



ГЯ. МЯКИШЕВ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ
ЧАСТИЦЫ

Г. Я. МЯКИШЕВ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Издание третье,
переработанное



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1979

22,382
М 99
УДК 539.12

Мякишев Г. Я.

М 99 **Элементарные частицы, 3-е изд., испр. и доп. —
М.: Наука, 1979. — 176 с.**

В книге в простой и доступной форме излагается физика элементарных частиц. Прочитав эту книгу, читатель сможет не только получить представление о мире элементарных частиц, но и почувствовать ту напряженную, полную неожиданных открытий и смелых гипотез атмосферу, в которой живут физики, изучающие элементарные частицы.

Написана книга живо, увлекательно, с юмором, а также (что является немаловажным достоинством) достаточно кратко.

Для лиц, имеющих среднее образование, а также для учащихся старших классов средней школы.

М $\frac{20402-158}{053(02)79}$ 141-79. 1704020000

ББК 22.31
530.1

М $\frac{20402-158}{053(02)-79}$ 141-79. 1704020000

© Наука. Главная редакция
физико-математической
литературы, 1979

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель этой книги не только в сообщении начальных представлений о мире элементарных частиц, но и в том, чтобы дать возможность почувствовать ту напряженную, полную неожиданных открытий и смелых гипотез атмосферу, в которой живут физики, изучающие элементарные частицы.

Главный факт в физике элементарных частиц — это способность частиц к превращениям друг в друга. Рассказ о ядерных, электромагнитных и слабых взаимодействиях, вызывающих эти превращения, занимает одно из центральных мест в книге.

С элементарными частицами может происходить и происходит в действительности все, что не запрещается законами сохранения. Поэтому рассказ о законах сохранения — второе центральное место книги.

Понять происходящие в микромире явления можно только на основе великих теорий XX в.: теории относительности и квантовой механики. Основам этих теорий также уделено должное внимание.

Прочтя эту книгу, нельзя получить совершенно ясного представления о том, что же такое элементарная частица. Этого пока не знает никто. Но в ней можно найти сведения о свойствах частиц, которые принято называть элементарными, о современной классификации частиц, достигшей в настоящее время столь высокого научного уровня, что она позволила предсказать ряд новых частиц до того, как они были обнаружены экспериментально.

Наконец, в книге рассказывается об открытиях в физике элементарных частиц, сделанных за последнее время в 70-е годы. В это время неожиданно были открыты новые частицы и возникла уверенность в том, что большая часть частиц, считавшихся элементарными, в действительности состоят из более простых частиц. Большой шаг вперед был сделан в понимании природы взаимодействий между элементарными частицами. Одновременно с успехами ученые встретились с новыми трудностями, новыми задачами. Но есть основание ожидать, что в ближайшем будущем в физике элементарных частиц произойдут коренные изменения.

1 ГЛАВА,

ВВОДНАЯ, но очень важная и, быть может, самая трудная



В ней ничего уже нет от коровы — одна белизна лишь.

Овидий. «Метаморфозы»

**Превращения,
превращения,
превращения**

Каждую весну в мире происходит обыкновенное чудо: голые ветки внезапно оживают. Пройдет несколько дней, и на них зазеленеют

клейкие весенние листочки.

Немного больше времени занимает превращение неповоротливой толстой гусеницы в изящную бабочку. За три десятка лет маленький мальчик становится солидным мужчиной.

Сухая палка в костре исчезает в несколько минут, оставив кучу золы, а аккуратные чистые тетради за несколько дней или недель становятся потрепанными фолиантами. С течением времени в какой-то мере меняется наш мозг — он больше знает и умеет.

Превращения — вот главное, что происходит вокруг нас и с самими нами. Одни превращения, такие, как взрыв

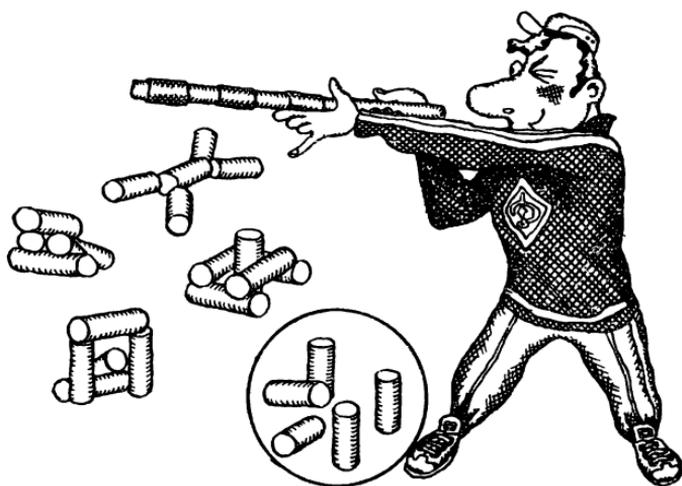
бомбы, длятся мгновения, другие же, такие, как формирование Земли и образование планет и звезд, длятся многие тысячи или даже миллионы и миллиарды лет.

Бывают и чудесные превращения, по крайней мере в сказках. Братец Иванушка попил водицы из конька и превратился в козленочка, а красная девица по воле злой колдуньи превратилась в зеленую лягушку. Любая сказка полна подобными событиями.

Все это — превращения, конечно же превращения! Но в чем-то они все же не совсем настоящие превращения.

В сущности эти превращения того же типа, что и превращение одной фигуры старинной русской игры — городки в другую, или превращение кукольного домика, сделанного из кубиков, в железнодорожный мост из тех же кубиков, но расположенных по-другому. Может быть, и из другого числа кубиков, большего или меньшего.

Превращения, о которых вы сейчас прочли и из которых состоит ваша жизнь и жизнь Вселенной, почти полностью сводятся к созданию все новых и новых комбинаций из одних и тех же «кубиков». С самими «кубиками» при этом не происходит ничего. Раньше такими «кубиками», всегда неизменными, неизмеримо более твердыми, чем составленные из них тела, и потому не изнашивающимися, считали атомы. Потом первичными «кубиками» мироздания стали считать составные части атомов, которым без особых раздумий было дано наименование элементарных частиц.



Образование новых комбинаций из уже существующих частиц — вот смысл обычных превращений. Конечно, бабочка от гусеницы отличается гораздо больше, чем два сооружения из одного и того же набора кубиков. Но все-таки и здесь, и там мы имеем новое сочленение старых частей. Даже сказочные превращения, собственно, не противоречат каким-либо фундаментальным законам природы. Из атомов, слагающих братца Иванушку, в принципе можно построить козленочка, да еще останутся лишние. Ни один фундаментальный закон природы при этом не будет затронут. Ведь сумела же природа из воды, газов и горных пород в конце концов создать живые существа и человека.

И настоящие превращения...

Так, может быть, и вообще не бывает настоящих превращений, когда происходит изменение самих «кубиков» мироздания, а не просто перетасовка, пусть сложная, существующих образований?

Нет и еще раз нет! Вы чиркнули спичкой — и она вспыхнула. Вот при этом-то и происходит настоящее превращение материи. Конечно, оно состоит не в том, что спичка исчезает на глазах. Атомы углерода соединяются с молекулами кислорода воздуха и дают молекулы углекислого газа — новую форму старого материала.

Дело в том, что вы увидели свет! Раньше света не было в спичке ни в какой форме. Свет начал рождаться в момент,



когда спичка загорелась. Здесь-то и произошло настоящее превращение: появился новый сорт «кубиков», произошло рождение новых элементарных частиц — фотонов. Вы стали свидетелями настоящего превращения материи!

Подобные превращения — рождение новых элементарных частиц — происходят не только при излучении света. Мир полон превращений элементарных частиц и без этих превращений не мог бы существовать в современном состоянии. Но почти во всех случаях, кроме излучения света, эти превращения запрятаны в самых глубинах материи, и непосредственно не наблюдаемы. Итак, уже в начале книги вы встретились со словами «превращения элементарных частиц».

Элементарная частица...

А что это такое?

Когда Демокрит назвал простейшие, нерасчленимые далее частицы атомами (слово «атом» означает в переводе неделимый), то ему, вероятно, казалось, что он знает, что делает. Все представлялось в принципе не очень сложным. Разные предметы, растения, животные построены из неделимых, неизменяемых частиц. Превращения, наблюдаемые в мире, — это простая перетасовка атомов. Все в мире течет, все изменяется, кроме самих атомов, бытие которых остается неизблемым.

Эта стройная картина, по существу, осталась без изменений и после того, как было открыто сложное строение атомов. В конце XIX в. с несомненностью была выделена составная часть атома — электрон. Затем уже в XX в. были открыты другие частицы. Поначалу все эти частицы рассматривали точь-в-точь, как Демокрит рассматривал атомы. Их считали неделимыми и неизменными первоначальными сущностями, основными кирпичиками мироздания.

Однако ситуация привлекательной ясности длилась недолго. Все оказалось намного сложнее. Неизменных частиц нет совсем. И более того, сейчас точно неизвестно, какие частицы заслуживают в действительности названия элементарных. Неизвестен также критерий, по которому можно ту или иную частицу отнести к элементарным.

Можно сказать, что в слове «элементарная» заключена восхитительная двусмысленность. С одной стороны, элементарный — это само собой разумеющийся, простейший. «Это элементарно», — любил восклицать мистер Шерлок Холмс, обращаясь к доктору Ватсону. С другой стороны, под элементарным понимается нечто настолько фундаментальное, что оно вообще пока никем не понято. Именно в этом смысле сейчас и называют субатомные частицы элементарными.

Может быть, конечно, в ближайшем будущем появится новый Шерлок Холмс микромира и для него сущность элементарных частиц будет столь же прозрачна, как и происхождение чудовищной собаки Баскервиллей, но пока это время еще не пришло.

**Ничто не вечно
под Луной**

Рассматривать известные сейчас элементарные частицы как неизменные атомы Демокрита прежде всего мешает простой, но убийственный факт. Ни одна из частиц не бессмертна. Большинство частиц сами собой, без какого-либо насилия извне, не могут прожить более двух миллионных долей секунды. Свободный нейтрон живет 16 мин. Лишь четыре частицы: фотон, нейтрино, электрон и протон — могли бы сохранять свою неизменность, если бы каждая из них была одна в целом мире. У электронов и протонов имеются опаснейшие собратья — позитроны и антипротоны, при столкновении с которыми происходит взаимное уничтожение частиц. Фотон, испущенный вашей настольной лампой, живет не более 10^{-8} с. Это то время, которое ему нужно, чтобы достичь страницы книги и поглотиться бумагой. Лишь нейтрино почти бессмертно из-за своего крайнего безразличия ко всем частицам. Но и нейтрино гибнут при столкновениях с другими частицами, хотя такие столкновения случаются редко.

Итак, в извечном стремлении к отысканию неизменного в нашем изменчивом мире ученые оказались на зыбучем песке вместо гранитного основания. Все элементарные частицы превращаются друг в друга, и эти взаимные превращения — главный факт их существования.

**Есть ли субчастицы
внутри элементарных
частиц**

Но, может быть, все это не так уж сильно отличается от того, что уже было? Может быть, современные элементарные частицы просто некий промежуточный этап в познании строения вещества, до которого удалось добраться человеку? Потом удастся добраться до более глубокого уровня, и сегодняшние элементарные частицы будут рассматриваться так же, как сейчас атомы. В конце же концов рано или поздно будут найдены некоторые неизменные частицы, слагающие вещество.

Или природа устроена иначе: материя делима до бесконечности, и люди будут находить все более и более мелкие частицы, никогда не дойдя до конца?

Пока здесь ничего нельзя утверждать наверняка. Скорее, однако, все это не так. Ближе к тому, что мы знаем сейчас, другая возможность.

Мы уже добрались до фундамента строения материи, но этот фундамент оказался совсем не застывшим в вечной неизменности, а непрерывно меняющим свое лицо, крайне сложным. Фундаментальные частицы неделимы уже далее подобно атомам, но неисчерпаемы по своим свойствам.

**Вселенная
из двух частиц!**

Вот что заставляет так думать. Пусть у нас возникло естественное и похвальное желание исследовать, а не состоит ли, например, электрон из каких-либо других, субэлементарных частиц? Что нужно сделать для того, чтобы попытаться расчленив электрон? Можно придумать только один способ. Это тот же способ, с помощью которого ребенок хочет узнать, что находится внутри пластмассовой игрушки, — сильный удар.

Разумеется, по электрону нельзя ударить молотком. Для этого нужен другой электрон, летящий с колоссальной скоростью, или какая-либо иная, движущаяся с большой скоростью элементарная частица. Сейчас построены ускорители, сообщающие электронам и протонам скорости, очень близкие к той максимальной, которая вообще возможна в природе, — скорости света.

Что же происходит при столкновении частиц сверхвысокой энергии? Они отнюдь не дробятся на нечто такое, что можно было бы назвать их составными частями. Нет, они рождают новые частицы, те же самые, которые уже давно фигурируют в списке элементарных частиц. И, что особенно примечательно, с самими первичными частицами не происходит ровным счетом ничего. Они, конечно, теряют энергию, уменьшая свою скорость, но свойства их не меняются. Чем больше энергия сталкивающихся частиц, тем большее количество и притом более тяжелых частиц рождается. Это возможно благодаря тому, что при увеличении скорости масса частиц растет. Всего лишь из одной пары любых частиц с выросшей массой можно получить все частицы, заполняющие известную на сегодняшний день таблицу элементарных частиц.

Можно даже представить себе поистине фантастическую, но находящуюся в полном соответствии с известными законами природы картину: две сверхэнергичные частицы при столкновении рождают целые миры, из которых потом могут возникнуть звезды и галактики. Случается ведь, что од-

на частица из космоса рождает ливни частиц, общим числом до сотен миллионов, захватывающие у поверхности Земли площадь в несколько квадратных километров.

Возможно, конечно, и даже более чем вероятно, что при столкновениях частиц с недоступной нам пока энергией будут рождаться и какие-то новые, еще неизвестные частицы. Но сути дела это не изменит. Рождаемые при столкновениях новые частицы никак нельзя рассматривать как составные части частиц родителей. Ведь две дочерние частицы, если их ускорить, могут, не изменив своей природы, а только увеличив массу, породить в свою очередь сразу несколько частиц, в точности таких же, как и те, которые произвели их на свет, да еще и множество других частиц.

