспериментаторы в прошлом месяце начали работы по установке его в Саванна-Ривер. Затем они будут терпеливо считать, час за часом, ожидая доказательств, которые, как они надеются, восстановят честь закона сохранения энергии и помогут им сыграть роль Галле по отношению к Ферми — Леверье физики двадцатого столетия.

## Поиски химиков

В это же время другая группа осуществляет исследования совершенно иным методом. Аналогично тому как осуществление описанной схемы сцинтиллирующих счетчиков представляет своего рода подвиг в области современного физического эксперимента, здесь также имеется соответствующий участок работы, требующий изумительного мастерства от химика. Надеются, что химическими методами удастся совершить своего рода фокус — опознать захват нейтрино, обнаружив продукты такой реакции. В этом случае мишенью будут не протоны, а ядра атомов хлора. Изотоп хлор-37 может захватить нейтрино, испуская электрон и превращаясь в атом редкого газа аргона. Возникающий при этом атом, аргон-37, сам является радиоактивным.

Возникновение радиоактивного аргона обнаруживается следующим простым способом. Большой сосуд, полный жидкости, содержащий хлор, очищают от аргона (во всяком случае от радиоактивного аргона) продуванием через него инертного газа гелия. Затем жидкость облучают потоком нейтрино из реактора. После экспозиции, длящейся несколько дней, сосуд снова продувается гелием, чтобы извлечь весь аргон, который мог образоваться за это время.

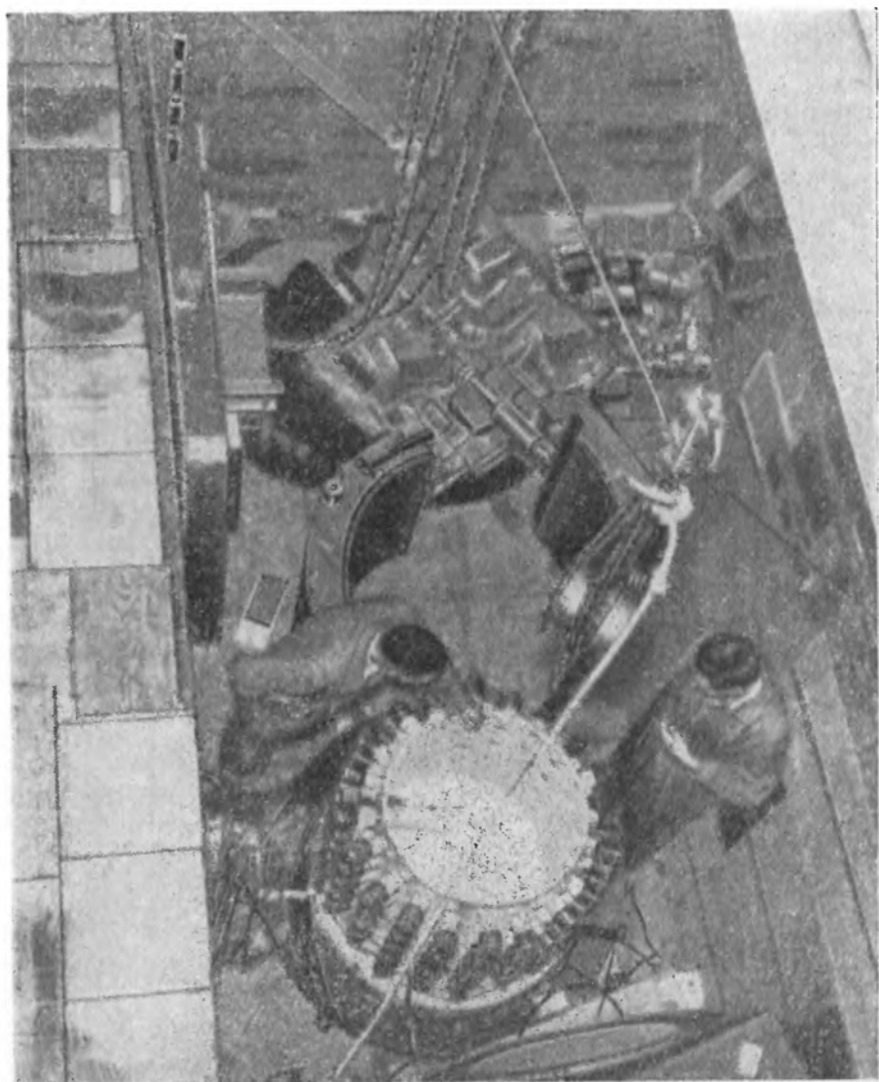
Аргон, некоторые следы которого во всяком случае должны при этом быть, отделяется от гелия хорошо известными методами физической химии, а уже затем счетчик Гейгера позволяет обнаружить присутствие радиоактивности в получающемся образце. Этот метод основан на столь тонкой химической «ловле» нескольких атомов в большом чане растворителя, что, несомненно, представляет собой образец попытки найти иголку в стоге сена.

Против описанного метода имеются два возражения. Первое, конечно, состоит в том, что вопрос об источнике радиоактивного аргона (если он обнаружен) остается открытым. Тщательные контрольные опыты могут снять это возражение. Но при этом остается более глубокое и серьезное возражение, идущее от теории элементарных частиц. Если мы обратим реакцию захвата нейтрино, то теория утверждает, что продуктами распада должны быть хлор-37, нейтрино и позитрон (а не электрон). Это означает, что само нейтрино здесь не в точности то же, что и в обычном  $\beta$ -распаде, скорее его следовало бы назвать антинейтрино. Следовательно, нейтрино, испускаемые реактором, могут и не превратить хлор в аргон. Однако возможно, что оба сорта нейтрино в действительности эквивалентны во всех отношениях, так что опыт будет удачным\*).

Раймонд Дэвис младший из Брукхэвенской национальной лаборатории будет измерять активность аргона, индуцированную в четырехтонном сосуде, содержащем четыреххлористый углерод, вблизи котла в Саванна-Ривер. Счастливым совпадением является тот факт, что оба эксперимента (со сцинтилляционными счетчиками и хлором) будут осуществляться в одно время и в одном и том же месте, поскольку они взаимно дополняют друг друга.

Было бы несправедливо не отметить, что описанные выше эксперименты не являются первыми попытками прямого обнаружения нейтрино. Несколько смелых экспериментаторов пробовали сделать это и ранее, но в слишком малых масштабах. Эксперимент, использующий хлор,

\*) К настоящему времени в связи с открытием несохранения четности (см. статью Моррисона на стр. 77) установлено, что нейтрино и антинейтрино различны. (Прим. ред.)



**Рис. 3.7.** Сцинтилляционный счетчик, использованный Райнесом, Кованом и их коллегами в попытке «поймать» нейтрино.

Счетчик — цилиндрическое тело внизу фотографии. Он был установлен рядом с реактором в Ханфорде. После этого эксперимента Райнес и Кован разработали проект нового эксперимента с еще более крупным оборудованием.

впервые был предложен итальянским физиком Бруно Понтекорво, который в настоящее время работает в СССР. Эксперимент, использующий захват протоном, в малом варианте был осуществлен Лос-Аламосской группой в Ханфорде в 1955 г. (рис. 3.7), причем были получены положительные, но вызывающие сомнение результаты. Большинство физиков склонны делать окончательные выводы только на основе действительно мощных усилий, осуществляемых в настоящее время.

### Новая астрономия

Нейтрино приводит нас в принципе к астрономии нового рода. До сих пор только видимый свет и микрорадиоволны служили объектом исследования, как излучение, приходящее из внешнего пространства. Потоки нейтрино от Солнца и звезд также несут нам информацию о строении вселенной и, несомненно, когда-нибудь мы прочитаем хотя бы часть этого текста. Опыт с захватом нейтрино хлором при увеличении массы образца примерно в тысячу раз, осуществленный в хорошо изолированной шахте или в глубине моря, может дать возможность измерить поток нейтрино от Солнца. Разрабатываются также усовершенствования сцинтилляционной схемы регистрации. Можно надеяться, что когда-нибудь мы сумеем непосредственно подтвердить циклы ядерных реакций в центре Солнца, исследуя испускаемые при этом нейтрино.

Но представим себе, что эксперименты не дадут результата? Предположим, что счетчики не зарегистрируют нейтрино? Логический вывод очевиден. Для многих неудача будет означать, что закон **сохранения** энергии, наконец, действительно нам изменил, или (это примерно так же плохо для наших теорий), что реакция не сопровождается обратной ей реакцией.

Нам бы не хотелось делать ни одного из этих заключений. Тогда мне представляется только один выход из положения — попытка отчаяния. Нейтрино может покинуть сцену своего рождения нормально, начиная жизнь как обыкновенное нейтрино Ферми. Однако оно может быть неустойчивым и распадаться на три других нейтрино (случай распада на две частицы запрещен соображениями динамики), которые, конечно, не смогут одновременно оказаться все в одной точке, чтобы осуществить обратную реакцию, поскольку направления их движения будут, немного различаться. Такая схема нейтрино сохранит в целостности теорию  $\beta$ -распада, но она сделает нейтрино еще более ускользающим понятием, чем в настоящее время, и только передаст заботы об этой трудности последующим поколениям физиков. Будет значительно лучше, если терпеливые экспериментаторы добьются успеха и их сцинтилляторы ясно зарегистрируют те несколько сигналов осциллографа в час, которые и будут означать, что существование нейтрино наконец-то окончательно доказано \*).

---

\*) Как я предполагал автор, опыты по обнаружению нейтрино закончились успешно и высказанные здесь соображения отпали сами собой. (Прим. ред.)



Эмилио Сегре и Клайд Виганд

## АНТИПРОТОН

(ИЮНЬ 1956 г.)

*Четверть века назад физическая теория предсказала существование фундаментальной частицы с массой, равной массе протона, но с противоположным зарядом. Здесь рассказывается о ее открытии.*

За последнее десятилетие физики открыли много «элементарных» частиц. (Здесь стоит откровенно сознаться, что мы до сих пор в сущности не знаем, как определить понятие «элементарная частица».) Не все они явились нам неожиданно, не предвещаемые ничем. Казалось бы естественным думать, что опыт — единственный способ открыть такую частицу. Однако это не так, хотя конечно, именно опыт остается судьей последней инстанции. Иногда физики-теоретики, исходя из гипотетических уравнений и вычислений с помощью карандаша и бумаги, предсказывали существование частиц, которых еще никто никогда не видел. Эти предсказания, сколь бы странными ни могли представляться некоторые из них, возникали из настойчивого желания сохранить принципы, составляющие основу нашего современного понимания физического мира. При необходимости физики скорее готовы допустить существование чего-либо никогда невиданного, чем подвергнуть опасности эти твердо установленные основы. Данная статья — история проверки одного такого предсказания.

Четверть века назад П. А. М. Дирак из Кембриджского университета придумал уравнение, основанное на наиболее общих принципах теории относительности и квантовой механики, которое количественно верно описывало разнообразные свойства электрона. Достаточно было вставить в уравнение заряд и массу электрона, и тогда его спин, связанный со спином магнитный момент, его поведение в атоме водорода, — все вытекало с математической неизбежностью. Тот факт, что все это можно было получить совершенно автоматически из одного-единственного уравнения, не прибегая ни к каким дополнительным предположениям, своим для каждого свойства, явился столь блистательным успехом, что уравнение Дирака и теория, на которой оно основывалось, заслужили почти безграничную веру.

Дирак обнаружил, однако, что уравнение требовало, чтобы существовали электроны обоих знаков заряда, как положительного, так и отрицательного: оно описывало не только известный отрицательный электрон, но и в точности симметричную частицу, во всем идентичную электрону, за исключением того, что ее заряд должен быть не отрицательным, а положительным. Все попытки исключить решения, соответствующие положительному заряду, ни к чему не привели. А это означало, что либо теория Дирака неверна, либо должен существовать положительный

электрон, который никем еще не наблюдался и о существовании которого до этого не подозревали.

И вот, спустя несколько лет после предсказания Дирака, Карл Андерсон в Калифорнийском технологическом институте нашел положительные электроны (позитроны) среди частиц, рожденных космическими лучами в камере Вильсона. Это открытие явилось не только триумфом теории Дирака, но и послужило толчком для новых более трудных исследований — поисков другой гипотетической частицы, которые заняли 25 лет и были вознаграждены лишь несколько месяцев назад.

### Что говорит теория

Общее уравнение Дирака, в слегка измененном виде, должно было бы быть применимо к протону в той же мере, как и к электрону. В этом случае оно также предсказывает существование античастицы — антипротона, во всем идентичного протону, но с отрицательным зарядом вместо положительного. Симметрия неизвестной частицы протону ясно определяла

некоторые ее свойства. Частица, имеющая право называться антипротоном, должна обладать:

1) массой, равной массе протона ( $1,6724 \cdot 10^{-24}$  г);

2) зарядом, равным заряду протона, но противоположного знака ( $4,8028 \cdot 10^{-10}$  электростатических единиц);

3) должна быть стабильна в том смысле, что в вакууме она не должна распадаться на другие частицы, а навечно оставаться самой собой;

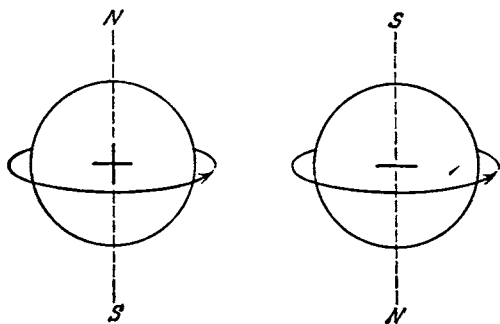
4) при встрече с протоном или нейтроном должна аннигилировать — взаимно уничтожаться с освобождением энергии, отвечающей массам двух исчезнувших частиц;

5) никогда не должна рождаться одинокой, но только в паре с протоном или нейтроном;

Рис. 4.1. Протон (слева) может грубо наглядно рассматриваться как вращающаяся сфера весом в  $1,6724 \cdot 10^{-24}$  г. Он имеет положительный электрический заряд, и, в результате вращения, северный и южный магнитные полюса. Антипротон (справа) имеет тот же самый спин и массу. Он обладает электрическим зарядом такой же величины, знак которого, однако, противоположен. Поэтому его северный и южный магнитные полюса (по отношению к полюсам протона) переставлены.

6) должна иметь собственный момент количества движения (спин), равный спину протона. Подобно протону антипротон должен обладать магнитным моментом (вести себя как маленький магнит), причем, когда он вращается в том же направлении, что и протон, его магнитный момент должен быть равен по величине, но противоположен по знаку магнитному моменту протона, т. е. «северный» и «южный» полюсы должны быть переставлены (рис. 4.1).

Вооруженные этими путеводными нитями физики стали настойчиво искать антипротон. Поскольку было ясно, что рождение этой частицы требует чудовищной энергии, наиболее естественным местом поисков стали космические лучи. Изредка исследователи находили явления, казалось бы, сигнализирующие о рождении антипротона, однако ни разу не удалось собрать достаточно фактов, чтобы «узнать» его бесспорно.



Тогда возник вопрос: какова должна быть энергия, достаточная для создания антипротонов в лаборатории при помощи ускорителей?

Так как антипротон может появиться только в паре с протоном, нам нужна энергия, эквивалентная по крайней мере массе двух протонов. Из соотношения Эйнштейна  $E=mc^2$  мы видим, что эта энергия составит  $2 \times 938 = 1876$  Мэв (т. е. около двух миллиардов электрон-вольт или 2 Бэв). Однако если ставить опыты в лаборатории, то потребуется гораздо больше двух миллиардов электрон-вольт. Дело в том, что для порождения

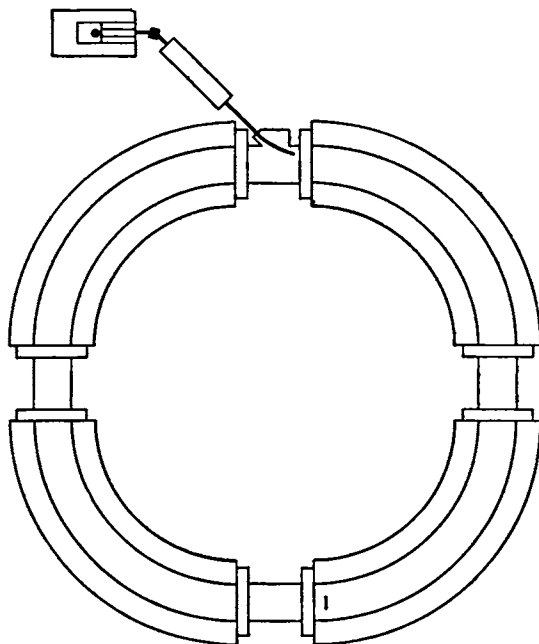


Рис. 4.2. Бэватрон Калифорнийского университета порождает антипротоны, ускоряя протоны до энергий 6,2 миллиарда электрон-вольт (6,2 Бэв).

На схеме изображены четыре магнитных сегмента, внутри которых ускоряются протоны. Радиус каждого сегмента равен 15 м. Протоны вводятся в эту установку двумя ускорителями, расположенными наверху. Медная мишень, в которой рождаются антипротоны, обозначена вертикальной чертой справа внизу.

пары частиц — протона и антипротона — необходимо сконцентрировать энергию в ничтожном объеме; это лучше всего достигается при столкновении частиц высокой энергии с неподвижной мишенью (например, протонов с протонами). После столкновения у нас будет четыре частицы: протон, антипротон и два первоначальных протона. Каждая из этих четырех частиц движется после соударения с кинетической энергией порядка 1 Бэв. Поэтому чтобы создать антипротон таким способом, нужна энергия около 6 Бэв: 2 Бэв для рождения пары протон — антипротон плюс 4 Бэв для кинетической энергии четырех разлетающихся частиц. Именно эти цифры имели в виду, когда проектировали бэватрон в Калифорнийском университете. Его построили, чтобы разгонять протоны до кинетической энергии, большей 6 Бэв, в надежде создать антипротон (рис. 4.2).

### Схема эксперимента

После того как бэватрон начал бомбардировать такими протонами медную мишень, встала задача обнаружить и опознать возникающие антипротоны. План исследования был разработан Оуэном, Чемберленом, Томасом, Ипсилантисом и авторами этой статьи. Он основывался на трех свойствах антипротона, которые позволяли решить эту задачу. Во-первых, стабильность частицы означает, что она будет жить достаточно долго, для того чтобы успеть пройти через длинную установку. Во-вторых, ее отрицательный заряд может быть легко определен по направлению отклонения частицы в приложенном магнитном поле, а величина заряда измерена по степени ионизации окружающей среды, производимой частицей при ее движении. В-третьих, зная скорость частицы, можно вычислить ее массу из кривизны траектории в данном магнитном поле.

Кривизна траектории заряженной частицы в магнитном поле определяется ее импульсом (произведением массы и скорости частицы): если траектория известна, то импульс можно подсчитать. Измеряя также скорость частицы (например, заметив время прохождения ею через две данные точки прибора), мы сможем вычислить ее массу, используя релятивистское уравнение, которое связывает импульс, массу покоя и скорость.

Все это выглядит достаточно просто, но главная трудность, о которой мы до сих пор не упомянули, заключается в следующем. Когда пучок протонов с энергией  $6,2 \text{ Бэв}$  попадает в мишень, он порождает множество других частиц, которые обладают таким же импульсом, что и антипротоны. Большинство из них — мезоны, которые, как предполагается, являются своеобразным цементом, связывающим нуклоны друг с другом в ядре. Оказалось, что в потоке выходящих частиц, фокусируемых нашими магнитами, антипротоны встречаются очень редко: на каждый антипротон приходится около 40 000 мезонов. Мезоны летят в точности по той же траектории, что и антипротоны, но они легче и поэтому скорость их практически равна скорости света, тогда как более тяжелые антипротоны движутся со скоростью, составляющей 78% от скорости света. Необходимо было выбрать эту случайно затесавшуюся в поток тяжелую частицу (одну из сорока тысяч!), узнав ее по скорости, соответствующей скорости антипротона.

