

НАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ КУЛЬТУРЫ



Я. А. СМОРОДИНСКИЙ

Элементарные частицы

1

1962

НАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ КУЛЬТУРЫ

Я. А. СМОРОДИНСКИЙ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО „ЗНАНИЕ“

**Всесоюзного общества по распространению
политических и научных знаний**

Москва

1962

Существуют ли элементарные частицы?

Лет тридцать назад физику не нужно было много времени, чтобы ответить на вопрос: «Что мы знаем об элементарных частицах?» Тогда были известны всего две частицы: электрон и протон. Считали, что из этих «неделимых» и «неизменных» частиц состоят и ядро атома и его оболочка. Электрон и протон казались элементарными в буквальном смысле слова.

Казалось вполне естественным, что все тела в природе образованы в конце концов из электронов и протонов: из них построены атомы, из атомов построены все молекулы — такая картина выглядела вполне стройной и понятной.

Но все же физик не мог избавиться от некоторых сомнений. Напрашивался вопрос: а из чего состоят сами протон и электрон? И, вообще, до каких пор можно будет задавать такой вопрос?

Будем ли мы до бесконечности делить частицы на все более и более элементарные или же есть какие-то «самые элементарные частицы», которые почему-то никакими силами разделить уже нельзя?

Много событий произошло в физике в XX веке, но, вероятно, одним из самых важных среди них было открытие в 1932 году Андерсеном и почти одновременно двумя учениками великого английского физика Резерфорда — Блеккетом и Оккалини положительно заряженной частицы — позитрона, масса которого совпадала с массой электрона. Этот год надо считать годом рождения новой науки — физики элементарных частиц. Существование такой частицы было теоретически предсказано другим английским физиком Дираком за год до этого. Самым удивительным свойством новой частицы было то, что она могла исчезать вместе с электроном, превращаясь, например, в два кванта (фотона):

электрон + позитрон \rightarrow 2 кванта.

В первый раз физики увидели исчезновение элементарной частицы. Этот новый факт произвел очень сильное впечатление на многих. Раздавались даже голоса об исчезновении материи. В действительности же физикам открылся новый мир, законы которого отличаются от законов классической механики и электротехники, и одно из главных отличий этого «микромира» состояло именно в том, что частицы в нем не остаются неизменными, а могут превращаться друг в друга. Это приводит к новым явлениям, которых не знала старая классическая физика.

Начнем с простого примера. Известно, что нейтрон (открытый Чедвиком в Англии в 1932 г.) в свободном состоянии превращается в протон, испуская электрон и нейтральную частицу — антинейтрино (о ней речь будет впереди):

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}.$$

Казалось бы, естественно говорить, что нейтрон состоит из протона, электрона и антинейтрино, на которые он и «разваливается». Ведь ранее говорили, что атом состоит из ядра и электронов, которые можно от него оторвать. Такое описание атома вполне отвечает нашим привычкам. Когда в армии учат, что затвор винтовки состоит из семи основных частей, то это значит, что его можно на семь частей и разобрать.

Так могло бы быть и в случае нейтрона, если бы не было известно, что протон в свою очередь может распасться на нейтрон, позитрон и другую нейтральную частицу — нейтрино:

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu.$$

Правда, такой распад не может происходить со свободным протоном, так как нейтрон тяжелее протона, и для распада надо добавить энергию; поэтому распад протона происходит только внутри атомного ядра или в недрах звезд, где протон получает энергию от соседних частиц. Но это обстоятельство не лишает протон права называться элементарным. Ведь для того чтобы оторвать электрон от атома, тоже надо затратить энергию. Поэтому с такой точки зрения о протоне даже естественнее говорить: «протон состоит из нейтрона и т. д.», чем о нейтроне, который сам разваливается. Но как бы то ни было, оба рассмотренных процесса в каком-то смысле кажутся противоречащими друг другу. «Что из чего состоит?» — такой, на первый взгляд, естественный вопрос на наших глазах теряет смысл. Мы обнаруживаем, что и протон и нейтрон с одинаковым правом могут быть как составными частицами, так и элементарными. Ясно, однако, что возникшая трудность надуманна. Она появилась лишь потому, что мы сами потребовали от частиц свойств, которыми они не обладают.

Мы привыкли, что все вещи в нашем макром мире (мире больших вещей, в отличие от микромира — мира атомов и

элементарных частиц) состоят из более мелких деталей; поэтому мы считаем естественным переносить такое свойство макромира и в микромир. Однако у объектов микромира такого свойства нет. У протона и нейтрона нет самих свойств неделимости и неизменности. Основное свойство этих частиц — возможность превращения одной в другую.

Так же обстоит дело и с другими частицами, которые по привычке называют элементарными. Поэтому, говоря сейчас об элементарных частицах, мы понимаем под этим термином только то, что эти частицы меньше (и легче) атомных ядер. Сейчас известно 30 сортов таких частиц. Они превращаются друг в друга, рождаются в одиночку и парами, существуют практически бесконечно долго или распадаются практически мгновенно. Законы их рождения и распада, казавшиеся на первых порах беспорядочными, постепенно приобретают стройность. Изучение этих законов и составляет предмет физики элементарных частиц.

Для того чтобы разобраться в свойствах этих частиц, нужно прежде всего разделить их на группы, подобно тому, как зоология начинается с классификации животных на млекопитающих, птиц и т. д. Таких групп элементарных частиц пять. Сначала мы перечислим все группы.

1. Лептоны (самые легкие частицы) — электроны, мю-мезоны (их сейчас называют более кратко мюоны) и нейтрино.

2. Нуклоны — протоны и нейтроны.

3. Мезоны — пи-мезоны и ка-мезоны, или, короче, пионы и каоны. Ранее попавшие сюда по ошибке мюоны переведены сейчас в группу лептонов.

4. Гипероны — самые тяжелые частицы; их обозначают буквами Λ , Σ , Ξ (лямбда, сигма и кси). Вместе с нуклонами гипероны часто называют барионами — тяжелыми частицами.

5. Фотоны — кванты электромагнитного поля; они не похожи ни на одну из предыдущих групп частиц и выделяются в отдельную группу.

Перечисляя частицы, мы не включили сюда античастицы. О них будет сказано отдельно. Античастицы следует внести в таблицу вместе с частицами. В настоящее время известно следующее число частиц и античастиц: 6 лептонов, 4 нуклона, 7 мезонов, 12 гиперонов и фотон — всего 30 разных сортов.

Земной опыт и законы Вселенной

С расширением возможностей опытов естествоиспытателю приходится соглашаться с тем, что старые представления и законы, которым подчиняются физические явления, оказываются неполными и приближенными. Порой — и эти моменты становятся поворотными в истории естествознания — изменение взглядов оказывается настолько глубоким, что новые тео-

рии длительное время кажутся надуманными и ошибочными, и им приходится долго завоевывать себе право на жизнь.

В XX веке таких переворотов в нашем понимании законов во Вселенной было два; они ознаменовались появлением теории относительности и квантовой механики. И в том и в другом случае перевороты имели общую черту: было обнаружено, что законы, которые были известны для явлений в обычных «земных» масштабах, оказались совсем другими, когда астрономы и физики перешли к изучению явлений в масштабах во много раз больших либо во много раз меньших, чем обычные.

Теория относительности принесла с собой новые представления о свойствах нашей Вселенной. Среди неожиданных открытий, которым не верили долго и упорно, было отклонение луча света при прохождении около Солнца, разбегание далеких галактик — изменение масштабов Вселенной и многие другие. Все эти новые явления говорили о том, что надо быть очень осторожными при попытках описания явлений, происходящих в совсем других масштабах, чем те, к которым мы привыкли, надо быть всегда готовыми к тому, что с расширением границ опыта могут изменяться сами законы, которые предыдущие поколения считали незыблемыми. Такова уж особенность развития науки.

Новые законы принесло физике открытие квантовой механики — механики движения в микромире; новые законы возникли в механике, когда физики стали изучать тела, движущиеся со скоростью, близкой к скорости света. Самые неожиданные события увидели физики тогда, когда стали изучать явления, объединившие в себе и свойства микромира и свойства больших скоростей, — именно в этой области и лежит большинство явлений физики элементарных частиц.

Микромир

Часто, пытаясь рассказать о микромире, различные авторы предлагают читателю вообразить, что он уменьшился в своих размерах во много раз, и посмотреть с новой точки зрения внутрь атома или даже ядра. К сожалению, такой прием не может привести к цели. Если при этом уменьшатся и молекулы, то ясно, что ничего не изменится во взглядах сказочного путешественника; если же размеры молекул и атомов оставить без изменений, то не ясно, как поступить с путешественником; придется упростить его строение — уменьшить число атомов, из которых он состоит. Но если его размеры уменьшить до размеров молекул (а именно этого и хотят обычно авторы), то на долю путешественника останется одна или несколько молекул. А такое образование (его уже нельзя назвать существом) не может ни видеть, ни слышать; ему не удастся получить много сведений о микромире, как этого хотели бы его создатели.

Такая трудность кажется, на первый взгляд, несущественной, не связанной с самой наукой. Однако в действительности эта трудность оказывается серьезнее, чем могло бы показаться. Мы привыкли (и иначе не можем) описывать явления физического мира в таких понятиях, которые отвечали бы физическим приборам. Координаты частиц, скорости, ускорения — это величины, которые можно измерить приборами, состоящими из очень большого числа атомов.

При переходе к явлениям микромира мы теряем возможность производить операции измерения, к каким мы привыкли, имея дело с объектами привычных нам размеров. Однако, исследуя явления микромира, мы по необходимости продолжаем их описывать нашим старым языком, хотя физический смысл понятий изменился самым решительным образом. Поэтому многие вопросы, на которые, казалось бы, должен существовать ответ, остаются без ответа просто потому, что сам вопрос лишен смысла.

Когда была создана модель атома, в котором электроны, как в солнечной системе, совершают свой путь вокруг ядра, такая аналогия доставила многим большое удовольствие. Свойства большого мира повторяются в малом, и было приятно, чтобы и дальше строение вещества раскрывалось перед физиками по подобной же схеме. Но когда я думаю о таких аналогиях, то невольно вспоминаю банку какао, виденную в детстве. На этой банке была нарисована девочка, которая держала такую же банку, на которой тоже была нарисована такая же девочка. Было даже страшно подумать о том, когда и где кончатся девочки и банки... В физике такой конец наступил быстро. Мы уже говорили об этом. Поиски неделимых частиц материи (последней девочки с банкой!) привели к тому, что в микромире исчезло само понятие неделимых частиц.

Одним из важнейших следствий теории относительности явилась возможность превращения частиц — явление, полностью чуждое классической механике. В очень малых объемах непрерывно происходят рождение и уничтожение частиц, их число все время меняется, и только с точки зрения макроскопического наблюдателя все выглядит спокойным и установившимся.

На больших ускорителях физики научились теперь воспроизводить в лабораторных условиях процессы рождения частиц и многое уже сделали для изучения их свойств. Однако они еще слишком мало знают о законах взаимодействия, чтобы можно было понять в деталях, что происходит на расстояниях, меньших 10^{-13} см и какие новые законы управляют явлениями в этом мире. Тем не менее сейчас мы можем многое рассказать о тех частицах, которые уже известны, о их массе и о процессах превращения одних частиц в другие.

Для того чтобы перейти к такому рассказу, мы условимся

о некоторых терминах и понятиях. Прежде всего о массе частицы. Массу можно измерять либо в граммах (электрон весит 10^{-27} г), либо, что удобнее, в массах электрона, т. е. указывать, во сколько раз данная частица весит больше, чем электрон (протон весит $1,7 \cdot 10^{-23}$ г, или его вес равен $1836 m_e$). Часто бывает удобно выражать массу в единицах энергии, пользуясь тем, что обе эти величины взаимно связаны.

Теория относительности учит, что если масса тела уменьшится на 1 г, то энергия тела уменьшится на $c^2 \text{ эрг}$ (c — скорость света), т. е. на $9 \cdot 10^{20}$ эрг. Поэтому можно измерять массу и в единицах энергии. За единицу энергии в физике элементарных частиц обычно берут кинетическую энергию электрона, прошедшего разность потенциалов в 1 миллион вольт. Такая единица называется «миллион электронвольт» (1 Мэв) и равна $1,6 \cdot 10^{-6}$ эрг. Так как масса электрона (m_e) равна 10^{-27} г, то нетрудно подсчитать, что $1 m_e = 0,51 \text{ Мэв}$, поэтому масса в Мэв примерно вдвое больше массы, выраженной в m_e . Надо также помнить, что масса движущейся частицы больше массы той же частицы, находящейся в покое; однако давно уже принято говорить только о массе покоящейся частицы; для движущейся частицы задают энергию и выражают ее в Мэв.