**Распадаться на А и В
еще не значит
состоять из А и В**

Подавляющее число элементарных частиц распадается само собой. Но это еще не дает основания считать, что они состоят из продуктов собственного распада.

Отношение частиц-потомков к частице-предку совсем не напоминает отношения осколков к целому сосуду.

Возьмем, например, нейтрон. Свободный нейтрон живет в среднем 16 мин, а затем распадается на протон, электрон и антинейтрино. Но заведомо можно сказать, что здесь мы имеем рождение новых частиц, а не распад сложной системы на составные части. Антинейтрино, подобно фотону, вообще может существовать, только двигаясь по прямой со скоростью света, и поэтому содержится в нейтроне, как птица в клетке или белка в колесе, не может. Протон с электроном могут в действительности образовать связанную систему. Однако это будет хорошо известный и превосходно изученный атом водорода. Как мы узнаем дальше, электрон не может находиться внутри протона и образовать нейтрон.

Аналогично обстоит дело и с другими частицами, живущими лишь определенный интервал времени. Распад частицы совсем не является признаком того, что она не элементарна.

Нейтрон, несмотря на свою нестабильность, считается элементарной частицей, а ядро атома тяжелого водорода — дейтон — вне всяких сомнений состоит из нейтрона и протона, хотя он и абсолютно стабилен.

То, что исчезновение одних частиц и появление других при реакциях между элементарными частицами является именно превращением, а не просто возникновением новой комбинации составных частей старых частиц, особенно



наглядно обнаруживается при встрече частицы со своим двойником-антагонистом — античастицей (например, электрона с позитроном). Обе частицы обладают определенной массой в состоянии покоя, электрическими зарядами и т. д. После же столкновения электрон и позитрон исчезают и появляются два фотона. Фотоны не имеют зарядов и не обладают массой покоя, так как не могут существовать в состоянии покоя.

Возможные формы существования материи

Итак, вся совокупность фактов говорит об отсутствии оснований для надежды, что при столкновениях удастся выделить некие сверхчастицы (составные части таких частиц, как электрон). Нет также оснований считать продукты распада нестабильной частицы ее составными частями. Прямые опыты говорят лишь о том, что все частицы способны превращаться

друг в друга. Всеобщая превращаемость частиц указывает на их единство.

Можно подумать, что все они построены из какой-то единой субстанции. Однако это не совсем точно. Все элементарные частицы состоят из материи, но не совсем в таком смысле, в каком кирпичи состоят из глины.

Кусок глины может иметь форму кирпича, но может принять и любую другую геометрическую форму. Все это достаточно просто. Более сложно уяснить, что глины как таковой, глины вообще, вне какой-либо определенной формы в природе нет. Точно так же нет и не может быть материи вообще, лишенной конкретных свойств.

Если глина может существовать в самых различных формах, между которыми можно осуществить плавный, непрерывный переход, то материя, насколько нам сейчас известно, не может находиться в каких угодно состояниях. Элементарные частицы являются, по-видимому, единственно возможными формами существования материи.

Между различными элементарными частицами нет никакого непрерывного перехода. Нельзя, к примеру, плавно изменять свойства нейтрино так, чтобы заполнить пропасть, отделяющую его от ближайшего соседа в таблице элементарных частиц — электрона.

Разумеется, говоря о формах существования материи, мы имеем в виду совсем не геометрическую форму, а возможные ее состояния, наделенные комплексом различных свойств.

Впрочем, не исключено, что элементарные частицы — это все же не более чем промежуточный этап познания строения вещества, каким раньше были атомы.

**Элементарное,
хотя бы отчасти,
должно быть простым**

Очень велики сомнения в том, что все частицы, называемые сейчас элементарными, в действительности оправдывают свое наименование. Часть из них, и, вероятно, даже большая часть, носит это наименование вряд ли заслуженно. Основания для сомнений крайне просты: частиц очень много!

Открытие новой элементарной частицы всегда составляло и составляет сейчас выдающийся триумф науки. Но уже довольно давно к каждому очередному триумфу начала примешиваться доля беспокойства. Триумфы стали следовать буквально друг за другом. Сейчас уже открыто 35 относительно стабильных частиц с временем жизни,

не меньшим 10^{-17} с. Число же короткоживущих частиц с временем жизни порядка $10^{-22} - 10^{-23}$ с перевалило за несколько сотен.

Существование большого числа частиц заставляет думать, что не все они в равной мере элементарны. Многие из них, вероятно, являются составными. Во всяком случае, уже сейчас предложена модель, согласно которой многие элементарные частицы, хотя и не все, построены всего лишь из трех (или двенадцати) различных фундаментальных частиц.

Что будет в книге?

Как видите, представить себе отчетливо, что такое элементарная частица, а этому вопросу и посвящена первая, вводная, глава книги,

далеко не просто. Если вы, прочтя введение, и не обогатились заметно знанием того, что такое элементарная частица (автор на это особенно и не рассчитывал), то некоторое представление о том, насколько здесь все сложно, можно надеяться, у вас возникло.

В самой книге речь пойдет преимущественно о более конкретных вещах. Конечно, будет приведена таблица относительно стабильных элементарных частиц. Будет рассказано о свойствах элементарных частиц и принципах их классификации. Именно в отношении систематики достигнуты наибольшие успехи. Несмотря на всю сложность взаимоотношений элементарных частиц, создана систематика частиц примерно на таком же научном уровне, как периодическая система элементов во времена Менделеева. Подобно тому как Менделеев, не зная, как устроен атом, сумел с помощью своей периодической системы элементов предсказать существование и главные свойства неоткрытых еще элементов, построенная систематика тяжелых элементарных частиц позволила предсказать многие частицы и их свойства.

Элементарные частицы превращаются друг в друга. Что вызывает эти превращения? Какие превращения возможны? Вот два наиболее важных вопроса.

Превращения частиц вызваны их взаимодействием друг с другом. Значит, нужно будет рассказать о различных взаимодействиях, или силах, как принято было говорить раньше и как часто по привычке говорят и теперь, хотя слово «сила» применительно к элементарным частицам совсем не имеет того смысла, который оно приобрело в механике Ньютона.

При превращении элементарных частиц меняются масса, заряды частиц и многие другие величины, характеризующие

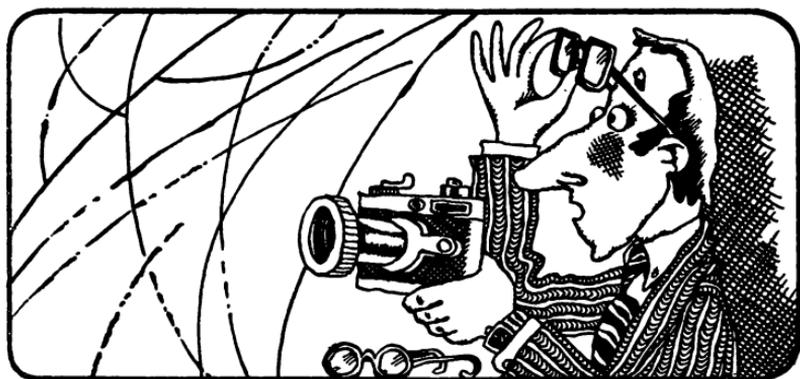
их свойства. Однако мир элементарных частиц, в котором само бытие частиц скоротечно, вправлен в жесткие рамки законов сохранения. Законы сохранения нигде в физике не играют столь огромной роли, как в микромире. Рассказ о законах сохранения, особенно о новых законах, которые были открыты при изучении элементарных частиц, должен занимать одно из центральных мест в повествовании об элементарных частицах. Не зная как следует, что такое элементарная частица, не зная ее структуры и не умея удовлетворительно количественно описывать взаимодействие элементарных частиц, ученые все же смогли навести определенный порядок в микромире, научились многое понимать и кое-что предсказывать, опираясь во многом на законы сохранения.

Пониманием, хотя, конечно, и неполным, процессов микромира мы также обязаны двум великим теориям XX в.: теории относительности и квантовой механике. Без них человечество оказалось бы совершенно беспомощным перед лицом необычных, а то и попросту абсурдных с точки зрения обыкновенного здравого смысла явлений, обнаруживающихся в глубинах материи. Об этих теориях нужно также немного рассказать.

Вопросов много. Поэтому постараемся быть краткими, не попытаюсь проследить в исторической последовательности за открытием всех частиц. Пусть сразу перед вами возникнет готовая таблица элементарных частиц. Но произойдет это еще не на следующей странице. Сначала нужно рассказать кое о чем другом, и прежде всего о том, как же наблюдаются элементарные частицы.

2 ГЛАВА,

в которой делается
попытка взять быка за
рога — увидеть элемен-
тарные частицы



Грубо говоря, это похоже на попытку определить по заоблачным следам конструкцию пролетевшего реактивного самолета.

К. Форд. «Мир элементарных частиц»

**Демокрит,
Галилей, Мах
и камера Вильсона**

Уже давно люди перестали верить в то, что можно усмотреть перво-причину всех вещей, сидя в кабинете за письменным столом или совершая прогулку под звездами и размышляя о том, каким должен быть мир. Правда, с помощью гениальных озарений Демокрит, Лукреций Кар и другие сумели прийти к атомной гипотезе, в общих чертах правильно отражающей природу вещей, но все же подлинное развитие науки в современном смысле слова берет начало с трудов Галилея, когда стали опытным путем отыскивать количественно формулируемые законы природы.

По словам В. Вайскопфа, это было началом науки в той форме, в какой мы знаем ее сегодня. Вместо того чтобы пытаться установить сразу всю истину и объяснить целиком

Вселенную, ее возникновение и нынешнее состояние, наука стала отыскивать истины малого масштаба: «Как падает камень на землю? На сколько градусов нагреется вода, если опустить в нее кусок горячего железа?» и т. д. Вместо того чтобы задавать общие вопросы и получать частные ответы, ученые стали задавать частные вопросы и находить общие ответы. Только отказ от немедленного получения «единственной и абсолютной истины», только бесконечный извилистый путь сквозь пестроту экспериментов позволили научным методам стать более проникающими, научным выводам стать более фундаментальными.

Именно на этом пути теоретических обобщений, опирающихся на показания самой природы, наука достигла поразительных результатов и, главное, создала уверенность в неограниченной познаваемости мира.

Надо сказать, правда, было время, когда многие ученые впали в другую, по сравнению с древними мыслителями, крайность. Стали считать единственной посильной задачей науки описание макроскопических явлений, доступных непосредственному созерцанию. Это было не так давно: в конце XIX в. и даже в начале XX в. Крупные физики, такие как, например, Э. Мах, считали попытки привлечения в науку таких объектов, как атомы и молекулы, недопустимыми. Они утверждали, что не только получить неопровержимые данные о свойствах атомов, но даже доказать экспериментально их существование невозможно.

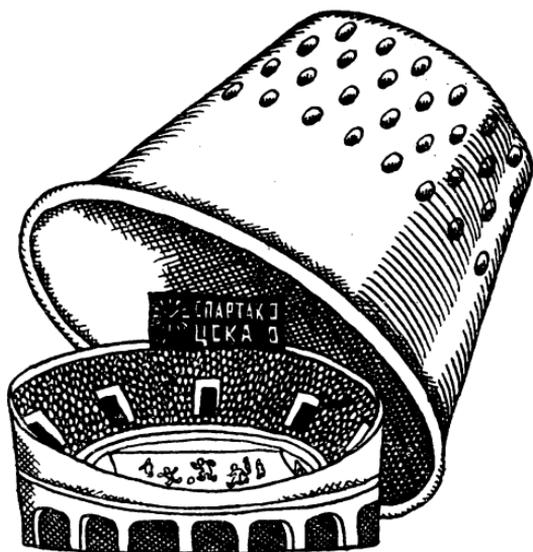
С тех пор прошло несколько десятков лет, и каждый собственными глазами может не только убедиться в существовании атомов, но и наблюдать в камере Вильсона их превращения.

Теперь стало ясно, что, не получая той огромной информации о микромире, которую поставляют нам разнообразные приборы, мы никогда бы не могли даже отдаленно представить себе всю сложность явлений в микромире.

Кое-что о масштабах в микромире

Наблюдать сами элементарные частицы, видеть их непосредственно, невооруженным глазом, невозможно вследствие их крайне малых размеров.

Размер элементарной частицы — понятие весьма неопределенное. Микрообъекты не имеют никаких резко очерченных границ. Однако опыты по рассеянию электронов на протонах позволили оценить размеры протона. Средняя плотность заряда в протоне плавно спадает от центра к



периферии, убывая в несколько раз на расстоянии 10^{-13} см от центра. Это расстояние условно и принимается за размеры протона. Такие же размеры имеет и нейтрон. О размерах электрона можно лишь сказать, что они не превышают 10^{-15} см.

Если бы частицы столь ничтожных размеров были упакованы вплотную друг к другу, то объем человеческого тела был бы равен не 60–70 л, а всего лишь объему кубика с ребром 0,1 мм. В наперсток можно было бы упрятать несколько тысяч человек.

В ядре частицы действительно упакованы довольно плотно, а вот атом до крайности пуст внутри, если не считать заполняющее его электрическое поле. Атом гораздо более пуст, чем наша Солнечная система. Если бы атом внезапно вырос до размеров земной орбиты, то ядро оказалось бы в 1000 раз меньше Солнца.

Нужно идти по следу

Хотя видеть элементарные частицы невозможно, ученые научились выслеживать отдельные элементарные частицы и даже на-

блюдать за длинной цепочкой их превращений друг в друга. Удалось также выявить и характеризовать очень точными числами различные свойства элементарных частиц.

Мы не можем видеть сами частицы, но с помощью не таких уж сложных ухищрений можем наблюдать следы,

оставляемые ими в веществе. Подобным образом, но уже без всяких ухищрений мы часто видим высоко в небе след пролетевшего самолета — тонкое облачко из кристалликов льда, — хотя сам самолет рассмотреть невозможно.