Для «вычесывания» антипротонов было поставлено большое число отклоняющих магнитов, магнитных фокусирующих линз и детекторов (рис. 4.3). Из пучка частиц, выходящих из медной мишени, отклоняющий магнит отбирал отрицательно заряженные частицы с нужным импульсом, направляя их по определенной траектории. Этот поток фокусировался магнитными линзами. Сфокусированный пучок встречал на своем пути детектор — диск из пластмассы, дающий вспышку света при прохождении сквозь него заряженной частицы. Детектор служил «секундомером», отмечая момент прохождения частицы, что использовалось далее при определении скорости. Ровно через  $12 \text{ м}$  частицы попадали во второй такой же детектор и по времени прохождения между этими двумя «секундомерами» определялась скорость. Всплески света каждого сцинтиллятора превращались фотоумножителями в импульсы электрического тока, которые в свою очередь давали вспышки на экране катодной трубки. Подобная система может измерить разницу в одну миллиардную долю секунды во времени прохождения частиц через 12-метровый интервал. В нашем эксперименте антипротоны проходили 12-метровую дистанцию

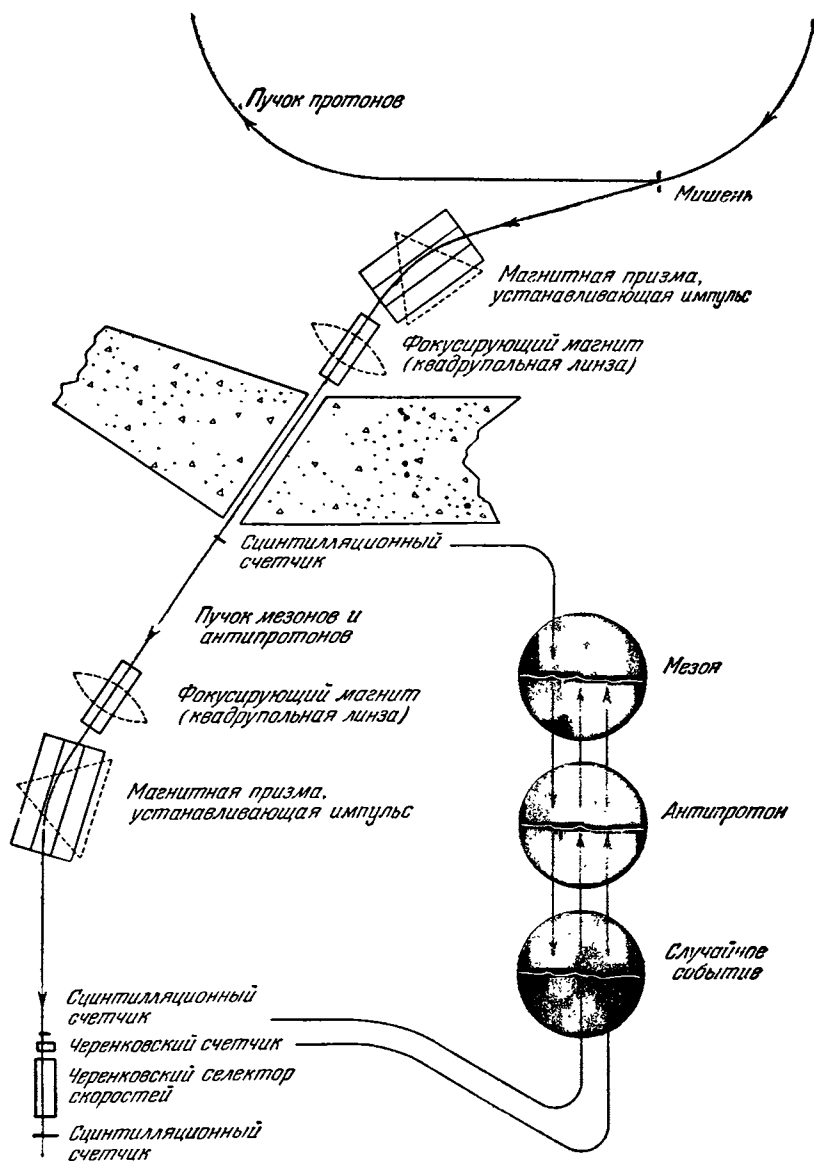


Рис. 4.3. Схема экспериментальной установки, на которой было подтверждено существование антипротона.

Цветная линия наверху — орбита протонов в Бэватроне. Путь антипротонов и других частиц, возникающих в мишени, показан цветной линией, идущей из верхней правой части к нижней левой части чертежа. От мишени до последнего сцинтилляционного счетчика частицы проходят путь в 24 м. В нижней части чертежа справа различные события эксперимента представлены характеризующими их картинами на экране осциллографа. Над центром диаграммы располагается цементная мишень Бэватрона. Призмы и линзы, изображенные пунктирными линиями на месте четырех магнитов, поясняют функции этих магнитов.

за 51 миллиардную долю секунды, тогда как мезоны тратили на это только 40 миллиардных долей секунды.

Однако выяснилось, что необходимо еще одно независимое измерение скорости частиц, чтобы гарантировать себя от случайных совпадений. Такая масса мезонов проносилась через наш «регистратор» скоростей, что иногда какой-либо мезон запускал первый «секундомер», а другой запускал второй через интервал, как раз соответствующий времени пролета антипротона. Поэтому за вторым сцинтиллятором мы поместили счетчик, регистрирующий скорости. Этот счетчик, выбирающий частицы только одной определенной скорости, использовал эффект, открытый много лет назад русским физиком Черенковым \*). Он нашел, что заряженная частица, проходящая через такую среду, как стекло, или кварц, со скоростью, большей скорости света в этой среде, испускает свет, — эффект, аналогичный ударным волнам, возникающим в воздухе при пролете реактивного самолета со скоростью, большей скорости звука. При этом угол между направлением черенковского излучения и путем частицы зависит от ее скорости. Здесь аналогом служат волны, расходящиеся от движущегося парохода: чем быстрее плывет пароход, тем меньше угол (по отношению к пути судна), на который они расходятся. Воспользовавшись этим, мы поместили кусок кварца на пути пучка и так устроили систему зеркал и диафрагм, чтобы черенковское излучение регистрировалось только от частиц, проходящих со скоростями от 75 до 78% скорости света, т. е. со скоростью антипротона.

Мы предприняли еще две предосторожности против ложных идентификаций. Для большей уверенности, что мезоны и другие «сорные» частицы отсеяны, мы расположили перед селектором скоростей «защитный» детектор черенковского типа. Он давал предостерегающий сигнал, когда проходила какая-либо частица со скоростью, превышающей 78% скорости света. Наконец, для исключения частиц, могущих проникнуть снаружи, мы использовали поставленный в конце установки сцинтилляционный счетчик, который регистрировал только частицы, движущиеся в направлении пучка.

Итак, частица регистрировалась как антипротон лишь по выполнению следующих обязательных требований: «секундомеры» указывали, что она прошла с правильной скоростью (12 метров за 51 миллиардную долю секунды), защитный счетчик не давал предостерегающего сигнала; скорость ее, зарегистрированная селектором скорости, лежала в интервале 75—78% скорости света; конечный сцинтиллирующий счетчик указывал, что частица прошла через всю длину селектора. Когда все это происходило, на осциллооскопе наблюдался характерный всплеск (см. рис. 4.3). Было сделано множество проверок, чтобы убедиться, что этот тип кривой действительно указывает, что через систему прошел антипротон.

### Открытие состоялось

К моменту объявления об открытии антипротона (1 октября 1955 г.) было зарегистрировано 60 частиц; скорость обнаружения в среднем составляла четыре антипротона за час работы бэзатрона. Обнаруженные антипротоны удовлетворяли всем требованиям, которые мы сформулировали перед тем, как начать эксперимент. Нам было очень приятно

\*) П. А. Черенкову, открывшему этот эффект, совместно с И. М. Франком и И. Е. Таммом, объяснившими его, была присуждена Нобелевская премия по физике за 1958 г. (Прим. ред.)

услышать, когда один весьма уважаемый нами физик, приехавший к нам из другого университета, где он только что закончил важный и трудный эксперимент по мезонам, сказал, ознакомившись с нашей системой контроля: «Я хотел бы, чтобы мои собственные эксперименты по мю-мезонам были так же убедительны, как эти».

Когда антипротон был открыт, возникла задача узнать, как происходит аннигиляция при его встрече с протоном (рис. 4.4). Первый эксперимент в этом направлении был выполнен группой, состоящей из Брабанта, Корка, Горовитца, Майера, Муррея, Уоллеса и Венцеля. Они решили исследовать, как происходит поглощение в куске стекла антипротонов, полученных на нашей установке. При остановке антипротон и протон, который, по-видимому, аннигилировал с ним, порождали быстрые заряженные частицы, движущиеся достаточно быстро для того, чтобы дать заметную вспышку черенковского излучения. Исследование этого излучения подтвердило, что частицы, идентифицированные как антипротоны, определенно не являлись мезонами.

В это же время был предпринят другой эксперимент для обнаружения антипротона. В нем участвовали авторы, а также Чемберлен, Чапп и Гольдхабер совместно с группой итальянских физиков — Амальди (как и Сегре — бывший сокурсник покойного Энрико Ферми), Барони, Кастаньоли, Франчинети и Манфредини. Было решено попытаться найти треки антипротонов в фотографических эмульсиях. Если бы мы сумели обнаружить их там, то была бы получена непосредственная информация о распаде антипротона.

Мы облучали фотопластинки пучком, энергия которого была достаточна для создания антипротонов. Затем некоторые пластинки были посланы в Рим, другие же изучались в Беркли. Несмотря на всемерные усилия обеих групп, исследователями в Риме была найдена только одна звезда, которая могла бы представлять собой аннигиляцию протон — антипротон. Последующие эксперименты нашей группы (включая Келлера и Стейнера) совершенно неожиданно показали, что поглотитель, который использовался нами

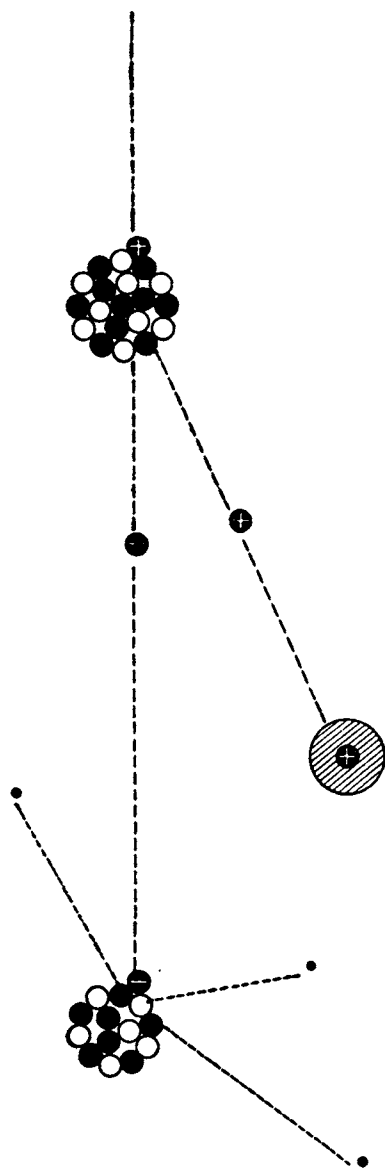


Рис. 4.4. Схема «жизненного цикла» антипротона.

Протон очень большой энергии (черный кружок со знаком плюс наверху) сталкивается с другим протоном в ядре мишени. В результате этого возникает новый протон (черный кружок со знаком плюс справа в центре) и антипротон (черный кружок со знаком минус). Возникший протон движется до тех пор, пока не останавливается, став ядром атома водорода (справа). Антипротон движется до тех пор, пока не встретит другое ядро (внизу). Тогда антипротон и протон или нейтрон из этого ядра аннигилируют, создавая ливень различных частиц.

для замедления антипротонов перед тем, как они попадут в фотопластинки, уничтожал многие из них. Этот поглотитель убрали и облучили новые пластинки; в результате при наблюдении в Беркли в эмульсиях обнаружили треки 20 антипротонов.

Звезда, возникшая в результате аннигиляции, изображена на рис. 4.5. След входящего антипротона обладает предсказанной длиной. Частица потеряла свою кинетическую энергию в соударениях, а также путем ионизации и остановилась в эмульсии. Затем она была захвачена ядром эмульсии и немедленно аннигилировала с одним из его нуклонов.

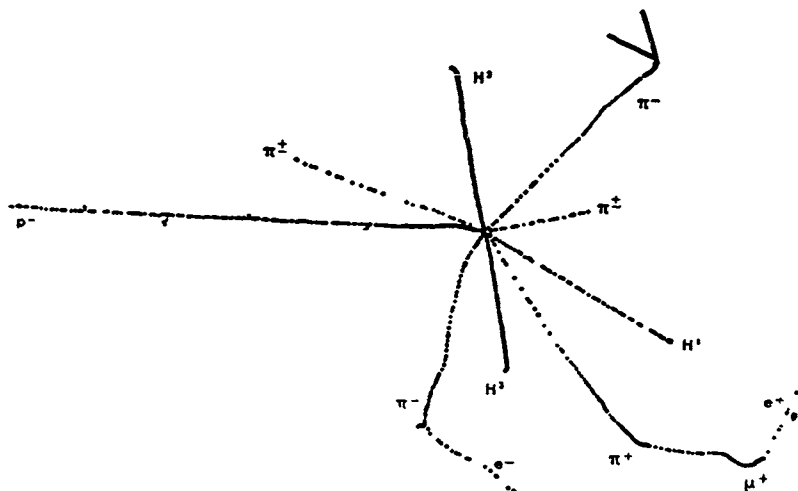


Рис. 4.5. Схема фотографии ядерной эмульсии, на которой были обнаружены эти следы. зарегистрировала гибель антипротона ( $p^-$ ), результатом которой было возникновение «звезды» пи-мезонов ( $\pi$ ) и ядер водорода (H). Один из пи-мезонов превратился в электрон ( $e^-$ ), другой — в мю-мезон ( $\mu$ ) и электрон.

Многие заряженные остатки, на которые распалось ядро, можно опознать по их трекам; некоторые же нельзя назвать с уверенностью; среди последних были нейтральные частицы, не оставляющие следов в эмульсии. Во всяком случае, мы определенно знаем, что полная энергия, освобожденная при аннигиляции, была больше энергии, эквивалентной массе антипротона — доказательство того, что с антипротоном аннигилировал другой нуклон.

Появление антипротона, как это обычно бывает при любом открытии, подняло много новых вопросов. Работа над их разрешением успешно продвигается. Пока только Беркли имеет ускоритель достаточно мощный, чтобы создать антипротон.

Судя по докладам Женевской конференции, следующей входящей в игру машиной явится ускоритель в СССР, который находится в стадии пуска \*).

\*) В настоящее время 10-миллиардный синхрофазотрон Объединенного института ядерных исследований в Дубне под Москвой успешно работает и позволяет изучать антипротоны. (Приж. ред.)



### Существует ли антимир?

Интересной темой для размышлений является возможность существования «антимира». Это должен быть мир, в котором все основные частицы по заряду противоположны основным частицам нашего мира: например, атом водорода должен бы был иметь антипротон в качестве ядра и позитрон вместо электрона. Мы не знаем методов, с помощью которых можно было бы установить путем астрономических наблюдений существование подобного мира \*). Но если антиматерия существует, и если где-либо она придет в контакт с обычной материей, то две формы материи будут аннигилировать, освобождая гигантскую энергию, в основном в виде мезонов. Возможность наблюдения этого события будет зависеть от плотности сталкивающейся материи. Если она будет также мала, как средняя плотность материи в галактиках, эффект может быть не очень заметным. Возможно также, что даже столкновение между концентрированными массами материи и антиматерии не будет очень эффективным в астрономическом масштабе, так как они, видимо, будут отталкивать друг друга давлением излучения, как только придут в соприкосновение.

Если вселенная возникла в результате превращения чистой энергии в нуклоны и электроны \*\*), то мы обязаны предполагать (для того чтобы выполнялся закон сохранения числа этих частиц), что где-либо имеются антинуклоны и антиэлектроны, в количестве, равном числу нуклонов и электронов в известной нам части вселенной. Это предположение в высшей степени удовлетворяет принципу симметрии.

---

\*) Сейчас разработан один из таких методов, основанный на измерении нейтрино. (Прим. ред.)

\*\*) Авторы имеют в виду превращение одной формы материи — поля, в другую форму — вещество, идущее с сохранением энергии и массы обеих форм материи. (Прим. ред.)

---

*Корбен и де Бенедетти*

## ПРОСТЕЙШИЙ АТОМ

(ДЕКАБРЬ 1954 г.)

*Когда радиоактивное ядро испускает позитрон, он может тесно связаться с обычным отрицательным электроном, образуя «позитроний». Эта простая система подтверждает логические основы квантовой электродинамики.*

**В** слове «элементарно» заключена восхитительная двусмысленность. Очо может означать или то, что понимается сразу («Элементарно, дорогой Ватсон!», — как говорил Шерлок Холмс), или же нечто настолько фундаментальное, что вообще никем не понято; как раз в этом смысле мы называем элементарными субатомные частицы. Представления о том, что относится к элементарному, менялись от века к веку. Это слово прилагалось к земле, воздуху, огню и воде, как «элементам», затем — к элементам периодической таблицы, потом к протонам, нейтронам и электронам, из которых образованы эти элементы. В наши дни эпитет «элементарный» используют при описании не только протонов, нейтронов, и электронов, но и позитронов, фотонов, нейтрино, мезонов и целой кучи других недавно открытых частиц.

Если мы обратимся к этому многообразному семейству элементарных частиц, стараясь понять, как они «припасовываются» друг к другу, образуя нам мир, мы найдем все, что угодно, кроме «элементарного» в смысле Шерлока Холмса, и, пожалуй, мы не бросили до сих пор попыток разобраться в этой головоломке только потому, что три ее куска очень хорошо подходят друг к другу. Электроны (частицы отрицательного заряда), позитроны (отличающиеся от электронов только положительным знаком заряда) и фотоны (кванты электромагнитного излучения) великолепно описываются теорией, которая называется квантовой электродинамикой.

Так, например, эта теория предсказывает, что в видимом спектре атома водорода должна быть определенная разность частот между двумя соседними линиями. Экспериментально было найдено, что действительный сдвиг совпадает с теоретическими подсчетами с точностью, лучшей одного мегагерца. Это, в некотором смысле, точность в одну миллиардную, поскольку частота видимого света — примерно миллиард мегагерц. Поэтому можно считать, что квантовая электродинамика относится к наиболее точным описаниям природы, достигнутым до сих пор человеком в какой-либо области научных знаний.

### Распад позитрония

Было бы очень приятно применить этот прецизионный инструмент к простому атому, состоящему лишь из электронов, позитронов и фотонов — системе, не осложненной протонами, нейтронами и другими плохо изученными частицами, которые составляют обычные атомы. Теперь

эта мечта физиков осуществилась. В цепи быстрой смены явлений, следующей за освобождением позитрона радиоактивным атомом, была открыта недолговечная система, состоящая только из электрона и позитрона. Вращаясь один вокруг другого, сдерживаемые электростатическим притяжением их противоположных зарядов, они образовывали электрически нейтральный атом. Этот короткоживущий атом был назван *позитронием*. Электрически он подобен легчайшему атому — водороду, однако место протона занимает в нем позитрон (рис. 5.1). Поскольку позитрон не тяжелее электрона, вес атома позитрония составляет примерно лишь одну тысячную долю веса атома водорода, а ближайшим целым числом, чтобы описать позитроний в шкале атомных весов, будет нуль.

В позитронии как электрон, так и позитрон вращаются вокруг их общего центра масс. Поэтому среднее расстояние между частицами оказывается вдвое большим, чем в атоме водорода, где электрон обращается вокруг относительно неподвижного протона. Но это значит, что длина волны какой-либо линии в спектре позитрония должна почти ровно вдвое превышать соответствующую длину волны атомного водорода.

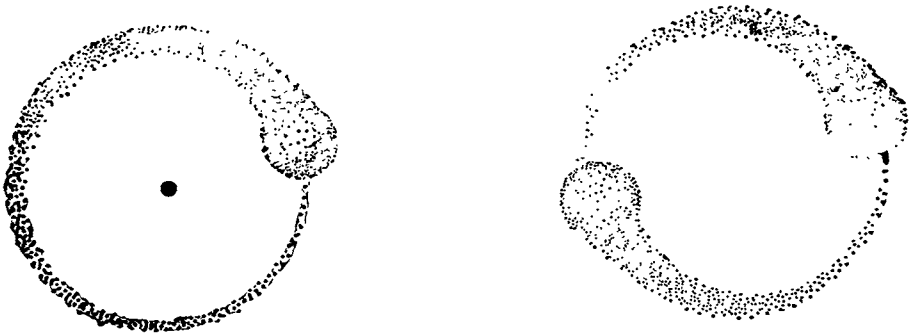


Рис. 5.1. На этой схеме сравниваются атомы водорода и позитрония.

В атоме водорода (слева) отрицательно заряженный электрон обращается вокруг в 1836 раз более тяжелого положительно заряженного протона. В атоме позитрония (справа) отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный электрон (позитрон) обращаются вокруг общего центра тяжести. Этот атом существует менее миллионной доли секунды.

Пройдет, однако, немало времени, прежде чем удастся обнаружить такое излучение, поскольку позитроний «производится» пока лишь в неопределимо малых количествах. Атом позитрония никогда не живет даже миллионной доли секунды; наоборот, жизнь большинства таких атомов не продолжается даже и одной миллиардной доли секунды. Через мгновение после образования позитрония электрон и позитрон взаимно аннигилируют, и атом исчезает. Масса двух частиц превращается в электромагнитную энергию \*), и два или три фотона вылетают из того места, где находился атом позитрония.

Необходимость испускания по меньшей мере двух фотонов следует из закона сохранения импульса. Как при выстреле из ружья что-то должно воспринять отдачу от пули, так и при аннигиляции позитрония что-нибудь должно воспринять отдачу от испущенного фотона. Эту роль может выполнить другой фотон, испускаемый с той же энергией в противоположном направлении. Как мы увидим, иногда позитроний предпочитает

\*) Правильнее было бы сказать, что масса и энергия обеих частиц превращаются в массу и энергию электромагнитного поля. (Прим. ред.)

испустить три фотона, разделяя между ними свою энергию. В принципе он мог бы превратиться, взрываясь, и в четыре, пять или больше фотонов, но вероятность подобных событий всегда очень мала и до сих пор их не удавалось наблюдать.

В любом случае сумма энергий вылетающих фотонов должна равняться энергии, соответствующей массам аннигилировавших частиц — электрона и позитрона (по закону  $E=Mc^2$ ). Эта энергия составляет примерно миллион электрон-вольт, так что если испускаются два фотона, то на каждый приходится около полумиллиона электрон-вольт. Фотоны такой энергии должны быть, и действительно оказываются, гамма-лучами, подобными тем, которые испускают возбужденные атомные ядра.