Если разделить массу покоящейся частицы на ее энергию, то отсюда легко определить скорость частицы по формуле:

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{mc^2}{E} \right)^2}.$$

Например, протон в пучке ускорителя в Дубне имеет энергию 10 000 Мэв, а его масса равна примерно 1000 Мэв. Это значит, что его скорость

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{1}{10} \right)^2} \cong c \left(1 - \frac{1}{200} \right) = \frac{199}{200}$$

скорости света.

Еще одно понятие понадобится нам в дальнейшем. Это понятие о спине частицы. Мы знаем, что вращение волчка характеризуется моментом количества движения. Оказывается, что электроны и нуклоны тоже имеют (в покоящемся состоянии) момент количества движения, хотя представлять их себе как волчки нельзя. Эту величину и называют спином.

Спин это одно из тех «квантовых» свойств, которые имеют смысл для элементарных частиц, хотя и не сводятся к привычным свойствам классических объектов и их движения (вращения вокруг оси). Из законов квантовой механики следует, однако, что для многих целей можно наглядно представить себе электрон как вращающийся волчок — такая картина будет правильно передавать симметрию движения (и, в частности, закон сохранения количества движения, придающий устойчи-

вость волчку), но эту картину нельзя слишком детализировать — «вращение» электрона нельзя сводить к движению его различных частей, как это делается для волчка. У электрона поэтому нет момента инерции, как у волчка, и его нельзя, приложив момент сил, быстрее раскрутить вокруг своей оси, как это можно сделать с волчком.

Спин электрона всегда один и тот же и равен $0,5 \cdot 10^{-27}$ эрг · сек. Принято измерять спины частиц в единицах 10^{-27} эрг · сек и обозначать эту единицу сербской буквой \hbar (постоянная Планка). Поэтому обычно просто говорят, что спин электрона и нуклонов равен $1/2 \hbar$, или просто $1/2$. Полезно еще знать, что момент количества движения частицы по орбите всегда равен целому числу \hbar (так учит квантовая механика). Поэтому только наличие спина частиц могло приводить к дробной (полуцелой) величине полного момента системы. Наконец, полезно еще напомнить, что заряды всех частиц равны заряду электрона или протона (если частица вообще имеет заряд). Заряд электрона равен $4,80 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц, или $1,6 \cdot 10^{-19}$ кулона; чтобы набрать 1 кулон, надо взять $6 \cdot 10^{18}$ электронов. Заряды частиц удобно выражать в зарядах протона. В этих единицах все элементарные частицы имеют заряд $+1,0$ или -1 .

Это все, что надо знать, чтобы можно было перейти к рассказу о 30 элементарных частицах, которые известны современной физике.

Электроны и нуклоны

Если, уподобившись историкам, разбить физику элементарных частиц на периоды, то время первых опытов с электронами надо отнести к «древней истории». Тогда «средними веками» следует назвать период от открытия Резерфордом 50 лет назад атомного ядра до открытия позитрона и нейтрона. С открытием странных частиц в физике элементарных частиц кончился период новой истории и началась история новейшая...

Событием, с которого надо начинать летосчисление, явился доклад английского физика Уильяма Крукса «Лучистая материя или четвертое состояние вещества», который он прочел в 1874 г. В этом докладе Крукс высказал мнение, что потоки катодных лучей есть не что иное, как потоки заряженных частиц. Как ни неправдоподобно было это высказывание (против него восстал даже знаменитый Герц), оно оказалось правильным, и первая частица через 17 лет получила греческое имя электрон (это имя дал ей Стоней). Через несколько лет физики смогли измерить заряд и массу электрона. Отношение этих двух величин e/m было определено еще в 1897 г. Дж. Дж. Томсоном, но только после того, как в 1909 г.

Милликен измерил заряд электрона, можно было узнать и значение его массы. Понадобилась работа почти целого поколения ученых — 35 лет, чтобы превратить в числа гипотезу Крукса.

В наше время все происходит значительно быстрее... Прошло еще 16 лет, и в 1925 г. Гаудсмитом и Юленбеком был открыт спин электрона — новое свойство, которое выявилось лишь тогда, когда были исследованы сложные закономерности в спектрах атомов. И, наконец, открытие позитрона в 1932 г. завершило длинную «биографию» электрона.

В 1911 г. в Манчестере началась история протона. В этом году Резерфорд открыл, что практически вся масса атома заключена в очень плотном ядре, находящемся в его центре. Ядро самого легкого атома — атома водорода заняло место в списке элементарных частиц и было названо протоном.

Вскоре были впервые оценены размеры ядер, это были первые измерения размеров в новом мире. Радиус ядра оказался меньшим, чем 10^{-12} см — в десятки тысяч раз меньше размеров атомов.

Годы, последовавшие за этим, были годами создания теории атома, завершившимися созданием квантовой механики. Они принесли успех не только теории, — невообразимо возросли и возможности эксперимента. Физики научились считать и «видеть» электроны и протоны; с этих пор все новейшие достижения техники сразу же становились достоянием физических лабораторий. Начался штурм атомного ядра.

Долгое время физиков угнетала невозможность понять, из чего состоит атомное ядро. Возьмем для примера ядро изотопа азота с атомным весом, или, вернее, с массовым числом¹ 14. Заряд ядра равен +7. Это значит, что в состав ядра входит 7 протонов. Но тогда его вес был бы также равен 7. Если же считать, что в ядре азота 14 находится 14 протонов, то не сойдется заряд. Выходом могло бы быть добавление к 14 протонам еще 7 электронов, которые компенсировали бы избыточные 7 единиц заряда. Однако из квантовой механики следовало, что электрону трудно находиться в столь малом объеме: размеры его орбит — атомные, около 10^{-8} см. Но главная трудность была не в этом. Если серьезно отнестись к такой модели, то ядро азота 14 окажется составленным из 21 частицы (7 электронов и 14 протонов). Вспоминая, что мы говорили о спине, следовало бы ожидать, что спин азота должен быть полуцелым: спин протона, так же как и электрона, равен $1/2$, а движение частиц внутри ядра, как мы уже говорили, добавляет к моменту количества движения всего ядра лишь целое число.

¹ Маленьким отклонением атомного веса от целого числа — дефектом массы — мы пренебрегаем. Такой округленный атомный вес — ближайшее целое число — называют массовым числом.

Спин азота 14 был известен — он равен единице, и это противоречило квантовой механике уже самым решительным образом. Положение казалось безвыходным. Эта печальная история получила название «азотной катастрофы». В этой «катастрофе», однако, ничего не погибло. Как это случалось еще не раз впоследствии, физики пытались строить мир лишь из тех материалов, о которых они знали; действительность была сложнее.

В 1932 г. была открыта нейтральная частица — нейтрон, и от азотной катастрофы не осталось и следа. Азот 14 состоит из 7 протонов и 7 нейтронов; все полуцелые спины погасили друг друга, и не было никакой надобности заставлять электроны занимать несвойственное им место внутри ядра.

Нейтрон оказался очень похожим на своего партнера — протона. Его масса была лишь немного больше, спин тоже $1/2$, а силы, с которыми протоны и нейтроны притягивались друг к другу в ядре, почти не зависели от сорта частиц. Это последнее очень важное свойство получило специальное название «зарядовой независимости ядерных сил». Оно играет фундаментальную роль в мире элементарных частиц.

С точки зрения строения ядра, заряд протона играет сравнительно небольшую роль, поэтому и протоны и нейтроны получили общее название нуклонов. Порядковое число элемента в периодической системе Менделеева — это число протонов в ядре его атома, а округленный до целого числа атомный вес есть число нуклонов в этом ядре. Так выявился физический смысл пророческой теории великого русского химика.

Открытие нейтрона (и позитрона) завершило большой этап понимания основных свойств атомных ядер. Перейдя от атомов к ядрам, а от ядер к нуклонам, физики разбили вещество на элементарные составляющие, и картина мира в это время выглядела крайне совершенной и законченной.

Но подобно тому, как в средние века люди не знали, что на земле есть много мест, где не бывал европеец, и что впереди их ожидает эпоха великих открытий, так и физики, вероятно, не подозревали, что это благополучие только временное и что последующие открытия покажут им новый мир, гораздо более сложный и более интересный. Для этого надо было только начать исследовать нуклоны и силы, которые их удерживают в ядре. К счастью для физиков, природа предоставила в их распоряжение необыкновенное по своему богатству средство исследования — космические лучи. Надо было только научиться их использовать.

Космические лучи были известны сравнительно давно. Их открыл еще в 1912 г. немецкий физик Хесс. Но только после того, как в их составе были обнаружены позитроны, изучение космических лучей стало основным методом открытия и исследования свойств элементарных частиц.

Фотон не сразу занял свое место в списке элементарных частиц — слишком уж он отличался по своим свойствам от нуклонов и электронов. С одной стороны, сравнительно давно было известно, что свет излучается квантами — фотонами. Открытие этого явления Планком и объяснение с его помощью Эйнштейном фотоэффекта, открытого А. Г. Столетовым, послужило начальным этапом квантовой физики.

Однако фотоны ведут себя странно, если сравнить их, например, с электронами. Прежде всего у них нет массы покоя, они всегда движутся со скоростью света. Это, конечно, удивительное свойство, но теория относительности приучила нас к разным удивительным явлениям.

Более непривычно, что фотоны могут рождаться и уничтожаться. Фотон, столкнувшись с атомом, может превратиться в два фотона, а может и исчезнуть совсем. Таких явлений с электроном не бывает. Электрон может «исчезнуть», только столкнувшись с позитроном, но свободных позитронов в природе нет, и обычно электрон ни во что другое не превращается.

Для того чтобы оценить значение такого поведения фотонов, нам следует разобраться в том, что мешает другим частицам уничтожаться и рождаться произвольным способом. Это приведет нас к законам сохранения, которые и ограничивают многообразие процессов в мире элементарных частиц.

Если не считать наличие массы покоя и неуничтожаемость (сохранение числа частиц) необходимыми свойствами частицы, то не останется возражений против того, чтобы фотон считался частицей. Фотон имеет энергию, пропорциональную его частоте ($E = \hbar\omega$, где ω — частота в угловых единицах — число полных колебаний в 2π секунд), и количество движения, пропорциональное энергии ($p = \frac{1}{c} E$, где c — скорость света). Интересным свойством фотона является его поляризация. Так как свет есть колебания электромагнитного поля, то можно говорить о направлении колебаний, например, электрического (или магнитного) вектора. Так как этот вектор может колебаться только в направлениях, перпендикулярных движению фотона (распространению света), то легко выбрать два разных направления колебаний, из которых уже можно составить любое другое колебание.

Известно, что любое колебание в плоскости можно представить как сумму двух вращательных движений — одного по часовой стрелке, другого против часовой стрелки. Поэтому возможны два типа фотонов. Образно можно говорить, что движение одного фотона имеет симметрию обычного винта с

правой нарезкой: направление движения фотона описывается направлением движения ввинчивающегося винта, а направление вращения поля — направлением вращения винта. Такой фотон носит название левополяризованного фотона. Более удобно называть его фотоном с правой спиральностью или даже просто правым фотоном¹. Второй тип фотона похож в этом смысле на винт с левой нарезкой. Это правополяризованный фотон. Мы его будем называть левым фотоном. За исключением направления поляризации (спиральности) левый фотон не отличается по своим свойствам от правого. Атом излучает оба типа фотонов одинаково, так что в природе число фотонов обоих типов должно практически быть одним и тем же.

Поляризация фотонов, которую мы описывали винтом, напоминает нам описание спина с помощью волчка. Ясно, что винт нам понадобился для того, чтобы дополнить вращение поступательным движением, и что движение винта похоже на волчок, летящий в направлении своей оси. Эта аналогия поляризации и спина имеет глубокую физическую природу, и в физике часто говорят о спине фотона по аналогии со спином электрона.

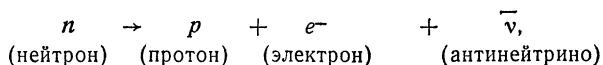
Позитрон и античастицы

Число электронов, как мы знаем, сохраняется не всегда. Они могут рождаться при радиоактивном распаде, могут исчезать при столкновении с позитронами. Фотон в поле ядра может превратиться в пару электрон — позитрон. Наличие у электрона положительного партнера является первым случаем, когда мы столкнулись с античастицей. Естественно возник вопрос: а есть ли антинуклоны? Долго оставались бесплодными попытки обнаружить их на опыте. Они должны быть в космических лучах, а отличить их при больших энергиях можно только по аннигиляции, но и аннигиляцию трудно отличить от столкновения нуклона с очень большой энергией — ведь энергии в тысячи *Мэв* обычное явление в космических лучах.