Следы, оставляемые частицами внутри приборов, — главный источник информации об их поведении и свойствах. На человека даже с посредственным воображением зрелище следов элементарных частиц, возникающих на его глазах в камере Вильсона, производит сильное впечатление, создает ощущение необычайно близкого соприкосновения с микромиром.

Но дело далеко не исчерпывается тем, чтобы только увидеть следы. Из фотографий следов различных частиц нужно извлечь информацию о них самих. Это — задача, по трудности близкая к той, о которой говорится в эпиграфе к главе. Физик находится в положении инженера, которому предложили сконструировать самолет, располагая лишь фотографиями его облачных следов.

Тем не менее с задачей исследования свойств элементарных частиц ученые справляются, и справляются весьма успешно. Для этого, правда, приходится создавать гигантские экспериментальные установки, такие, например, как ускорители заряженных частиц. Сооружение их сравнимо по стоимости с постройкой города на десятки тысяч жителей.

Любое устройство, регистрирующее элементарные частицы, подобно заряженному ружью со взведенным курком. Достаточно небольшого усилия при нажатии на спусковой крючок ружья, как произойдет эффект, не сравнимый с затраченным усилием, — выстрел.

Регистрирующий прибор — это большое более или менее сложное устройство (макроскопическая система), которое может находиться в неустойчивом состоянии. При небольшом возмущении его, вызванном пролетевшей элементарной частицей, немедленно начинается бурный процесс перехода системы в новое, более устойчивое состояние. Этот процесс и позволяет регистрировать частицу.

Имеется большое количество разнообразных счетчиков элементарных частиц. В настоящее время в экспериментах на крупнейших ускорителях применяются преимущественно сцинтилляционные и черенковские счетчики. Они дают электрический сигнал при прохождении сквозь них элементарной частицы.

Регистрация α -частиц по крохотным вспышкам света (сцинтилляциям) при попадании их на экран, покрытый сернистым цинком, использовалась еще на заре ядерной физики. Так, в опытах Резерфорда по рассеянию α -частиц ядрами число частиц, которые в результате рассеяния летели под определенным углом, определялось путем визуальных наблюдений сцинтилляций в микроскоп. Впоследствии этим методом как малоэффективным перестали пользоваться. Однако в 40-х годах сцинтилляционный метод был возрожден благодаря двум усовершенствованиям. Во-первых, непрозрачные экраны, покрытые сернистым цинком (ZnS), были заменены прозрачными кристаллами некоторых органических соединений или неорганическими кристаллами иодистого натрия (NaI) или иодистого калия (KI) с примесями, а также прозрачными жидкими сцинтилляторами. Благодаря этому оказалось возможным заменить поверхностный эффект объемным и, используя большое количество сцинтиллятора, обеспечить высокую чувствительность прибора. Во-вторых, вместо визуальной регистрации вспышек света в сцинтилляторе было предложено применять изобреетенный к тому времени фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), имеющий коэффициент усиления около ста миллионов.

Сцинтилляционный счетчик представляет собой комбинацию сцинтиллятора (твердого или жидкого) и фотоумножителя (рис. 1). Излучаемый сцинтиллятором при прохождении частицы свет попадает на фотокатод ФЭУ. Выбитые из катода электроны ускоряются электрическим полем и размножаются за счет вторичных электронов, выбитых из промежуточных электродов — динодов. В конце концов возникает достаточно сильный импульс тока, который можно непосредственно регистрировать. Существенно, что величина

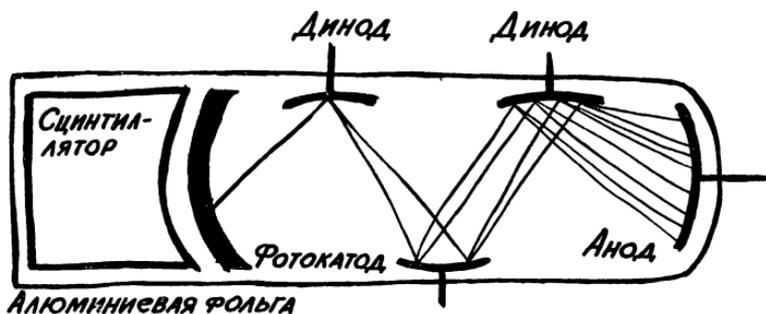


Рис. 1. Сцинтилляционный счетчик.

выходного импульса счетчика прямо пропорциональна поглощенной сцинтиллятором энергии частицы. Это позволяет измерять энергию частиц.

Широкое применение сцинтилляционных счетчиков объясняется тем, что, имея простое устройство, они успешно регистрируют практически все частицы. Эффективность регистрации велика. Даже γ -кванты могут регистрироваться с эффективностью 100%. Используя большие объемы жидкого сцинтиллятора, можно регистрировать частицы, очень слабо взаимодействующие с веществом.

На совершенно ином принципе основано действие черенковского счетчика. Советскими физиками, лауреатами Нобелевской премии Черенковым, Таммом и Франком было установлено, что при движении частицы в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде, возникает слабое излучение, направление которого составляет с направлением движения угол θ , определяемый отношением скорости света c к скорости частицы v (рис. 2):

$$\cos \theta = c/v.$$

Этот эффект можно использовать для регистрации элементарных частиц, улавливая с помощью чувствительного фотоумножителя черенковское излучение, возникающее в газе, жидкости или прозрачном твердом теле.

Черенковские счетчики пригодны только для регистрации частиц, движущихся с очень большими скоростями. По углу между направлением движения частицы и направлением излучения можно с точностью до десятых долей процента определить скорость частицы. Черенковские счетчики были применены в опытах, приведших к открытию антипротона.

Окна в микромир

Наиболее наглядная и точная информация о событиях микромира получается с помощью камеры Вильсона и ее младшей сестры — пузырьковой камеры. Эти приборы можно назвать окнами в микромир.

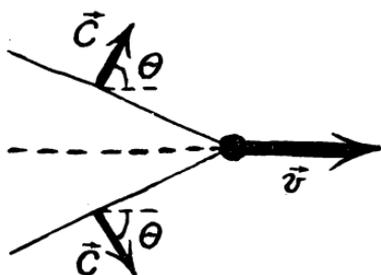


Рис. 2. Фронт световой волны, испускаемой частицей, которая движется со скоростью, превышающей скорость света в данной среде.

Камера Вильсона, созданная еще в 1912 г., представляет собой герметически закрытый сосуд с прозрачными стенками, заполненный парами воды или спирта, близкими к насыщению. Дном камеры служит подвижной поршень. При резком опускании поршня газ в камере расширяется и одновременно охлаждается, так как при расширении он совершает работу и расходует часть своей внутренней энергии. Пары становятся перенасыщенными, т. е. весьма неустойчивыми, склонными к конденсации. Превосходными центрами конденсации являются ионы, которые создает быстрая заряженная частица, отрывая электроны от нейтральных атомов. Если ионизирующая частица проникнет в камеру непосредственно перед расширением или сразу после него, то вдоль цепочки ионов, которые она образует, происходит конденсация паров. Возникающие на ионах капельки воды образуют туманный след пролетевшей частицы — трек, который можно видеть простым глазом и сфотографировать. По длине трека удастся определить энергию, а по числу капелек на единице длины трека оценить модуль скорости частицы.

Советскими физиками Д. В. Скобельцыным и П. Л. Капицей был предложен простой метод, позволяющий по фотографиям треков получить много важных сведений о частице. Камеру Вильсона помещают в магнитное поле. При этом траектория заряженной частицы искривляется. По направлению отклонения и кривизне траектории можно определить знак заряда частицы и отношение заряда к массе.

Хуже обстоит дело с нейтральными частицами. Они не оставляют следов в камере Вильсона, так как, не обладая зарядом, не вызывают ионизации атомов. Об их присутствии можно судить только по вторичным эффектам: столкновениям с заряженными частицами, распадам на заряженные частицы и т. д.

Наиболее интересные события в микромире происходят при столкновениях частиц высокой энергии. Можно наблюдать целые серии последовательных превращений более тяжелых частиц в более легкие. Можно, но только не в камере Вильсона. Из-за малой плотности рабочего вещества камеры (газ) проследить длинную цепь рождений и распадов частиц нельзя. Частицы большой энергии слишком быстро покидают камеру, не испытав каких-либо превращений.

В 1952 г. физики справились и с этой проблемой. Была построена пузырьковая камера. Эта камера наполняется жидкостью, чаще всего жидким водородом или пропаном.

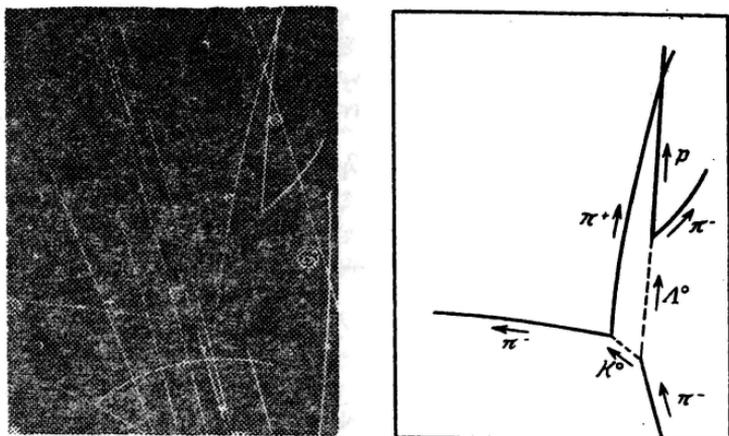


Рис. 3. Превращения элементарных частиц в процессе слабого взаимодействия, зарегистрированные в пузырьковой камере.

В подготовленном для работы состоянии жидкость в камере находится под высоким давлением, предохраняющим ее от закипания, несмотря на то, что температура жидкости выше температуры кипения при атмосферном давлении. При резком понижении давления жидкость оказывается перегретой и в течение некоторого времени находится в этом неустойчивом состоянии. Для того чтобы она закипела, нужны какие-либо центры парообразования. Пролетающая заряженная частица и создает такие центры в виде цепочки ионов. На этих ионах образуются пузырьки пара, составляющие трек частицы (рис. 3).

Из-за большой плотности жидкости (по сравнению с плотностью газа) частица быстро теряет свою энергию. Пробеги частиц оказываются достаточно короткими, и частицы даже больших энергий застревают в камере. Это позволяет наблюдать как распад частицы (или серию последовательных распадов), так и вызываемые ею реакции. Большинство новых элементарных частиц было открыто в последнее время с помощью пузырьковых камер.

Однако обработка информации, даваемой пузырьковой камерой, весьма трудоемка. Сначала фотографии треков просматривают и отбирают наиболее интересные. Затем изображения с помощью специального устройства преобразуются в серию электрических импульсов, подобно тому как это делается в телевизионной передающей трубке, и дальнейший анализ производится с помощью электронных

вычислительных машин автоматически. И даже в этом случае на изучение каждой фотографии затрачивается довольно много времени. Поэтому обнаружить с помощью пузырьковой камеры очень редкие события, имеющие место в мире элементарных частиц, довольно трудно.

Для увеличения вероятности обнаружения редких реакций между частицами сейчас изготавливают огромные пузырьковые камеры с рабочим объемом около 30 м^3 . Часто камеры заполняют более плотными жидкостями, чем водород или пропан, например фреоном.

В 1957 г. была изобретена искровая камера. Ее действие основано на применении электрического пробоя. В камере имеется система плоскопараллельных пластин, расположенных близко друг к другу. Пространство между пластинами заполнено инертным газом (обычно неоном). На пластины подается высокое напряжение, чуть ниже пробойного. При пролете быстрой частицы вдоль ее траектории между пластинами проскакивают искры, создавая огненный трек.

Главное преимущество искровой камеры по сравнению с пузырьковой в том, что она может управляться автоматически. Команда к фотографированию треков дается лишь после того, как окружающие камеру счетчики зарегистри-

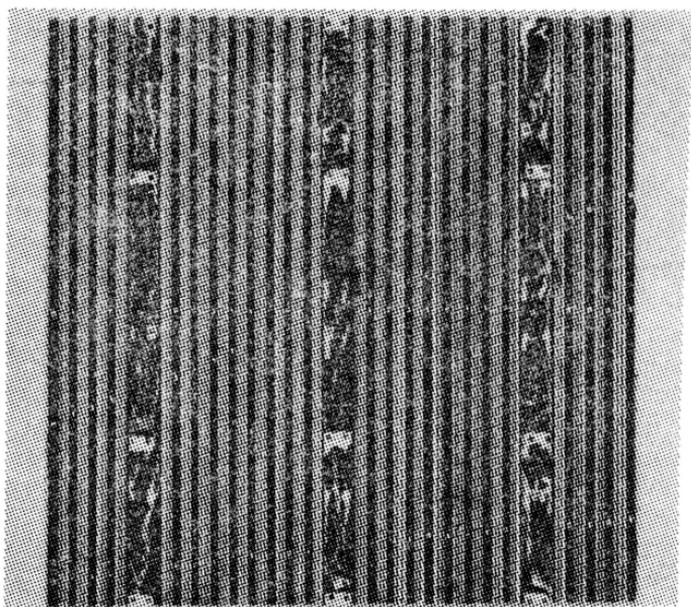


Рис. 4. Следы частиц, порожденных нейтрино в искровой камере.

руют событие, представляющее интерес. Одновременно подается напряжение на электроды камеры. Часто при этом применяются электронные логические схемы, оценивающие автоматически до включения камеры важность получаемой информации.

Такое управление пузырьковой камерой невозможно. Дело в том, что время жизни зародышевых пузырьков очень мало (менее миллионной доли секунды) и за это время по сигналу счетчиков не успевает сработать механическое устройство, уменьшающее давление в камере. Но четкость треков в пузырьковой камере много выше, чем в искровой.