### Орто- и пара-позитроний

Для наблюдения продуктов аннигиляции позитрония можно просто заключить испускающее позитроны вещество в контейнер, и установить симметрично по обеим сторонам контейнера два счетчика гамма-лучей (рис. 5.2). Счетчики связываются со схемой совпадений, которая дает



Рис. 5.2. Аннигиляция пара-позитрония обнаруживается двумя сцинтилляционными счетчиками (слева и справа).

Позитроний получается с помощью кусочка испускающего позитроны натрия-22 (в центре). Счетная схема устроена таким образом, что она регистрирует событие только в том случае, если фотоны проходят сразу через оба счетчика. Поскольку пара-позитроний распадается на два фотона, а орто-позитроний — на три, то в таком эксперименте обнаруживается только первый из них

сигнал (щелчок и вспышку света) только тогда, когда каждый счетчик пронизывается гамма-лучом в одно и то же время. Это происходит каждый раз, когда атом позитрония распадается и испускает два фотона в направлении счетчиков.

Итак, мы обнаруживаем не образование позитрония, но аннигиляцию позитрона и электрона. Позитрон из радиоактивного источника встречается в стенке контейнера с электроном; партнеры вертятся в танце около десятимиллиардной доли секунды и затем уничтожают друг друга. Каждое такое событие, если оно произошло как раз на прямой, соединяющей счетчики, приводит к щелчку и вспышке в аппаратуре. Недвусмысленный, легко выполнимый и производящий сильное впечатление опыт! Огоньки вспыхивают и счетчики щелкают, прямо как в голливудском фильме о ядерной лаборатории.

Описанное явление называют двухквантовой аннигиляцией. Испускание трех фотонов можно обнаружить с другой аппаратурой, использующей три счетчика, которые расположены в одной плоскости (проходящей через источник позитронов) и включены (все три) в одну схему совпадений, так что вспышка происходит только в случае, если все три счетчика срабатывают одновременно (рис. 5.3).

Почему позитроний иногда превращается в два фотона, а иногда (значительно реже) в три? Естественно предположить, что может существовать позитроний двух «сортов». Если это так, то квантовая электро-

динамика предсказывает, что двухфотонный «сорт» должен был бы жить в среднем  $1,25 \cdot 10^{-10}$  сек, а трехфотонный —  $1,4 \cdot 10^{-7}$  сек.

Для обычных часов это необычайно короткие промежутки времени, но большее из них (порядка миллионной доли секунды) можно точно измерить с помощью современной электронной аппаратуры. Действительно, как раз обнаружив позитроны со средним временем жизни  $1,4 \cdot 10^{-7}$  сек, М. Дойч из Массачусетского технологического института

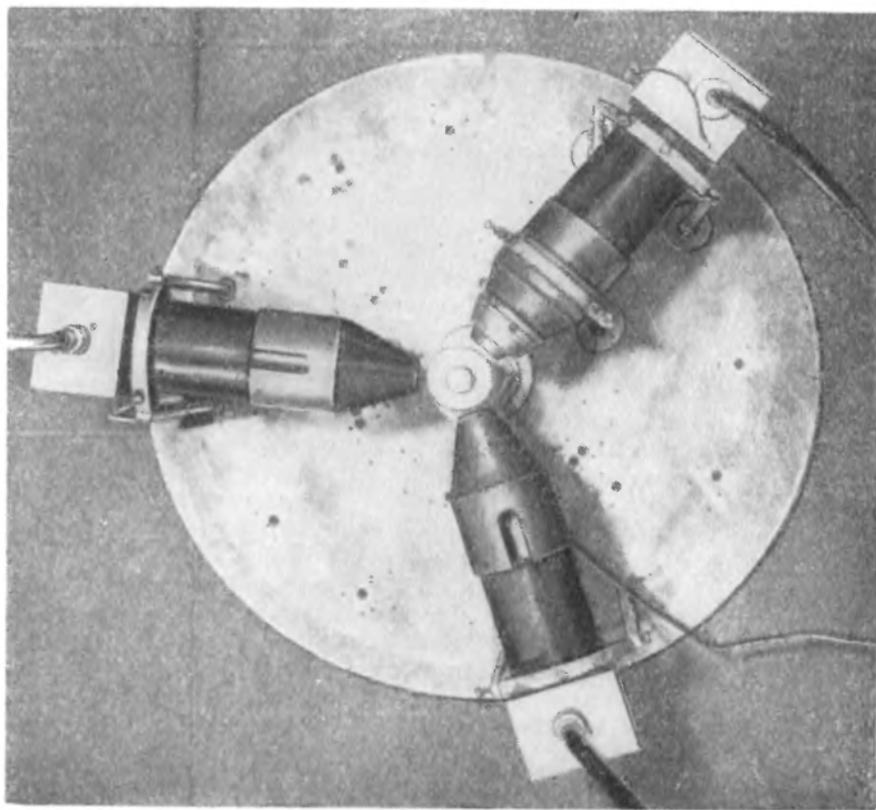


Рис. 5.3. Орто-позитроний обнаруживается с помощью этой аппаратуры.

Три сцинтилляционных счетчика устроены здесь таким образом, что событие регистрируется лишь тогда, когда фотоны проходят одновременно через все счетчики.

открыл позитроний. Замечательно, что этот атом удалось открыть и вообще возможно изучать только благодаря эффективности его смерти!

В своих опытах Дойч мерил время, проходящее с момента рождения позитрона, который сигнализировал о своем вылете из источника, до его аннигиляции. Доказательством существования позитрония послужил тот факт, что иногда позитроны продолжали жить некоторое определенное среднее время, согласующееся с тем, которое предсказывала теория, если бы они спаривались с электронами, образуя нейтральные атомы. Те же соображения позволили изучить некоторые химические свойства позитрония, несмотря на то, что он уничтожается меньше чем через микросекунду после рождения.

Это — воистину замечательное достижение, если учесть, сколь ничтожные количества атомов позитрония были доступны изучению. Допустим, что радиоактивный источник испускает миллион позитронов в секунду. Тогда, даже в случае если все эти позитроны образуют атомы долгоживущего «сорта» позитрония, их время жизни будет столь мало, что 90% времени вообще не будет присутствовать ни одного подобного атома.

Два «сорта» наших атомов были названы пара-позитронием (двухфотонный) и орто-позитронием (трехфотонный). Чтобы понять, чем отличаются они друг от друга, нам придется вернуться примерно на тридцать лет назад, к тому времени, когда обнаружилось, что об электронах

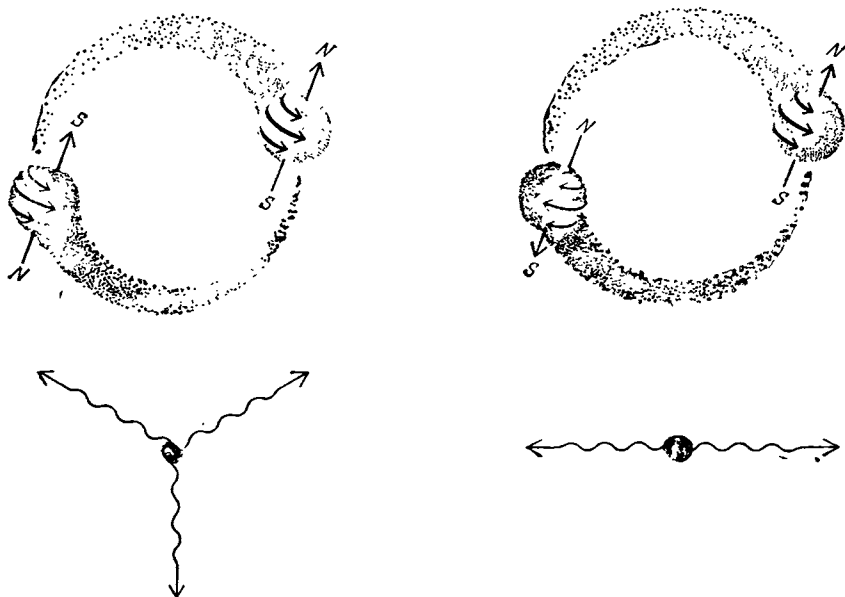


Рис. 5.4. Два сорта позитрония — орто-позитроний (слева) и пара-позитроний.

В орто-форме направления спинов электрона и позитрона параллельны, а магнитные моменты направлены противоположно. В пара-форме противоположны направления спинов, в то время как магнитные моменты параллельны. Орто-позитроний распадается на три фотона, а пара-позитроний — на два.

можно сказать нечто большее, чем то, что они суть очень маленькие шарики с определенной массой и электрическим зарядом. Мы узнали, что электрон не только обращается вокруг ядра атома, но и вращается, подобно Земле, вокруг своей оси, сохраняя постоянный момент количества движения. То же справедливо и для позитрона, идентичного электрону во всех отношениях, исключая знак заряда. Этот врожденный момент количества движения (спин) электрона всегда равен половине используемой в атомной физике единицы момента. Когда электрон и позитрон объединяются в позитроний, их спины могут расположиться либо параллельно, либо антипараллельно. В первом случае они сложатся в единицу, во втором — уничтожатся и дадут нуль. Этим и объясняется существование двух сортов позитрония. В атоме орто-позитрония спины электрона и позитрона параллельны, в то время как в пара-позитронии они направлены в противоположные стороны.

Но спин есть и у фотонов. Их момент количества движения равен обычно одной целой единице со знаком плюс или минус, т. е. направлен по некоторому направлению или против него. Поскольку момент, как и энергия и импульс, подчиняется закону сохранения, мы видим, что орто-позитроний, с его полным спином, равным единице, не может распасться на два фотона, так как спины двух фотонов могут, складываясь, дать только либо нуль либо двойку, судя по тому, направлены ли они противоположно или одинаково. Поэтому с орто-позитронием происходит следующий в порядке убывания вероятности процесс — он распадется на три фотона. С другой стороны, пара-позитроний с полным спином, равным нулю, всегда превращается в два фотона (рис. 5.4).

### Поразительное предсказание

Время жизни позитрония, хотя оно и лежит почти на пределе измеримости нашими самыми тонкими приборами, все еще велико с точки зрения атомной шкалы времени. Согласно боровской теории атома электрон и позитрон обращаются вокруг общего центра тяжести за миллионную долю миллиардной доли секунды. Поэтому даже в пара-позитронии хватает времени примерно на миллион оборотов, прежде чем атом распадется. Итак, у нас есть достаточный запас времени, чтобы изучить взаимное обращение частиц.

Кроме спина, электрон и позитрон обладают, опять-таки подобно Земле, магнитными моментами, т. е. ведут себя как маленькие магнетики, с магнитными осями, направленными в той или иной степени вдоль осей, вокруг которых вращаются частицы. В орто-позитронии северный и южный полюса двух магнетиков направлены противоположно, — к этому приводят противоположные заряды электрона и позитрона, если частицы вращаются одинаковым образом (см. левую часть рис. 5.4). Небольшое отталкивание между обращенными друг к другу одинаковыми полюсами несколько ослабляет связь в этой системе по сравнению с пара-позитронием, в котором магнитное притяжение усиливает электрическое (правая часть рис. 5.4). Эффект, конечно, зависит от того, как ориентированы частицы друг относительно друга; по усреднении выясняется, что энергия орто-позитрония слегка больше энергии пара-позитрония.

Чтобы вычислить уровни энергии с максимальной возможной точностью, следовало бы учесть, что атом может распасться. Дело обстоит так, как если бы атом то и дело предпринимал неудачные попытки взорваться. Это особенно существенно для орто-позитрония. Его момент, равный единице, позволял бы ему превратиться в один фотон, хотя это, как мы видели, и запрещено соображениями отдачи. Тем не менее можно представить себе, что атом пытается сделать это, и, обнаруживая невозможность осуществить подобную попытку, возвращается обратно в основное состояние. Поэтому примерно 1% времени электрические заряды в орто-позитронии не действуют, они как бы аннигилировали, когда атом пытался стать фотоном. Благодаря этому эффекту, который называется «аннигиляционными силами», орто-позитроний оказывается связанным несколько слабее, чем было бы без него. С другой стороны, пара-позитроний не может даже и пытаться стать одним фотоном, поскольку для этого не подходит его момент, а когда он пробует превратиться в два фотона, ничто не препятствует успеху. Это — другая причина, по которой орто-позитроний связан слабее пара-позитрония.

Объединяя эти эффекты, можно показать теоретически, что разность энергий двух сортов атомов должна составить примерно тысячную долю электрон-вольта. Учитывая также и некоторые другие, меньшие эффекты, Карплус и Клейн из Гарвардского университета вычислили, что более точное значение этой разности должно составлять (в частотах) 203 370 мегагерц. Войстину удивительно, что Дойч и его сотрудники обнаружили на опыте для той же разности значение  $203\,350 \pm 50$  мегагерц.

Нельзя не признать, что квантовая электродинамика должна быть чрезвычайно сильной теорией, если она может предсказать с такой поразительной точностью эту ничтожную разницу энергий двух сортов позитрония! Однако та же теория, которая так блестяще справляется с этой задачей, приводит иногда и к полностью бессмысленным заключениям. В частности, она приводит к выводу, что масса и заряд электрона бесконечны! До сих пор никому еще не удалось придумать, как исправить теорию, чтобы избавиться от этих бесконечных ответов. Когда кто-нибудь поймет, как это сделать, он, вероятно, достигнет, лучшего понимания природы других «элементарных» частиц.

---



*Серджио де Бенедетти*

## МЕЗОАТОМЫ

(ОКТАБРЬ 1956 г.)

*В течение короткого времени мезоны могут подобно электронам вращаться по орбитам вокруг атомного ядра. Излучаемые ими при переходе с орбиты на орбиту рентгеновские лучи могут помочь нам в исследовании природы ядерных сил*

**В** течение полувека, прошедшего с тех пор, как нам открылся новый загадочный мир атома, физики стремились разделить атом, чтобы выяснить, из чего он состоит. Это был период неистовой бомбардировки и штурма; сами эксперименты в атомной физике стали общеизвестны под именем «расщепление атома». Теперь изучение атома вступает в новую фазу. В наше время строение атомов понято так хорошо, что физики способны, по желанию, как разрушать, так и создавать их. Некоторые же из вновь открытых атомных частиц явились материалом для создания совершенно искусственных атомов, которые, таким образом, послужили орудием проверки теорий, касающихся природы атомного мира.

Первым таким атомом был позитроний. Позитроний — это короткоживущий, практически невесомый атом, состоящий из электрона и позитрона — частицы, которая точно похожа на электрон с тем только отличием, что заряд ее не отрицательный, а положительный. Атом позитрония аналогичен простейшему из «обычных» атомов — атому водорода, который состоит из электрона и протона; мы можем считать, что в позитронии место протона занимает позитрон.

В этой статье мы займемся другим типом искусственных атомов, где электрон замещен мезоном. Такой атом имеет обычное ядро, состоящее из протонов и нейтронов, но вместо электрона по одной из орбит вокруг ядра вращается мезон. Мезоны, как это теперь хорошо известно, являются частицами среднего веса (тяжелее электрона, но легче протона); предполагается, что мезоны каким-то образом связаны с теми силами, которые действуют внутри атомного ядра. И поскольку природа ядерных сил является в настоящее время крупнейшей и до сих пор не решенной проблемой атомной физики, ясно, что подобный мезонный атом или, короче, мезоатом представляет собой исключительно интересный объект исследования. Что же он может рассказать нам о строении ядра?

### Экскурсия в мезоатом

Давайте начнем с экскурсии по простейшему из обычных атомов, атому водорода, под опытным руководством Нильса Бора, которому мы обязаны важнейшими идеями о строении атома. Вступая в атом, мы находим электрон, вращающийся вокруг тяжелого положительного ядра

(протона) по круговой орбите диаметром около  $10^{-8}$  см. Бор указывает, нам, что, передавая атому определенную порцию энергии, мы можем заставить электрон покинуть свою первоначальную орбиту (называемую основным состоянием), причем электрон мгновенно перескакивает на другую орбиту, более далекую от ядра. Имеется лишь дискретный набор таких орбит, доступных для электрона. Он может двигаться только по одной из этих орбит, но ему запрещено находиться в каком-либо ином месте внутри атома. Вскоре после прыжка на верхнюю орбиту, электрон, которого все время притягивает к себе положительно заряженное ядро, переходит обратно в основное состояние, причем он может сделать это или сразу, или в результате ряда последовательных промежуточных шагов. Каждый такой переход освобождает энергию, которую мы и наблюдаем в виде света. Известный пример подобного излучения света дают хорошо

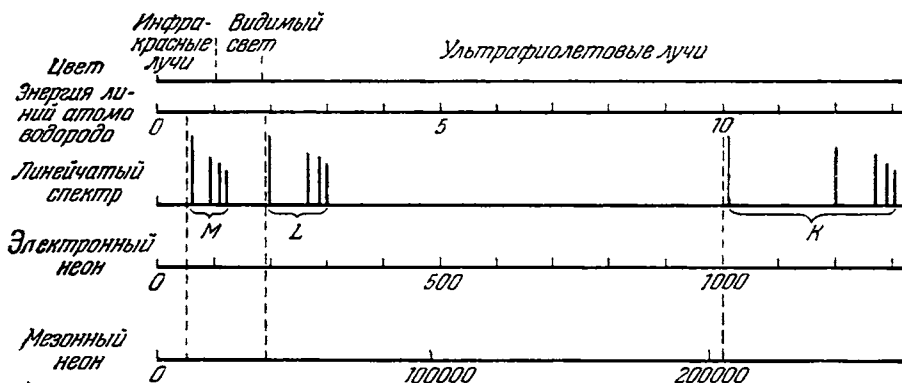


Рис. 6.1. Сравнение энергетических спектров электронного и мезонного атомов.

Три верхние полосы показывают расположение водородных линий по отношению к видимому свету (верхняя полоса) и к энергетическому спектру водорода (вторая полоса). Линии испускания электронного неона должны быть на этом рисунке изображены в масштабе, измененном в 100 раз. Поскольку  $\mu$ -мезон в 210 раз тяжелее электрона, масштаб энергетического спектра мезонного неона должен быть изменен в 210 раз по сравнению с электронным неопом или в 21000 раз по сравнению с водородом.

всем знакомые газовые трубки, из которых делают светящиеся надписи. Атомы в светящихся трубках возбуждаются электрическим разрядом. Каждый атом излучает свет характерного цвета. Если посмотреть в спектроскоп свет от трубки, содержащей атомы водорода, то мы увидим целый ряд резких линий различного цвета; каждая линия соответствует определенному переходу электрона.

Спросим теперь нашего экскурсовода, что произойдет, если электрон в атоме водорода заменить отрицательно заряженным мезоном? Нильс Бор отвечает, что и мезон подобно электрону может занимать только определенные орбиты, а при переходах с орбиты на орбиту будет испускать характеристическое излучение. Если это окажется  $\mu$ -мезон, который в 210 раз тяжелее электрона, то каждая орбита будет по своим размерам в 210 раз меньше соответствующей электронной орбиты, а длина волны излучения — во столько же раз короче. Если же частица будет  $\pi$ -мезоном, который тяжелее электрона в 273 раза, то и орбита и длина волны излучения должны будут уменьшаться в 273 раза.

Но укорочение длины волны переводит интересующее нас излучение из области видимого света в область рентгеновских лучей. К сожалению, в случае мезонного атома водородного типа это излучение должно состоять

из мягких (непроникающих) рентгеновских лучей, которые довольно трудно исследовать. Однако более тяжелые мезоатомы будут испускать более коротковолновое (т. е. отвечающее большей энергии) рентгеновское излучение. Возьмем, например, неон, атом которого содержит 10 электронов. Его самая внешняя электронная орбита оказывается примерно одного порядка с основной орбитой водорода ( $10^{-8}$  см в диаметре). Но зато его внутренняя орбита как раз в 10 раз меньше, чем основная орбита водорода. Таким образом, наименьшая из возможных орбит для  $\mu$ -мезона, замещающего один из электронов в атоме неона, была бы не в 210, а в 2100 раз меньше основной орбиты невозбужденного атома водорода. При этом имеет место и соответствующее сокращение длины волны излучения: длина волны излучения при мезонном переходе в неоне должна быть в  $210 \times 10 \times 10 = 21\,000$  раз меньше, чем длина волны у обычного водорода (рис. 6.1). Регистрация рентгеновских лучей такой длины волны не представляет трудностей.