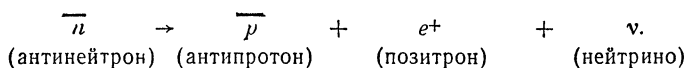
Только в 1955 г. на ускорителе в Беркли Сегре и Чемберлен обнаружили, наконец, антипротон, а годом позднее на том же ускорителе был получен и антинейтрон. Может показаться с первого взгляда, что антинейтрон не должен отличаться

¹ В оптике издавна принято называть левополяризованным фотоном такой фотон, у которого электрический вектор вращается против часовой стрелки, если фотон летит *на* наблюдателя; в современной физике такой фотон называют правым, так как наблюдателя располагают так, что фотон летит *от* него.

от нейтрона. Это неверно. Он отличается прежде всего по типу своего распада. Если нейтрон распадается так:



то антинейтрон распадается иначе:



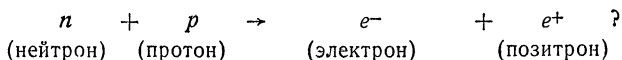
Это отличие можно проиллюстрировать и на другом примере. Представим себе атом, состоящий из антипротона и позитрона. Такая система — антиводород — нейтральна. Атом водорода, состоящий из протона и электрона, — тоже нейтральная система. Но одна из этих систем под действием фотонов разваливается на протон и электрон, а другая — на антипротон и позитрон. В этом и проявляется их различие.

Основным же свойством антинуклонов — антипротонов и антинейтронов является то, что при столкновении с нуклоном они аннигилируют, выделяя огромное количество энергии. Эта энергия в основном выделяется в виде пионов. Покоящиеся нуклон и антинуклон выделяют при аннигиляции почти 2000 Мэв энергии. Это $3 \cdot 10^{-3}$ эрг — величина вполне ощутимая даже на нашей макроскопической шкале (химические реакции дают энергию, в миллиарды раз меньшую).

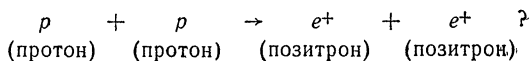
Могло бы показаться, что антинуклон должен аннигилировать и при столкновении с электроном. Однако это не так. Оказывается, электроны могут аннигилировать только с позитронами и с антинейтрино, а нуклоны с антинуклонами. Существует какой-то запрет, который не позволяет исчезать лептонам за счет антинуклонов и нуклонам за счет антилептонов. Это важный запрет, к нему мы и обратимся.

Устойчивость ядер

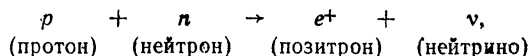
Мы отметили, что нуклон и антинуклон аннигилируют. Естественно спросить, почему не могут аннигилировать два нуклона. Что мешает тому, чтобы нейтрон и протон превратились, например, в электрон и позитрон:



Этому мешает электрический заряд, точнее, закон его сохранения. Нейтрон и протон имеют суммарный заряд +1, а позитрон и электрон в сумме заряда не имеют. Но что же мешает тогда осуществлению другой реакции:



Мы можем быть совершенно уверены, что такой реакции в природе не существует. В противном случае все протоны в ядрах давным-давно бы исчезли. Невозможность такой реакции и ей подобной:



очевидно, является необходимым условием стабильности ядер, а вместе с тем и условием существования нашего мира. Мы уже готовы к тому, что нельзя (по крайней мере сейчас) ответить на вопрос, почему это так. Собственно, также нельзя ответить на вопрос, почему сохраняется электрический заряд. Мы должны принять закон сохранения электрического заряда как один из основных законов мира, установленных опытом. Этот закон можно, очевидно, формулировать так, что разность между числом положительно заряженных частиц и числом отрицательно заряженных частиц сохраняется во всех процессах.

Из опыта можно также заключить, что существует еще один не менее важный закон сохранения — закон сохранения числа нуклонов. Мы должны, однако, так сформулировать этот закон, чтобы ему не противоречило явление аннигиляции. Для этого необходимо условиться, что при счете числа нуклонов следует выбрасывать все пары нуклон — антинуклон. Иначе говоря, считая число нуклонов, мы должны все антинуклоны брать со знаком минус. Так как непривычно говорить об отрицательном числе частиц, то оказывается более удобным воспользоваться аналогией с зарядом и называть эту величину не числом нуклонов, а нуклонным зарядом, приписывая нуклону «заряд» $+1$, а антинуклону «заряд» -1 . Тогда вместо числа частиц мы будем говорить о величине нуклонного заряда и вместо сохранения числа частиц (под которым мы понимаем сохранение разности числа частиц и числа античастиц) говорить о сохранении нуклонного заряда.

Такая аналогия, однако, не распространяется слишком далеко, и величина нуклонного заряда не связана непосредственно с силами, как это справедливо для заряда электрического. Нуклонный заряд введен только как удобный способ формулирования закона природы, который обеспечивает устойчивость ядер. К сказанному можно добавить еще, что лептонам следует приписать нуклонный заряд, равный нулю, так же, как мезонам и фотону.

Ядерные силы и мезоны

После того как физики выяснили, из каких частиц состоят ядра, и ликвидировали «азотную катастрофу», возник новый вопрос: почему нейтроны и протоны удерживаются внутри

ядра, а не разлетаются в разные стороны друг от друга? Пока думали, что в ядре находятся электроны, такого вопроса не возникало.

Электроны притягиваются к протонам и таким образом, по крайней мере в принципе, они могли бы «склеивать» ядра. В действительности, как мы говорили, электроны не могут даже сами удержаться внутри ядра.

Открытие нейтрона немедленно привело к вопросу о природе сил, которые заставляют нейтрон притягиваться к протону. Эти силы получили название ядерных сил.

Вначале о ядерных силах знали только то, что они действуют тогда, когда расстояния между нуклонами малы, порядка 10^{-13} см или меньше, но на таких расстояниях ядерные силы весьма велики, превышая в тысячи раз электрическое притяжение между электроном и протоном (на тех же расстояниях).

Однако ввести новые силы в физику в XX веке — дело не такое простое, как в XIX веке. Теория относительности научила, что никакое воздействие одной частицы на другую не может быть мгновенным; самое большое, оно может передаваться со скоростью света (300 000 км/сек).

Как ни велика эта скорость, все же для того, чтобы передать взаимодействие между двумя нуклонами, нужно некоторое конечное, хотя и очень малое время. Отсюда с необходимостью уже следует (как учит квантовая механика), что должно существовать новое поле, колебания которого передают ядерное взаимодействие, так же как электромагнитное поле передает взаимодействие движущихся зарядов.

Но, допустив существование такого поля, физики уже не могут этим ограничиваться. С абсолютной необходимостью они должны заключить, что новое поле может излучаться и поглощаться только порциями — квантами. Это значит, что должны существовать новые частицы — кванты поля ядерных сил. Мы видим, как сравнительно безобидное предположение о силах приводит чисто логическим путем к существованию новой частицы. Можно задать вопрос: почему новой? Быть может, функцию передачи взаимодействия выполняют уже известные частицы?

И. Е. Тамм предложил первую теорию ядерных сил. Он предположил, что силы между нуклонами передаются электронами и антинейтрино, излучаемыми, как при бета-распаде ядер. Идея Тамма обсуждалась и Д. Д. Иваненко. Однако расчет показал, что такие силы оказывались слишком малы, чтобы ими можно было объяснить существование ядер. Физическая картина мира казалась физикам (уже в который раз!) настолько полной, что ни у кого не хватало смелости говорить о новых частицах для объяснения ядерных сил.

Лишь в 1936 г. молодой японец Х. Юкава исправил теорию

Тамма. Он показал, что из свойств ядерных сил следует, что их может переносить только новая частица и масса этой новой частицы должна быть больше электрона примерно в 200—300 раз.

Заслугой Юкавы было то, что он не побоялся объявить, что другого выхода, кроме как допустить существование новой частицы, в физике нет. Более того, он показал, где искать эту новую частицу, — ее надо искать в космических лучах, там, где в свое время был открыт позитрон.

В 1938 г. такая частица была открыта. Второй раз в истории физики неполадки в теории приводили к открытию частицы. Один раз это сделал Дирак, второй раз Юкава. Новая частица была открыта Андерсоном и Неддермайером и получила название мезона¹.

К 1940 г. триумф физики казался полным, все явления связывались в красивую и очень простую схему. Несколько смущало лишь то, что были найдены положительно и отрицательно заряженные мезоны (величина заряда была, конечно, равна зарядам позитрона или электрона), но не было обнаружено нейтрального мезона. Это было плохо. Действительно, протон мог излучать только положительный мезон и превращаться в нейтрон, который после этого превращался в протон. Очевидно, что протон не мог излучить отрицательный мезон или поглотить положительный мезон, а нейтрон не мог поглотить отрицательный мезон и излучить положительный. Если бы это было разрешено, то протон превращался бы в дважды заряженную частицу, которой не существует в природе, а нейтрон превращался бы в антипротон, что запрещено законом сохранения нуклонов. Единственный обмен между двумя нуклонами (1 и 2) мог происходить по схеме:

1-й этап: 1-й протон \rightarrow 1-й нейтрон + положительный мезон;

2-й этап: положительный мезон + 2-й нейтрон \rightarrow 2-й протон.

Для того чтобы объяснить и силу, действующую между одинаковыми нуклонами, необходимо было найти незаряженный мезон. Однако этот мезон (его даже называли заранее — нейтретто) искали упорно, но найти не могли.

Вся эта история окончилась почти водевилльно — оказалось, что физики нашли не тот мезон. Одними из первых обратили на это внимание А. И. Алиханов и А. И. Алиханьян. Изучение космических лучей привело их и некоторых других физиков к мысли, что одним мезоном дело не ограничивается, а в космических лучах должны существовать другие неизвест-

¹ Сначала новую частицу называли мезотроном по аналогии с электроном, но потом заметили, что последнее слово происходит от греческого «электрос», в то время как в мезотроне греческое «мезос» — среднее имеет окончание «трон», никакому языку не принадлежащее.

ные физике частицы. Эта уверенность становилась со временем все сильнее, пока, наконец, Поуэлл, усовершенствовав метод регистрации космических частиц с помощью фотографических пластинок, не обнаружил в 1947 г. новую частицу, несколько более тяжелую, чем мезон Андерсона.

Новая частица была названа π -мезоном. Интересно, что сначала были найдены даже две частицы — ро- и сигма-мезоны, — но они оказались просто положительно и отрицательно заряженными π -мезонами (для краткости будем писать π^+ - и π^- -мезон). Вскоре к ним прибавился почти такой же по массе незаряженный π -мезон.

Три мезона π^+ , π^- , π^0 оказались теми частицами, которые предсказывал Юкава. Их масса составляет $273 m_e$ (π^+ и π^-) и несколько меньше — $264 m_e$ (π^0). Старый мезон с массой 206 получил название μ -мезон (μ^+ и μ^- соответственно), и так как он в конце концов к ядерным силам отношения не имеет, то его отнесли в группу лептонов и сохранили за ним имя мезона лишь как напоминание о былой славе. При современной экономии в словах эти частицы стали называть еще короче — пионами и мюонами.

Пионы и мюоны все же оказались не совсем чужими друг другу. Пион — частица неустойчивая и распадается по схеме:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu; \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}.$$

Нейтральный пион распадаться так не может, ибо нет нейтрального мюона. Он распадается на два фотона:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Время жизни пиона невелико. В покое π^+ и π^- распадаются в среднем за $2 \cdot 10^{-8}$ сек., а π^0 даже за еще меньшее время — около $2 \cdot 10^{-16}$ сек. Мы подчеркнули слово «в покое», так как из теории относительности следует, что движущаяся частица будет распадаться медленнее во столько раз, во сколько ее полная энергия больше ее энергии покоя. Движущийся пион живет (как и другие движущиеся частицы) дольше. «Парадокс часов» — замедление их хода в движущейся системе координат — был впервые ярко проиллюстрирован наблюдениями распада движущихся мезонов.

Положительные и отрицательные пионы относятся друг к другу, как частицы и античастицы. Для нейтрального пиона античастицы (подобной антинейтрону) найдено не было; теория показала, что ее и не может быть — в этом смысле π^0 подобен фотону. Принято говорить, что нейтральный пион тождествен со своей античастицей. Такие частицы удобно называть истинно нейтральными.

Размеры частиц

Если заказать столяру, например, диван с заданными размерами в сантиметрах, то никакого недоразумения возникнуть не может. Соответствующие числа означают отношение

между, скажем, длиной дивана и длиной стандартного метра—отношение, которое можно непосредственно измерить, прикладывая метр к дивану. Даже измерение очень больших расстояний на земле сводилось к сравнению этого расстояния с уложенным вдоль пути измерительным прибором.

Для атомных расстояний деревянную линейку сделать трудно. Как измерить расстояние между атомами хлора и натрия в обыкновенной столовой соли, если нельзя сделать линейку из более мелких частиц? Для таких измерений физики научились сравнивать отрезки не с линейкой, а с длиной волны света (рентгеновских лучей). Одна из линий спектра криптона (изотопа криптона с массовым номером 86) служит сейчас даже основным стандартом длины.