Искровая камера, кроме того, позволяет осуществлять автоматическую регистрацию треков с использованием электронно-вычислительных машин непосредственно в экспериментальной установке. Для этого электроды камеры выполняются в виде очень тонких параллельных проволок, расположенных на расстоянии около одного миллиметра друг от друга (рис. 5). Искра при попадании в какую-либо проволочку вызывает в ней слабый ток, который фиксируется с помощью того или иного устройства и подается в вычислительную машину. Номера проволок, в которых возник ток, определяют траекторию частицы. Таким образом, вычислительная машина сразу же получает сведения о процессах в камере и может тут же анализировать полученные данные. Это чрезвычайно сокращает время между экспериментом и получением обработанной информации.

Кроме того, внутри искровых камер можно помещать многотонные металлические пластины для увеличения вероятности обнаружения редких реакций, в частности реакций, вызываемых нейтрино. Поместить такие массивные мишени внутрь пузырьковой камеры невозможно.

Для обнаружения реакций, вызванных нейтрино, применяют в настоящее время сложные комбинированные детекторы, состоящие из больших объемов жидкого сцинтиллятора, множества фотоумножителей и счетчиков, нескольких искровых камер и мощных электромагнитов.

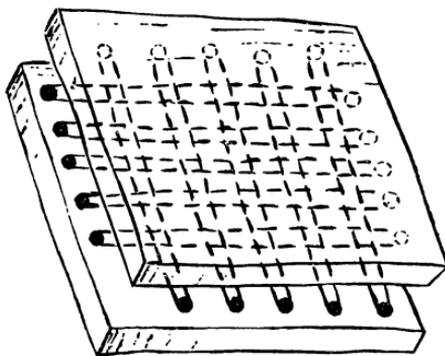


Рис. 5. Схема искровой камеры с проволочными электродами.

**О чем мы
не будем говорить**

Много еще можно было бы говорить о других устройствах для регистрации элементарных частиц, о толстослойных эмульсиях, о других счетчиках частиц и т. д. и т. п. Можно было бы в деталях проследить, каким образом физики перекидывают мост от туманных следов в камерах к свойствам самих частиц. Большая глава или целая книга получилась бы, если начать рассказывать, как физики получили в свое распоряжение мощные, легко управляемые пучки частиц огромных энергий.

Всего этого в книге мы почти не будем касаться. Наша цель — познакомить со свойствами частиц, какие они есть, и с законами превращения их друг в друга. Поэтому методов исследования, используемых для изучения микромира, мы будем касаться только вскользь, там, где это совершенно необходимо.

3 ГЛАВА,

из которой можно усмотреть, что величие идей физики XX века граничит с недоступностью их для понимания



Часто говорят, что «природа проста». Неверно! Это наш ум стремится к простоте, чтобы не тратить лишних усилий.

Л. Бриллюэн. «Научная неопределенность и информация»

Трагедия на рубеже XX в.

Величайший переворот в физике произошел на рубеже XX в. Именно в это время великие принципы классической физики обнаружили свою несостоятельность перед лицом новых фактов. Физики перешли границы новой неведомой области, имя которой микромир.

И здесь с первых же шагов последовал ряд ошеломляющих открытий. Природа, по выражению французского физика Ланжевена, оказалась непохожей на детскую игрушку — матрешку с ее одинаковыми, вложенными одна в другую деревянными фигурками, различающимися только размерами. В природе уменьшение масштабов до атомного связано с резким изменением физических свойств и законов.

Удар по представлениям, ставшим привычными, оказался тем более чувствительным, что в конце XIX в. даже выдающиеся физики были убеждены в том, что основные законы природы раскрыты и остается только использовать их для объяснения разнообразных явлений и процессов.

Ведь до этого фундаментальные принципы механики Ньютона, электродинамики Максвелла и других разделов физики получали все новые и новые подтверждения своей справедливости. Поэтому казалось, что коль скоро открыты законы, управляющие определенным кругом процессов, то это сделано окончательно, раз и навсегда.

Никому не приходило в голову, что с уменьшением, к примеру, массы тел или увеличением их скорости законы Ньютона, давно считавшиеся чуть ли не самоочевидными, могут оказаться несостоятельными.

Один из крупнейших физиков XIX в. — Кельвин с большой уверенностью писал о безоблачном научном горизонте, на котором его взор смог усмотреть лишь два маленьких облачка. Этими облачками были: отрицательный результат опыта Майкельсона, ставившего целью обнаружить зависимость скорости распространения света от направления светового луча относительно летящей в пространстве Земли, и необъяснимая существующей теорией зависимость теплоемкости газов от температуры.

Однако на общем фоне огромных достижений науки эти два неприятных факта казались случайной заминкой, которая скоро будет преодолена. Лишь такой выдающийся ученый, как Кельвин, смог обратить особое внимание именно на эти факты. Ведь было много других непонятных явлений, привлекавших внимание ученых.

С течением времени стало все более и более отчетливо выясняться, что отмеченные Кельвином явления никак не укладываются в рамки той, вполне созревшей к концу XIX в. физики, которую ныне называют классической.

Необычайность результата опыта Майкельсона бросается в глаза, и надо было лишь полностью оценить значение этого результата. Ведь нельзя представить себе, что скорость относительно Земли человека, бегущего по эскалатору метро, не зависит от скорости самой лестницы. Скорость же света относительно наблюдателя, в противоречии с обычными представлениями, не зависит от того, движется ли наблюдатель навстречу волне или же убегает от нее.

Что же касается теплоемкости газов, то, согласно теории, она должна зависеть только от числа степеней свободы

молекул, т. е. числа независимых движений, которые молекула может совершать. Если молекулы способны двигаться лишь поступательно, то сообщенная газу при нагревании энергия равномерно распределяется по трем степеням свободы молекул, причем кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы, пропорциональна абсолютной температуре газа. Газ, молекулы которого могут вращаться, должен иметь большую теплоемкость, так как в этом случае сообщаемая газу при нагревании энергия распределяется и по вращательным степеням свободы. Благодаря этому на каждую степень свободы приходится меньшая энергия и соответственно температура меняется на меньшую величину.

Если атомы в молекуле способны, кроме того, совершать колебательное движение, то теплоемкость газа должна быть еще больше, так как часть энергии расходуется на возбуждение колебаний. Однако опыт показывает, что только в некотором определенном интервале температур теплоемкость газа постоянна. При охлаждении она уменьшается, а при нагревании увеличивается. Молекулы ведут себя так, как если бы при охлаждении газа вращательные степени свободы «замораживались» (молекулы перестают вращаться), а колебательные степени свободы «размораживались» только при достаточно высоких температурах. С точки зрения классической физики совершенно непонятно, как это может происходить.

Подмеченные странности в поведении микрообъектов, обнаруженные при изучении теплоемкости газов, оказались не единственными. К нелепому результату привела теория излучения электромагнитных волн нагретым телом — любое тело должно путем излучения отдать внутреннюю энергию и охладиться до абсолютного нуля. В дальнейшем вся проблема поведения микрочастиц сконцентрировалась на теории теплового излучения.

Было неясно, почему теория, блестяще описывающая излучение электромагнитных волн антенной и даже предсказавшая само существование этих волн, не способна дать количественное объяснение процессу излучения электромагнитных волн атомами обыкновенного нагретого тела. Самые строгие рассуждения, основанные на законах механики и электромагнетизма, приводили к вопиющему противоречию с опытом. Никакие ухищрения не спасали теорию от противоречащего простым фактам вывода, будто энергия не может удержаться в нагретом теле и обязана целиком перейти в излучение. Тепловое равновесие между телами

и излучением не может существовать, и все тела должны остыть до абсолютного нуля.

В действительности же тепловое равновесие между телами и излучением устанавливается. Для спасения положения Макс Планку пришлось допустить в полном противоречии со сложившимися представлениями, что не только вещество состоит из отдельных частиц, но и энергия в ряде случаев может принимать только прерывные значения. Это позволило построить теорию теплового излучения и решить загадку зависимости теплоемкости от температуры.

Таким образом, непригодность классической физики для объяснения многих явлений становилась не только очевидной, но и бесспорной.

Еще одно открытие конца XIX в. хотя и не противоречило известным фундаментальным законам, но существеннейшим образом меняло представления о строении мира. Как раз в это время выяснилось, что основные кирпичи мироздания — атомы — подвержены разрушению. Открытие радиоактивного распада не оставляло в этом сомнений.

Странные свойства обнаружил электрон. Его масса, как показали прямые опыты, возрастала со скоростью. Основная характеристика тела — масса, считавшаяся со времен Ньютона неизменной, оказалась зависящей от скорости. А ведь массу было принято рассматривать как меру количества вещества, содержащегося в теле.

Все эти небывалые для науки события пришлось на небольшой отрезок времени и не могли не потрясти умы. Ру-



шились основы основ: механика Ньютона, электродинамика Максвелла. Начали расшатываться фундаментальные понятия. Многими физиками старшего поколения, даже самыми крупными, овладела растерянность. Но все эти трудности в конечном счете оказались трамплином для прыжка к новым физическим теориям XX в.: теории относительности и квантовой механике. Эти теории помогли распутать самый сложный клубок закономерностей микромира.

Мы остановимся на существовании этих теорий предельно кратко, сосредоточив внимание лишь на тех следствиях, которые необходимы для понимания свойств элементарных частиц и их превращений.

Специальная теория относительности

Опыт Майкельсона недвусмысленно показал, что скорость света не зависит ни от движения источника, ни от движения приемника света и в вакууме всегда равна 299 792 км/с.

С другой стороны, еще со времен Галилея было хорошо известно и многократно проверено на различных механических экспериментах принцип относительности. Согласно этому принципу равномерное прямолинейное движение системы никак не влияет на течение механических процессов внутри этой системы. Так, на пароходе вы можете спокойно играть в теннис независимо от того, стоит ли он на якоре или пересекает Атлантический океан.

Если законы механики Ньютона справедливы по отношению к какой-то одной системе отсчета, то они справедливы и по отношению к любой другой системе отсчета, движущейся равномерно и прямолинейно относительно первой.



ливы и в любой другой, которая движется относительно данной с постоянной скоростью. Такие системы отсчета называются инерциальными. В частности, инерциальной является система, связанная с Солнцем и неподвижными звездами.

Эйнштейн распространил принцип относительности Галилея, принцип равноправия инерциальных систем отсчета, на процессы любой природы, в частности электромагнитные. Основываясь на работах Лоренца и других ученых, он построил новую теорию пространства и времени — теорию относительности.

Дело в том, что принцип относительности и тот факт, что скорость света во всех инерциальных системах отсчета одинакова, не могут быть совмещены с обычными, укоренившимися в нашем сознании представлениями о пространстве и времени.

Согласно обычным представлениям расстояние между двумя любыми точками не зависит от системы отсчета и, следовательно, движение никак не влияет на геометрические размеры тел. Время также течет одинаково как в неподвижных, так и в движущихся системах.

Согласно новым представлениям длина, промежуток времени, масса и многие другие величины, долгое время считавшиеся абсолютными, в действительности имеют определенное значение только по отношению к определенной системе отсчета. Они, как говорят, относительны. Причем эти свойства величин заметно сказываются лишь при скоростях движения, близких к скорости света. Скорость света в пустоте имеет в природе фундаментальное значение. Ни одно материальное тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света.

В движущейся системе время течет медленнее. Так, на часах в ракете, летящей со скоростью 299 702 км/с (на 90 км/с меньше скорости света), пройдет всего лишь один час, в то время как земные часы покажут уже сто часов. Если для современных ракет это замедление времени настолько мало, что его очень трудно обнаружить, то для нестабильных элементарных частиц оно очень существенно. Мезоны и другие элементарные частицы, как показывает прямой эксперимент, живут тем дольше, чем с большей скоростью они движутся. Так, время жизни π^+ - или π^- -мезона, движущегося со скоростью, составляющей 99,5% от скорости света, удлиняется в десять раз по сравнению с временем жизни медленного мезона.

Для стремительно летящих частиц время замедляет свой темп. Поэтому, когда в таблице элементарных частиц указывается время жизни, то всегда имеется в виду время жизни медленной частицы.

Аналогичные изменения происходят и с размерами предметов. Если бы тело космонавта, летящего со скоростью 299 702 км/с, было расположено в направлении движения, то его рост в системе отсчета, связанной с Землей, не превышал бы двух сантиметров при нормальной толщине. Самое удивительное, что сам он никакого изменения своих размеров не обнаружил бы. Но если бы он посмотрел на нас, то увидел бы, что все предметы и люди на Земле подверглись странному сплющиванию, уменьшив свои размеры в направлении движения в сто раз.

Сокращение размеров, равно как и упомянутое изменение течения времени, обладает замечательным свойством взаимности. Здесь, по словам английского ученого Эддингтона, получается парадокс, идущий гораздо дальше того, что мы встречаем у Свифта. Гулливер смотрел на лилипутов как на карликов, а лилипуты смотрели на Гулливера как на великана. Это вполне естественно. А могло ли быть так, что лилипуты казались бы карликами Гулливеру, а Гулливер казался карликом лилипутам? «Нет, — восклицает Эддингтон, — это слишком нелепо даже для сказки, такие вещи можно найти только в серьезной научной книге».

Масса и энергия

Нам не потребуется в дальнейшем знание и даже понимание основ теории относительности. Исключительное значение для физики элементарных частиц имеют в основном два следствия теории относительности. В них нужно хорошо разобраться. Оба они касаются уже не свойств пространства и времени, а динамических характеристик материи — массы и энергии.

В механике Ньютона масса является основной характеристикой любого тела. Она определяет его инертные свойства, т. е. способность получать то или иное ускорение под действием внешней силы.

Тысячи проделанных опытов демонстрировали, как казалось, абсолютную неизменность массы тела, если только оно не дробилось на части.

В новой же, релятивистской механике, соответствующей изменившимся представлениям о пространстве и времени, масса любого тела зависит от его скорости. Если масса покоящегося тела равна m_0 , то при движении его со

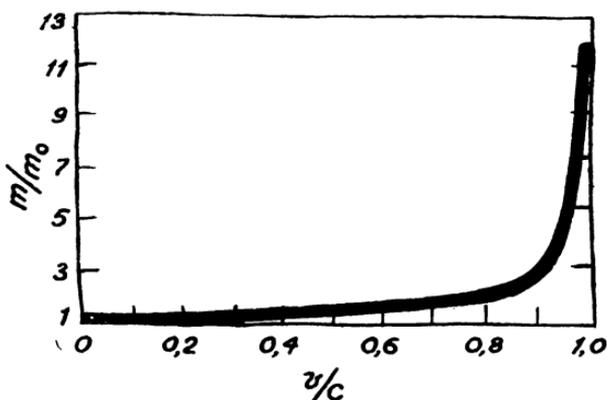


Рис. 6. Возрастание массы движущейся частицы с увеличением скорости ее движения.