### Что показал опыт

Теперь, после того как совершив под руководством Нильса Бора небольшую экскурсию по атому, мы выяснили, чего нам следует ждать от мезоатомов с общей теоретической точки зрения, посмотрим, как эти

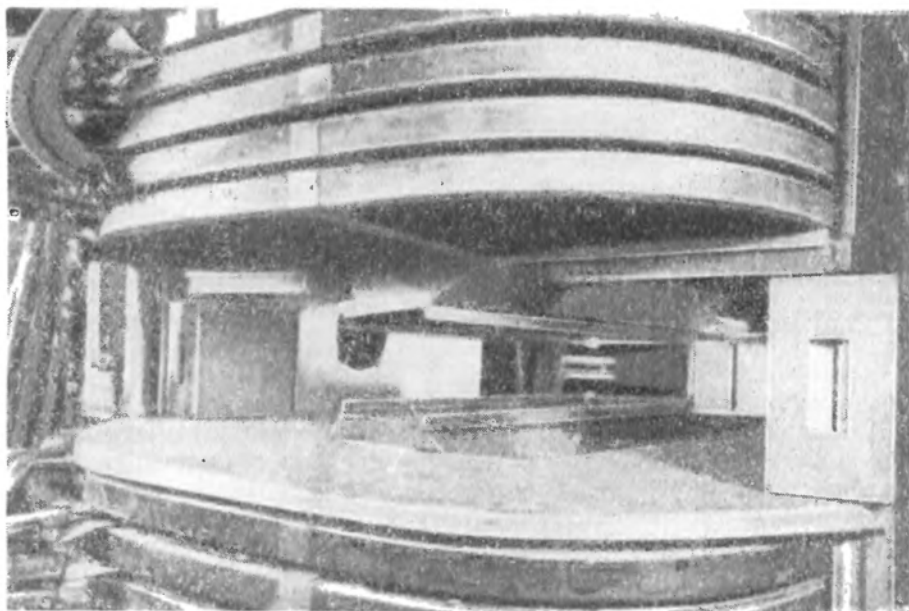


Рис. 6.2. Отклоняющий магнит направляет пучок мезонов от синхроциклотрона на мишень. Люцитовое окно синхроциклотрона можно видеть справа от центра через отверстие в 5-метровой стенке. Пучок путешествует более 10 метров в воздухе от окна к мишени. Кривые металлические дорожки на полюсах магнита указывают отклонение пучка.

предсказания оправдываются на опыте. Эксперимент в этом случае требует наличия синхроциклотрона для получения пучка отрицательных мезонов (рис. 6.2) и, кроме того, специального прибора, в котором мезоны захватывались бы атомами, а затем регистрировалось рентгеновское

излучение; такой прибор был построен Валом Фитчем и Джемсом Рейнуотером из Колумбийского университета.

Быстрые мезоны, вылетающие из синхроциклотрона, тормозятся при прохождении через слой тормозящего вещества; затем, обладая уже тепловыми скоростями (т. е. обычными скоростями теплового движения атомов), они входят в ту среду, атомы которой должны захватывать мезоны (рис. 6.3). Блуждая среди таких атомов, мезон испытывает электростатическое притяжение со стороны положительно заряженных ядер и попадает во внутренние области атома, близкие к ядру. Перескакивая

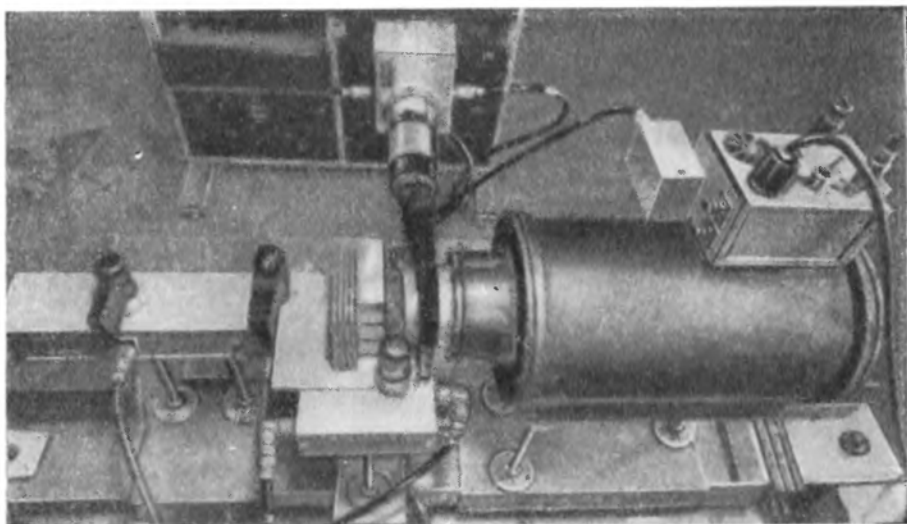


Рис. 6.3. Мезонная мишень.

Мезонный пучок проходит на фотографии слева направо. Сначала он детектируется двумя счетчиками слева. Потом мезоны замедляются плитками меди и бериллия, расположенными на рисунке сразу влево от центра. Затем пучок входит в мишень, заключенную между двумя счетчиками, в центре. Рентгеновские лучи, выходящие из вещества мишени, измеряются детектором (большая коробка справа).

с орбиты на орбиту, мезон излучает рентгеновские лучи. Эти лучи регистрируются сцинтилляционным счетчиком, причем энергию лучей (т. е. длину волны) можно определить путем измерения величины импульсов в счетчике.

Вначале опыты велись с  $\mu$ -мезонами. В случае относительно легких атомов, таких, например, как атомы неона и углерода, все происходило именно так, как предсказывала теория Бора (рис. 6.4). Длина волны рентгеновских лучей от мезонных переходов находилась в ожидаемом отношении к длине волны, излучаемой при переходах электрона, с учетом соответствующей разницы в массах между  $\mu$ -мезоном и электроном. Однако когда перешли к более тяжелым атомам, регулярность этого отношения нарушилась. Энергия рентгеновских лучей, испускаемых тяжелыми мезоатомами, оказалась значительно меньше ожидавшейся.

Где же мы ошиблись? Мы найдем ключ к решению, если сравним между собой размеры, с которыми приходится иметь дело в таких опытах. Возьмем, например, атом свинца, который имеет 82 электрона. Если заместить мезоном один из этих электронов, то согласно теории Бора ближайшая

к ядру мезонная орбита должна быть в 82·210 раз меньше диаметра водородного атома; значит, если размеры атома порядка  $10^{-8}$  см, то диаметр мезонной орбиты должен составлять  $5,8 \cdot 10^{-13}$  см. Это воистину очень маленькая орбита.

Посмотрим, для сравнения, каков диаметр самого ядра атома свинца. Из таблицы, составленной еще до опытов Фитча и Рейнуотера, мы узнаем, что диаметр ядра свинца равен  $17 \cdot 10^{-13}$  см. Иными словами, мезонная орбита оказывается меньше половины диаметра самого ядра, так что согласно нашему расчету мезон должен вращаться внутри ядра!

Но возможно ли это? Приходится заключить, что хотя в обычной атомной физике такие вещи и немыслимы, здесь, в мезоатоме, это возможно. Хотя ядро атома и очень плотно, но плотность не обязательно означает непрозрачность, и не исключено, что мезон может свободно двигаться внутри ядра. Понятие непроницаемости вещества принадлежит макроскопической физике. В атомном и субатомном мире все может обстоять по-иному.

И это на самом деле так:  $\mu$ -мезон действительно свободно перемещается внутри ядра (ниже мы увидим, что для  $\pi$ -мезона это несправедливо). Он делает миллионы миллионов оборотов внутри ядра свинца (рис. 6.5). Но все это происходит в течение одной стомиллионной доли секунды, после чего мезон поглощается ядерным веществом, причем вся масса  $\mu$ -мезона превращается в энергию\*), так что ядро взрывается.

Исходя из данных о длинах волн излучения мезоатомов, Фитч и Рейнуотер смогли подсчитать размеры атомных ядер. Вычисления эти довольно сложны, и мы не будем входить в их детали; скажем только несколько слов об исходных предположениях.

Ядро представляется в виде заряженного облака, плотного, но в то же время сходного с идеальной жидкостью в том смысле, что оно не оказывает сопротивления движению  $\mu$ -мезона. Для мезона мы должны использовать более тонкую модель, чем в старой теории Бора: необходимо учесть принцип неопределенности, согласно которому частицу нельзя представлять себе точкой, движущейся по определенной орбите; она оказывается размазанной, как если бы она была расплывчатым, желеподобным объектом конечной протяженности. Когда это облако или это желе, сдобренное такими «приправами», как теория относительности и спин, «засыпают» в электронную

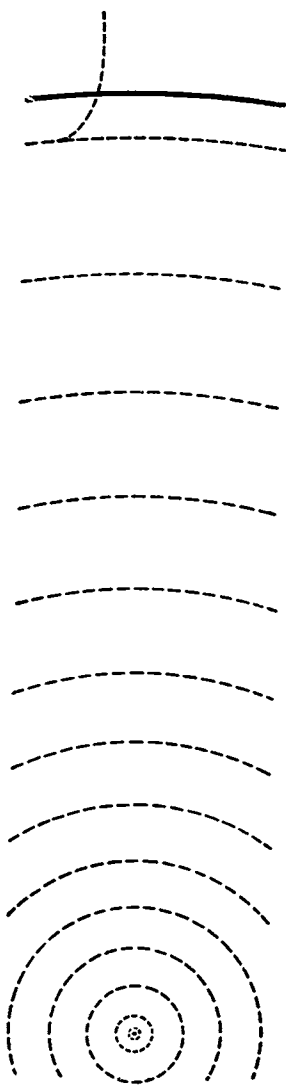


Рис. 6.4. Приближенная картина мезонных орбит углерода и их относительных расстояний от ядра атома (внизу).

Жирная дуга наверху рисунка изображает ближайшую к ядру орбиту электрона

\*) См. примечание на стр. 63. (Прим. ред.)

счетную машину, то наружу выскакивает результат: зависимость длины волны рентгеновских лучей от размеров ядра.

Если до сих пор физики и были уверены в чем-то касательно свойств атомного ядра, так это в знании его размеров. Но эксперименты Фитча и

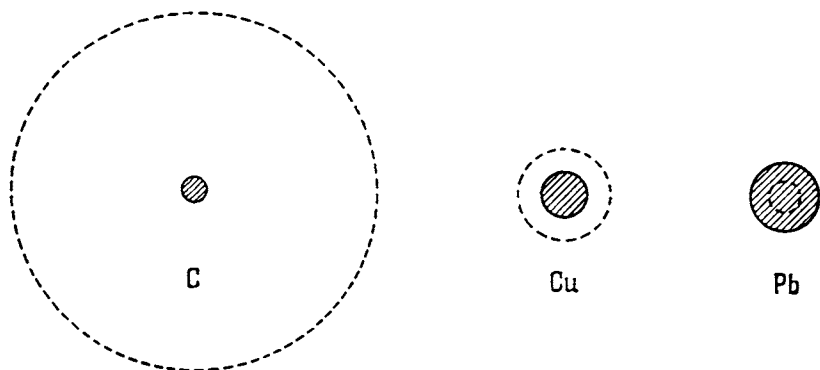


Рис. 6.5. Самые глубокие мезонные орбиты в углероде, меди и свинце. Показаны также относительные размеры ядер. Первая орбита в свинце находится целиком внутри ядра.

Рейнуотера показали, что физики ошибались даже в этом. Согласно этим измерениям объем ядра атома оказался вдвое меньше, чем предполагали ранее. Это был первый очень важный вклад, внесенный мезоатомом в наши знания об атомном ядре.

### Мю- и пи-мезоатомы

Посмотрим теперь, какие результаты были получены с  $\pi$ -мезонами. В отличие от  $\mu$ -мезона,  $\pi$ -мезон взаимодействует с ядерным веществом очень быстро и с гораздо большей силой. В мезоатоме водорода, например,  $\mu$ -мезон будет спокойно вращаться по своей орбите вокруг протона в течение сравнительно долгого времени (по атомной шкале времен), измеряемого несколькими микросекундами; после этого он самопроизвольно распадется на электрон и два нейтрино так, как если бы поблизости вовсе и не было никакого протона. В то же время  $\pi$ -мезон в таком атоме едва достигает нижней орбиты, как тотчас же поглощается протоном. Его время жизни в атоме в миллионы раз короче, чем время жизни  $\mu$ -мезона. Когда отрицательный  $\pi$ -мезон реагирует с положительным протоном, они нейтрализуют свои заряды и превращаются в нейтральные частицы.

В тяжелом атоме явление еще более эффективно. В атоме неона  $\pi$ -мезон не достигает даже последней нижней орбиты: ядро «пожирает» его, как только он попадет на предпоследнюю орбиту. Жадность ядер к  $\pi$ -мезонам почти невероятна. В тяжелом атоме, таком, как атом свинца, где  $\mu$ -мезон может путешествовать почти беспрепятственно внутри ядра,  $\pi$ -мезон захватывается, находясь еще на пятой или шестой орбите от ядра, т. е. на орбитах, диаметр которых по крайней мере в 10 раз больше самого ядра. Экспериментальным доказательством этого является отсутствие последних рентгеновских линий. Когда ядро захватывает  $\pi$ -мезон, он перестает существовать. Как и в случае  $\mu$ -мезона, его масса превращается в энергию: ядро взрывается и распадается на много кусков. В флюорографи-

ческой эмульсии разлетающиеся осколки оставляют изображение, которое можно проявить. Оно имеет характерную форму звезды (рис. 6.6).

Тот факт, что ядро захватывает мезон с далекой орбиты, не означает непременно, что они сближаются под действием силы притяжения. Как мы уже отмечали выше, вся картина орбит — это всего лишь удобное, но грубое упрощение действительности: частица, которая согласно теории Бора движется по орбите, на самом деле размазана почти по всему атому и в некотором смысле касается ядра. Поэтому нет необходимости в каких-либо специальных силах, способных притянуть мезон к ядру.

Какой свет могут пролить мезоатомы на нашу главную проблему — силы, которые удерживают протоны и нейтроны в атомном ядре? Большинство физиков-ядерщиков думают сейчас, что ключ к этой загадке лежит в  $\pi$ -мезоне (который даже в газетах теперь называют «атомным клеем»). Кажется очевидным, что существуют большие силы неэлектростатической природы, действующие между  $\pi$ -мезонами и атомными ядрами. Пучок  $\pi$ -мезонов, бомбардирующий вещество, ведет себя по-иному, чем такой же пучок  $\mu$ -мезонов;  $\pi$ -мезоны меняют направление движения (рассеиваются) гораздо сильнее, чем  $\mu$ -мезоны, а поскольку электрические силы одинаковы в обоих случаях, мы приписываем эту разницу действию специфических ядерных сил на  $\pi$ -мезон.

Рассеяние  $\pi$ -мезонов было впервые с определенной точностью исследовано покойным Энрико Ферми и его сотрудниками в Чикагском университете. Одним из пунктов, которые они не могли выяснить, был знак сил: имеем ли мы дело с силами притяжения или отталкивания. На этот вопрос с помощью мезоатома можно попытаться ответить. Если эта сила есть сила притяжения, мы должны ожидать, что  $\pi$ -мезон будет притянут ближе к ядру, чем в случае, когда действуют силы отталкивания; расстояние же до ядра можно вычислить на основе изучения длин волн рентгеновского излучения. С этой целью

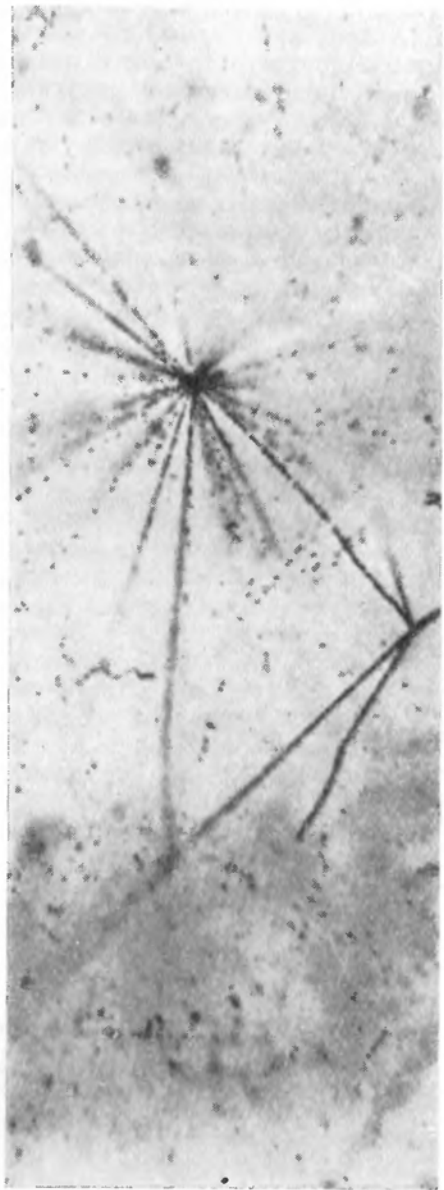


Рис. 6.6. Мезонная звезда, вызванная разрушением атома первичной частицей космического излучения.

Трек  $\pi$ -мезона, идущий по диагонали направо вниз, заканчивается во вторичной звезде.

тщательные измерения рентгеновских лучей из  $\pi$ -мезонных атомов были осуществлены в Технологическом институте Карнеджи физиками Мартином и Мэри Стирнс, Ларри Лейпунером и автором. Результаты показывают, что ядерные силы отталкивают  $\pi$ -мезоны. Это заключение, которое с тех пор было подтверждено изучением некоторых деталей рассеяния, вовсе не разрушает наших представлений о самом ядре. Силы между протоном и нейтроном могут по-прежнему остаться силами притяжения и мы можем не опасаться, что атомное ядро развалится!

Несмотря на всю важность вопроса, до сих пор не найдено никаких количественных соотношений между поведением  $\pi$ -мезона и ядерными силами. Может быть, и другие мезоны и новые частицы, которые непрерывно открываются, имеют отношение к ядерным силам. Во всяком случае мезоатом дает нам новый многообещающий подход к этой проблеме. Как только достаточно мощные пучки новейших мезонов ( $\Sigma$ ,  $K$  и т. д.) станут доступными благодаря большому ускорителю, мы получим надежду построить новые атомы и быть может, узнать еще кое-что о свойствах ядра.

---



Филипп Моррисон

## НИСПРОВЕРЖЕНИЕ ЧЕТНОСТИ

(АПРЕЛЬ 1957 г.)

*Закон сохранения четности в квантовой физике утверждал, что нет абсолютного различия между правым и левым. Эксперимент показал, что это различие существует.*

Во времена, когда главными исследователями природы физического мира были философы, лишенные орудий познания современной науки, но обладавшие острой наблюдательностью, философ Готфрид Вильгельм фон Лейбниц высказал «великий принцип», который в дальнейшем принес плоды, значительно более обильные, чем думал сам ученый. Это утверждение было на первый взгляд абсурдно простое и самоочевидное: «два неразличимых друг от друга состояния представляют собой одно и то же состояние». Сам Лейбниц вывел свое заключение на основе аргументов, которые теперь мы бы назвали скорее теологическими, чем научными. Тем не менее этот принцип стал одним из краеугольных камней современной физики. Он лежит в основе теории относительности и законов сохранения энергии, импульса и т. п., на которых строится наше понимание природы. А сейчас этот принцип получил более глубокий и отчетливый, чем когда-либо, смысл в связи с новым удивительным событием в физике: свержением «принципа четности» и выяснением подлинной природы левого и правого.

Важнейшим в аксиоме Лейбница является слово «неразличимые». Современную физику глубоко интересует, что различимо, а что неразлично. Согласно одному из наиболее плодотворных предположений в число «неразличимых» входят абсолютное пространство, абсолютное время и абсолютное направление.

Нетрудно привести поясняющий пример. Подумайте о самой обычной географической карте. Каждому месту на земле ставится в соответствие некоторая пара чисел: широта и долгота. Эти числа чрезвычайно полезны, но они ни в коем случае не являются реальными свойствами какого-либо места — они не имеют физического смысла. Если переместить начальную точку отсчета долготы из Гринвича, скажем, в Тимбукту, то числа изменятся, но ведь при этом горы не сдвинутся с места. Эти числа являются, по существу, произвольными метками. Подобным же образом физика рассматривает пространство и в самом общем случае. Координаты, характеризующие положения в пространстве, описывают только относительные положения. Мы пытаемся выразить физические законы с помощью математических схем, в которые никогда не входят абсолютные положения в пространстве. Мы говорим, что какова бы ни была наша система отсчета, пространство остается инвариантным.

Возьмем другой, более занимательный и доступный пример. Предположим, что на сцене перед вами разыгрывается некоторое физическое событие или явление, все равно какое, но вам не указаны ни дата события, ни ориентация сцены в пространстве, ни местоположение театра. Можете ли вы по каким-либо признакам определить все это сами? Разумеется, нет. Вы можете, конечно, определить, что представление происходит в какой-то момент в течение времени вашей жизни, но это явно субъективное (т. е. относительное) время. (Конечно, Рип ван Винкль \*) не смог бы сделать даже этого.) Вы можете указать, какое направление внутри театра есть направление вверх, а какое — вниз, но всегда понятия «вверх» и «вниз» имеют смысл относительно земли. Представьте себе, что вы находитесь в театре в Австралии и пытаетесь определить абсолютную ориентацию. Самым прямым путем было бы найти по компасу направление «север», однако это не приведет к успеху, потому что режиссер театра может нарочно исказить магнитное поле в зале; во всяком случае, направление «север» на земле ничего не говорит вам об абсолютной ориентации в пространстве. Не можете вы также определить и местонахождение театра, даже если вам удастся посмотреть в окно и увидеть знакомый пейзаж или знакомую звезду. Действительно, движутся и сама Земля, и все внешние точки отсчета. Нет, абсолютное местонахождение во времени и пространстве и абсолютное направление принципиально неразличимы.

Эти факты имеют основополагающее значение в физике. Неразличимость абсолютных координат лежит в основе специальной теории относительности Альберта Эйнштейна, на что указывает и само название теории. То обстоятельство, что физические уравнения не могут включать абсолютного времени, абсолютного пространства и абсолютного направления, логически приводит путем математических рассуждений, в детали которых нам нет необходимости здесь вдаваться, к классическим законам сохранения энергии и импульса.