Но при измерении расстояний между атомами в кристалле надо, конечно, иметь в виду, что атомы колеблются вокруг своих положений равновесия, и расстояние, которое мы измерим, будет только средним расстоянием, усредненным по многим положениям атомов. Когда мы будем переходить к меньшим размерам, задача еще более усложнится. Поэтому, прежде чем отвечать на вопрос о том, какой размер могут иметь элементарные частицы, надо, во-первых, попытаться определить, что мы понимаем под самим словом «размер» в применении к столь малым объектам, и, во-вторых, выяснить, как такие размеры можно в принципе измерить.

Первые измерения длины в микромире были сделаны в тех самых опытах Резерфорда, которые привели к открытию атомного ядра. Напомним идею этих опытов. Резерфорд направил пучок альфа-частиц, вылетающих из радиоактивного источника RaC' (изотопа полония с массовым числом 214), на металлическую пластинку. При прохождении альфа-частиц через такую пластинку они отклонялись от своего пути электрическим полем ядер.

Если поле ядра отвечает электрическому полю заряженной точки, то можно вычислить, как должна отклоняться альфа-частица от своего пути. Такое вычисление показывает, что практически нельзя наблюдать случаев отклонения альфа-частиц на большие углы. Вероятность отклонения, например на угол 90° , практически равна нулю. Вопреки ожиданию Резерфорд наблюдал такие случаи отклонения в сравнительно большом количестве. Картина, описанная Резерфордом, выглядела так, как будто альфа-частица наталкивается в центре атома на какую-то преграду. Отсюда прямо следует, что поле ядра не есть поле заряженной точки. Эти соображения и явились исходными для построения модели атома с атомным ядром в центре. Зная энергию альфа-частиц, можно было вычислить расстояние, на которое альфа-частица могла проникнуть в атом, и на каком расстоянии столкновение с плотным ядром вызвало столь резкое изменение направления ее движения.

Первые расчеты показали, что для альфа-частиц, которые проходят от центра атома на расстояниях больших, чем $3 \cdot 10^{-12}$ см, поле ядра не отличается от поля точечной частицы и только при более глубоком проникновении в атом прощупываются отклонения от простого закона Кулона. Так было установлено, что ядро атома имеет размеры, которые можно заметить на опыте, но эти размеры меньше, чем $3 \cdot 10^{-12}$ см.

Для нас сейчас важно отметить в этих результатах то обстоятельство, что размеры здесь определялись не точно, а как несколько неопределенное расстояние, на котором начинает замечаться отклонение распределения электрического поля от поля точечной частицы. Ясно, что такие отклонения возникают постепенно и что граница ядра не может быть очень резкой.

Действительно, сейчас хорошо известно, что в то время как размеры ядер лежат в пределах от $2 \cdot 10^{-13}$ до 10^{-12} см, граница ядра размытая и представляет собой «оболочку» толщиной около 10^{-13} см. С этой точностью и можно говорить о размерах ядер. Такое же положение существует и для элементарных частиц. Но для того чтобы можно было измерить размеры самого простого ядра — протона, надо было использовать значительно более мощное средство, чем пучок альфа-частиц RaC' . Только после того как физики получили в свое распоряжение ускорители электронов, стало возможным исследовать и размеры протона. Первые сведения были получены из экспериментов по рассеянию протонов протонами. При больших энергиях они рассеивались так, как будто были шариками с радиусами примерно $0,5 \cdot 10^{-13}$ см. Этот вывод был подтвержден прямыми опытами Хофштадтера в 1955 г., который изучал рассеяние электронов с энергией 100 Мэв протонами. В результате большой работы было показано, что радиус протона составляет около $0,7 \cdot 10^{-13}$ см. Примерно такой же радиус имеет и нейтрон.

В последнее время точность опытов настолько возросла, что стало возможным говорить о более детальной характеристике строения протона. Сейчас становится понятным распределение заряда по объему протона и даже распределение электрических токов, которые порождают магнитный момент протона. Сходные результаты получены и для нейтрона.

Описанные ранее свойства ядерных сил позволяют понять и природу размеров нуклонов. Как это следует из современной теории мезонного поля, протон и нейтрон непрерывно превращаются друг в друга:

$$\begin{aligned} \text{нейтрон} &\rightarrow \text{протон} + \pi^-, \\ \text{протон} &\rightarrow \text{нейтрон} + \pi^+. \end{aligned}$$

Такое взаимное превращение происходит с большой частотой. Эта частота определяется массой пиона m_π и равна по порядку величины $\frac{m_\pi c^2}{\hbar} = 10^{23}$ превращений в секунду. За вре-

мя около 10^{-23} сек. пион может отойти от центра ядра на расстояние порядка 10^{-13} см, если он движется со скоростью, близкой к скорости света. Эффект непрерывного излучения и поглощения приводит к наблюдаемому «размазыванию» заряда и появлению мгновенных (или, как принято говорить, виртуальных) электрических токов¹.

Таким образом, в объемах радиусом меньше 10^{-13} см нуклон перестает выступать как отдельная частица; на этих расстояниях обнаруживается сложный динамический процесс взаимодействия нуклона с «пионным облаком», детали которого только начинают вырисовываться перед наукой.

О размерах других элементарных частиц сейчас ничего сказать нельзя. Принято думать, что размеры мезонов и гиперонов по крайней мере не меньше нуклонных, но этого еще никто не доказал экспериментально.

Очень интересный и важный вопрос: имеют ли размеры электроны? Решение его тесно связано с решением вопроса о том, каковы границы справедливости электродинамики. Если размеры электрона имеют заметную величину, то это значит, что при описании свойств электромагнитного поля на таких расстояниях мы должны принимать во внимание, что носители тока не точечные, и учитывать их размеры.

Различные теории приводят к разным взглядам на размеры электрона. Некоторые считают, что электрон по величине мало отличается от протона, некоторые же, напротив, считают, что его размеры исчезающе малы. Это очень интересная и важная проблема. Ее решение связывают, в частности, с постройкой ускорителей, которые будут давать два сталкивающихся пучка электронов большой энергии. В таких лобовых столкновениях можно будет прощупать и структуру электрона.

Мы знали, что расстояние порядка 10^{-13} см действительно является некоторой границей двух миров. На этой границе кончаются неизменные элементарные частицы и начинается новый бурлящий мир, к исследованию которого мы только еще приступаем.

Длина 10^{-13} см заняла сейчас роль важного масштаба. Ее называли «ферми» (1 ферми = 10^{-13} см) в честь великого итальянского физика Энрико Ферми, одного из создателей физики атомного ядра и элементарных частиц.

Бета-распад и нейтрино

Одной из самых удивительных частиц, несомненно, является нейтрино. Придуманная теоретиками для того, чтобы «спа-

¹ Возникший пион не может совсем вылететь из нуклона, так как этому мешает закон сохранения энергии. Описанный процесс отвечает колебаниям поля ядерных сил, окружающих нуклон.

сти» закон сохранения энергии, она с самого начала была разделена такими свойствами, что наблюдать ее казалось в то время почти невозможным.

История нейтрино началась с того, что в бета-распаде ядер обнаружилось несохранение энергии. Возьмем, например, нейтрон (в то время, конечно, речь шла о тяжелых ядрах). Распадаясь, он превращается в протон и испускает электрон. Согласно закону сохранения энергии энергия электрона при таком распаде должна в точности равняться разности масс нейтрона и протона, умноженной на квадрат скорости света. В действительности же электроны, вылетающие при таком распаде, имеют энергию всегда меньшую, чем вычисленная по закону сохранения энергии, причем в разных случаях распада разную. Перед физиками возникли два пути: один — отвергнуть закон сохранения энергии; это было, конечно, решение кардинальное, его долго обсуждали, но в конце концов не приняли. Второй путь оказался правильным. Швейцарский физик Паули объяснил странное поведение электронов при бета-распаде тем, что вместе с электроном вылетает еще одна частица, такая же легкая (или еще легче), как электрон, но не имеющая заряда. Эта частица называется теперь антинейтрино. Сначала ее называли нейтрино — сейчас это название присвоено частице, сопутствующей позитронному распаду (например, распаду изотопа кислорода с массовым числом 14: $O^{14} \rightarrow N^{14} + e^+ + \nu$).

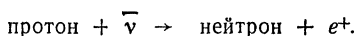
Антинейтрино, как теперь известно, вовсе не имеет массы, и в этом смысле оно похоже на фотон. Спин антинейтрино равен $1/2$; в этом оно похоже на электрон.

Энергия антинейтрино в сумме с энергией электрона точно равна разности масс нейтрона и протона, но так как эта энергия может по-разному распределяться от распада к распаду между электроном и антинейтрино, то и энергия электрона оказывается разной. Это объяснение делает сразу же понятным, почему электрон, возникающий при бета-распаде, не может иметь сколь угодно большой энергии.

Доказательство существования антинейтрино выглядело несколько странным: все аргументы сводились к простоте объяснения картины бета-распада, но не было видно, каким образом можно наблюдать антинейтрино, как его зарегистрировать. Это казалось невозможным. Ведь все свойства антинейтрино были придуманы так, чтобы объяснить, почему его никто не заметил раньше. Однако способ был найден. Советский физик А. И. Лейпунский заметил, что если наблюдать отдачу протона — скорость, с которой он образуется, то, очевидно, отдача будет разной в зависимости от того, вылетел ли при бета-распаде один электрон или две частицы — электрон и антинейтрино. Поэтому, измеряя скорости протонов, можно выяснить, вылетает ли при распаде одна частица или две.

К сожалению, экспериментальная техника в то время была недостаточно развита, и Лейпунский не смог проделать точного опыта. Такой опыт был проведен лишь в 1948 г. Аллсом.

Но как ни красив был опыт Лейпунского, все же надо было и непосредственно наблюдать взаимодействие антинейтрино с веществом. Это была одна из самых трудных задач, поставленных перед физиками. Возможность ее решения появилась только после создания атомных реакторов и единственный путь состоял в наблюдении реакции, обратной бета-распаду нейтрона. Для этого надо антинейтрино, вылетающие из ядерного реактора (где происходит очень много бета-распадов), направить на большой сосуд, содержащий вещество, в состав которого входит много водорода. Тогда под действием антинейтрино протон превращался бы в нейтрон и излучал бы позитрон:

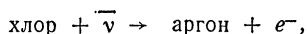


Эта реакция очень редкая. Антинейтрино должно пройти в жидкости путь в десятки тысяч километров, чтобы произошла одна реакция. Поэтому, чтобы наблюдать его в лаборатории, надо было иметь очень много антинейтрино (для этого и нужен реактор) и вести опыт достаточно долго.

Такой опыт был действительно проведен Рейнесом и Коуэном. Ядерную реакцию, вызванную антинейтрино, удалось зарегистрировать примерно через 30 лет после открытия антинейтрино теоретиками.

Реакции, вызванные антинейтрино, позволили доказать, что нейтрино и антинейтрино разные частицы. Б. Понтекорво предложил это выяснить так. Антинейтрино может вызывать позитронный распад протона, и, следовательно, оно не может вызывать электронного распада ядра, так как такой распад может быть вызван только нейтрино. Это есть изложенное другими словами утверждение, что нейтрино вылетает при позитронном распаде, а антинейтрино вылетает при распаде электронном.

Если вопреки этому предсказанию антинейтрино, получаемые из реактора, могут вызывать электронный распад, например реакцию Понтекорво:



то это будет означать, что нейтрино и антинейтрино обладают одинаковыми свойствами и нет смысла их различать. Опыт показал, что реакция Понтекорво не происходит. После этого уже нельзя было сомневаться, что есть два сорта такой нейтральной частицы.

Постепенно все больше и больше выясняется, что частица, само существование которой подвергалось сомнению, оказы-

вается, играет весьма важную роль в нашем удивительном микромире. История нейтрино в этом смысле очень поучительна.

По-видимому, роль нейтрино велика и в процессах эволюции Вселенной. Когда в недрах звезд рождаются новые элементы, когда там бурно протекают ядерные реакции, при этом возникает много нейтрино. Хотя эти реакции происходят на большой глубине, нейтрино свободно вылетают наружу и уносят таким образом энергию из звезды во Вселенную. Такая утечка энергии может оказаться существенным механизмом охлаждения звезды.

Ядерные реакции, происходящие на Солнце, порождают большой поток нейтрино. Поток их на Земле должен составлять 10^{11} частиц, проходящих через каждый квадратный сантиметр в секунду. При этом нейтрино проходят Землю насквозь и опять улетают в мировое пространство. Сколько нейтрино и антинейтрино содержится в мировом пространстве? Этого никто не знает. До сих пор не замерен даже поток «солнечных» нейтрино.