скоростью v масса будет равна

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (1)$$

По мере приближения v к c масса стремится к бесконечности (рис. 6). Именно поэтому ни одно тело, имеющее массу покоя, нельзя разогнать до скорости света.

Массы элементарных частиц крайне малы, и поэтому им сравнительно легко можно сообщить большую скорость, близкую к скорости света. Если скорости электронов в атомах примерно в 100 раз меньше скорости света, то частицы, разгоняемые в современных ускорителях, имеют почти световые скорости. В больших ускорителях масса протонов увеличивается в процессе ускорения в сотни раз. Именно, благодаря росту массы с увеличением скорости, быстрая частица способна породить целый каскад новых частиц.

Уже упоминалось, что фотон и нейтрино всегда движутся со скоростью света. Эти частицы не существуют в состоянии покоя. Едва родившись, они сразу же устремляются вперед со скоростью света. Определить массу фотона или нейтрино из формулы (1) нельзя. Но эту массу можно точно определить, используя второе, наиболее фундаментальное следствие теории относительности. Это — знаменитая формула Эйнштейна о взаимосвязи массы с энергией

$$E = mc^2, \quad (2)$$

где E — энергия тела, m — его масса и c — скорость света.

Даже если тело или частица покоятся, то с ними связана энергия покоя

$$E_0 = m_0 c^2.$$

По мере увеличения скорости движения тела к его собственной энергии, энергии покоя, прибавляется кинетическая энергия, энергия движения. Лишь фотоны и нейтрино не имеют энергии покоя. Формула (2) позволяет в этих случаях вычислить массу частиц по их энергии, которая поддается прямым измерениям.

Любое изменение энергии системы, согласно формуле (2), связано с изменением его массы. Так, например, при нагревании масса тела увеличивается, а при охлаждении — уменьшается. Однако этот эффект крайне мал из-за того, что коэффициент пропорциональности между массой и энергией — квадрат скорости света — очень велик, а изменения энергии при теплообмене обычно незначительны. Поэтому наблюдать экспериментально изменение массы при нагревании практически невозможно. Нельзя заметить изменения массы и при химических реакциях, поскольку выделяемая или поглощаемая при этих реакциях энергия мала. Энергетическая цена одного грамма массы — квадрат скорости света — очень большая величина.

Лишь превращения атомных ядер и элементарных частиц сопровождаются такими большими изменениями энергии, что сопутствующие им изменения массы становятся ощутимыми. Так, масса ядра гелия на целый процент



меньше массы составляющих это ядро двух протонов и двух нейтронов в свободном состоянии. Энергия покоя ядра гелия меньше суммарной энергии покоя элементарных частиц, из которых оно состоит, также на один процент. Слияние элементарных частиц в атомное ядро сопровождается выделением огромного по масштабам микромира количества энергии. Эта энергия уносится в виде излучения, и вместе с излучением уходит часть массы. Можно сказать, что при слиянии элементарных частиц или легких ядер часть энергии, заключенная внутри них, вырывается наружу. Когда подобные превращения происходят с участием очень большого количества легких ядер, наблюдается взрыв чудовищной силы. Это взрыв водородной бомбы.

Отсюда видно, что энергия покоя частиц — самый грандиозный и концентрированный резервуар энергии во Вселенной. При взрыве водородной бомбы теряется лишь 0,1% массы покоя или собственной энергии. Но энергия покоя может быть освобождена полностью, может полностью превратиться в энергию движения. Это происходит, например, каждый раз при столкновении электрона с позитроном.

Сохранение энергии

и

элементарных частицы

Как известно из классической механики, энергия любой замкнутой, т. е. не взаимодействующей с внешним миром, системы сохраняется. Все превращения элементарных частиц происходят столь быстро и на столь малых по сравнению с размерами атомов расстояниях, что сталкивающиеся частицы можно считать изолированной системой. Поэтому при любом превращении частиц энергия сохраняется.

Энергия частиц как до реакции, так и после нее может быть в двух формах: кинетической (энергия движения) и собственной (энергия покоя). В процессе превращения частиц кинетическая энергия может переходить в собственную и обратно. Причем реакции между элементарными частицами отличаются от химических и ядерных коренным образом: при этих реакциях вся энергия покоя одних частиц может превратиться в энергию покоя и движения совершенно других частиц. Так, например, при распаде нейтрона его энергия покоя идет на образование энергии покоя и движения протона и электрона, а также на сообщение определенной кинетической энергии антинейтрину.

Совершенно ясно, что при распаде масса исходной частицы должна быть больше суммы масс частиц, на которые

она распадается (речь идет о массах покоя). Жесткие ограничения подобного рода ставит закон сохранения энергии и в других случаях. Но в мире элементарных частиц может существовать и сверхпарадоксальная ситуация. Легкая частица не может распадаться на более тяжелые, но состоять из них может!

Если силы взаимодействия между двумя частицами очень велики, то при слиянии их может образоваться объект с массой покоя, меньшей массы любой из начальных частиц. Избыток массы уйдет в виде излучения (потока фотонов), лишённого массы покоя. Чтобы расщепить полученную частицу на те же исходные части, нужна энергия, превышающая энергию покоя любой из исходных частиц.

Как же тогда установить, имеет ли элементарная частица сложное строение? Привычные и естественные представления о том, что более сложные, более тяжелые частицы должны состоять из более простых и легких, оказались подорванными. Часть может оказаться больше целого!

Нигде, кроме как в мире элементарных частиц, такая ситуация немыслима.

Итак, теория относительности посредством формулы $E = mc^2$ показала нам, каким сложным может быть мир элементарных частиц, какими необычными могут быть отношения между частицами.

Квантовая теория приводит к еще более удивительным выводам. Вот, например, одна из вероятных картин строения элементарных частиц, соответствующая квантовой теории: каждая частица состоит в определенном смысле из всех остальных частиц!

**Из небытия выплывает
слово квант**

Долго, очень долго свет считался волной. И действительно, при распространении свет обнаруживает свойства, типичные для всех волн: явления интерференции и дифракции.

При встрече двух пучков света световые волны накладываются друг на друга. Если при этом волны имеют одинаковую длину и одна волна не смещается по отношению к другой, то в одних местах они взаимно усиливают друг друга, а в других — гасят. Это и есть интерференция.

Наблюдать это явление не так уж трудно. Возьмите линзу от очков дальнозоркого и положите ее выпуклой стороной на стеклянную пластинку. Вблизи точки соприкосновения линзы с пластинкой вы увидите темные и светлые кольца небольших радиусов. Они получаются из-за того,

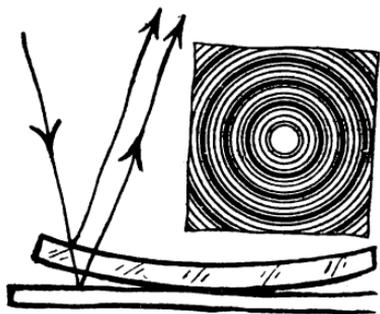


Рис. 7. Интерференционные кольца в тонкой воздушной прослойке (кольца Ньютона).

микроскопа разглядеть детали предметов, значительно меньшие длины волн.

Таким образом, при распространении свет бесспорно ведет себя как непрерывное образование — волна. Естественно было думать, что и излучение света является непрерывным процессом. Именно к такому выводу приводила электромагнитная теория света Максвелла.

Однако в 1900 г. Планк показал, что в действительности излучение света происходит отдельными порциями — квантами. Только при таком предположении теорию теплового излучения удалось согласовать с опытом. Если бы из возбужденных атомов свет вытекал непрерывно, как некая сверхтонкая субстанция, то атомы никоим образом не могли бы удерживать в себе энергию и отдавали бы ее всю без остатка электромагнитному полю¹⁾.

Энергия кванта зависит только от одной величины — частоты электромагнитной волны. Она прямо пропорциональна частоте:

$$E = h\nu.$$

Постоянный коэффициент пропорциональности h — это знаменитая постоянная Планка — квант действия. Постоянная Планка очень мала ($h = 6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·с), поэтому мала и энергия одного кванта. Так, желтый свет излучается порциями всего по 2 эВ каждая.

¹⁾ Не нужно представлять себе картину излучения слишком упрощенно. В атомах нет света, так же как в струне рояля нет звука. Возбужденный атом, согласно классической электродинамике, рождает свет, подобно тому как колеблющаяся струна рождает звук.

что световые волны, отраженные от пластинки и линзы, проходят разный путь и, складываясь, взаимно гасят или усиливают друг друга в зависимости от того, насколько одна волна отстает от другой (рис. 7).

Дифракция света состоит в огибании светом препятствий, имеющих размеры, сравнимые с длиной волны. Из-за дифракции, в частности, нельзя с помощью

Из того факта, что свет излучается порциями, еще не вытекает прерывистая структура самого светового луча. «Если пиво всегда продают в бутылках, содержащих пинту, — говорит Эйнштейн, — отсюда вовсе не следует, что пиво состоит из неделимых частей, равных пинте». Но эксперименты по вырыванию светом электронов из вещества (фотоэффект) настойчиво указывали, что свет поглощается также только отдельными порциями. Излученная порция света сохраняет свою индивидуальность в дальнейшем.

Впервые эта мысль была высказана Эйнштейном в 1905 г. Порция света оказалась неожиданно очень похожей на частицу и была названа фотоном. Замечательными опытами советского физика С. И. Вавилова было установлено, что глаз, этот тончайший из «приборов» нашего организма, способен реагировать на различие освещенности, измеряемое единичными квантами.

Фотон — особенная частица. Подобно электрону, он обладает энергией и импульсом, но полностью лишен массы покоя. Покоящихся фотонов нет.

Итак, ученые были вынуждены признать, что свет обнаруживает удивительное единство, казалось бы, взаимно исключаящих друг друга свойств: непрерывных (волны) и прерывных (фотоны). Причем электромагнитную волну никоим образом нельзя считать некоторым образованием из фотонов, подобно тому как звуковая волна образована чередующимися сгущениями и разрежениями молекул воздуха. Абсолютно достоверно, что волновые свойства присущи одному фотону. Ведь молекулы воздуха могут образовывать волну только потому, что между ними существуют силы взаимодействия. Фотоны же непосредственно не взаимодействуют друг с другом. Поэтому наличие у фотона тех или иных свойств, в частности волновых, не может зависеть от присутствия по соседству других фотонов.

Волновые свойства частиц

Если с электромагнитным полем всегда связывалось представление о материи, непрерывно распределенной в пространстве, то электроны, напротив, рисовались воображению физиков как некие крохотные комочки материи. Это подчеркивалось уже самим названием — «частица», постоянно присутствующим рядом со словом «электрон».

Не допускаем ли мы здесь ошибки, обратной той, которая была сделана со светом? Может быть, электрон и другие частицы обладают также и волновыми свойствами? Эту

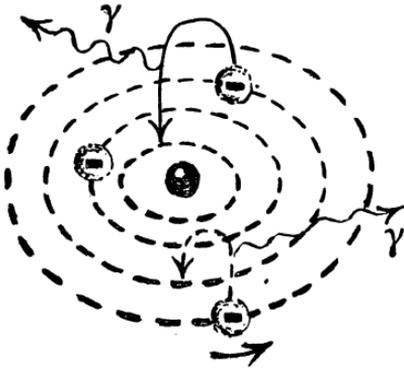


Рис. 8. Схема излучения фотонов при перескоке электронов с одной орбиты на другую.

короткая вспышка света свидетельствовала бы о печальном конце атома. В действительности ничего подобного не происходит. Атом может существовать неограниченно долго, если не обращаться с ним слишком грубо, не подвергать его сильным внешним воздействиям.

Датский физик Нильс Бор дополнил модель Резерфорда предположением, идущим вразрез с классической физикой. Он допустил существование в атомах лишь особых стационарных орбит, для которых вращательный момент является целым кратным постоянной Планка. Двигаясь по стационарным орбитам, электрон не излучает. Фотон излучается лишь при перескоке электрона с одной орбиты на другую (рис. 8).

Однако оставались неясности: почему имеются определенные устойчивые орбиты? Что заставляет электрон переходить с одной орбиты на другую? И т. д. А главное, теория Бора, прекрасно объяснившая спектр излучения атома водорода, оказалась совершенно неспособной объяснить спектр гелия, не говоря уже о более сложных атомах.

Предположив, что с движением частиц связано распространение некоторых волн, де-Бройль сумел найти длину этих волн. Для этого он, в сущности, распространил на все частицы ту связь между длиной волны и импульсом, которая справедлива для фотона. Найти эту связь несложно. Импульс фотона выражается формулой

$$p = mc,$$

так как фотон всегда движется со скоростью света. Но, со-

необычную мысль высказал в 1923 г. французский ученый Луи де-Бройль. Не в том ли причина всех трудностей в атомной физике, что мы не учитываем волновых свойств электрона?

А трудности были налицо. Планетарный атом Резерфорда, если бы классическая физика была верна, не мог бы существовать. Вращаясь вокруг ядра, электрон должен непрерывно излучать, терять энергию и быстро упасть на ядро. Ничтожно

гласно формуле Эйнштейна,

$$m = E/c^2.$$

Следовательно,

$$p = E/c.$$

С другой стороны, длина волны в соответствии с открытой Планком связью энергии фотона с частотой может быть выражена так:

$$\lambda = c/\nu = ch/E.$$

Отсюда непосредственно вытекает, что

$$\lambda = h/p.$$

Это знаменитая формула де-Бройля для длины волны, связанной с частицей, которая имеет импульс p .

Оказалось, что на любой стационарной орбите Бора укладывается как раз целое число волн де-Бройля.