### Правое и левое в природе

«Закон» сохранения, который нас будет сейчас интересовать, — это сохранение «четности», основанное на предполагаемой неразличимости правого и левого. Этот принцип неразличимости может быть выражен следующим образом: нет абсолютного различия между реальным объектом (или событием) и его зеркальным отображением. Правая и левая перчатки, конечно, различны, но, будучи тщательно сделанными, они являются точными двойниками друг друга; глядя на правую перчатку в зеркало, вы не сможете по ее свойствам сказать, что вы не смотрите на левую перчатку. Принято считать зеркальный мир необычным. Ваше зеркальное отражение плохо воспитано: оно здоровается с вами левой рукой вместо правой и очень забавно пишет. Но ведь странность зеркального мира в значительной степени условна. Нет оснований сомневаться, что такой мир мог бы существовать. В самом деле, всякий хороший режиссер мог бы поставить спектакль, неотличимый от зеркального отражения обычного спектакля.

Физический принцип неразличимости правого и левого предполагает, что для всякого события, всякого эксперимента возможен точный зеркальный двойник. Правда, природа благоприятствует определенной ори-

---

\*) Герой одноименного рассказа Вашингтона Ирвинга, проспавший незаметно для себя вместо одной ночи сто лет. (Прим. ред.)

ентации (правой или левой) спиральных раковин улиток и других животных, а также молекул живого вещества. Но этот факт не может служить решающим доводом для физика: он видит, что зеркально отображенная молекула будет функционировать совершенно так же, как и «обыкновенная», поэтому физик может представить себе мир живых существ, во всех отношениях похожий на наш, кроме того обстоятельства, что «левое» и «правое» поменялись в нем местами. Такой зеркально отраженный мир мог бы развиваться совершенно аналогично действительному миру.

До потрясающих событий последних месяцев казалось, что инвариантность левого и правого столь же непоколебима, как и инвариантность времени и пространства. Весь наш опыт подтверждал идею о невозможности найти внутреннюю разницу, которая отличала бы физическое явление в зеркальном мире от явления в мире реальном. Все попытки найти это отличие терпели неудачу. Студент, изучающий электричество, мог бы

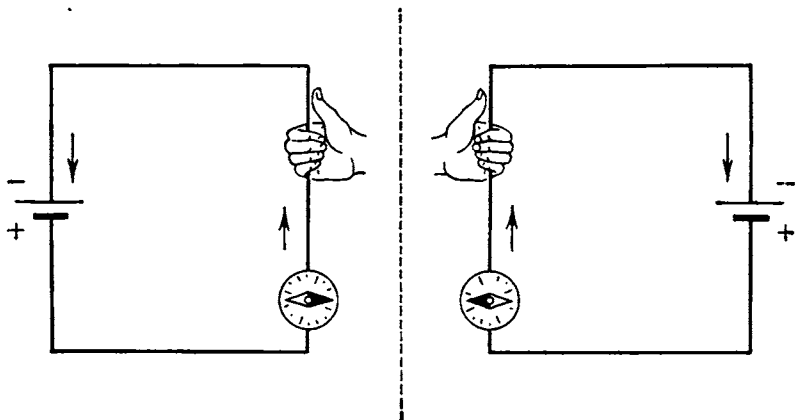


Рис. 7.1. Правило правой руки, связывающее направления электрического тока и результирующего магнитного поля (большой палец указывает направление тока, остальные пальцы указывают направление на «северный» конец стрелки компаса), становится правилом левой руки, когда весь эксперимент отражается в зеркале.

На рисунке «действительный» эксперимент изображен слева, зеркальный ему — справа.

указать на знаменитое правило правой руки для определения направления электромагнитного поля: если вы зажимаете провод правой рукой так, чтобы большой палец указывал направление электрического тока, то концы ваших пальцев укажут направление, в котором северный магнитный полюс стал бы двигаться в магнитном поле, окружающем провод. Но не надо спешить. Что отличает северный полюс от южного? Вы укажете мне на стрелку компаса. Конец стрелки, указывающий на «север», синего цвета и снабжен большой буквой *N*. Но ведь это условие можно без затруднений изменить на противоположное. Если переместить букву *N* на другой конец стрелки, то в нашем эксперименте мы будем иметь дело уже с левой рукой. Следовательно, только предварительная договоренность отличает наш эксперимент от зеркального по отношению к нему (рис. 7.1). Никакого внутреннего физического различия между северным и южным магнитными полюсами не существует ни в макроскопическом, ни в микроскопическом мирах. Всякое правило правой руки представляет собой чистую условность: в законах электромагнитного поля нет ничего,

что дало бы возможность установить абсолютное различие между правым и левым. Плодотворная сила идеи о пространственной симметрии должна быть теперь ясна. Постулируя зеркальную инвариантность, мы приходим к полной неразличимости северного и южного магнитных полюсов. Последнее же в свою очередь является важным принципом в микромире элементарных частиц, позволяя упорядочить описание некоторых явлений в этом мире. Наконец, мы приходим здесь к принципу сохранения величины, называемой «четностью», подобно тому как инвариантность пространства и времени приводит нас к законам сохранения энергии и импульса.

«Четность» — математическое понятие; его трудно объяснить, пользуясь одними физическими представлениями. Это свойство так называемой волновой функции, которая описывает в квантовой механике волну, характеризующую частицу, а также представляет положение частицы в пространстве. Аргументами волновой функции являются те самые координаты, которыми мы пользуемся, чтобы определить местоположение. Нетрудно понять, что перемена знака одной из координат (с плюса на минус) эквивалентна отражению всей системы в зеркале. Четность выражает действие такой перемены знака на волновую функцию. Если волновая функция при изменении знака одной из трех пространственных переменных не меняется, мы скажем, что функция «четная». Если перемена знака координаты ведет к перемене знака волновой функции, то функция «нечетная». Таким образом, четность может принимать одно из двух значений: функция может быть либо четной, либо нечетной.

Весь наш опыт, равно как и теория, всегда указывали, что в изолированной системе четность никогда не меняет своего значения, т. е. четность всегда сохраняется. Вернее, на это указывали почти все эксперименты. Теперь мы столкнулись с полным фиаско закона сохранения четности. Нам придется вернуться примерно на год назад, когда два исследователя, владевшие большим воображением и исключительной изобретательностью, при изучении вновь открытых в атомном мире «странных» частиц сделали действительно новаторское предположение.

### Предположение Ли и Янга

Оба ученых — Ли Цзун-дао из Колумбийского университета и Янг Чжень-нин из Института углубленных исследований \*) — были поглощены одним из наиболее интересных парадоксов в этом царстве странности: так называемой «загадкой тау-тета». Существовали два сорта мезонов, называемые тау и тета. Тау-мезон с течением времени распадался на три  $\pi$ -мезона (пиона) (рис. 7.2); тета-мезон — на два  $\pi$ -мезона (рис. 7.3). Поразительным, однако, было то, что, исключая способ распада, во всем остальном тау- и тета-мезоны были совершенными близнецами. Может быть, эти мезоны представляют собой одну и ту же частицу? Распад частиц одного сорта двумя различными способами вполне разрешен теорией, такие случаи уже встречались, но здесь на пути встал принцип сохранения четности. Тау-мезон при распаде давал нечетную группу пионов, тета-мезон, наоборот, четную группу пионов. По закону сохранения четности тау- и тета-мезоны должны были обладать различной четностью и, следовательно, быть разными частицами.

\*) В 1957 г. эти известные китайские физики-теоретики, проживающие в США, получили за свою работу по четности Нобелевскую премию. (Прим. ред.)

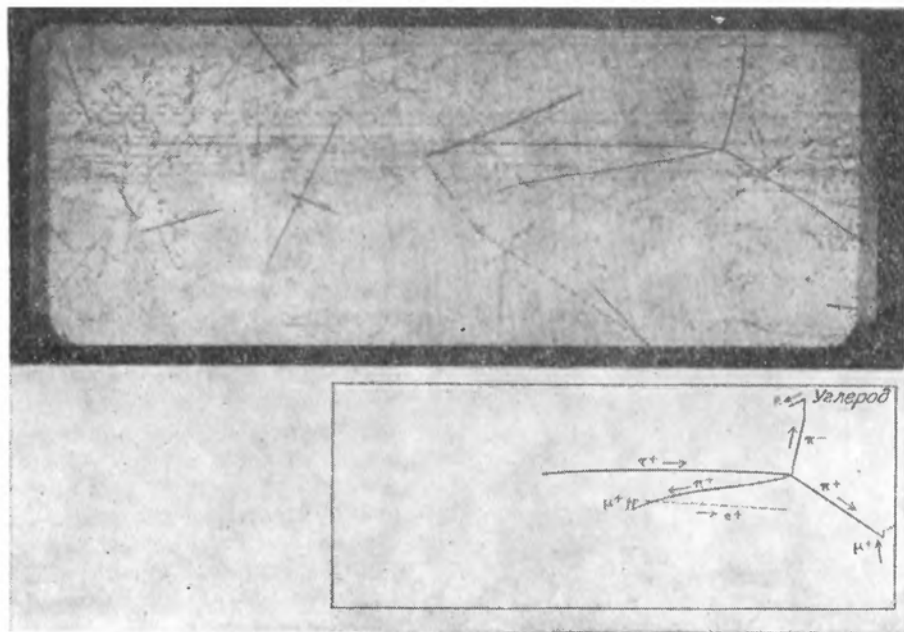


Рис. 7.2. Тау-частица ( $\tau^+$ ) распадается на три пи-мезона.

Она входит в камеру слева и проходит почти до правой стенки, где распадается, давая трехлучевую звезду. Нижние треки представляют положительные пионы, верхний трек — отрицательный пион. Эксперименты выполнены Глезером, Броуном, Меьером и Пирлом из Мичиганского университета.

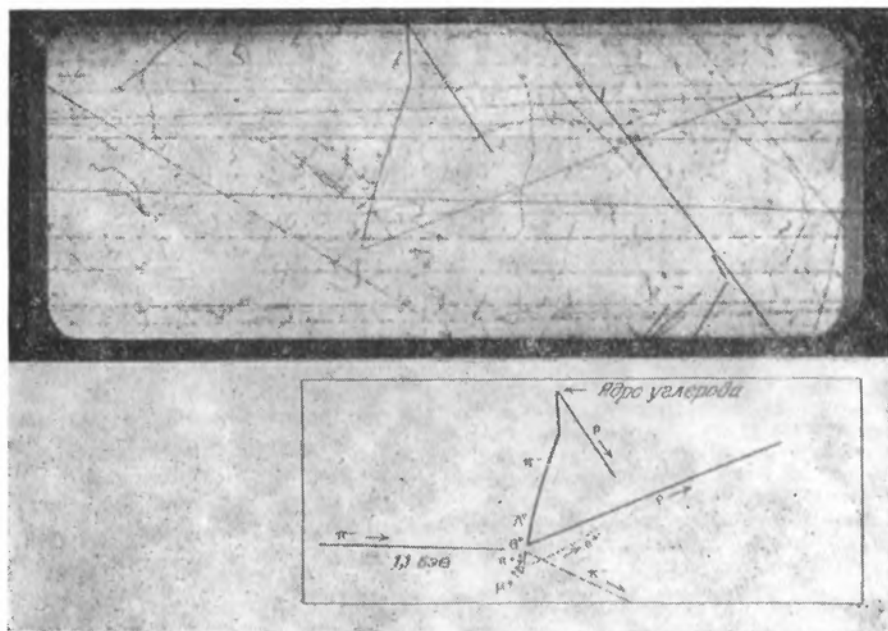


Рис. 7.3. Тета-частица ( $\theta^0$ ) распадается на два пи-мезона.

Будучи нейтральной, тета-частица не образует пузырьков и невидима до тех пор, пока не распадается на две заряженные частицы. Распад тета-частицы — нижнее из двух событий двойного распада, показанных на рисунке. Фотография показывает также рождение тета-частицы. Она образовалась в результате столкновения пи-мезона с протоном в камере.

Оставался, однако, нерешенным вопрос: почему тау- и тета-мезоны совершенно одинаковы во всех остальных отношениях? Ли и Янг смело обратились к противоречащей общепринятым идеям, но зато радикальной возможности: может быть, закон сохранения четности просто не выполняется при распаде таких частиц, как тау- и тета-мезоны?

Эта смелость не была безрассудной. Ученые основывались на том важном обстоятельстве, что даже если зеркальная инвариантность (ко-

торая ведет к сохранению четности) имеет место во всех остальных случаях, она не должна с необходимостью быть справедливой в мире тау- и тета-мезонов. Дело в том, что распад тау- и тета-мезонов принадлежит к особому классу ядерных реакций, известных под именем реакций со «слабым взаимодействием». Силы, вызывающие такие реакции, очень слабы, значительно слабее, чем даже силы, связывающие электроны в атоме. Обычно силы измеряются временем, необходимым для испускания частицы при фиксированной энергии системы. В этом смысле силы, действующие при слабом взаимодействии, таком, как распад тау- или тета-мезонов, в 100 миллиардов раз слабее, чем силы, связывающие атомный электрон. Ли и Янг чувствовали, что все предыдущие проверки зеркальной инвариантности в других физических явлениях могут не иметь цены в этой неисследованной еще области исчезающе слабых взаимодействий.

Они предложили опыт для проверки того, можно или нельзя отличить правое от левого в этой области. Тау- и тета-мезоны были мало удачными кандидатами для такой проверки, потому что время их жизни очень мало, около миллиардной доли секунды. Но вот

бета-распад (испускание бета-частиц) радиоактивных атомных ядер также принадлежит к семейству слабых взаимодействий, причем эти распады, в которых участвуют гораздо меньшие порции энергии, имеют достаточно долгие времена жизни, измеряемые секундами и даже годами (например, период полураспада кобальта-60 равен 5,3 года). По существу, предложе-

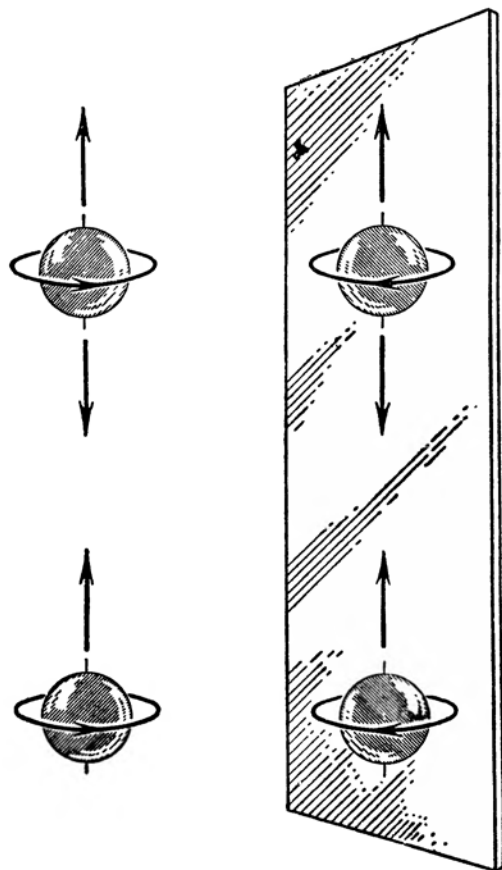


Рис. 7.4. Зеркальное отражение вращающегося шара нельзя отличить от самого шара, если шар испускает частицы одинаково в обоих направлениях вдоль оси вращения. Отражение вверху выглядит совершенно так же, как перевернутый шар. Отражение может быть обнаружено, если имеется выделенное направление испускания частиц. Так, отражение внизу уже нельзя спутать с реальным шаром.

ние Ли и Янга сводилось к тому, чтобы ориентировать спины бета-активных ядер вдоль одной определенной оси, а затем посмотреть, будут ли бета-частицы испускаться преимущественно в одном из двух противоположных направлений вдоль этой оси (рис. 7.4). Ни одно направление заранее не выделено ни по условию, ни каким-либо иным образом: ось не имеет «стрелки», указывающей какое-либо направление. Но преимущественное направление бета-испускания ядра со спином («вращающегося»

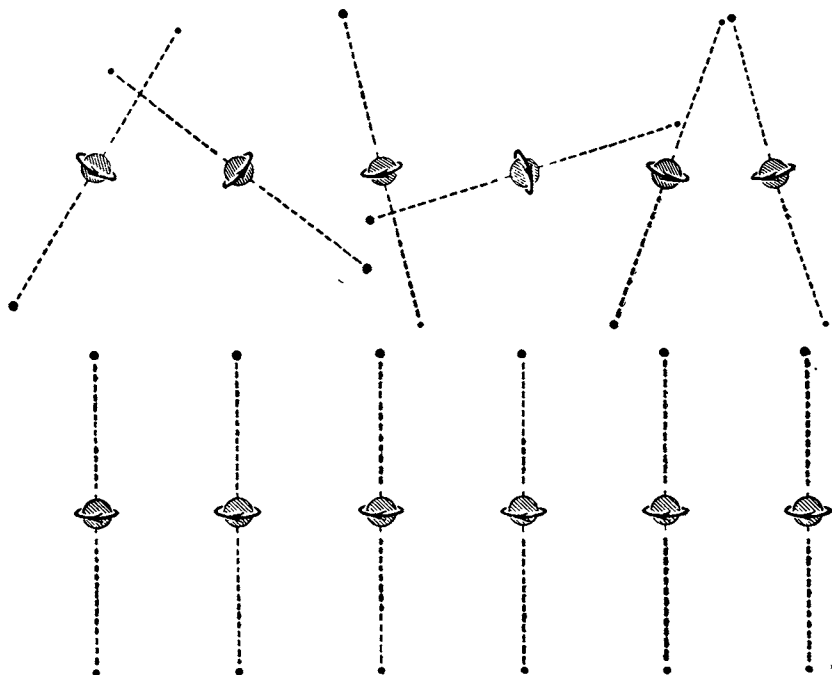


Рис. 7.5. «Вращающиеся» ядра кобальта-60 (серые кружки) испускают электроны (большие точки) преимущественно в одном направлении вдоль оси вращения и антинейтрино (маленькие точки) в противоположном направлении. Это явление обычно нельзя обнаружить (верхний рисунок), однако оно становится заметным, если оси ядер ориентированы (нижний рисунок).

ядра) действительно определит на нашей оси «стрелку» — направление движения правого или левого винта, так что зеркальное отображение предмета будет отличимо от самого предмета (рис. 7.5). Эксперимент не должен был оставить сомнений относительно возможности отличить правое от левого при бета-распаде.

### Проверка опытом

Вызов был принят мощной группой экспериментаторов. Ву Цзянь-сюн из Колумбийского университета вложила в этот опыт свое искусство тонкого эксперимента и глубокие знания в области бета-распада. Другая группа физиков под руководством Эрнста Эмблера из Национального бюро стандартов взяла на себя осуществление ориентации ядер. Задачей Эмблера было провести прямую линию; задачей Ву — найти конец «стрелки» (т. е. предпочтительное направление бета-испускания).

Ориентация ядер — это новое искусство, которому не более трех-четырёх лет от роду. Единственной «рукояткой», взяв за которую можно поворачивать ядро атома, является его магнитный момент. Ни один лабораторный генератор не может создать поле, достаточно сильное для того, чтобы ориентировать эти крошечные моменты; такие поля имеются только внутри самих атомов. Поэтому сначала специально выбранные атомы ориентируются для получения нужного поля, которое в свою очередь уже ориентирует магнитные моменты ядер. Однако для того, чтобы ориентация стала вообще возможной, тепловое движение атомов должно

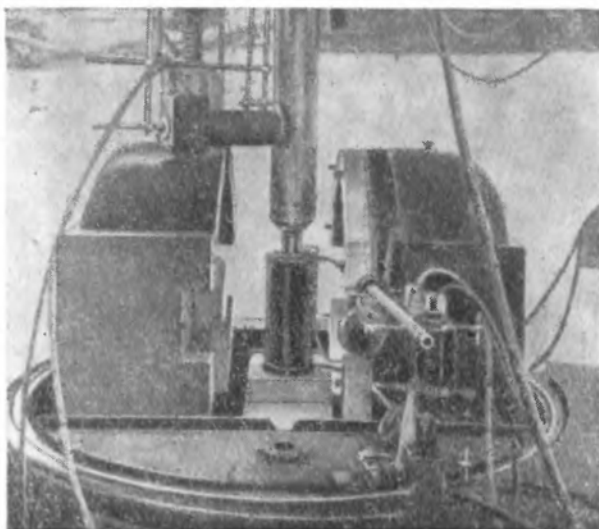


Рис. 7.6. Прибор Бу — Эмблера регистрирует электроны, испускаемые ориентированными ядрами кобальта. Черный вертикальный цилиндр — катушка, которая дает ориентирующее поле. Горизонтальная труба — фотоумножитель

быть сведено к минимуму. Это означает, что вся система должна быть охлаждена до очень низких температур: значительно ниже одного градуса над абсолютным нулем. Защищенный вакуумной рубашкой лучшего качества, охлаждаемый потоком жидкого гелия, кобальт-60, служивший бета-излучателем, мог находиться в ориентированном состоянии около 15 минут в каждом опыте (рис. 7.6 и 7.7).

Шесть месяцев для расчета, приготовления и осуществления 15-минутного эксперимента, — этого времени оказалось вполне достаточно, чтобы сделать результат несомненным. Бета-частицы, испускаемые ориентированными ядрами кобальта, вылетали преимущественно в направлении против магнитного поля. Это означало, что с точки зрения бета-излучения ядра кобальта обладают левым спином (левым собственным «вращением»). Иначе говоря, стало возможным отличить левое от правого. Зеркальная инвариантность погибла. Справедливая повсюду, она потерпела явный провал в мире слабых взаимодействий (рис. 7.8).