Уже несколько раз нейтрино преподносило физикам сюрпризы. Быть может, в будущем откроются новые свойства нейтрино, и их роль в эволюции нашей Вселенной в действительности окажется более существенной, чем просто роль «мусора», который рассеивает энергию звезд и не играет никакой активной роли. Физика нейтрино родилась совсем недавно, и мы вправе ожидать от нее много новых открытий.

Загадка мюона

Мы рассказали, как открытие мезона запутало физиков и как оказалось, что вовсе не он ответствен за ядерные силы. После открытия π -мезона, или пиона, интересы всех обрагались к этой новой частице — действительному переносчику ядерных сил. Старый же мезон под новым именем μ -мезона, или мюона, остался на некоторое время в тени.

Источником мюонов являются пионы, которые распадаются на мюон и нейтрино:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}.$$

Эти распады происходят очень быстро. Остановившийся пион (мы подчеркиваем «остановившийся», так как быстро летящий пион будет жить дольше) живет в среднем $2,6 \cdot 10^{-8}$ сек. (1/50 микросекунды).

На первый взгляд могло бы показаться, что нейтральный пион должен распасться на нейтральный μ^0 -мезон, но мы уже знаем, что это не так; π^0 -мезон распадается на два фотона. Если посмотреть на схему распада внимательно, то видно, что нейтральному пиону не просто распасться на μ^0 , так как непо-

нятно, какой должна быть вторая нейтральная частица. Так как ν и $\bar{\nu}$ различные частицы, то для распада $\pi^0 \rightarrow \mu^0$ надо было бы придумывать еще третью частицу—нейтрино, которая совпадала бы со своей античастицей. И действительно, несмотря на поиски, которые велись долгие годы, нейтральный мюон обнаружен не был. Сейчас уже все примирились с тем, что есть тройка пионов и только пара мюонов. Все лептоны, таким образом, существуют парами: μ^+ и μ^- , e^+ и e^- , ν и $\bar{\nu}$.

μ -мезон сам по себе живет недолго. Покоящийся μ -мезон распадается в среднем за 2 микросекунды ($2 \cdot 10^{-6}$ сек.). Схема его распада своеобразна; он распадается на три частицы—электрон, нейтрино и антинейтрино:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu},$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}.$$

Другие процессы, при которых бы вылетела пара нейтрино, не известны. Это также особое свойство мюона. На первых порах всем казалось, что у мюона должны быть и другие способы распада, например такой:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + e^- + e^+,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + e^+ + e^-.$$

Но такого распада никто никогда не видел. Почему его нет, непонятно!

Казалось бы, что мюон может распадаться на электрон и фотон:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma,$$

но и такого распада никто не видел. В то же время более сложный распад

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} + \gamma,$$

хотя и очень редко, но происходит.

Эти загадки возникли сразу, как только стали расширяться заброшенные исследования мюона. Разрешить их не легко. Один из остроумных способов был предложен Понтекорво, который пошел по пути Паули — по пути изобретения новой частицы.

Для того чтобы распады, записанные выше, были бы невозможны, оказывается, достаточно предположить, что нейтрино, вылетающие при распаде мюона и бета-распаде, разные. Более того, надо сказать, что при распаде электрон всегда должен сопровождаться своим «электронным» нейтрино, а мюон своим «мюонным» (обозначим их ν_e и ν_μ). Тогда распад мюона идет по схеме

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

При таком предположении распада без нейтрино оказываются невозможными, если к этому добавить, что оба сорта нейтрино настолько разные, что они не могут аннигилировать. В этом случае, например, существование распада $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$ означало бы, что ν_μ и $\bar{\nu}_e$ могут превратиться в фотон вопреки нашему предположению.

Как проверить эту гипотезу? Ясно, что для этого надо установить, что пучок «мюонных» антинейтрино в отличие от обычных «электронных» (из реактора) не может вызвать реакцию превращения протона в нейтрон. Так ли это, покажет опыт.

Интерес к мюонам сейчас возрос, и надо думать, что ближайшие несколько лет многое добавят к пониманию свойств этой несколько таинственной частицы. А мюон достаточно таинствен. Его свойства очень похожи на свойства электрона — недаром мюоны и электроны отнесены к одной группе лептонов. Только мюон в 200 раз тяжелее электрона. В чем причина столь большого сходства (или столь большой разницы в массе), непонятно. Вообще непонятно, какую роль играет мюон в природе. Он живет мало, сравнительно слабо взаимодействует с веществом и в общем служит лишь промежуточным пунктом в цепи распада пиона:

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu \rightarrow e^+ + \nu + \nu + \bar{\nu}, \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu} \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu} + \bar{\nu}.\end{aligned}$$

Хотя не очень ясно, можно ли спрашивать у природы, зачем существует что-то, но все-таки мы привыкли к тому, что все частицы участвуют в каком-то сложном процессе, и не хочется предполагать, что мюон является лишним в картине микромира, не играющим в ней никакой роли. В чем же состоит эта роль? Этот вопрос и представляет собой одну из тех задач, которые поставили в тупик физиков.

Странная история

Если не обращать внимания на непонятное назначение мюона, то после открытия пиона все стало на свои места. Каждая частица несет свои обязанности, и на этот раз не было никакой необходимости в новых частицах.

И все-таки неизвестным оказался целый новый мир. Когда на фотопластинках были найдены следы неведомых частиц, это было настолько удивительным, что о них говорили как о странных частицах. Такое несколько ироническое название так и осталось за ними, а американский физик Гелл-Манн, который первым увидел порядок в этом странном мире, даже ввел новый термин «странность», которым описывают нечто аналогичное заряду в мире «обычных» частиц.

Таким образом появились частицы с разной странностью, а о старых частицах стали говорить, как о частицах со странностью, равной нулю (это на языке физиков означает в конце концов просто, что частицы обычные).

Население нового мира, как теперь выяснилось, состоит из частиц тяжелых, с массой больше массы нуклонов — их называли гиперонами, и новых сортов мезонов — K -мезонов, или каонов. Каоны бывают положительно заряженными и нейтральными, а антикаоны — отрицательными и тоже нейтральными. В этом смысле они похожи не на пионы, а скорее на электроны и нейтрино (частицы e^- и $\bar{\nu}$, античастицы e^+ и ν). Но каоны не имеют спина, и в этом смысле они похожи на пионы. По массе же они почти в 3 раза тяжелее пиона; их масса равна примерно 970 электронным массам.

Гипероны также устроены необычно. Они явно составляют две группы. В одну из них входит нейтральный лямбда-гиперон (гипероны было решено обозначать прописными греческими буквами) и три сигма-гиперона: положительный, отрицательный и нейтральный. Массы этих гиперонов сравнительно близки друг к другу (Λ имеет массу 2180 электронных масс, Σ — около 2330; это больше массы протона). Разность масс гиперона и нуклона превышает массу пиона, а потому в странном мире встречается новая радиоактивность — пионная. Очень непривычно выглядят и античастицы. Антилямбда тоже нейтральна; есть еще три антисигмы, две из которых заряжены: антисигма-минус заряжена положительно, а антисигма-плюс отрицательно; третья антисигма — частица нейтральная.

Другая группа более похожа на нуклоны, но тяжелее их. Это кси-гипероны (Ξ) с массой 2580. Бывают отрицательно заряженные кси-минус и нейтральные кси-ноль гипероны. Их античастицы, очевидно, должны называться: антикси-минус (заряженная положительно; потому она называется просто кси-плюс) и антикси-ноль.

Все гипероны имеют спины, равные половине, так же как и нуклоны. Перечислим все 12 гиперонов еще раз: Λ , анти- Λ^0 , Σ^+ , Σ^- , Σ^0 , анти- Σ^+ , анти- Σ^- , анти- Σ^0 , Ξ^+ , Ξ^0 , Ξ^- и анти- Ξ^0 . Вместе с четырьмя каонами K^+ , K^0 , анти- K^0 и K^- они составляют 16 членов семейства странных частиц.

Необычность этого семейства проявляется с момента его открытия. Одной из первых загадок было то, что два нуклона, сталкиваясь друг с другом, не могли превращаться в гипероны, хотя для этого им вполне хватало энергии.

Так, несмотря на все старания, физики не могли обнаружить ни процесса

$$\text{нейтрон} + \text{нейтрон} \rightarrow \Lambda + \Lambda,$$

ни процесса

$$\text{нейтрон} + \text{нейтрон} \rightarrow \Lambda + \text{нейтрон}.$$

С другой стороны, при больших энергиях обнаружилась реакция:



Дело выглядело так, что гиперон не мог возникать в одиночку, а только в паре с каоном. Ясно, конечно, что гиперон может возникать и в паре с антигипероном, но для этого надо иметь большую энергию нуклонов (например, для процесса $\text{нуклон} + \text{антинуклон} \rightarrow \Lambda + \text{анти-}\Lambda$).

Это означало, что Λ -гиперон вместе с каоном может в принципе превратиться в нуклон, а один каон или один гиперон этого сделать не может. Почему этого не может сделать каон, это ясно. У каона нет нуклонного заряда и нет спина. Но Λ -гиперон имеет такой же нуклонный заряд и спин, как и у нуклона (иначе он не мог бы возникнуть и в паре с каоном). Значит у Λ -гиперона есть «что-то», что все же отличает его от нуклона. Это «что-то» и называли «странностью». Не следует удивляться, что вместо того, чтобы объяснить свойство частиц, физики ввели просто новое слово. Собственно говоря, это делалось и раньше — именно так вводилось понятие нуклонного заряда, сохранение которого не дает исчезнуть ядрам, так же вводилось и понятие электрического заряда, хотя его сохранение по привычке и кажется нам естественным свойством вещества.

Случилось так, что введенная по аналогии с другими зарядами странность оказалась очень продуктивным понятием, которое связало в одну простую схему множество необычных явлений. Поэтому «изобретение» Гелл-Манном «странности» явилось в действительности одним из самых важных открытий в физике элементарных частиц.

Странности всех частиц были измерены на опыте по законам их рождения. Странности, не равные нулю, имеют только гипероны и каоны. K^+ и K^0 имеют странность $S = +1$, K^- и анти- K^0 — странность $S = -1$.

Гипероны Λ и семейство Σ имеют странность $S = -1$, их античастицы $+1$. Наконец, гипероны Ξ имеют $S = -2$, а их античастицы $+2$. Может показаться, что странность отличается от других зарядов тем, что она принимает значения $0, \pm 1$ и ± 2 , в то время как остальные заряды принимают лишь значения 0 и ± 1 . Но это отличие только кажущееся. Можно было вместо странности ввести другое число (и его действительно вводили), которое представляет сумму нуклонного заряда и странности. Если вспомнить, что нуклонный заряд гиперонов $N = 1$, а нуклонный заряд каонов $N = 0$, то можно легко убедиться, что число $Z = N + S$ принимает действительно только значения 0 и ± 1 .

Существенно более важно другое отличие странности от зарядов. Странности не всегда сохраняются. Мы говорили, что,

например, лямбда-гиперон распадается на пион и нуклон; такой распад явно противоречит сохранению странности. Любопытно, что именно этот распад дал название Λ -гиперону: так как сам нейтральный Λ -гиперон не оставляет следа, то на снимке видна только вилка в виде буквы Λ , образованная треками отрицательного пиона и протона. Однако такие распады обладают важной особенностью. Они происходят сравнительно медленно. Покоящийся лямбда-гиперон распадается в среднем за $2,5 \cdot 10^{-10}$ сек. И все же это очень длинная жизнь в масштабах времен реакций.

Время образования гиперонов при столкновениях нуклонов — это время, за которое частица, движущаяся со скоростью света $3 \cdot 10^{10}$ см/сек, проходит расстояние порядка радиуса действия ядерных сил $1,5 \cdot 10^{-13}$ см, т. е. время порядка 10^{-23} сек. Λ -гиперон «живет», таким образом, в 10^{13} раз дольше. За это время он уйдет от места образования на расстояние около 1 см. Такой распад можно назвать медленным, а взаимодействие, ответственное за него, слабым. К медленным распадам относятся распады, о которых говорилось выше: бета-распад, распад пионов и мюонов.

Взаимодействие, ответственное за рождение пионов, каонов и гиперонов, надо тогда назвать сильным. Можно теперь уточнить понятие странности, сказав, что странность не сохраняется при слабых распадах. Сохранение странности, в отличие, например, от сохранения электрического заряда, закон не универсальный, а лишь приближенный, верный для процессов, за которые отвечает сильное взаимодействие.

Непонятным свойством странного мира остается то, какую роль он играет в строении ядра и вообще в физике микромира. Несомненно, что его существование связано с какими-то свойствами этого мира, до которых физики еще не добрались. Удивительные свойства странных частиц указывают на скрытые на очень малых расстояниях не известные нам процессы, изучение которых и явится задачей физики элементарных частиц на следующее десятилетие.