Впоследствии волновые свойства, предсказанные де-Бройлем, были обнаружены экспериментально не только у электронов, но и у всех других элементарных частиц. Двойственность свойств частиц материи, несмотря на всю обычность, стала бесспорным фактом.

Принцип неопределенности

Но ведь не может же, например, электрон быть одновременно и частицей, и волной. Ведь эти понятия взаимно исключают друг друга. Да, вынуждены мы признать, не может. Значит, сказав, что электрон — и волна, и частица, мы тем самым соглашаемся с тем, что он не является ни тем, ни другим; ни частицей в обычном смысле слова, ни обычной волной. (То же самое относится к фотону, протону и т. д.) И если мы все же употребляем эти термины, то их нужно понимать в том смысле, что электрон лишь приближенно можно описывать, например, как частицу. Что значит приближенно?

Говоря о частице, мы представляем себе комочек вещества, находящийся в данный момент в определенном месте, обладающий определенной энергией и движущийся со строго определенной скоростью. При этом мы допускаем, что можно абсолютно точно задать координаты, импульс и энергию частицы в любой момент.

Однако, связывая импульс частицы однозначно с определенной длиной волны, мы от частицы переходим к образу бесконечной синусоиды, простирающейся во всем пространстве. Выражение «длина волны в данной точке» не может



иметь никакого смысла. Значит, не может иметь смысла понятие импульса в точке. Точно так же не имеет смысла понятие энергии частицы в данный момент: ведь энергия связана с частотой ($E = h\nu$), а понятие частоты относится к бесконечному во времени гармоническому колебательному процессу. Утверждение, что электрон лишь приблизительно может рассматриваться как материальная точка, означает, что его координаты, импульс и энергия могут быть заданы лишь приближенно. Количественно это выражается соотношением неопределенностей Гейзенберга.

Согласно соотношению Гейзенберга, чем точнее фиксирован, например, импульс, тем большая неопределенность будет в значении координаты. Если через Δp обозначить неопределенность импульса вдоль оси x , а через Δx — неопределенность, с которой фиксируется координата, то принцип неопределенностей Гейзенберга запишется в следующей форме:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq h,$$

где h — это та же постоянная Планка, что и в предыдущих формулах. Этот принцип — прямое следствие нелокализваемости волн. Ни одна волна не может занимать в пространстве область, меньшую длины волны.

Согласно принципу неопределенностей теряет смысл одно из важнейших понятий классической механики — понятие траектории частицы. Ведь это понятие предполагает, что в каждой точке пространства импульс (или скорость) частицы точно определен. Теперь уж нельзя говорить, что ча-

стица движется вдоль какой-то линии. Ньютоновское описание движения становится в микромире невозможным.

Из-за того, что постоянная Планка очень мала, принцип неопределенности имеет кардинальное значение лишь для очень легких частиц. Если бы масса частицы равнялась массе автомобиля, то неопределенность ее скорости была бы порядка 10^{-24} см/с при фиксации положения с точностью до размеров атома. Ясно, что эта неопределенность на много порядков меньше той, с которой мы можем измерять скорости. Для электрона в атоме положение совсем иное. Находясь в атоме, электрон локализован в пространстве с точностью 10^{-8} см. Ввиду малой массы электрона неопределенность скорости при этом достигает огромной величины — 10^8 см/с, которая лишь в 100 раз меньше скорости света (неопределенность скорости выражается через неопределенность импульса по формуле $\Delta v = \Delta p/m$).

Большое значение имеет также принцип неопределенностей для энергии и времени. Чем меньше промежуток времени Δt в течение которого протекает какой-либо процесс, тем больше неопределенность в значении энергии частицы ΔE :

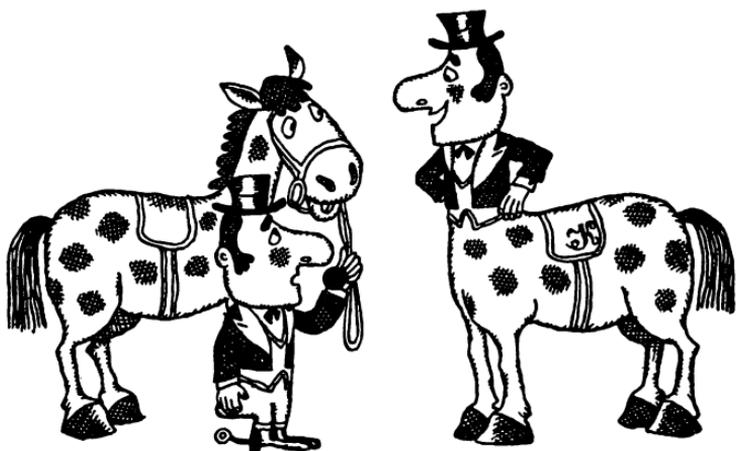
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h.$$

Это соотношение означает, что проверка выполнения закона сохранения энергии с точностью, превышающей $\Delta E = h/\Delta t$, невозможна ни при каком процессе.

Квантовая механика и наглядность

После напряженных усилий многих ученых различных стран в 20-х годах нашего века была построена новая механика. Это — квантовая (или волновая, как ее называли раньше) механика, способная удовлетворительно описывать движение микрочастиц, несмотря на всю парадоксальность (с обычной точки зрения) их свойств. Ее авторами явились Гейзенберг и Шредингер.

Квантовая механика обобщает классическую механику Ньютона и переходит в нее лишь в предельных случаях, когда конечной величиной кванта действия h можно пренебречь. Постоянная Планка — важнейшая универсальная константа, которая подобно скорости света определяет масштаб явлений в природе. Явления, в которых конечность величины кванта действия h существенна, подчиняются квантовым законам, а явления, в которых существенна конечность скорости распространения взаимодействий, подчиняются теории относительности.



Процессы, которые описывает квантовая механика, процессы микромира, недоступны не только восприятию органами чувств, но и воображению. Мы лишены возможности представить их себе наглядно в полной мере, так как они совершенно отличны от тех макроскопических явлений, которые человечество наблюдало на протяжении миллионов лет. Наше воображение «не создает новых образов, а лишь комбинирует известные» (А. Франс). Так, в частности, возникли образы ведьм и кентавров.

Пытаясь на своем макроскопическом языке описать поведение электронов и других частиц, мы с необходимостью приходим к несовместимым макроскопическим образам частиц и волн.

Вероятность и элементарные частицы

Самой, пожалуй, поразительной особенностью новой механики оказался ее вероятностный характер. Поведение даже одной частицы не определяется однозначным образом теми макроскопическими условиями, в которых находится частица.

Любой атом, получив энергию извне, некоторое время остается в возбужденном состоянии, не излучая. Это время — случайная величина, и момент испускания фотона не может быть предсказан точно. Если много атомов перевести в возбужденное состояние одновременно, то они будут излучать фотоны в разные моменты. И это — при полной изоляции атомов, когда внешние электромагнитные поля на них не действуют. Единственное, что позволяет рассчитать квантовая теория, — это вероятность испускания фотона в данный

момент времени (точнее, за некоторый очень узкий интервал времени). Вероятность испускания фотона за время Δt есть отношение числа атомов, которые за это время рождают фотоны, к числу всех возбужденных атомов.

Ясно, что вероятностная, или статистическая, теория не может быть проверена экспериментально путем наблюдения единичного акта излучения. Ее предсказания относятся либо к большой группе атомов, либо к большой серии повторных опытов с одним из них.

Ничто не демонстрирует вероятностный характер законов микромира столь отчетливо и наглядно, как распад элементарных частиц. Возьмем, к примеру, нейтроны. В атомных реакторах они рождаются в свободном состоянии в огромном числе (до 10^{18} нейтронов в секунду). Их среднее время жизни 16 мин, но это совершенно не означает, что все они, просуществовав 16 мин, дружно распадутся. Со всем нет. Некоторые из них распадаются сразу же по выходе из развалившегося ядра урана, другие же могут прожить более 30 мин.

Важно при этом подчеркнуть, что вероятность распада нейтрона совершенно не зависит от того, сколько времени он уже прожил. Нейтроны (это относится и ко всем другим нестабильным частицам) совершенно не стареют. Любой распад — это несчастный случай в жизни частицы и как таковой не может быть точно предсказан.

В самом факте существования вероятностных законов нет ничего нового и необычного. Статистические законы в физике были известны уже давно. Но раньше эти законы всегда относились к системам с громадным числом частиц, таким, как газ в сосуде или кусок твердого тела.

Теперь же выяснилось, что вероятностным законам подчиняется движение и вообще поведение отдельных, изолированных частиц. Этого трудно было ожидать. Статистический характер законов, оказывается, может быть совсем не связан со сложностью систем, с тем, что они состоят из очень большого числа объектов.

Многие частицы могут распадаться различными способами или, как говорят, распадаться по различным каналам. Так, K^+ -мезон, о котором мы еще будем говорить, может распадаться на μ^+ -мезон и нейтрино, а может и на π^+ - и π^0 -мезоны. Возможны и другие варианты распада. Предсказать, по какому каналу произойдет распад, нельзя. Можно определить лишь вероятность распада по тому или другому каналу: в среднем в 63% случаев распад идет по

первому каналу, а в 21,5% — по второму. Другие каналы менее вероятны.

Конечно, не исключена возможность того, что вероятность какого-либо процесса окажется близкой к нулю или единице. Тогда событие можно предсказать практически с полной достоверностью. Так, например, вероятность того, что свободный нейтрон просуществует сутки, хотя и не равна нулю, но настолько к нему близка, что мы с полным основанием можем утверждать, что за это время нейтрон распадется наверняка.

Вероятностный характер законов в настоящее время представляется фундаментальным свойством микромира.

**Все ли электроны
одинаковы?**

Квантовая механика позволила дать ответ на, казалось бы, совершенно безнадежный вопрос: «Все ли электроны (или другие элементарные частицы) абсолютно одинаковы?». Вопрос этот поначалу кажется безнадежным из-за того, что для ответа на него надо сравнить величины различных параметров, характеризующих электроны: масс, зарядов и т. д. Для этого их надо измерить. Но всякое измерение, увы, может быть проделано с конечной точностью. Поэтому всегда остается сомнение: может быть, на самом деле различие есть, только точности эксперимента не хватает, чтобы его уловить?

Тем не менее имеются достаточные основания утверждать, что элементарные частицы абсолютно тождественны. Дело в том, что, согласно квантовой теории, система тождественных частиц ведет себя совершенно иначе, чем система частиц неодинаковых, сколь бы малыми ни были различия между частицами.

Электронные же системы, как показывает опыт, ведут себя как системы одинаковых частиц. Если бы электроны чуть-чуть отличались друг от друга, они располагались бы в атоме не слоями, а на одинаковом расстоянии от ядра и не было бы периодической системы элементов.

В макромире мы не встречаемся ни с чем подобным, так как нет и не может быть совершенно тождественных макрообъектов. Как бы мы ни старались сделать одинаковыми два пятака, они все же будут разными.

Спин

Всем телам природы, от самых больших до самых маленьких, свойственно вращательное движение. Вращаются звезды, планеты, атомы. Вращаются, или, точнее, как бы вращаются, вокруг своих осей электроны.

Оговорка «как бы» нужна, так как микрочастицы нельзя считать маленькими шариками и представлять себе вращающуюся частицу подобной детскому волчку.

Да, частица вращается, обладает собственным вращательным моментом, который называется спином. Но волчок вы можете закрутить как угодно. Можно вообще его остановить. Сделать это с электроном нельзя. Электрон заверчен раз и навсегда, и изменить его вращательный момент не может ничто. Благодаря этому спин является такой же неотъемлемой характеристикой частицы, как масса или заряд.

Количественно значение спина элементарных частиц известно очень точно. Он равен либо $\hbar/2$, либо \hbar (величина \hbar представляет собой постоянную Планка, но только уменьшенную в 2π раза: $\hbar = h/2\pi$). Спин электрона, так же как и протона, нейтрона и многих других частиц, является полуцелым, т. е. он равен $\hbar/2$. Фотон имеет целый спин \hbar . Однако не все частицы закручены. Так, у π -мезонов спин равен нулю.

Спин элементарной частицы является вектором. Однако в сравнении с другими векторными величинами спин электрона, например, обладает той особенностью, что его

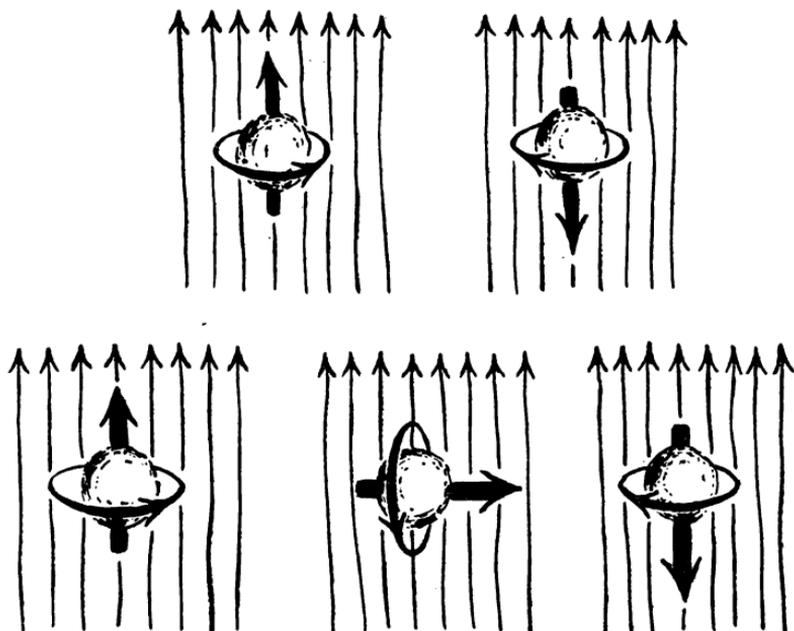


Рис. 9. Возможные ориентации частицы с полуцелым (вверху) и целым (внизу) спином.

проекция на любое направление, как показывает опыт, может принимать только два значения: $+\hbar/2$ и $-\hbar/2$. Знаки проекций указывают на то, что вращение электрона образует с любым направлением либо правый либо левый винт. Если спин частицы является целым, то его проекция на всевозможные направления может принимать три значения: \hbar , 0 , $-\hbar$ (рис. 9).