Через несколько недель после этого первого испытания в декабре 1956 г. основной результат нашел новое несомненное подтверждение в другом опыте. На этот раз в качестве слабого взаимодействия был выбран



распад мю-мезона (рис. 7.9). Эксперимент основывался на гипотезе, с помощью которой пытались объяснить несостоятельность зеркальной инвариантности в бета-распаде. Теория предполагала, что при распаде мю-мезона вместе с бета-частицей испускаются также нейтрино и анти-

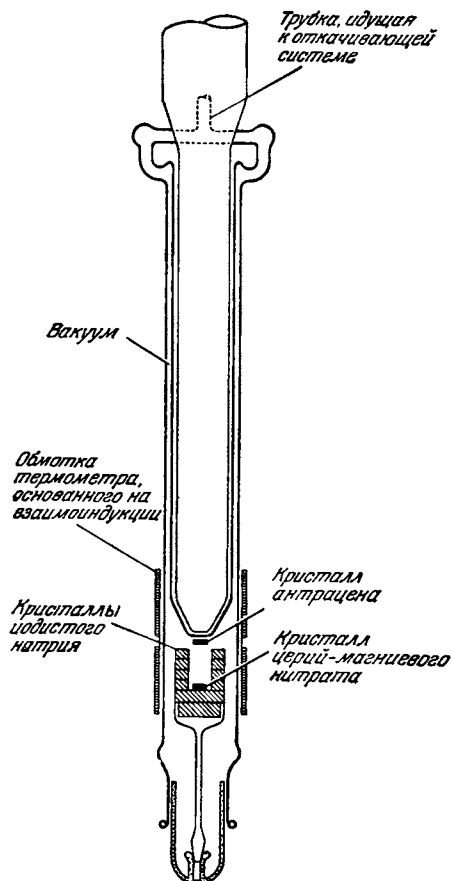


Рис. 7.7. Схема вакуумной камеры для эксперимента с кобальтом.

Слой кобальта наносится на поверхность кристалла церий-магниевого нитрата. В кристалле антрацена происходит вспышка, когда по нему ударяют электроны. Кристаллы йодистого натрия регистрируют гамма-кванты от кобальта, тем самым указывая степень ориентации. Над антраценом — люцитовый жгут, проводящий свет антраценовых сцинтилляций к усилительным и счетным системам.

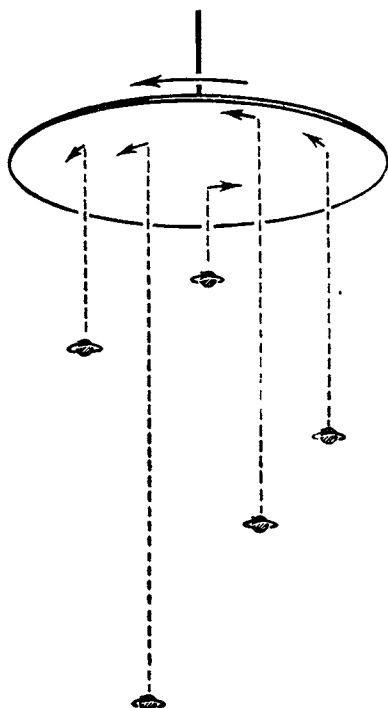
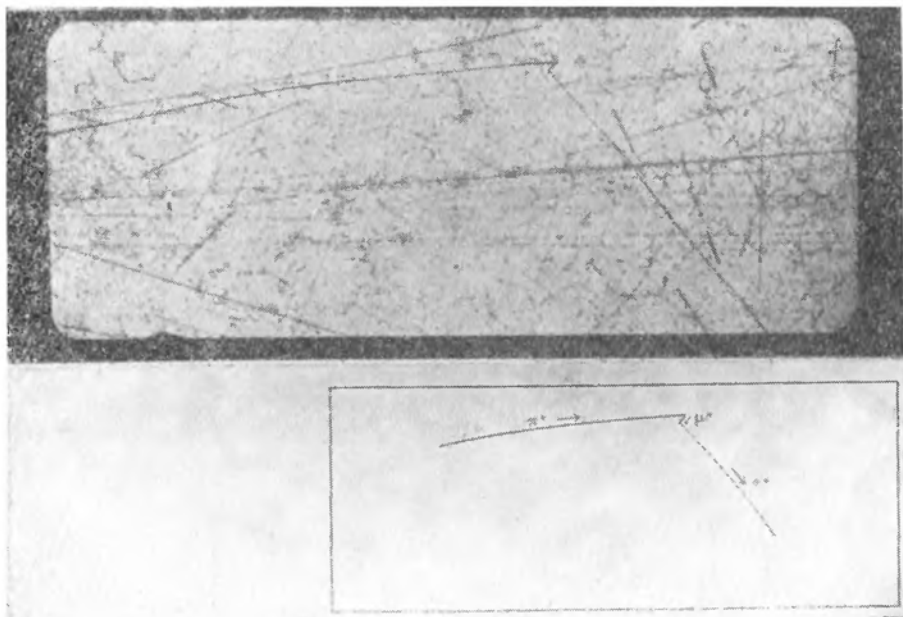


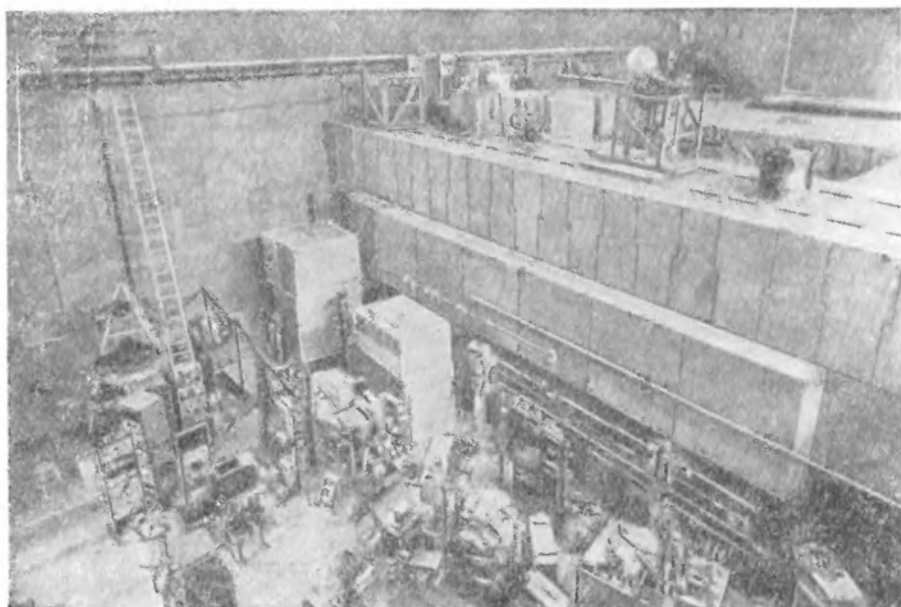
Рис. 7.8. Направление винта по крайней мере принципиально может быть определено помощью алюминиевого диска, который может вращаться вокруг вертикальной оси. Нижняя сторона диска покрыта слоем кобальта-60. Электроны, испускаемые вниз, имеют преимущественно одно вращение (спин) и передают противоположное вращение диску. Испущенные вверх электроны поглощаются алюминием. Таким образом, диск все время вращается в указанном на рисунке направлении. Эта схема предложена Захариасом из Массачусетского технологического института.

нейтрино, причем нейтрино имеет всегда правый спин, а антинейтрино — левый. Можно было заключить, что при распаде пи-мезона на мю-мезон и антинейтрино испускаемый мю-мезон должен обладать левым спином,



**Рис. 7.9.** Распады пи- и мю-мезонов являются процессами, в которых не сохраняется четность.

Здесь представлены оба эти события. Это фотография пузырьковых следов, образованных частицами от Брукхэвского Космотрона в камере, наполненной жидким пропаном. Как указано на сопроводжающей схеме, пи-мезон ( $\pi^+$ ) входит в камеру слева и превращается в мю-мезон ( $\mu^+$ ) примерно в середине камеры. Мю-мезон распадается затем в положительный электрон ( $e^+$ ).



**Рис. 7.10.** Эксперимент по распаду мю-мезона, также показавший отсутствие зеркальной симметрии, был выполнен на циклотроне Колумбийского университета. Экспериментальное устройство находится в центре, между маленькой лестницей и стеной бетонных блоков. Сам циклотрон находится за защитой справа.

чтобы скомпенсировать спин антинейтрино. Вследствие этого, если ориентированные при некоторых условиях мю-мезоны распадаются с испусканием электронов, то электроны должны вылетать в некотором избранном направлении. Теория была проверена сначала группой экспериментаторов в Колумбийском университете (рис. 7.10—7.14), а затем и в других лабораториях. Эксперименты показали наличие преимущественного направления винта. Колумбийская группа весьма изобретательно применила этот эффект для измерения магнитного момента мю-мезона, что явилось полезным использованием отсутствия зеркальной инвариантности.

Физики-теоретики только начали размышлять о более глубоком смысле ниспровержения одного из фундаментальных принципов в мире слабых взаимодействий. Однако общую мораль этого события можно выразить просто: великие принципы инвариантности в природе могут быть справедливыми внутри области их применимости, но заранее вовсе не самоочевидно, что они будут универсально применимы. Важной является все

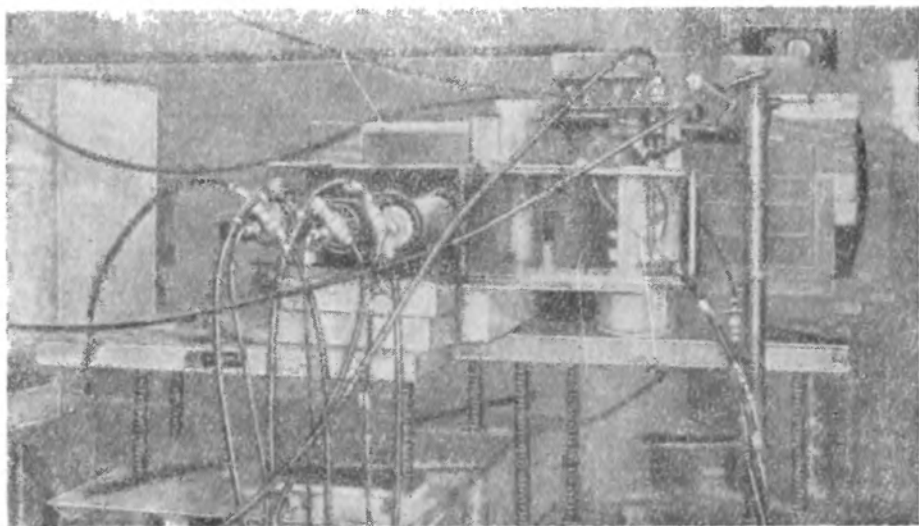


Рис. 7.11. В более крупном масштабе среди переплетения проводов виден углеродный блок, в котором тормозятся мю-мезоны. Блок находится в прямоугольной раме, опирающейся на кирпич и банку из-под кофе. Слева от рамы находится тройной счетчик, регистрирующий испускаемые электроны.

более и более точная проверка основных фундаментальных принципов, включая и закон сохранения энергии. До сих пор, даже при слабых взаимодействиях частиц, сохранение энергии всегда имело место, но будет ли оно справедливым при самых слабых из всех взаимодействий — при слабых гравитационных взаимодействиях? Здесь можно думать о гипотезе спонтанного рождения вещества из пространства, не содержащего энергии; различные возможности увлекательны.

Может оказаться также, что существует связь между двумя главными асимметриями, которые мы видим теперь в физическом мире — асимметрией правого и левого в реакциях со слабым взаимодействием и тем фактом, что наш мир состоит преимущественно из одного рода вещества при почти полном исключении антивещества. Возможно, что это указание

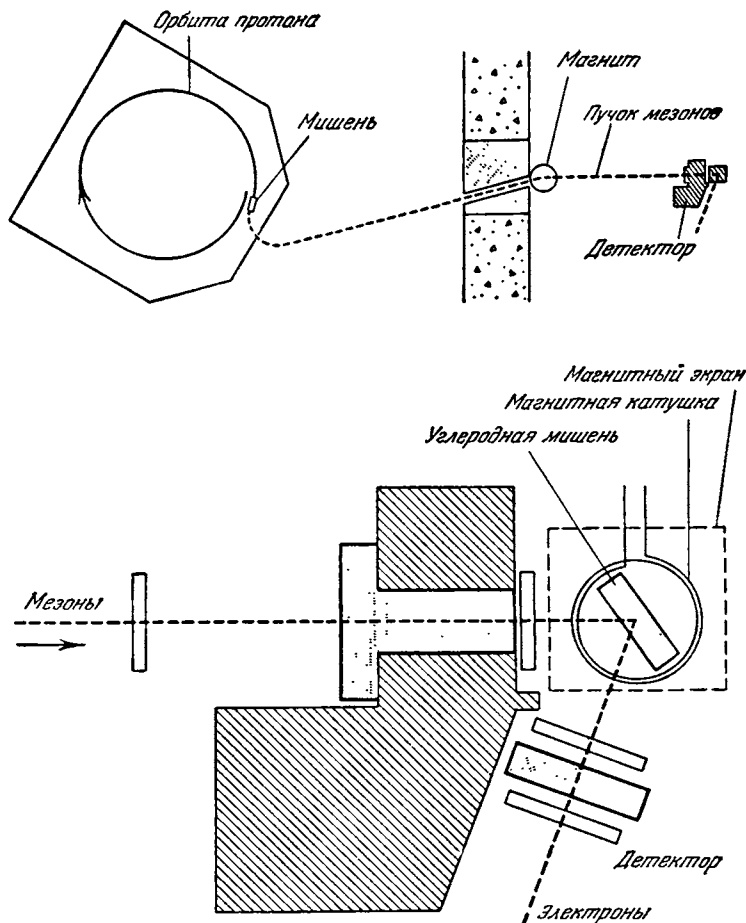


Рис. 7.12. Путь мезонов от ускорителя к детектору показан наверху. Внизу — подробная схема мишени и детектора.

Т-образный блок задерживает пи-мезоны, пропуская пучок мю-мезонов. Они тормозятся в углеродной мишени и распадаются, испуская электроны, которые регистрируются детектором.

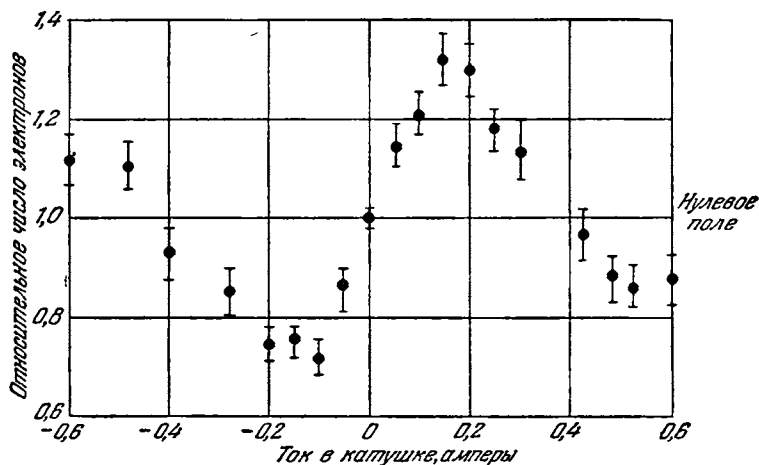


Рис. 7.13. Число зарегистрированных электронов отложено по вертикали, по горизонтали — магнитное поле, поворачивающее мю-мезоны, которые испускают электроны. График показывает асимметрию испускания.

поможет перебросить мост между микрофизикой фундаментальных частиц и физикой больших расстояний, т. е. космологией. Во всяком случае

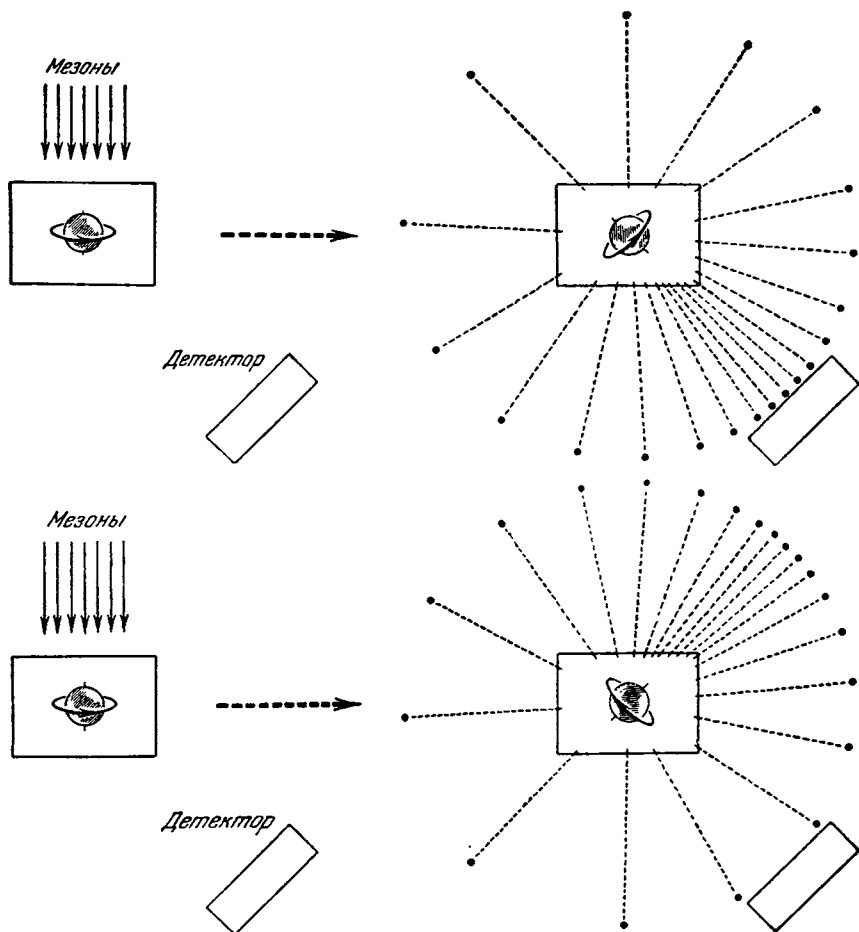


Рис. 7.14. Схематическое изображение асимметричного распада мезона, обнаруженного в Колумбийском университете.

Пи-мезоны от циклотрона превращаются в мю-мезоны, причем спины мю-мезонов оказываются ориентированными вдоль направления их движения. Затем мю-мезоны останавливаются в углеродном блоке. Ориентация мю-мезонов в блоке символически представлена на схеме одним вращающимся шаром. Катушка, окружающая блок, дает магнитное поле, поворачивающее «вращающиеся» мю-мезоны (спины мезонов). Поле действует в течение времени, равного примерно среднему времени распада мю-мезонов с испусканием электрона. Электроны распада, показанные маленькими точками, летят во всех направлениях, но регистрируются только те, которые вылетают из блока в одном избранном направлении. Эксперимент повторяется для разных значений силы магнитного поля, т. е. для разных степеней поворота мезонов. Количество зарегистрированных при этом частиц меняется, как видно из рис. 7.13. Это показывает, что в одном направлении — вдоль оси мезонного спина («вращения») — электронов испускается больше, чем в противоположном направлении.

открытие ограничений для принципа зеркальной инвариантности отнюдь не является препятствием, наоборот, оно открывает новые возможности продвижения вперед. Мы вступили в период оживленного развития науки.

Фримен Дж. Дайсон

## НОВАТОРСТВО В ФИЗИКЕ

(СЕНТЯБРЬ 1958 г.)

*Сталкиваясь с фактами физических наблюдений и эксперимента, физик-теоретик применяет абстрактные математические соотношения для того, чтобы связать между собой эти факты и предсказать новые.*

Одна из наиболее увлекательных научных автобиографий — это книга Майкла Пупина, которая называется «От иммигранта до изобретателя». Имя Пупина можно увидеть над дверями физической лаборатории Колумбийского университета. Для более молодых физиков сегодня это имя принадлежит зданию, а человек уже забыт. Это грустно, потому что он был не только ярким, но и замечательным человеком. В шестнадцать лет он приехал в Америку из лесных чащоб Венгрии и после разнообразных приключений в 34 года стал профессором Колумбийского университета. Он родился с беспокойным любопытством и с твердой решимостью овладеть наукой своего времени.

Его книга интересна в двух отношениях. Она дает живую картину американского общества семидесятых годов прошлого столетия, открывшуюся перед глазами бедняка-иммигранта. Кроме того, Пупин описывает в ней, точно подмечая детали, физику и физиков того времени. В то время в физике господствовало одно выдающееся открытие — теория электромагнетизма Джемса Клерка Максвелла. В своих попытках понять теорию Максвелла Пупин был похож на рыцаря, ищущего чашу святого Грааля. Сначала он пришел в Колумбийский университет, но там он не нашел никого, кто мог бы ему объяснить Максвелла. Тогда он отправился в Кембридж, где работал Максвелл; но Максвелл уже умер, а наставники Пупина в Кембридже требовали от него главным образом, чтобы он получал хорошие отметки на экзаменах по математике. Наконец, он приехал в Берлин и нашел там Людвига Больцмана. Больцман понял теорию Максвелла, и он научил Пупина тому, что знал сам. Пупин был поражен «как мало было физиков, которые уловили смысл этой теории даже через 20 лет после того, как Максвелл создал ее в 1865 г.»