Гипероны

Рассмотрим теперь более подробно свойства различных гиперонов. Прежде всего условимся, что мы не будем говорить об антигиперонах, так как их свойства вполне аналогичны. Заметим только, что после открытия в Дубне анти- Σ^- -гиперона и в Италии анти- Σ^+ -гиперона на опыте не обнаружен только анти- Ξ^0 -гиперон.

Итак, мы будем говорить о гиперонах с отрицательной странностью: лямбда и сигма ($S = -1$) и кси ($S = -2$) и нуклонным зарядом, равным 1. Эти гипероны распадаются за время около 10^{-10} сек. (кроме Σ^0) по одной из схем:

$$\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0, \quad \Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-;$$

$$\Sigma^+ \rightarrow \begin{cases} n + \pi^+ \\ p + \pi^0 \end{cases}, \quad \Sigma^- \rightarrow n + \pi^-, \quad \Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma.$$

Все эти распады происходят, как мы уже упоминали, с нарушением закона сохранения странности. Странность нуклонов и пионов равна нулю, поэтому во всех распадах происходит изменение странности на единицу. Так как массы всех четырех гиперонов мало отличаются друг от друга, то Σ -гиперон не может по такой же схеме превратиться в Λ -гиперон (не хватает энергии для излучения пиона).

Самый тяжелый кси-гиперон распадается по схеме:

$$\Xi^- \rightarrow \begin{cases} \pi^- + \Lambda \\ \pi^0 + \Sigma^- \\ \pi^- + \Sigma^0 \end{cases}.$$

Аналогично может распадаться и нейтральный Ξ^0 -гиперон. Однако никому не удалось наблюдать случаев превращения кси-гиперона в нуклон, хотя энергии в этом случае с избытком хватило бы даже на образование двух пионов. Так что закон сохранения энергии не мешает существованию распадов типа

$$\Xi^- \rightarrow n + \pi^- + \pi^0.$$

Однако такие распады в природе не происходят. Это заставляет сделать не очень понятный вывод, что хотя странность при слабых распадах и не сохраняется, тем не менее она не может изменяться как угодно. Уже изменение на 2 единицы оказывается для нее невозможным.

Поэтому закон сохранения странности надо уточнить и формулировать его так: в сильных взаимодействиях странность сохраняется, в слабых — меняется на единицу. Это основной закон странного мира.

Можно теперь понять, как рождаются гипероны. Когда нуклон пролетает мимо другого нуклона, обе частицы находятся близко друг к другу слишком малое время, чтобы могла произойти реакция, обратная слабому распаду, и нуклон превратился бы, например, в лямбда-гиперон, поглотив при этом пион из пионного облака другого нуклона.

При столкновении рождение гиперонов может происходить только за счет сильного взаимодействия, т. е. только с сохранением странности. Поэтому лямбда- и сигма-гипероны образуются из нуклона (при столкновении его с ядром) одновременно с одним положительным каоном.

Кси-гиперон может образоваться из нуклона только вместе с двумя каонами, поэтому такой процесс требует большой энергии и наблюдается сравнительно редко. Кси-гиперон может в принципе родиться из столкновения лямбда- или сиг-

ма-гиперона с ядром вместе с одним каоном, но такой процесс наблюдать еще труднее, так как самих лямбда- и сигма-гиперонов рождается не очень много. Только в последний год на самых больших ускорителях начинают получать пучки гиперонов, и на очередь стала задача подробного изучения их взаимодействия с веществом.

Так как гипероны вообще очень похожи по своим свойствам на нуклоны (их вместе называют общим именем барионы), то надо было ожидать, что, как и нуклоны, гипероны могут распадаться с излучением электрона. Такой бета-распад гиперонов должен происходить по схемам:

$$\begin{aligned}\Lambda &\rightarrow p + e^- + \bar{\nu}, \\ \Sigma &\rightarrow n + e^- + \bar{\nu}.\end{aligned}$$

Электроны, вылетающие при бета-распаде гиперонов, должны обладать огромной энергией, доходящей до 100 Мэв и даже выше, и свойства распада при такой большой энергии представляли бы несомненный интерес. Напомним, что при обстреле нуклона электронами с энергией 100 Мэв Хофштадтер впервые заметил, что нуклон имеет размеры. В распаде гиперона электрон с такой энергией с самого начала находится вблизи гиперона, и на его поведении должна отразиться структура гиперона.

К сожалению, и это было большим разочарованием, распады гиперонов оказались настолько редкими, что за все годы удалось зарегистрировать лишь пару десятков случаев бета-распада лямбда-гиперона и всего несколько случаев (да и то сомнительных) бета-распада сигма-гиперона. Столь малое число резко расходится с предсказанием теории, и здесь возникла еще одна загадка: почему гипероны так неохотно излучают электроны?

Бета-распадов кси-гиперонов вообще никто не видел. Это, правда, частично объясняется тем, что самих кси-гиперонов мало, но, по-видимому, несколько загадочный запрет бета-распада у гиперонов связан с чем-то более глубоким и интересным.

В принципе, с гиперонами мог происходить и еще один не известный до сих пор тип распада — μ -распад — распад, подобный бета-распаду, в котором вместо электрона вылетал бы мюон (энергии на это хватает, так как гипероны достаточно тяжелые). Однако μ -распадов вообще никто не наблюдал. Почему это так, тоже не вполне понятно.

Исследование природы гиперонов — очень интересная задача. Может быть, гиперон есть возбужденное состояние нуклона, подобно возбужденному состоянию атома водорода? Может быть, существуют еще и более тяжелые гипероны? Эти и многие другие вопросы ждут своего решения.

Гиперядра

У гиперонов наблюдается интересное явление. Иногда при расщеплении ядра быстрой частицей из него вылетают наряду с нуклонами и мезонами осколки, которые через небольшой промежуток времени излучают пион. Объяснение этого явления состоит в том, что вылетающий осколок представляет собой, например, ядро трития (изотопа водорода с массовым числом 3), в котором один из нейтронов был заменен на лямбда-гиперон. Такое ядро получило название гипертрития. Гипертритий также является изотопом водорода, но он радиоактивен. За время около 10^{-10} сек. гипертритий излучает π -мезон. Новое явление π -радиоактивности ядер открыто совсем недавно и еще почти не изучено.

Кроме гипертрития, открыто еще несколько гиперядер — гипергелий 3 (изотоп гелия 3, в котором нейтрон замещен гипероном), гиперлитий, гипербериллий, гипербор и гиперуругрод. Однако до сих пор не удалось наблюдать самого простого представителя семейства гиперядер — гипердейтрона (системы из лямбда-гиперона и протона). Силы между этими двумя частицами оказываются постоянно настолько малыми, что они не могут связаться в одно ядро. Только с помощью третьей частицы — еще одного нейтрона, удастся объединить систему в сравнительно устойчивый гипертритий.

Каоны

Четыре ка-мезона, или каона, принесли с собой очень много новых явлений, их свойства разнообразны и непохожи на свойства их более легких партнеров — пионов. Рождаясь в процессах сильного взаимодействия вместе с гиперонами, они могут рождаться и парами K^+K^- или K^0 — анти- K^0 . Живут каоны недолго; все они распадаются, и распады их являются слабыми — медленными распадами. Отличительной чертой распадов каонов является их разнообразие. Возьмем, например, положительный каон, он может распадаться одним из семи способов (справа даны принятые названия распадов):

$$K^+ \rightarrow \begin{cases} \pi^+ + \pi^0 & 2\pi\text{-распад} \\ \pi^+ + \pi^0 + \pi^0 & 3\pi\text{-распад} \\ \pi^+ + \pi^+ + \pi^- & 3\pi\text{-распад} \\ e^+ + \nu + \pi^0 & 3e\text{-распад} \\ e^+ + \nu & 2e\text{-распад} \\ \mu^+ + \nu + \pi^0 & 3\mu\text{-распад} \\ \mu^+ + \nu & 2\mu\text{-распад} \end{cases}$$

Аналогичные распады существуют и для отрицательного и нейтрального каона. Такого разнообразия распадов не имеет ни одна частица. Потребовалось очень много труда и споров, пока было доказано, что множество разных распадов, реги-

стрируемых приборами, в действительности относятся к одной и той же частице.

С открытием нейтрального K^0 -мезона связано и открытие нового фундаментального явления — н е с о х р а н е н и я ч е т н о с т и.

Начало этого открытия лежало в неожиданно обнаруженной загадке, получившей название «тэта-тау проблема». Это было в ту пору, когда еще не было понятно, что все распады каонов есть распады одной и той же частицы. В это время распад на 2 π -мезона называли тэта-распадом и относили его к некой гипотетической Θ -частице, а распад на 3 π -мезона считали распадом другой — тау-частицы. То, что тэта и тау являются разными частицами, не вызывало никакого сомнения.

Довольно тонкие свойства, которые следовали из квантовой механики для частиц без спина (какой и является каон), не разрешали одной и той же частице распадаться двумя разными способами — на 2 и на 3 пиона с таким угловым распределением пионов, как это наблюдалось на опыте. Это, как говорили, противоречит «закону сохранения четности».

Чтобы объяснить, что это за закон, нам придется довольно далеко уйти в сторону от нашей темы, а сейчас мы попросим читателя поверить, что еще несколько лет назад этот закон был столь же незыблем, как и другие законы, чуть ли не как сам закон сохранения энергии.

И вот на противоречие с таким законом и наткнулись несколько лет назад все физики. Были предприняты героические попытки спасти этот закон, но доказать, что существуют две разные частицы Θ и τ , не удавалось. Эксперименты все более и более убедительно доказывали обратное, что Θ и τ — это распады одной и той же частицы. И вот в самое тяжелое время раздался голос двух физиков. Янг Чжень-нин и Ли Цзян-дао (их зовут обычно короче — Янг и Ли) спросили, а почему, собственно говоря, вы так уверены, что закон сохранения четности незыблем? Какие есть тому теоретические или экспериментальные основания?

И неожиданно для всех оказалось, что оснований для всеобщей справедливости этого закона нет. Оказывается, физики боялись черта, которого они сами же выдумали. Еще один урок был преподан убедительной историей элементарных частиц...

Правое и левое в природе

А теперь бросим на время интересный микромир и посмотрим на более привычный мир, который нас окружает. Было время, когда люди, говоря «вверх» и «низ», не требовали объяснений, что это такое. Более того, эти понятия настолько

вошли в сознание человека, что идея шарообразной Земли, по которой люди ходят (на другом полушарии) вниз головой, казалась совсем нелепой. Очень трудно было привыкать к тому, что на Земле нет «верха» и «низа», а есть направление к центру Земли и от центра Земли. Симметрия того, что делалось вокруг, была симметрией шара, а не плоскости. Магеллан, объехавший вокруг света, первый проверил прямым экспериментом, что линия, казавшаяся бесконечной прямой, — его путь в океане — является в действительности окружностью.

Но кроме «верха» и «низа» есть еще «право» и «лево». Если немного задуматься над этими весьма привычными понятиями, то они делаются совсем не такими естественными — недаром ребенку они даются с большим трудом и многие путают «правое» и «левое», даже выйдя из младенчества. Схожие «верх» и «низ» вряд ли может спутать даже ребенок после того, как он научился произносить эти слова. С другой стороны, весь мир вокруг нас устроен так, что «правое» и «левое» оказываются существенными признаками. Прежде всего сам человек устроен несимметрично: сердце слева, печень — справа, два полушария мозга выполняют разные функции. Несимметричны и все другие животные организмы. Раковины на берегу моря, как правило, закручены против часовой стрелки, если смотреть на них с острия. Наиболее сложные молекулы нашего организма — белки и основной хранитель наследственных свойств организма — молекула вещества с длинным названием дезоксирибонуклеиновая кислота — все они имеют симметрию винта, причем винта с правой нарезкой. Спираль оказывается очень характерной линией в мире больших органических молекул. По спиральям также располагаются волокна многих мышц. Число примеров можно умножать без конца.

Не видно, однако, никакого простого объяснения такому предпочтению одного направления другому. Изредка встречаются люди с другим — зеркальным расположением сердца, у которых оно справа; часто мы встречаем людей с более активной левой рукой — эти люди вообще вполне такие же, как и остальные. Совсем непонятно, почему в процессе эволюции возникла столь резкая асимметрия правого и левого. Это тем более удивительно, что в неорганической природе нет видимых признаков подобной асимметрии. Человек, считавший «верх» и «низ» когда-то абсолютными понятиями, никогда не делал этого с понятиями «правое» и «левое». Напротив, все, что мы находим в неорганической природе, и все то, что мы можем синтезировать без помощи микробов, всегда оказывается симметричным. Можно сказать, что без ссылок на человека или на другой живой организм нельзя определить, какой винт мы называем правым, а какой левым.

Существуют, однако, и в неорганическом мире явления, в которых по крайней мере видимым образом появляются понятия «правого» и «левого».