По макроскопическим масштабам величина спина элементарной частицы, разумеется, мала. Человек, сидящий на вращающемся стуле для пианино, должен был бы совершить один оборот примерно за 10^{27} лет, чтобы иметь такой же спин, как и электрон.

Но в микромире — свои масштабы. Здесь \hbar — естественная единица действия или вращательного момента, и в этих единицах спин элементарной частицы совсем не мал.

Уже было сказано, что система тождественных частиц ведет себя особым образом. Не так, как система частиц, чем-либо отличающихся друг от друга. Особенно замечательно поведение одинаковых частиц с полужелым спином, таких, как электроны. Эти частицы подчиняются принципу, установленному в 1925 г. В. Паули. Согласно принципу Паули одинаковые частицы с полужелым спином не могут находиться в одном и том же состоянии. Тождественные по своим свойствам, они не могут иметь еще и тождественные состояния. Так, например, в атоме не может быть двух электронов с одной и той же энергией, моментом импульса, проекцией момента импульса и проекцией спина. Именно из-за этого электроны в атомах располагаются слоями на разных расстояниях от ядра.

Несколько лет назад, когда физики вплотную подошли к изучению структуры элементарных частиц, выяснилось, что принцип Паули играет здесь немаловажную роль.

Что нужно помнить

Из всего сказанного о квантовых законах микромира нужно запомнить пять фактов:

- 1) корпускулярно-волновой дуализм (двойственность) свойств микрообъектов;
- 2) принцип неопределенностей;
- 3) вероятностный характер законов микромира;
- 4) спин элементарных частиц;
- 5) принцип Паули.

Все это нужно для знакомства с объектами микромира.

4 ГЛАВА,

из которой можно
узнать, что заставляет
частицы превращаться
друг в друга



Что, не спросясь, примчало нас сюда
И, не спросясь, уносит нас, куда?

Омар Хайям. «Рубаи»

Взаимодействие и волейбол

После создания квантовой механики совершенно изменились наши представления о механизме взаимодействия (речь сначала у нас пойдет только об электромагнитных взаимодействиях). Со времен Фарадея электромагнитные взаимодействия представляли себе следующим образом. Электрический заряд создает в окружающем пространстве поле, которое действует на другие заряды.

Это поле считалось непрерывной субстанцией, простирающейся в пространстве вокруг заряда, как безлесная равнина вокруг одинокого холма.

Однако корпускулярно-волновой дуализм заставляет искать черты прерывного в непрерывном. Поле должно иметь и корпускулярное «лицо». И с этой корпускулярной точки зрения, характерной для квантовой теории, нужно осмыслить взаимодействие. Оно будет выглядеть так: одна

заряженная частица все время испускает фотоны, которые затем поглощаются другой заряженной частицей и служат посредниками взаимодействия. Точно так же вторая заряженная частица испускает фотоны, которые поглощаются первой частицей. Этот обмен промежуточными частицами, как механизм взаимодействия, и является переводом на квантовый язык прежней классической картины.

Взаимодействующие частицы заняты чем-то напоминающим игру в волейбол. И эта игра их так увлекает, что они, как, например, электрон с протоном в атоме водорода, образуют связанную систему, для разрушения которой нужна заметная энергия. Это один вывод. Другой вывод состоит в том, что никакой пропасти между веществом и полем, как думали раньше, нет. И то, что взаимодействует, и то, что переносит взаимодействие, предстало перед нами как обычная материя, в конечном итоге — как элементарные частицы.

Диаграммы Фейнмана

Процессы взаимодействия в квантовой теории наглядно изображаются с помощью диаграмм Фейнмана. На этих диаграммах

электрон или другая заряженная частица изображаются сплошной линией, а фотон пунктирной.

На рис. 10 вы видите фейнмановскую диаграмму взаимодействия двух электронов. Диаграмма имеет две вершины A и B . Вершины — это точки, в которых происходит взаимодействие. В вершине A один из электронов испускает фотон и переходит в новое состояние. В вершине B фотон поглощается другим электроном и изменяет его состояние. Теория позволяет вычислять вероятность этих взаимодействий.

Рассеяние фотона на электроне изображается диаграммой Фейнмана похожего вида (рис. 11). В вершине A электрон поглощает фотон и переходит в новое, промежуточное, состояние. В вершине B происходит рождение нового фотона, а электрон переходит в конечное состояние.

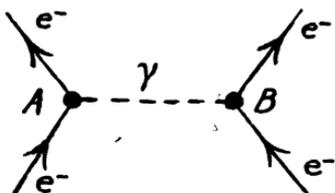


Рис. 10. Фейнмановская диаграмма взаимодействия двух электронов.

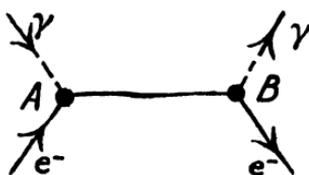


Рис. 11. Фейнмановская диаграмма рассеяния фотона на электроне.

На грани бытия и небытия

Но как можно себе представить испускание фотона заряженной частицей? Ведь нельзя же представлять себе электрон как нечто, подобное старинным часам с кукушкой, из которых эта птичка выскакивает по прошествии каждого часа. Фотона до его испускания внутри электрона не было. Фотон не прячется внутри электрона; он рождается в самом акте излучения.

О рождениях частиц уже говорилось неоднократно, и вы к этому начали привыкать. Но, давайте, подумаем, как же покоящийся электрон может испустить фотон. До испускания фотона энергия электрона была минимально возможной. Она равнялась энергии покоя m_0c^2 . Уменьшиться эта энергия не может. А тем не менее электрон рождает фотон, тоже обладающий энергией. Как же это согласовать с законом сохранения энергии? С точки зрения классической физики такой процесс невозможен.

Но для частиц существенным является соотношение неопределенностей Гейзенберга. Вспомните, согласно этому соотношению, на интервале времени Δt энергия не может быть фиксирована с точностью, превышающей $\Delta E \sim h/\Delta t$. Если процесс длится малое время, то неопределенность энергии любой системы достаточно велика и испускание электроном фотона оказывается в принципе дозволенным процессом.

Фотон испускается и вновь поглощается за столь малое время, что выигрыш в энергии остается незамеченным и, в общем-то, можно считать энергию сохраняющейся. Это время составляет всего лишь 10^{-21} с. Таково характерное время электромагнитных процессов. К началу и к концу процесса энергия одна и та же.

Такую картину рисует современная квантовая теория поля. Никто никогда не наблюдал этих промежуточных фотонов, переносящих взаимодействия между заряженными частицами. Более того, теория говорит, что их и нельзя наблюдать с помощью обычных счетчиков или камеры Вильсона. Поэтому подобные фотоны называют виртуальными¹⁾, чтобы как-то отличить их от обычных реальных частиц, которые можно регистрировать подходящими устройствами. Виртуальные фотоны ведут свое существование на грани бытия и небытия. Это частицы-призраки, появляющиеся в теории, чтобы сделать, хотя бы в некото-

¹⁾ Виртуальный по-русски означает возможный.

рой степени, процессы, происходящие в микромире, наглядными. Но от обычных призраков, порожденных человеческим воображением, они отличаются немало. Привидения рассеиваются, превращаются в ничто, если только попытаться их поймать. Виртуальные же фотоны превращаются в обычные, «добропорядочные» частицы, если только сообщить электрону дополнительную энергию, ускоряя его движение.

Итак, электромагнитное взаимодействие — это результат того, что одна заряженная частица испускает фотоны, а другая их поглощает.

**«Образ жизни»
заряженной частицы**

А может ли частица сама поглощать испущенные ею же кванты? Оказалось, что может. Более того, процесс непрерывного излучения и поглощения виртуальных фотонов составляет суть «жизнедеятельности» любой заряженной частицы. Частица взаимодействует как бы сама с собой.

Величина электрического заряда как раз определяет интенсивность процесса рождения и поглощения фотонов. Так как фотоны переносят взаимодействия, то величина электромагнитных сил будет определяться тем, за какое время происходит рождение и поглощение фотона, т. е. периодом «дыхания» заряженной частицы.

Процесс излучения и поглощения виртуального фотона электроном изображается диаграммой Фейнмана с петлей. В вершине *A* фотон излучается, а в вершине *B* поглощается тем же электроном (рис. 12).

Можно подсчитать энергию взаимодействия частицы самой с собой через виртуальные кванты. Однако такой подсчет привел к удручающе нелепому результату. Эта энергия, а значит, и собственная масса заряженной частицы получилась бесконечно большой. Фотонная «шуба» электрона, а значит, и он сам весят бесконечно много! Несомненно, взаимодействие с собственным полем должно вносить какой-то вклад в массу частицы.

Но не бесконечный же!

Выход из этих трудностей до сих пор не найден.

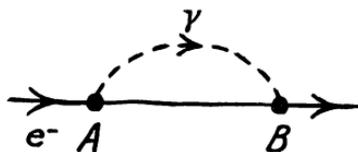


Рис. 12. Фейнмановская диаграмма излучения и поглощения виртуального фотона.



Частицы и античастицы

В 1931 г. английский физик П. Дирак пришел к выводу, что у электрона есть двойник — частица, во всем подобная электрону, но с противоположным знаком электрического заряда. Такая частица действительно была обнаружена. Назвали ее позитроном. Как и электрон, эта частица вполне устойчива. Она может существовать сколь угодно долго. Однако стоит позитрону встретиться с электроном, как они исчезают (аннигилируют), порождая фотоны высокой энергии.

Может протекать и обратный процесс — рождение электронно-позитронной пары. Например, при столкновении фотона достаточно большой энергии (его масса должна быть больше суммы масс покоя рождающихся частиц) с ядром.

В свое время это буквально потрясло воображение физиков. Электрон, старейшая из частиц, важнейший строительный материал для бесчисленных атомов, надежный, испытанный электрон оказался не вечным. Он мог исчезать, мог появляться!

После того, как эксперимент блестяще подтвердил предсказания теории, возникло, по словам известного писателя и физика Ч. Сноу, ощущение полного благополучия. Опять, уже не в первый раз, заговорили о том, что основные законы, управляющие поведением частиц — кирпичиков мироздания, познаны раз и навсегда и теперь остается только применять их для объяснения явлений различной сложности. И, в который раз, это оказалось явным заблуждением.

Впоследствии двойники — античастицы — нашлись почти у всех частиц. Античастица имеет ту же массу, что и частица, но все заряды, какие только у нее есть, имеют противоположный знак. (Мы потом увидим, что, кроме электриче-

ского, есть еще другие заряды. У некоторых частиц их немало.) Обнаружены сравнительно недавно антипротон и антинейтрон.

Сейчас мы хорошо знаем, что рождение пар и их аннигиляция не составляют монополии электронов и позитронов.

Только в исключительных случаях частицы не имеют античастиц. Это — фотон, π^0 , η^0 и некоторые другие мезоны.

Но и в этих случаях можно считать, что античастицы имеются, только они по всем своим свойствам совпадают с частицами. Просто у фотона, π^0 - и η^0 -мезонов нет никаких зарядов, и частица поэтому ничем не отличается от античастицы. При столкновении же они могут аннигилировать, как и пары частица — античастица. Так, два фотона, сталкиваясь, могут аннигилировать, давая электронно-позитронную или какую-либо другую пару. Правда, вероятность этого процесса настолько мала, что он никогда не наблюдался.

**Атомное
ядро...**

Квантовая теория движения электронов и взаимодействия их с фотонами, т. е. с электромагнитным полем, превосходно

описывает электронную оболочку атома и все события, которые могут в ней произойти. Нет ни одного эксперимента, который количественно не объясняла бы теория. В атоме нет загадок, если не считать того, что загадочными остаются сами частицы, его слагающие.

До 1932 г. вопрос о строении ядра оставался без ответа. Было известно, что ядро простейшего атома, атома водорода, представляет собой положительно заряженную элементарную частицу — протон. Но из чего состоят другие ядра? Можно было думать (так сначала и думали), что наряду с протонами в ядро входит некоторое число электронов. Избыток числа протонов над числом электронов равен заряду ядра и значит числу электронов в атомной оболочке.

Однако по многим причинам от такой мысли пришлось отказаться. Вот одна из причин. Ядро очень мало по своим размерам (10^{-13} см). Значит, неопределенность координаты внутриядерной частицы имеет порядок 10^{-13} см. Это дает возможность с помощью принципа неопределенностей Гейзенберга оценить неопределенность импульса, а следовательно, и разброс значений кинетической энергии электрона. Этот разброс обратно пропорционален массе частицы. Для электронов он настолько велик, что никакие силы не способны удержать их внутри ядра. По этой же причине нельзя считать, что нейтрон состоит из протона и электрона.

После того как в 1932 г. Д. Чедвиком была открыта новая тяжелая элементарная частица — нейтрон, незначительно превышающая протон по массе, сразу же было высказано предположение (в СССР — Д. Д. Иваненко, в Германии — В. Гейзенбергом), что именно нейтроны наряду с протонами слагают атомные ядра. Теперь протонно-нейтронная модель ядра является бесспорной.

Частицы удерживаются внутри ядра какими-то силами взаимодействия. Причем весьма и весьма немалыми. Что это за силы? Заведомо можно сказать, что это не гравитационные силы, которые слишком малы. Устойчивость ядра также не может быть объяснена электромагнитными силами по той причине, что между одноименно заряженными протонами действует электрическое отталкивание.

... и
ядерные силы

Значит между ядерными частицами — нуклонами — действуют особые силы. Название для них нашлось само собой — ядерные силы. Каковы основные свойства ядерных сил?

Прежде всего их величина. Эти силы примерно в 100 раз превосходят электромагнитные. Это самые мощные силы из всех, которыми располагает природа. Сейчас физики склонны называть вещи прямо своими именами и таким образом создавать официальные термины. Согласно этому обычаю ядерные силы часто называют сильными взаимодействиями. Причем сильные взаимодействия не сводятся только к взаимодействию нуклонов в ядре. Это особый тип взаимодействия, присущий многим элементарным частицам наряду с электромагнитными силами.