Черты теории, которые сейчас представляются нам наиболее значительными, совершенно не совпадают с тем, что казалось особенно важным самому Максвеллу. В широчайшем смысле можно сказать, что центральная идея этой теории состоит в том, что природа обладает двухъярусной структурой. В более глубоком нижнем ярусе преобладают электрические и магнитные поля, которые удовлетворяют простым волновым уравнениям и свободно распространяются в пространстве в виде света или радиоволн. В верхнем ярусе мы видим материальные объекты, энергии и силы. Только верхний ярус непосредственно доступен нашим на-

блюдениям. Объекты нижнего яруса, например, электрическое поле, могут быть обнаружены только наблюдением над теми энергиями и силами, которые они порождают в верхнем ярусе, причем эти энергии и силы всегда пропорциональны квадратам напряженностей поля. Таким образом, сама напряженность поля — это чистая математическая абстракция. Тот факт, что напряженность поля не может быть непосредственно измерена, легко заметить, взглянув на единицы, в которых она обычно измеряется. Эта единица пропорциональна квадратному корню из эрга на кубический сантиметр. Эрг — это обычная единица, которая может быть измерена с помощью таких инструментов, как термометры и калориметры. Но никто и никогда не мог бы вообразить инструмент, который непосредственно измерял квадратный корень из эрга или квадратный корень из кубического сантиметра. Таким образом, напряженность поля — основная величина, с которой имеет дело теория Максвелла, — по самой своей природе абстрактна и не так-то просто связана с теми вещами, которые мы можем увидеть и потрогать.

### Новые идеи и их восприятие

Причина, по которой трудно охватить новую концепцию в любой области науки, всегда одна и та же: современные ученые пытаются представить себе эту новую концепцию в понятиях тех идей, которые существовали прежде. Сам открыватель страдает от этой трудности больше всех; он приходит к новой концепции в борьбе со старыми идеями и старые идеи еще долго потом остаются языком, на котором он думает. Максвелл пишет в предисловии к своему *«Трактату об электричестве и магнетизме»*: «Я приложу все усилия к тому, чтобы представить как можно яснее соотношение между математической формой этой теории и математической формой фундаментальной науки о динамике для того, чтобы мы могли в какой-то мере подготовиться к выбору тех динамических явлений, среди которых мы будем искать иллюстрации или объяснения явлений электромагнитных». Это было написано через семь лет после первой публикации Максвелла о его теории. И он все еще не понимал, что создал новую науку, которая имеет равные с динамикой Ньютона права на прилагательное «фундаментальная».

Основной трудностью теории Максвелла в те дни было то, что никто не был в состоянии постичь электромагнитное поле иначе, как в терминах какой-нибудь механической модели; сам Максвелл был искусным изобретателем моделей такого рода (рис. 8.1). Физические идеи, существовавшие к тому времени, относились к материальным частицам, потокам жидкостей и упругим твердым телам, и все они укладывались в рамки законов динамики Ньютона. У физиков тех дней не было других способов представить себе электрическое поле; они были вынуждены начинать с некой сложной картины движения механических объектов, и с этой точки зрения уравнения Максвелла не представлялись им ни простыми, ни естественными. Только очень постепенно оказалось возможным начать забывать механические модели и рисовать себе электрическое поле как нечто основное и неделимое, как некоторый физический объект, который существует по своему собственному праву и не нуждается в том, чтобы его «объясняли» с помощью чего-то еще (рис. 8.2). Физикам потребовалось около тридцати лет, чтобы произвести такие изменения в своем образе мышления. Как только произошли эти изменения, тотчас же обнаружилась вся простота и красота уравнений Максвелла и оказалось даже трудно понять, из-за чего поднялась вся эта суета.

Сегодня мы находимся в точно таком же отношении к квантовой механике, в каком Пупин находился к теории Максвелла. Квантовая механика считается странной, трудной и непостижимой для простого смертного. И все же я считаю, что ничуть не труднее сейчас понять квантовую механику, чем Максвелла в 1885 году.

Опять в широчайшем смысле можно сказать, что основная идея квантовой механики состоит в распространении на обычную материю

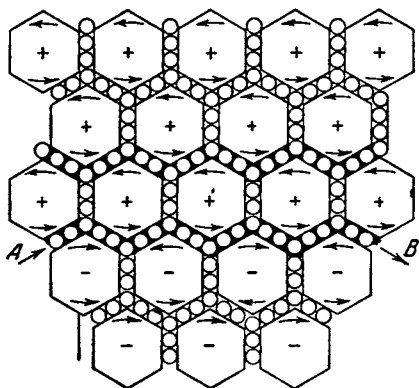


Рис. 8.1. Механическая модель электромагнитного поля, опубликованная в «Избранных трудах» Максвелла.

Шестиугольники — это «молекулярные вихри»; круги — «направляющие колеса». Когда колеса движутся от А к В, примыкающие вихри вращаются в противоположных направлениях. Модель отражает попытки физиков девятнадцатого столетия дать наглядную картину поля в терминах прежних понятий.

состоит в том, что интуитивное представление о твердой природе материи гораздо глубже коренится в нас, чем какое-либо интуитивное понимание электричества.

Можно надеяться, что квантовая механика со временем в значительной мере потеряет свои ошеломляющие и ставящие в тупик качества. Теорию Максвелла нелегко объяснить неспециалисту, но трудности ее теперь в деталях, а не в основных понятиях. Сегодня, может быть, трудно вспомнить, где плюс, а где минус перед различными членами уравнений Максвелла, но общая физическая картина электрического и магнитного полей в пустом пространстве нисколько не трудна для понимания. Мы уже не страдаем от бесплодных попыток вообразить электрическое поле, которые заводили в тупик ученых восьмидесятых годов. Нам даже нелегко понять как следует, в чем же состояла их трудность. В этом отношении книга Пупина весьма поучительна. Нам кажется поэтому, что со временем основным идеям квантовой механики (разумеется, не деталям ее) можно будет обучать школьников. Они станут вполне привычными для широкого общества.

Преподавая квантовую механику, я сделал одно наблюдение (знакомое мне, впрочем, и по собственному опыту изучения квантовой механики). Обучающиеся проходят стадии понимания, очень напоминающие те, которые описывает Пупин. Студент начинает с того, что обучается приемам своего труда. Он учится делать вычисления в квантовой механике и получать правильные результаты, вычисляет сечение рассеяния

того двухпланового понимания, которое уже содержится в максвелловской трактовке электричества и магнетизма. Квантовая механика окончательно не делает никакого различия между обычной материей и электричеством. При этом представление о двухъярусном строении природы становится последовательным и универсальным. В нижнем ярусе мы найдем теперь электрическое и магнитное поля, и математические абстракции такого же рода, называемые волновыми функциями, которые описывают поведение материи. В верхнем ярусе теперь находятся только энергии, силы и вероятности. Конечно, между теорией Максвелла и квантовой механикой, между поведением обычной материи и электромагнетизмом очень много различий в деталях. Но в основных чертах картина одна и та же. Причина же, по которой квантовая механика кажется нам сейчас куда более трудной для понимания,



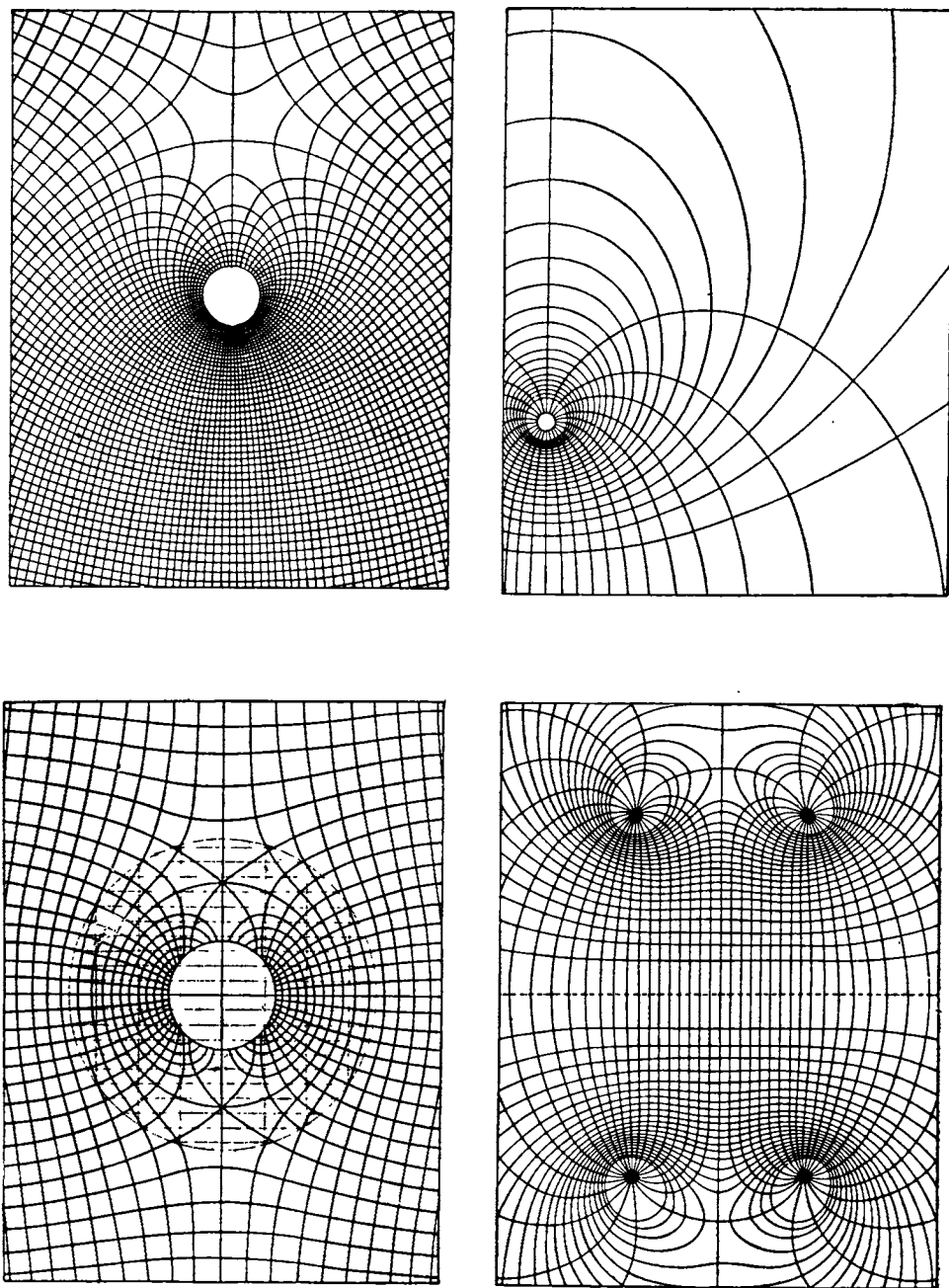


Рис. 8.2. Картина силовых линий электромагнитных полей из «Трактата об электричестве и магнетизме» Максвелла.

Эти рисунки больше согласуются с представлением современного физика, который рассматривает поле как полноправную самостоятельную концепцию, не требующую объяснений с помощью прежних представлений. Наверху слева — в поле, образованном электрическим током в прямолинейном проводнике; внизу слева — в поле вокруг намагниченного цилиндра. Наверху справа — круговой ток, внизу справа — два круговых тока.

нейтронов протонами и всякие другие подобные вещи. На то, чтобы выучиться математическим методам и научиться правильно их применять, у него уходит примерно шесть месяцев. Это — первая стадия в изучении квантовой механики, и она проходит сравнительно легко и безболезненно. Потом наступает вторая, когда он начинает терзаться, потому что не понимает, что же он делает. Он страдает из-за того, что у него в голове нет ясной физической картины. Он совершенно теряется в попытках найти физическое объяснение каждому математическому приему, которому он обучился. Он усиленно работает и все больше приходит в отчаяние, так как ему кажется, что он уже просто не способен мыслить ясно. Эта вторая стадия чаще всего тоже длится месяцев шесть или даже дольше. Потом совершенно неожиданно наступает третья стадия. Студент говорит самому себе: «Я понимаю квантовую механику» или, скорее, он говорит: «Я теперь понял, что здесь нечего особенно понимать». Трудности, которые казались такими непреодолимыми, таинственным образом исчезли. Дело в том, что он научился думать непосредственно и бессознательно на языке квантовой механики и больше не пытается объяснять все с помощью доквантовомеханических понятий.

Мне кажется, что продолжительность и мучительность второй стадии с течением времени сокращается. Каждое новое поколение студентов обучается квантовой механике с большей легкостью, нежели их учителя. Подростающие поколения гораздо меньше привязаны к доквантовой картине; они меньше сопротивляются тому разрушению этой картины, которое необходимо предшествует периоду, когда они начинают чувствовать себя как дома среди квантовомеханических идей. Возможно, что впоследствии вторая стадия совсем исчезнет; квантовая механика будет восприниматься студентами с самого начала как простой и естественный способ мышления именно потому, что мы все к ней уже достаточно привыкли. К этому времени, если наука будет развиваться, как мы надеемся, мы окажемся готовыми к следующему большому прыжку в неизвестное.

### «Безумные» теории

Теория Максвелла и квантовая механика — это примеры физических открытий глубочайшего значения. Такие открытия приходят тогда, когда становится очевидным, что экспериментальные факты невозможно понять в рамках прежних представлений. Новый способ рассуждений и новые представления должны быть отысканы ощупью и в темноте. Это медленный и мучительный процесс.

За последние десять лет большинству физиков стало ясно, что потребуются какие-то нововведения весьма основного характера для того, чтобы прийти к пониманию свойств элементарных частиц. Большая часть наших усилий в экспериментальной физике сейчас посвящена изучению этих частиц. Оправданием для столь усиленного изучения этих явлений служит надежда, что именно здесь, скорее чем в какой-либо другой области физики, ситуация назрела для весьма радикальных открытий. В связи с этим стоит обратиться к историческим примерам, чтобы посмотреть, как и в какие моменты делают радикальные открытия.

Несколько месяцев назад Вернер Гейзенберг и Вольфганг Паули верили, что им удалось сделать существенный шаг вперед в теории элементарных частиц. Когда Паули был проездом в Нью-Йорке, его уговорили прочесть лекцию, чтобы объяснить эти новые идеи. Среди слушателей был Нильс Бор. Паули говорил около часа. После этого развернулось

Таблица 8.1

В этой таблице собраны известные сейчас физикам фундаментальные частицы. Массы всех частиц выражены в массах электрона. Времена жизни нестабильных частиц даны в секундах или долях секунды. Для нейтральных  $K$ - и анти- $K$ -мезонов не указано никакого времени жизни, так как они немедленно распадаются на частицы, указанные здесь как нейтральный  $K$ -мезон (1) и нейтральный  $K$ -мезон (2).

№	Частица	Символ	Масса	Время жизни, сек
1	Фотон . . . . .	$\gamma$	0	Стабилен
2	Нейтрино . . . . .	$\nu^0$	0	Стабильно
3	Антинейтрино . . . . .	$\bar{\nu}^0$	0	Стабильно
4	Электрон . . . . .	$e^-$	1	Стабилен
5	Позитрон . . . . .	$e^+$	1	Стабилен
6	Отрицательный мю-мезон . . . . .	$\mu^-$	206,2	$2,2 \cdot 10^{-8}$
7	Положительный мю-мезон . . . . .	$\mu^+$	206,2	$2,2 \cdot 10^{-8}$
8	Отрицательный пи-мезон . . . . .	$\pi^-$	273,2	$2,56 \cdot 10^{-8}$
9	Положительный пи-мезон . . . . .	$\pi^+$	273,2	$2,56 \cdot 10^{-8}$
10	Нейтральный пи-мезон . . . . .	$\pi^0$	263	$< 4 \cdot 10^{-18}$
11	Отрицательный $K$ -мезон . . . . .	$K^-$	966,5	$1,22 \cdot 10^{-8}$
12	Положительный $K$ -мезон . . . . .	$K^+$	966,5	$1,22 \cdot 10^{-8}$
13	Нейтральный $K$ -мезон . . . . .	$K^0$	966	
14	Нейтральный анти- $K$ -мезон . . . . .	$\bar{K}^0$	966	
15	Нейтральный $K$ -мезон (1) . . . . .	$K_1^0$	966	$0,95 \cdot 10^{-10}$
16	Нейтральный $K$ -мезон (2) . . . . .	$K_2^0$	?	$9 \cdot 10^{-8}$
17	Протон . . . . .	$p^+$	1836,1	Стабилен
18	Антипротон . . . . .	$p^-$	1836,1	Стабилен
19	Нейтрон . . . . .	$n^0$	1838,6	$1,04 \cdot 10^3$
20	Антинейтрон . . . . .	$\bar{n}^0$	1838,6	$1,04 \cdot 10^3$
21	Лямбда-частица . . . . .	$\Lambda^0$	2182	$2,77 \cdot 10^{-10}$
22	Анти-лямбда-частица . . . . .	$\bar{\Lambda}^0$	2182	$2,77 \cdot 10^{-10}$
23	Отрицательная сигма-частица . . . . .	$\Sigma^-$	2341,4	$1,67 \cdot 10^{-10}$
24	Положительная анти-сигма-частица . . . . .	$\bar{\Sigma}^+$	2341,4	$1,67 \cdot 10^{-10}$
25	Положительная сигма-частица . . . . .	$\Sigma^+$	2327,6	$0,83 \cdot 10^{-11}$
26	Отрицательная анти-сигма-частица . . . . .	$\bar{\Sigma}^-$	2327,6	$0,83 \cdot 10^{-11}$
27	Нейтральная сигма-частица . . . . .	$\Sigma^0$	2331,7	$< 10^{-11}$
28	Нейтральная анти-сигма-частица . . . . .	$\bar{\Sigma}^0$	2331,7	$< 10^{-11}$
29	Отрицательная пси-частица . . . . .	$\Xi^-$	2570	$5-200 \cdot 10^{-10}$
30	Положительная анти-пси-частица . . . . .	$\bar{\Xi}^+$	2570	$5-200 \cdot 10^{-10}$
31	Нейтральная пси-частица . . . . .	$\Xi^0$	?	?
32	Нейтральная анти-пси-частица . . . . .	$\bar{\Xi}^0$	?	?

обсуждение, во время которого он подвергся довольно острой критике со стороны младшего поколения физиков. Наконец, попросили выступить Бора с тем, чтобы подытожить различные высказывания. «Все мы согласны, — сказал он, — что ваша теория безумна. Вопрос, который нас разделяет, состоит в том, достаточно ли она безумна \*), чтобы иметь шансы быть истинной. По моему она недостаточно безумна для этого».

То же самое возражение — недостаточная безумность — применимо и ко всем другим делавшимся до сих пор попыткам создать радикально новую теорию элементарных частиц. Это особенно относится к ниспро-

\*) Термин «безумность» употребляется здесь в смысле глубокого принципиального отличия от прежних представлений, коренной ломки их, не укладывающейся в старые привычные понятия и образы. (Прим. ред.)

Таблица 8.2

Символ	Частица	Классификация
$\Xi^0$ $\Xi^-$ $\Sigma^-$ $\Sigma^0$ $\Sigma^+$ $\Lambda^0$	$\Xi^+$ $\Xi^0$ $\Xi^+$ $\Xi^0$ $\Xi^-$ $\Lambda^0$	Кси-частица Сигма-частица Ламбда-частица
$p^+$ $n^0$	$\bar{p}^0$ $\bar{p}^-$	Протон, нейтрон Нуклоны
$K^+$ $K^0$ $K_1^0$ $K_2^0$ $\pi^-$ $\pi^0$ $\pi^+$	$\bar{K}^+$ $\bar{K}^0$ $\bar{K}_1^0$ $\bar{K}_2^0$ $\pi^-$ $\pi^0$ $\pi^+$	К-мезон Пи-мезон
$\mu^-$ $e^-$ $\nu^0$	$\mu^+$ $e^+$ $\nu^0$	Мю-мезон Электрон Нейтрино
$\gamma$	$\gamma$	Фотон Фотон

К табл. 8.2. Классификация частиц по группам. фотон, лептоны, мезоны, нуклоны и гипероны.

Мю-мезон, несмотря на свое название, относится к лептонам. Справа от пунктира располагаются античастицы; слева — соответствующие частицы. Фотоны и нейтральные пи-мезоны могут рассматриваться как совпадающие со своими античастицами. Нейтральные К- и анти-К-мезоны распадаются в одни и те же дочерние частицы.

вергателям основ. Большая часть ниспровергающих основы статей, которые направляются в «Physical Review»\*), отклоняется редакцией не потому, что их нельзя понять, а именно потому, что их можно понять. Те, которые понять нельзя, как правило, печатаются. Великое открытие, когда оно только что появляется, почти наверняка возникает в запутанной, неполной и бессвязной форме. Самому открывателю оно понятно только наполовину. Для всех остальных оно — полная тайна. Поэтому любое построение, которое не кажется на первый взгляд безумным, не может иметь надежды на успех.

\*) «Физическое обозрение» — основной американский физический журнал. (Прим. ред.)

Темп фундаментальных изменений в физике задается инерцией наших старых представлений. Это — темп по необходимости очень медленный.