Во всех учебниках электротехники говорится, как определять направление магнитного поля, как определять направление отклонения проводника с током в магнитном поле. Во всех этих правилах фигурирует либо правая, либо левая рука, либо в них участвует штопор. Не всегда подчеркивается, что такие правила противостественны. Действительно, почему направление движения проводника с током должно быть связано с правой или левой стороной человека, почему нельзя сформулировать все правила, не прибегая к руке, штопору или другим предметам, явным образом не имеющим никакого отношения к делу?

Если разобрать этот кажущийся парадокс немного подробнее, то можно увидеть, что трудность возникла из-за попытки определить направление магнитного поля. Если вспомнить, что источниками магнитного поля являются электрические токи, то можно вообще не говорить о магнитном поле, а разбирать только действие одного тока на другой. В этом случае никакой надобности в правилах рук или штопоров не возникает. Вот, например, электромотор. Для того чтобы описать его работу, можно воспользоваться законом движения проводника с током в поле магнитов электромотора. В этом случае нам надо будет располагать пальцы нашей руки так, как это нарисовано обычно на картинках, а большой палец покажет нам направление движения проводника. Но можно поступить и иначе, если вспомнить, что магнитное поле создается другим проводником с током (или молекулярными токами внутри постоянного магнита, что не меняет дела). Можно использовать правила, определяющие непосредственно силу, с которой действует один проводник с током на другой. Такой путь несколько более хлопотный, но для него не нужны ни рука, ни штопор. Таким образом, на этом примере видно (а это верно и для других примеров), что когда надо выяснить физический эффект (куда движется проводник?), то это можно сделать без того, чтобы определять, где «право», а где «лево».

Эти понятия возникают только для таких величин, как магнитное поле, которые, как оказывается, входят в рассуждения лишь в качестве промежуточного этапа. Более того, можно утверждать, что если во всех правилах заменить правую руку левой и наоборот, то определенные такими «зеркальными» правилами направления движения проводников будут правильными. Единственное, что изменится при новых правилах, это направление магнитного поля. Но, к счастью, само направление магнитного поля измерить нельзя.

Действительно, направление электрического поля мы измеряем по тому, как движется положительно заряженное тело (например, протон) в этом поле. В природе нет отдельных магнитных зарядов, а потому нельзя придумать похожего способа определения направления магнитного поля. Такое свойство магнитного поля принципиально отличает его от поля электрического. Все это сообщает читателю обычный учебник электротехники, в котором измерение магнитного поля в конце концов сводится к контуру с током.

Куда же направлено магнитное поле, которое существует вокруг проводника с током, изогнутого кольцом? Именно этот вопрос оказывается бессмысленным. Так как направление такого поля можно измерить только с помощью другого проводника с током, то «настоящего» направления магнитного поля не существует. Для простоты дела условились называть направлением магнитного поля направление, в котором будет двигаться шток, вращающийся по направлению тока. Но это только условное правило. В арсенале средств учебника электротехники не было другого способа определить направление магнитного поля.

К этому же сводится в конце концов и то, что в неорганической природе нет различия между вращением по часовой стрелке и против часовой стрелки.

В неживой природе нет никакого явления, которое могло бы заменить сделанные человеком часы для определения двух направлений вращения. Это свойство природы получило название зеркальной симметрии, так как при отражении в зеркале правое и левое меняются местами. Свойство зеркальной симметрии неорганического мира распространяли и на мир элементарных частиц. Считалось, что и здесь все процессы происходят так, что правое и левое вращение встречается одинаково часто и никакие эффекты в этом мире не могут дать средство для абсолютного определения направления вращения. И вдруг распад каонов оказался таким явлением. Нам нет необходимости разбирать этот очень трудный для понимания распад каонов. Дальше мы будем говорить о более простом процессе, сейчас же нам важно только то, что налицо был первый случай нарушения зеркальной симметрии. После работы Ли и Янга, о которой мы говорили, начались поиски других случаев. Ли и Янг обратили внимание на возможные эффекты в бета-распаде. Физики направили свои усилия в указанном направлении. Результаты не заставили себя ждать. В начале 1957 г. появилось сообщение об опытах группы физиков, в состав которой входила исследовательница Ву. В этих опытах было обнаружено, что бета-распад ядра кобальта с массовым числом 60 происходит так, что в нем одно направление вращения оказывается выделенным — распад оказался несимметричным.

Спиральность слабых распадов.

О том, что было открыто Ву и другими в бета-распаде кобальта 60, можно здесь рассказать — новое явление вполне наглядно.

Ядра очень многих элементов (те из них, у которых есть спин) представляют собой маленькие магнитики. Физики говорят, что такие ядра обладают магнитным моментом. Магнитный момент имеют ядра дейтерия, лития и других элементов. Имеет его и ядро кобальта-60. Если такое ядро поместить в магнитное поле, то ядра-магнитики ориентируются по полю подобно тому, как магнитные стрелки всех компасов мира ориентированы на север. Такой опыт сделать трудно. При тепловом движении ориентация ядер будет все время нарушаться, и лишь сравнительно недавно, в условиях очень низких температур, когда тепловое движение незначительно, научились поляризовать ядра, как называют сейчас явление ориентации в магнитном поле.

Вспоминая сказанное раньше о направлении магнитного поля, следует сделать вывод, что направление магнитного момента (или, что в общем почти то же ¹ — направление спина) есть понятие условное и можно лишь говорить о сравнении направлений поля и спина. Поэтому до работы Ли и Янга считалось, что направление поляризации не может оказывать никакого влияния на направление вылета электрона.

Такой вывод представлялся настолько естественным, что не было сделано ни одной серьезной попытки его проверить. Опыт Ву показал, что эта уверенность ни на чём не основана. Электроны из кобальта 60, помещенного в магнитном поле, в большом количестве летели против направления этого поля. Отсюда сразу пришлось сделать вывод, что, вопреки сказанному выше, существует физический способ определения истинного направления магнитного поля, не известный ранее и поэтому не описанный в учебниках электротехники.

Вслед за опытами Ву последовали и другие. Оказалось, что электроны, вылетающие при бета-распаде ядер (без магнитного поля), имеют отрицательную спиральность, т. е. их спин направлен в сторону, обратную их движению. Напомним: это значит, что электрон подобен летящему волчку, вращающемуся против часовой стрелки (если смотреть ему вслед). Одними из первых в 1957 г. продольную поляризацию электронов (так называют это явление) наблюдали Алиханов и его сотрудники.

Недавно вспомнили, что разговор о продольной поляризации возникал 30 лет назад, когда три американца — Кокс,

¹ У некоторых ядер магнитный момент отрицателен, т. е. направлен против направления спина.

Ильврайт и Керрельмейер заявили, что они наблюдали такие поляризованные электроны. Однако эффект не был оценен, и об опытах забыли...

Много интересного дает исследование распада мюона на электрон, нейтрино и антинейтрино. Так как спин есть и у распадающейся частицы, а также из-за того, что в распаде возникают три частицы, закон сохранения количества движения приводит к сложным закономерностям, определяющим, как зависит спиральность электрона от энергии и направления вылета. Эти закономерности подтверждены опытом.

Похожие эффекты возникают и в слабых распадах гиперонов. Хотя в этих распадах нейтрино не участвует, но все же оказывается, что и здесь вылет возникающих частиц (нуклона и пиона) связан со спином распадающегося гиперона. Опыт показывает, что в распаде $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ число пионов, летящих по направлению спина гиперона, больше числа пионов, летящих в противоположную сторону (если, конечно, исследовать много случаев распада).

Какие же важные выводы будут сделаны из изучения распадов каонов и гиперонов? В последнее время появляются сообщения о наблюдении эффектов несохранения четности в процессах, связанных с каонами и гиперонами. Однако пока ничего определенного сказать еще нельзя. Во всяком случае, господствовавшее много лет утверждение о полной зеркальной симметрии явлений в микромире оказалось неверным, и нам надо сейчас оценить, какие изменения это обстоятельство вносит в наши взгляды на его структуру.

Симметрия мира

Открытие несимметричного распада ядра кобальта 60 в магнитном поле заставило заново обсудить вопрос о свойствах пространства.

Вернемся теперь к самому опыту. Так как магнитное поле создается током, то можно видоизменить опыт так, чтобы образец кобальта 60 лежал в центре кольца с током. Тогда, если менять направление тока в кольце, будет меняться направление преимущественного вылета электронов. Если при одном направлении тока электроны в основном летят вверх, то при изменении направления тока электроны будут в основном лететь вниз. Если теперь мы представим себе, что все направления вращения во всем мире изменились на обратные, весь мир превратился в свое зеркальное отображение, то в описанном опыте связь между направлением вылета электрона и направлением тока изменилась бы на противоположную. Действительно, в зеркальном мире направление прямолинейного

движения электрона остается тем же, а направление вращения (направление кругового тока) меняется на прямо противоположное.

Такое положение означает, что мир и его зеркальное отображение вовсе не одинаковы по свойствам и если бы в действительности вдруг с миром произошла такая перемена — он превратился бы в своего зеркального двойника, физики заметили бы это, повторив опыт Ву.

Этот весьма странный результат ведет к серьезным следствиям. Действительно, если существует опыт, который позволяет установить разницу между двумя зеркальными мирами (это значит, другими словами, измерить спиральность мира), то отсюда надо прийти к заключению, что пространство не обладает зеркальной симметрией, а как бы «закручено» в каждой точке.

В частности, это означало бы, что луч света, распространяясь в пустом пространстве, менял бы свою поляризацию, вектор электрического поля вращался бы по мере распространения луча либо по часовой стрелке, либо против. Это значит, что всякий свет с плоской поляризацией становился бы светом с круговой поляризацией. Направление вращения плоскости поляризации, как называется это явление¹, и служило бы характеристикой, определяющей спиральность пространства. Отметим сразу, что такой вывод неправилен, но для того, чтобы сделать ясным причину этого, нам нужно вспомнить еще об одном из видов симметрии мира.

Речь идет о симметрии зарядовой. В тот спокойный период, когда физики знали только протон и электрон, никакого разговора о зарядовой симметрии не могло и возникнуть. Был тяжелый положительный протон и легкий отрицательный электрон. Казалось даже, что различие в массе этих частиц каким-то неизвестным образом связано с различием их электрических зарядов. Но после открытия позитрона постепенно возникала уверенность, что у каждой частицы есть свой партнер с обратным знаком электрического заряда. Свойства античастиц оказались совсем такими же, и возникло убеждение, что если бы во всем мире изменились знаки всех зарядов, то при этом никаких изменений в физических явлениях не произошло.

Антиводород — атом с одним позитроном, вращающимся вокруг отрицательного антипротона, не отличается от обычного водорода, если вокруг него нет других частиц нашего мира (в противном случае он аннигилирует). Если мир и антимир не соприкасаются друг с другом, то законы в них должны

¹ Оно обычно наблюдается при прохождении света через магнитное поле или через некоторые виды кристаллов. Считалось, что в пустом пространстве поляризация не должна меняться.

быть одинаковы. Учебник, написанный в нашем мире, будет содержать теоремы, верные и для антимира. Только при соприкосновении объектов из обоих миров можно будет установить, что миры разные.

Зарядовая симметрия мира представлялась столь же важным и фундаментальным свойством мира, как и симметрия зеркальная (правое — левое). Нетрудно, однако, увидеть, что опыт Ву противоречит и этому новому утверждению. Предположим, что опыт Ву производился бы в мире, в котором знаки зарядов противоположны. В этом мире кобальтом 60 называлось бы ядро, состоящее из антипротонов и антинейтронов. Однако спиральность нейтрино осталась бы такой же, как в нашем ядре, и при распаде антикобальта 60 вылетела бы нейтральная частица с левой спиральностью. В то же время в нашем мире при распаде антикобальта вылетает нейтрино с правой спиральностью. Такая же разница будет, очевидно, и с поляризацией электрона. Поэтому переход к частицам другого знака превращает распад кобальта в распад антикобальта, но такой, какой в нашем мире не происходит, а значит, явления в нашем мире не симметричны относительно изменений знаков всех зарядов. Измерение спиральности вылетающей легкой частицы позволяет различать кобальт и антикобальт.

Таким образом, опыт Ву сразу уничтожил две симметрии мира, и это должно было, как казалось в то время, привести к далеко идущим изменениям в наших представлениях о свойствах пространства.

Однако этого все же не случилось. Л. Д. Ландау, а несколько позже Ли и Янг обратили внимание, что оба нарушения симметрии происходят не независимо друг от друга.

Если одновременно перейти от мира к его зеркальному двойнику (произвести зеркальное отображение) и изменить знаки всех зарядов (произвести отображение зарядовое), то ничего в опыте Ву не изменится. Кобальт перейдет в антикобальт, а знаки спиральности электрона и антинейтрино поменяются на обратные и новые частицы просто превратятся соответственно в позитрон и нейтрино.