Быстрое развитие экспериментальных работ за последние десять лет привело к тому, что наши экспериментальные знания сейчас очень сильно опередили теорию. Это совершенно здоровая ситуация. Но с глубоким пониманием этих фактов нельзя торопиться. Вполне может случиться, что все опыты, которые могут быть сделаны на ускорителях путем взаимных столкновений различных частиц, какие только можно придумать, будут сделаны; все результаты будут тщательно запротоколированы и собраны, а мы все еще не будем иметь никакого понятия о том, что же происходит. Тогда придется сидеть и дожидаться новых идей или совершенно нового рода экспериментальных результатов. Но мы уверены, что как-нибудь и когда-нибудь завал будет расчищен. Правда, мы можем проталкивать только по одному бревнышку за раз, и очень мало какие из них шевелятся, когда мы их толкаем.

### Атомное ядро и несохранение четности

Но в физике было много открытий, и некоторые из них (первостепенного значения) не были связаны с существенно новым образом мышления (рис. 8.3). Одним из таких открытий было открытие Резерфордом атомного ядра. Другой пример — недавно сделанное Янг Чжень-нином и Ли Цзун-дао предположение о том, что в субатомных процессах может нарушаться симметрия между левым и правым. История обоих этих открытий еще раз показывает неспособность даже лучших из нас видеть много дальше кончика собственного носа.

Резерфорд открыл существование атомного ядра в 1911 г. Из того факта, что альфа-частицы, проходя сквозь тонкие металлические листки, отклоняются на большие углы, он сделал вывод, что вся масса и положительный заряд атома должны быть сосредоточены внутри сферы с радиусом, меньшим одной тысячной доли радиуса атома. Эта работа была опубликована в мае 1911 г. Легко предположить, что такая работа была сенсацией для всех физиков. Однако в своей недавней лекции Андраде так вспоминает об этом событии: «В то время я работал в лаборатории Ленарда в Гейдельберге, одном из очень активных исследовательских центров в области электронной физики. У меня не сохранилось никаких воспоминаний об интересе, вызванном резерфордовской моделью атома».

В 1913 г. Резерфорд опубликовал книгу «Радиоактивные вещества и их излучения», в которой впервые отчетливо излагается представление о структуре атома, состоящего из ядра с окружающими его электронами. Отзыв на эту книгу в «Nature» \*) написан лордом Ралеем, физиком, несомненно, настолько широким и разносторонним, насколько можно только себе представить. В обзоре содержания книги не говорится ни слова о структуре атома.

Впрочем, быть может, не так удивительно, что несомненная очевидность существования атомного ядра столь долго игнорировалась современниками Резерфорда. Они привыкли рассматривать любые измышления о внутреннем строении атома, как относящиеся скорее к метафизике, чем к физике. Они сознательно не желали воспринимать никакой информации, относящейся к той области, которая в течение столетий была

\*) «Природа» — один из ведущих английских естественно-научных журналов. (Прим. ред.)

достоянием только шарлатанов и философов. Гораздо удивительнее, что самому Резерфорду понадобилось несколько лет, чтобы прозреть и понять то, что он сделал. Когда он впервые объявил о своем открытии в письме к Отто Хану в апреле 1911 г., он писал: «В последнее время я



Рис. 8.3. Воображаемая компания физиков

Первый слева — Исаак Ньютон, второй — Майкл Фарадей, третий — Джеймс Клерк Максвелл, седьмой — Ли Цзун-дао. Сидит — Луи де Бройль, далее Эрвин Шредингер, затем —

работал над теорией рассеяния альфа- и бета-частиц и разработал модель атома для того, чтобы объяснить результаты и специальную теорию рассеяния».

Его, кажется, в это время гораздо больше занимало, что он умеет рассчитывать отклонение частицы, на которую действует сила, изменяющаяся обратно пропорционально квадрату расстояния от некоторого фиксированного центра, чем вопрос о том, что представляет собою на самом деле этот таинственный тяжелый центр. В его книге 1913 г. ядро по-прежнему занимает самое скромное место. Иначе вряд ли его проглядел бы лорд Рэлей. По существу, наверное, можно сказать, что только Нильс Бор первый обратил внимание Резерфорда на то, что он сделал.

Работа Янга и Ли обнаруживает такую же слепоту физиков младшего поколения. Эта история мне известна уже по собственному опыту. Янг и Ли написали свою работу, озаглавленную «Вопросы сохранения четности в слабых взаимодействиях» в июне 1956 г. Я получил эту рукопись и прочел ее. Я прочел ее дважды и сказал: «Это очень интересно» или еще какие-то слова в этом роде. Но у меня не хватило воображения воскликнуть: «Бог ты мой, да ведь если это правда, то это открывает целую новую область в физике!». И я думаю, что все остальные физики, за очень небольшими исключениями, были в то время так же лишены воображения на этот счет, как и я.

В своей статье Янг и Ли предложили несколько опытов, с помощью которых можно было бы проверить вопрос о сохранении четности. Естественно было ожидать, что всякий экспериментатор, услышав об этих

предложениях, сорвется с места и побежит ставить эти опыты. Ведь здесь предлагалась возможность сделать тот самый долгожданный решительный опыт, с помощью которого, несомненно, будет обнаружен новый закон природы (рис. 8.4). Но экспериментаторы, за редкими исклю-



и математиков, упоминающихся в этой статье.

четвертый — Вильям Роуан Гамильтон, пятый — П. А. М. Дирак, шестой — Янг Чжень-нин, Энрико Ферми, Вернер Гейзенберг и Нильс Бор. Крайний справа — Эрнест Резерфорд.

чениями, продолжали тихо заниматься тем, чем занимались прежде. Лишь Ву Цзянь-сюн и ее сотрудники в Национальном Бюро стандар-


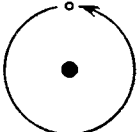

<i>Силы</i>	<i>Ядерные</i>	<i>Электро- статические</i>	<i>Слабые</i>
<i>Сравнитель- ная величина силы</i>	1	$10^{-2}$	$10^{-14}$
<i>Примеры</i>			

Рис. 8.4. Сравнение трех родов сил, известных в физике.

Самые интенсивные — это ядерные силы, которые представлены здесь примером силы, связывающей протон (черный шарик) с нейтроном (белый шарик). Электро-статические силы, представленные здесь притяжением между протоном и электроном, вращающимся вокруг него, в сто раз слабее ядерных. В сто миллионов миллионов раз слабее силы слабых взаимодействий. Они проявляются в распаде нуклона (большой белый шарик) с испусканием бета-частицы (меньший белый шарик). Не показана еще более слабая сила — гравитация (тяготение).

тов имели мужество потратить шесть месяцев на подготовку решающего эксперимента (рис. 8.5). О положительных результатах этого эксперимента было объявлено в январе 1957 г. К этому времени было

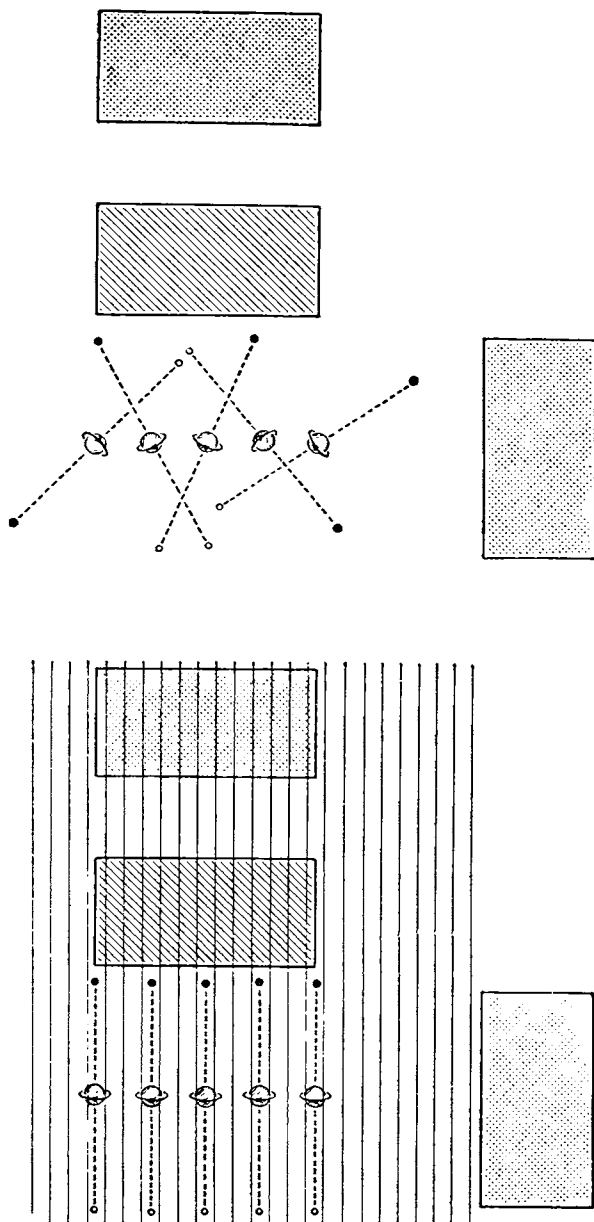


Рис. 8.5. Схема эксперимента с четностью, проделанного Ву Цзянь-сюн и ее сотрудниками.

Вращающиеся шарики в верхней части — это радиоактивные ядра в тонкой пленке кобальта-60. Ядра распадаются, испуская бета-частицы (черные точки) и нейтрино (белые точки). Бета-частицы регистрируются с помощью кристалла антрацена (заштрихованный прямоугольник). Кристаллы йодистого натрия (серые прямоугольники) регистрируют гамма-лучи, являющиеся мерой беспорядка и, следовательно, температуры кобальта-60. Когда кобальт-60 охлаждается с помощью жидкого гелия и помещается в магнитное поле (штриховые линии), его ядра выстраиваются так, что бета-частицы испускаются преимущественно в одном направлении. Это указывает, что направление, в котором испускаются бета-частицы, и которое считалось прежде не зависящим от направления вращения ядер (круговые стрелки), на самом деле связано с направлением вращения (спином).



еще три группы экспериментаторов, которые готовили подобные опыты: в Чикаго, в Лейдене и в Москве. Среди всех физиков-экспериментаторов мира нашлось только четыре группы людей, которые оказались готовы отложить свои повседневные дела и рискнуть ради новой идеи.

Я помню, как в октябре 1956 г. я встретил Янга и сказал ему: «Было бы все так здорово, если бы эти опыты Ву что-нибудь дали». «Да, — ответил он, — это было бы здорово», и продолжал мне рассказывать о своих вычислениях в теории неидеальных газов. Я думаю, что даже и он в то время не понимал ясно, насколько здорово это было бы. Он был в этом отношении не лучше и не хуже Резерфорда.

### Удивительная периодичность

В качестве общего правила, от которого, правда, бывают заметные отступления, можно сказать, что всякое большое открытие в физике есть просто решительный момент в процессе постепенно возрастающего понимания, который всякий раз длится около шестидесяти лет. Тридцать лет проходит обычно между наблюдением загадочного явления и рождением новой идеи, которая может его объяснить. Следующие тридцать лет проходят от момента рождения новой идеи до разработки ее основных следствий. Первые тридцать лет, это — время борьбы и поисков решения. Вторые тридцать — это годы приспособления и усвоения странных понятий и концепций. От открытия Майклом Фарадеем явления электромагнитной индукции до создания теории Максвелла прошло тридцать лет. От теории Максвелла до демонстрации электромагнитных волн Генрихом Герцем или до пупиновских линий передачи прошли следующие тридцать лет. Потребовалось тридцать лет на то, чтобы от ядра Резерфорда прийти к приблизительному пониманию структуры ядра и механизма ядерных процессов. Понадобилось тридцать лет, чтобы от квантовой механики Гейзенберга прийти к новой теории сверхпроводимости Джона Бардина, хотя почти все физики давно уже были уверены в том, что сверхпроводимость есть просто зримое в крупном масштабе проявление квантовомеханических принципов. Но только Бардину удалось это блестяще показать.

В примере с работой Ли и Янга мы можем смотреть только в прошлое, а не в будущее. Тридцать лет назад Энрико Ферми нашел способ общего описания слабого взаимодействия, приводящего к распаду радиоактивного ядра с испусканием бета-частицы и поставил задачу точного описания таких взаимодействий. Задача оставалась нерешенной в течение тридцати лет, хотя выяснению этого вопроса было посвящено невероятное количество опытов, становившихся год от года все более остроумными и точными. Наконец, затор был прорван благодаря предположению Ли и Янга о том, что нарушение симметрии между левым и правым, может быть, является основной чертой слабых взаимодействий. В течение года после первого экспериментального подтверждения идеи Ли — Янга появился целый поток новых экспериментальных работ — лево-правая асимметрия экспериментально измерялась и проверялась. С помощью этих экспериментов была окончательно решена проблема, поставленная Ферми. Теперь мы знаем, по крайней мере для бета-распада ядра, что представляют собой слабые взаимодействия. Но каждому ясно, что мы еще только на полпути. Наличие право-левой асимметрии в слабых взаимодействиях и ее отсутствие во взаимодействиях сильных совершенно непонятно в глубоком смысле. Только теперь впервые стало возможно думать о фундаментальных свойствах слабых взаимодействий реали-

стическим и связным образом. Мы можем уверенно предсказать, что размышления об этом предмете будут продолжаться дальше и не прекратятся до тех пор, пока окончательно не проявится полный смысл открытия Ли и Янга. Если доверять историческим прецедентам, то эта задача будет нас занимать в течение ближайших тридцати лет или даже дольше.

Я предложил здесь краткий и фрагментарный обзор некоторых главных физических открытий за последние сто лет. Я не хочу переоценивать смысл того сходства и регулярности, которые обнаруживают эти примеры. Тó, на что мне хотелось обратить внимание, это более медленный и более широкий процесс расширения человеческого понимания, который предваряет каждое значительное открытие и следует за ним. Работа, которая должна быть проделана учеными, большими и малыми, чтобы воспринять и усвоить открытие после того, как оно сделано, так же длинна, так же трудна и так же значительна, как и та работа, которая расчищает и прокладывает путь к рождению этого открытия. Самое лучшее описание всего процесса в целом мы находим в словах сэра Артура Эддингтона, написанных им в 1934 г.: «Когда мы наблюдаем это новое развитие в перспективе, оно выглядит как естественное распускание цветка».

Наконец, что можно сказать о будущем? Можем ли мы предсказать или хоть каким-либо способом предугадать пути будущих открытий? Ответ, конечно, один — нет, разве только в самом неопределенном и гипотетическом смысле. Тем не менее я рискну высказать наудачу несколько догадок о характере будущего развития.

Обычно придерживаются одной из двух различных точек зрения на современную ситуацию в физике элементарных частиц. Одна из точек зрения, которая может быть названа оптимистической, состоит в том, что в настоящее время мы находимся в положении, сравнимом с положением в 1925 г., когда классическая и атомная физика находились в разительном противоречии. В то время героические интеллектуальные усилия Бора, Крамерса, де Бройля, Шредингера, Дирака и Гейзенберга привели к созданию квантовой механики и к установлению порядка из прежнего хаоса. Оптимистический взгляд состоит в том, что такое создающее эпоху открытие, которое положит конец всей современной неразберихе в физике элементарных частиц, уже совсем не за горами. Противоположный взгляд часто называют пессимистическим, однако я предпочитаю называть его скептическим, потому что сам его придерживаюсь, а я не согласен считать радость своего участия в делах природы чем-либо меньшим счастьем оптимиста. Скептический взгляд предполагает более длинные сроки развития; он отводит более скромное место задачам и возможностям современного поколения физиков и больше верит в глущину неисчерпаемого богатства природы.

Согласно скептической точке зрения наше поколение занимает примерно такое место, как последователи Ньютона в восемнадцатом веке. После того как Ньютон закончил построение динамики, перед его последователями стояли две большие задачи. Одна задача заключалась в том, чтобы разработать и полностью понять математические следствия идей Ньютона. Эта задача была делом жизни великих математиков восемнадцатого и девятнадцатого столетий: Леонарда Эйлера, Жозе Луи Лагранжа, Пьера Симона де Лапласа, Карла Якоби и Вильяма Роуана Гамильтона. Она была окончена только через сто пятьдесят лет после создания «Principia» Ньютона. Вторая задача состояла в изучении и приведении в порядок тех физических явлений, которые, как это хорошо было известно самому Ньютону, лежат за пределами его динамики, в особен-

ности света, электричества и магнетизма. Эта задача поглощала усилия ведущих физиков в течение примерно двухсот лет после Ньютона и решение ее было завершено только работами Майкла Фарадея и Максвелла.

Мне представляется бесспорным, что квантовая механика не могла быть открыта кем бы то ни было, как бы гениален он ни был, до того, как Гамильтон и Максвелл закончили свою работу. И если бы кто-нибудь через тридцать лет после Ньютона сказал: «Совершенно ясно, что нам нужны радикальнейшие открытия в динамике для того, чтобы объяснить поведение света и электричества» и уселся изобретать квантовую механику — он бы только зря потратил время. Без глубокого математического анализа динамики Ньютона, проделанного Гамильтоном, который подсказал математическую форму новой теории, и без детальной максвелловской теории электрических сил, подсказавшей ее физическое содержание, никто не мог иметь и малейшего подозрения о том, какого рода открытия и нововведения необходимы.

Мой взгляд, взгляд скептический, состоит в том, что мы так же далеки от понимания природы элементарных частиц, как последователи Ньютона были далеки от квантовой механики. Как и перед ними, перед нами стоят две грандиозные задачи. Одна из них — это изучение и исследование математического содержания существующих теорий. Существующие квантовые теории поля могут быть верными или не верными, но они, несомненно, скрывают математические глубины, которые могут быть измерены лишь гением, подобным гению Эйлера или Гамильтона. Вполне возможно, что нельзя даже подойти к новой теории, пока мы ясно не поняли математической природы старых. Вторая наша задача — исследовать широкий круг физических явлений, которые не принимаются во внимание существующими теориями. Это означает — экспериментальное исследование модной области элементарных частиц, но это значит также и нечто гораздо большее. Среди тех вопросов, которые не входят в круг современных теорий элементарных частиц, особняком стоят гравитация и космология. Эйнштейновская теория гравитации — это выдающееся физическое открытие, которое даже теперь, через сорок лет после своего возникновения, еще не усвоено в основном русле физики. Космология сейчас большинству физиков, подобно внутреннему строению атома для современников Резерфорда, не представляется серьезным объектом для размышлений. Вполне вероятно, что удовлетворительная теория элементарных частиц потребует в качестве необходимой составной части описание «граничных условий», которым наша вселенная должна была удовлетворять при своем возникновении. В таком случае мы не можем ожидать никакого окончательного прояснения в физике элементарных частиц, пока путем наблюдений не будет найден ответ на большие и еще совершенно открытые вопросы космологии.

Итак, я думаю, что важные открытия в физике будут появляться, как это было и в прошлом, с интервалом в двадцать пять — пятьдесят лет. Это примерно тот период времени, который требуется для того, чтобы переварить одно открытие, прежде чем новое может быть установлено. Я думаю, что открытие такой величины, как ньютоновская динамика или квантовая механика, вряд ли будет сделано раньше, чем через ближайшие сто лет. И я думаю, что следующее важное открытие возникнет в течение двадцати пяти лет из гравитационных или астрономических наблюдений, которые окажется возможным осуществить благодаря разработке оборудования для наблюдений в межпланетном пространстве.

## СОДЕРЖАНИЕ

От издательства . . . . .	4
<i>М. Гелл-Манн и П. Е. Розенбаум</i> , Элементарные частицы . . . . .	5
<i>Р. Е. Маршак</i> , Пионы . . . . .	32
<i>Филипп Моррисон</i> , Нейтрино . . . . .	40
<i>Эмилио Сегре и Клайд Виганд</i> , Антипротон . . . . .	53
<i>Корбен и де Бенедетти</i> , Простейший атом . . . . .	62
<i>Серджио де Бенедетти</i> , Мезоатомы . . . . .	69
<i>Филипп Моррисон</i> , Ниспровержение четности . . . . .	77
<i>Фримен Дж. Дайсон</i> , Новаторство в физике . . . . .	90

---

Настоящий сборник научно-популярных статей является вторым выпуском неперiodической серии сборников под общим названием «Над чел думают физики». Каждый сборник этой серии посвящается какому-либо важному разделу современной физики. В сборники включаются статьи крупных советских и зарубежных ученых, в которых «из первых рук» рассказывается о ведущихся ими исследованиях. Сборники должны помочь читателю ознакомиться с физикой наших дней, ее сегодняшними и завтрашними проблемами, понять, как делаются научные открытия.

В данный сборник включены статьи по различным проблемам физики элементарных частиц, опубликованные в американском научно-популярном журнале «Scientific American». Все статьи написаны широко известными учеными. Сборник открывается обзорной статьей Гелл-Манна и Розенбаума, описывающей современное состояние физики элементарных частиц. Далее следует ряд статей, посвященных отдельным элементарным частицам (пионы, нейтрино, антипротон) и образуемым ими системам (позитроний, мезоатомы). В статье Ф. Моррисона подробно рассказывается об одном из наиболее интересных открытий последних лет — несохранении четности при  $\beta$ -распаде. Сборник завершается статьей крупного физика-теоретика Ф. Дайсона «Новаторство в физике», в которой дается своеобразный анализ развития физики в значительной степени на материалах последних открытий в области физики элементарных частиц.