Это означает, что хотя опыт Ву и не имеет ни зеркальной ни зарядовой симметрии, он обладает совсем новой симметрией, сохраняя все свои качества при одновременном отражении в пространстве и изменении знаков зарядов всех частиц. Такую сложную операцию Ландау предложил называть комбинированным отражением. Можно сказать, таким образом, что опыт Ву обладает комбинированной симметрией.

В дальнейшем анализ всех опытов показал, что комбинированной симметрией обладают все эффекты в слабых распадах и что именно комбинированная симметрия является основным свойством нашего мира, в то время как зеркальная

симметрия и зарядовая симметрия в отдельности характерны лишь для процессов электромагнитного и сильного взаимодействия.

Если где-либо во Вселенной существуют антимир, то в них должны быть правые позитроны и левые нейтрино, такие же, как и у нас, только позитроны и антинуклоны окажутся там основным строительным материалом, из которого эти миры построены.

В недрах звезд нашей Галактики и внутри Солнца происходят ядерные реакции, сопровождающиеся вылетом нейтрино. В звездах антигалактики рождаются, соответственно, антинейтрино. Если бы можно было регистрировать потоки нейтрино и антинейтрино от далеких миров, то по этому признаку мы могли бы найти антимир.

Но есть ли на самом деле такие миры, сказать сейчас нельзя. Мы слишком еще плохо знаем строение далеких частей нашей Вселенной и почти совсем не умеем ловить нейтрино и антинейтрино.

Заряды и законы их сохранения

Мы фактически закончили обзор всех элементарных частиц, которые до сих пор найдены физиками. Мы увидели, как сложно устроен микромир, какое огромное количество разных процессов рождения и распадов происходит в нем. Но все эти распады и рождения регулируются несколькими законами сохранения, которые разрешают одни процессы и запрещают другие.

Часть законов ведет свое происхождение из механики (мы о них здесь говорить подробно не будем); это закон сохранения энергии, закон сохранения количества движения (импульса, как говорят сейчас) и закон сохранения момента количества движения (сейчас говорят — углового момента).

Кроме этих законов, существуют три закона совсем другой природы, которые нельзя свести к законам механики. Речь идет о трех законах сохранения зарядов:

- 1) сохранение электрического заряда,
- 2) сохранение нуклонного заряда,
- 3) сохранение лептонного заряда.

О первых двух законах уже говорилось раньше. Последним — законом сохранения лептонного заряда — мы фактически пользовались, не называя его. Его роль состоит в том, чтобы разрешать распад нейтрона (или бета-распад какого-либо другого ядра) с вылетом антинейтрино, т. е. разрешать распад $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ и запрещать распад $n \rightarrow p + e^- + \nu$. Сохранение лептонного заряда разрешает распад $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ и запрещает распад $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}$ и т. д.

Лептонный заряд, как это следует из его названия, приписывается лептонам. Трем частицам: антинейтрино ($\bar{\nu}$),

позитрону (e^+) и положительному мюону (μ^+), приписывают лептонный заряд -1 , их античастицам ($\nu e^-, \mu^-$) лептонный заряд $+1$. Все остальные частицы (фотон, нуклоны, гипероны и мезоны) имеют лептонный заряд, равный нулю.

Легко проверить, что тогда запреты и разрешения возникнут автоматически. Роль лептонного заряда не вполне выяснена. Наибольшая опасность самому его существованию связана с нерешенным вопросом о том, существует ли одно нейтрино или два; является ли антинейтрино, излучаемое при распаде $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$, тем же, что и антинейтрино в распаде $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. Мы об этом говорили раньше. Если опыт, к которому сейчас идет подготовка, покажет, что существуют два разных нейтрино, то тогда придется вводить два заряда для разных сортов нейтрино. Будет ли так на самом деле, мы скоро, вероятно, узнаем.

Три закона сохранения зарядов несколько ограничивают ту неопределенность в самом понятии элементарной частицы, о которой говорилось вначале. Трудность ведь состояла в том, что, например, нейтрон превращался в протон, а протон в нейтрон, поэтому протон нельзя считать вполне элементарным. В частности, нельзя сказать, строго говоря, сколько в ядре протонов, нейтронов и склеивающих их пионов. Однако в силу законов сохранения можно утверждать, что число нуклонов (т. е. нуклонный заряд, равный, конечно, массовому числу) вполне определенно и также определен заряд ядра. На этом примере видно, что понятие нуклона оказывается более близким к тому, что мы хотим приписать элементарной частице, чем понятия протона и нейтрона в отдельности, так как их число (вернее, разность между числом нуклонов и числом антинуклонов) остается неизменным.

Таким же образом оказывается элементарным лептон.

Обычный электрон также окружен «облаком»: вокруг него все время рождаются и уничтожаются пары электрон—позитрон; поэтому число электронов и позитронов в этой системе (которую мы называем электроном) все время меняется. Однако лептонный заряд системы и ее электрический заряд остаются неизменными, что и дает нам основание говорить о ней, как об элементарной частице.

Если бы странность сохранялась столь же строго, как и три заряда, то можно было бы с успехом распространить такие же рассуждения на гипероны и говорить о странности, как о четвертом заряде, который определял бы число гиперонов. Однако странность сохраняется лишь приближенно, и гиперон может превратиться, хотя и очень редко, в нуклон+пион. Поэтому, строго говоря, мы не можем говорить о гипероне отдельно, а должны относить и его к нуклонам, хотя для боль-

шинства задач можно не обращать внимания на слабые распады и считать странность зарядом.

Подчеркнем разницу между новым пониманием слова «заряд» и старым. Электрический заряд не только определяет число заряженных частиц, но и по закону Кулона определяет силу, действующую между частицами. Ничего похожего на закон Кулона для зарядов лептонного и нуклонного (а также и странности) не существует; поэтому эти заряды служат только для счета частиц. Силу взаимодействия определяют другие постоянные. Только для электромагнитного поля постоянная, определяющая взаимодействие, и заряд оказываются одной и той же величиной. Для других полей закономерности значительно сложнее.

Мы видим, как постепенно устанавливается порядок в мире, который казался совсем хаотическим всего несколько лет назад. История, о которой мы рассказывали в этой книжке, очень хорошо показывает, как развивается современная физика и как на основании опыта возникает стройная теоретическая картина мира, в котором мы живем.

Заключение

В этой книжке мы увидели, как постепенно были поняты многие явления в мире элементарных частиц, как самые неожиданные свойства уложились в стройную картину. Но пока эта картина очень далека от того, чтобы быть законченной.

Исследования продолжаются во многих лабораториях мира. Физики, совсем недавно перешагнувшие рубеж в миллиард электроновольт, исследуют сейчас в трех лабораториях — в Дубне, Женеве и Брукхэвене (около Нью-Йорка) — процессы, которые происходят при энергиях от 10 до 30 миллиардов электроновольт. Строятся ускорители с энергией, превышающей 50 миллиардов электроновольт. Ведутся дискуссии о том, как получить частицы с огромной энергией до 1000 миллиардов электроновольт. Как не фантастична эта энергия, но пройдет время и мы услышим о первых работах на таких ускорителях и узнаем, что происходит, когда частицы сходятся на расстояния в сотые доли ферми.

Много сил тратят физики, чтобы найти пути, которые позволят подойти к решению самого главного вопроса о том, почему существует так много частиц, которые мы пока называем элементарными, почему их массы образуют ряд значений, которые выглядят совсем случайными?

Нельзя ли построить теорию микромира, из которой бы можно было вычислить, что протон в 1836 раз тяжелее электрона, а пион — только в 276 раз?

Много нерешенных вопросов стоит перед физиками. Среди них не последнее место занимает и вопрос о том, какую роль играют в этом мире силы тяготения, не вступают ли они в игру на тех малых расстояниях, где существующая теория оказывается бессильной что-либо предсказать? Разные точки зрения защищаются и опровергаются в научных журналах и на научных конференциях. Физики обсуждают пройденный путь и убеждаются, что впереди лежит путь еще более длинный и трудный.

Интересно, полезно знать

Нейтрино так слабо взаимодействует с веществом, что оно пролетает до самых далеких галактик. Чтобы поглотить нейтрино, надо было бы пропускать его вдоль металлического столба длиной 10^{15} км.

Сейчас физики изучают частицы, которые живут столь мало, что их не вполне законно называть частицами. Их пока называют ро-мезон и омега-мезон. Ро-мезон распадается на два пиона, а омега-мезон — на три пиона. Время их жизни около 10^{-22} сек.

Из современного ускорителя можно получать 10^{11} частиц в секунду с энергией 30 000 Мэв. Мощность такого пучка 0,5 квт.

В космических лучах зарегистрировали частицы с энергией до 10^{19} эвтроновольт. Это энергия, которую приобретает стакан с водой, упавший с высоты почти в 1 м.

Отрицательно заряженный мюон может, соединившись с протоном, образовать систему, подобную атому водорода. Физики наблюдали спектры, излучаемые такими мезоатомами.

Недавно удалось наблюдать процесс, при котором два фотона с длиной волны 6943 ангстрема (красный свет) превращаются в фотон с длиной волны 3472 ангстрема (ультрафиолетовое излучение). Кварцевый кристалл, освещенный сильным пучком света из светового усилителя (оптического лазера), излучал слабую ультрафиолетовую линию.



Для читателей, интересующихся научно-популярной литературой об успехах в области изучения элементарных частиц, приводим краткий список брошюр и статей, изданных в последние годы.

Новожилов Ю. В. *Элементарные частицы*. Физматгиз, 1959.

Шапиро И. С. *Элементарные частицы*. Изд-во «Знание», 1958.

Гольданский В. И. *В мире элементарных частиц*. Изд-во «Знание», 1959.

Сегре Э. *Антипротоны*. Изд-во «Знание», 1957.

Ли Цзян-дао и Ян Чжень-нин. *Доклады при получении Нобелевской премии*. Успехи физических наук, том 64, № 1, 1958.

Сморodinский Я. А. *Структура протона*. «Природа» № 6, 1959.

Сморodinский Я. А. *Античастицы, антивещества, антимир*. «Природа» № 6, 1960.

Абрикосов А. А., Халатников И. М. *Новые свойства элементарных частиц*. Изд-во «Знание», 1957.

Таблица элементарных частиц и их масс
(в массах электрона)

Барионы		нуклонный заряд ± 1 лептонный заряд 0 спин $1/2$	
Гипероны			
S = -2		S = +2	
кси-минус	2580	антикси-минус	
кси-ноль	2566	антикси-ноль	
S = -1		S = +1	
сигма-минус	2341	антисигма-минус	
сигма-плюс	2328	антисигма-плюс	
сигма-ноль	2332	антисигма-ноль	
лямбда-ноль	2183	антилямбда-ноль	
Нуклоны S=0			
протон	1836,1	антипротон	
нейтрон	1838,7	антинейтрон	

Лептоны			нуклонный заряд 0 лептонный заряд ± 1 спин $1/2$	
нейтрино	0	ачгинейтрино		
электрон	1	позитрон		
минус мюон	206,8	плюс мюон		

Мезоны

нуклонный заряд 0
лептонный заряд 0
спин 0

Пионы S=0		
плюс пион	273,2	минус пион
нейтральный пион		
	264,2	

Каоны		
S=1		S=-1
плюс каон	966,6	минус каон
нейтральный каон	974,2	нейтральный антикаон

Фотон		все заряды = 0
		спин 1
		масса 0

О ЧЕМ РАССКАЗЫВАЕТСЯ В ЭТОЙ КНИЖКЕ

	Стр.
Существуют ли элементарные частицы?	3
Земной опыт и законы Вселенной	5
Микромир	6
Электроны и нуклоны	9
Фотоны	12
Позитрон и античастицы	13
Устойчивость ядер	14
Ядерные силы и мезоны	15
Размеры частиц	18
Бета-распад и нейтрино	21
Загадка мюона	24
Странная история	26
Гипероны	29
Гиперядра	32
Каоны	32
Правое и левое в природе	33
Спиральность слабых распадов	37
Симметрия мира	38
Заряды и законы их сохранения	41
Заключение	43
Приложение: «Интересно, полезно знать»	45
Таблица элементарных частиц	46

Автор
Яков Абрамович Сморodinский

Научный редактор **В. А. Лешковцев**
Редактор издательства **И. Б. Шустова**

Техн. редактор **Л. Е. Атрощенко.** Корректор **Н. Н. Огородникова**
Обложка художника **Р. Г. Алеева**

Сдано в набор 13.III 1962 г. Подп. к печати 13.IV 1962 г. Изд. № 126.
Формат бум. 60×92¹/₁₆. Бум. л. 1,5. Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,74,
А 02254. Цена 9 коп. Тираж 23 000 экз. Заказ 962

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д 3/4.

9 коп.