Другая важная особенность ядерных сил, или сильных взаимодействий, — это их короткодействующий характер. Электромагнитные силы являются дальнедействующими. Они медленно убывают с расстоянием. Ядерные силы заметно проявляются, как показывают прямые опыты, лишь на расстояниях порядка размеров ядра — 10^{-12} — 10^{-13} см. Это, так сказать, гигант с очень короткими руками. Какова же природа ядерных сил?

Мезоны — кванты
ядерного поля

Рассматривая картину взаимодействия заряженных частиц с позиций квантовых представлений, мы обнаружили, что она напоминает игру в волейбол. Заряженные частицы обмениваются (перебрасываются) частицами промежуточного поля — фотонами.

Если не пытаться при исследовании ядерных сил возвращаться к ствергнутой еще в XIX в. концепции дальнего действия, то нужно признать, что взаимодействие между протонами и нейтронами осуществляется посредством особого поля.

Раз есть поле, значит, есть и кванты этого поля, т. е. особые элементарные частицы. Взаимодействие нуклонов внутри ядра должно определяться тем, что они перебрасываются какими-то частицами, являющимися переносчиками взаимодействия.

Первым к такому заключению пришел в 1935 г. японский физик Хидеки Юкава. Принимая во внимание известный факт, что внутриядерные силы являются короткодействующими и на расстояниях, превышающих размеры ядра, практически никак не сказываются, Юкава сумел оценить массу частиц — квантов ядерного поля. С помощью принципа неопределенностей это сделать настолько несложно, что мы сейчас это тоже сделаем.

Испускание протонам или нейтроном кванта промежуточного поля является виртуальным процессом. Энергия кванта ε должна укладываться в рамки того разброса энергий, который допускается соотношением неопределенностей

$$\varepsilon \sim \Delta E \sim h/\Delta t.$$

Время Δt , очевидно, есть не что иное, как время пребывания частицы-переносчика взаимодействия в пути, т. е. промежуток между моментом испускания и моментом поглощения (время взаимодействия). Но это время равно пройденному пути l , деленному на скорость. Пройденный же путь по порядку величины просто равен радиусу действия ядерных сил ($l \sim 10^{-13}$ см), а скорость без большой ошибки можно считать равной скорости света. Поэтому

$$\Delta t = l/c.$$

Следовательно, искомая энергия кванта ядерного взаимодействия выразится так:

$$\varepsilon = hc/l.$$

Понятно, что масса, эквивалентная этой энергии, определится по формуле

$$m = \varepsilon/c^2 = h/lc.$$

Здесь уже все величины известны из опыта. Подставив значения постоянной Планка h , радиуса взаимодействия l и ско-

рости света c , мы обнаружим, что масса m должна равняться примерно двумстам-тремстам массам электрона.

Эта масса является промежуточной между массами электрона и протона. Поэтому новые гипотетические частицы получили название мезонов, что означает «промежуточная частица».

После того как Юкава предсказал мезоны, экспериментаторы энергично принялись за поиски этих частиц.

Начало периода «смуты» в физике элементарных частиц

Поиски увенчались успехом, но не сразу. Очень быстро, через год после предсказания Юкавы, на фотографиях космических лучей в камере Вильсона обнаружили следы новых частиц. Это были положительно и отрицательно заряженные частицы, масса которых примерно в 207 раз превосходила массу электрона. Никто вначале не сомневался в том, что это и есть мезоны Юкавы. Их стали исследовать, и здесь открылись странные вещи.

Если мезон является квантом ядерного поля, то он должен очень энергично взаимодействовать с атомными ядрами, состоящими из протонов и нейтронов. Опыты же показали, что новые частицы (их стали называть мю-мезонами или мюонами) проявляют совершенно непонятное равнодушие к нуклонам. Они способны только к электромагнитным взаимодействиям и совершенно не склонны принимать участия в сильных взаимодействиях. Мю-мезон оказался не той частицей, за которую его сначала приняли и которая была жизненно необходима для объяснения мира. Поэтому ее открытие положило начало эпохе «смуты» в физике элементарных частиц. Мюон оказался ближайшим, очень богатым по массе, но короткоживущим «родственником» электрона. Только зачем нужен электрону такой «богатый родственник», неясно и по сей день. Впрочем, об этой частице мы еще поговорим в дальнейшем. Это не единственная частица, существование которой представляется нам сейчас прихотью щедрой природы.

Пи-мезоны

Наконец с большим опозданием, только в 1947 г., были открыты как раз те мезоны, которые предсказал Юкава. Эти частицы были названы π -мезонами (пи-мезон) или пионами. Взаимодействовали они с ядрами очень энергично.

Как и предсказывала теория, оказалось, что есть π -мезоны трех сортов: положительно заряженные, отрица-

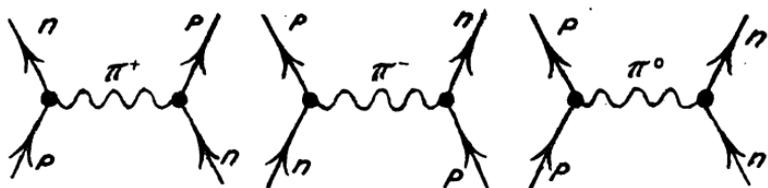


Рис. 13. Фейнмановские диаграммы взаимодействия между нуклонами посредством π -мезонов.

тельные и нейтральные. Масса нейтрального π^0 -мезона равна 264,1 электронной массы, а положительных и отрицательных π -мезонов — 273,1. Заряженные пионы живут в 100 раз меньше, чем мюоны, а π^0 -мезон — в 10 миллиардов раз меньше. Не удивительно, что их оказалось труднее обнаружить, чем μ -мезоны.

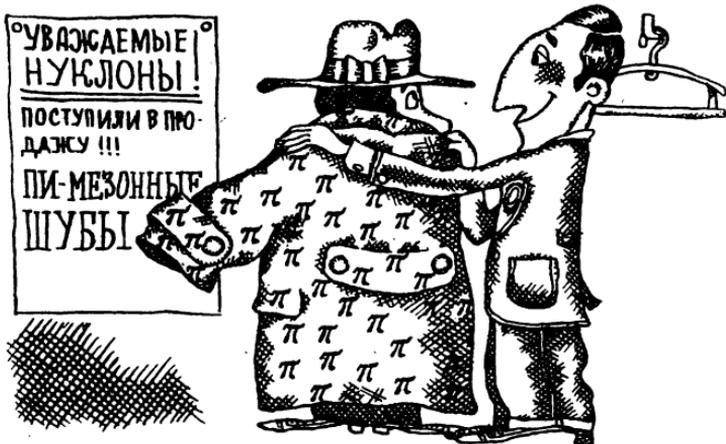
Все π -мезоны активно участвуют в ядерных взаимодействиях. Но лишь π^0 -мезонами свободно обмениваются как протоны, так и нейтроны, π^+ -мезон виртуально может быть испущен только протоном, а поглощен только нейтроном, π^- -мезоны, напротив, могут испускаться только нейтронами, а поглощаться только протонами. При обмене заряженными мезонами протон и нейтрон превращаются друг в друга.

На рис. 13 показаны диаграммы Фейнмана, изображающие взаимодействия между нуклонами посредством заряженных и нейтральных π -мезонов. Пионы изображены волнистыми линиями.

Мезонная «шуба» нуклонов

Итак, нуклоны взаимодействуют посредством ядерного поля, состоящего из виртуальных π -мезонов. Одиночный нуклон также создает вокруг себя мезонное поле. Говоря иными словами, он непрерывно испускает и поглощает виртуальные π -мезоны. Этот процесс является основой «жизнедеятельности» как протонов, так и нейтронов, подобно тому как испускание и поглощение фотонов — основа «жизнедеятельности» электрически заряженных частиц.

Каждый нуклон обладает ядерным зарядом, точнее, константой сильных взаимодействий, величина которой характеризует быстроту процесса испускания и поглощения мезонов и определяет величину ядерных сил. Как уже было отмечено, ядерные взаимодействия в 100 раз интенсивнее электромагнитных. Соответственно мезоны поглощаются и испускаются нуклонами в 100 раз быстрее, чем фотоны



электрическими зарядами. Характерное ядерное время составляет 10^{-23} с.

Нуклон всегда окружен довольно плотным облаком заряженных и нейтральных мезонов, как говорят физики, мезонной «шубой». Если бы ядерное взаимодействие выключилось, то нуклон оказался бы «голым».

Структура нуклонов

На самом деле взаимодействие нуклона с мезонами нельзя никоим образом выключить. Поэтому мезонная «шуба» — это неотъемлемая составная часть самого нуклона, его структурный элемент. Заговорив о ней, мы тем самым совершаем качественный скачок в степени знакомства с элементарными частицами. Незаметно переходим к структуре элементарной частицы. Как в свое время начали исследовать структуру атома, так теперь на повестке дня стал вопрос о структуре элементарной частицы. Однако эта новая проблема является значительно более сложной.

Атом просто состоит из электронов, и ядра. Протон же отнюдь не построен из мезонов. Он непрерывно рождает и вновь поглощает мезоны, но не состоит из них. Тем не менее сложная структура частицы, налицо.

Мезонное облако имеет конечные размеры. Хотя мезоны являются виртуальными, их никак нельзя назвать несуществующими. Просто их поглощение и испускание происходит невероятно быстро. Им лишь не хватает энергии, чтобы обнаружить себя в качестве реальных частиц. При столкновении быстрых протонов мезоны вырываются из окружаю-

щих протоны облаков и уже существуют в виде самостоятельных частиц. За счет кинетической энергии протонов они получают энергию, «достаточную для бытия».

Для исследования распределения заряда в нуклонах применялась бомбардировка их очень быстрыми электронами. Но почему быстрыми? Вот почему. Надо исследовать структуру нуклонов, размеры которых порядка 10^{-13} см. Но электроны имеют волновые свойства. Длина электронных волн тем меньше, чем больше импульс электронов. Чтобы исследовать структуру объекта, необходимы волны длиной, обязательно меньшей размеров самого объекта. Иначе вследствие дифракции волны будут огибать объект и никаких его деталей нельзя будет обнаружить. Оказалось, что для исследования структуры нуклонов электроны должны иметь энергию не меньше 100 млн. эВ. Такая энергия может быть сообщена электронам специально сконструированными ускорителями.

Почему в качестве снарядов были выбраны именно электроны? Дело в том, что нуклоны рассеивают электроны, и по картине рассеяния, исходя из хорошо разработанной теории электромагнитных взаимодействий, можно определить размеры нуклона и даже рассчитать среднее распределение заряда внутри заряженной сферы. Так как электрон не испытывает ядерных взаимодействий, то таким методом определяется характер распределения внутри нуклона именно

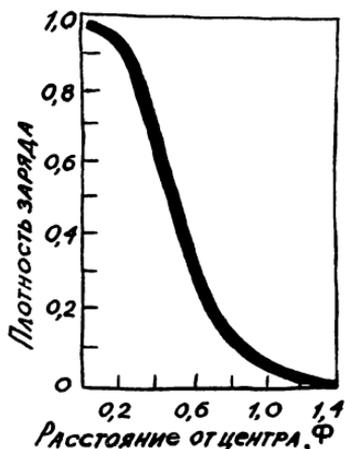


Рис. 14. Изменение плотности заряда протона по мере удаления от его центра (1 ферми = 10^{-13} см).

но электрического заряда. Использование же в качестве снарядов сильно взаимодействующих частиц почти ничего не может дать, так как мы в деталях не знаем, как они должны рассеиваться ядерными силами.

Опыты показали, что внутри протона средняя плотность заряда постепенно спадает от центра к периферии. На расстоянии $1,4 \cdot 10^{-13}$ см от центра плотность заряда уже можно считать равной нулю (рис. 14).

Нейтральный в целом нейтрон содержит внутри себя заряженные слои, в которых плотность заряда меняется сложным образом.

Весьма примечательно во всем этом то, что, несмотря на размазанность заряда в пространстве, от него нельзя отщипнуть ни единой крупинцы.

Таковы первые шаги внутрь элементарной частицы. В действительности структура частиц еще более сложна. Более глубокое понимание структуры большей части элементарных частиц наметилось в самое последнее время. Но об этом позднее.

**Семейства
сильно
взаимодействующих
частиц**

Ядерные силы действуют между нуклонами. Но протон отличается от нейтрона электрическим зарядом и массой. Приводит ли это к тому, что протон-протонные, нейтрон-нейтронные и протон-нейтронные силы различны?

Точные эксперименты по рассеянию нуклонов друг на друге показали, что ядерные силы, если отвлечься от некоторых деталей, одинаковы для любой пары нуклонов. Электрический заряд не оказывает влияния на эти силы. Существует, как говорят, зарядовая независимость ядерных сил.

Этот важнейший факт позволяет по-новому взглянуть на протон и нейтрон. Если бы не электрический заряд у протона, то как можно было бы их различить? По отношению к сильным взаимодействиям они ведут себя абсолютно одинаково. У них одинаковый спин. Даже небольшое различие в массах и то имеет электромагнитное происхождение. Исчезни электрические заряды, и массы стали бы одинаковыми. Тогда протон от нейтрона нельзя было бы отличить.

Все это позволяет выразить уверенность, что протон и нейтрон — это, в сущности, не две разные частицы, а одна, но только в различных зарядовых состояниях.

Протон и нейтрон — не единственный пример близнецов, различающихся лишь своими электрическими одедами. Три π -мезона отличаются тоже только электрическими зарядами, и за счет этого заряженные и нейтральный мезоны имеют мало различающиеся массы. Их тоже можно считать одной частицей в разных зарядовых состояниях.

В дальнейшем, мы увидим, что все без исключения сильно взаимодействующие частицы объединяются в группы, так называемые зарядовые мультиплеты. Частицы, входящие в тот или иной зарядовый мультиплет, различаются только зарядовым состоянием. Принадлежность к тому или другому мультиpletу — важнейшая отметка в паспорте элементарной частицы. Объединение отдельных частиц в мультиплеты обнаруживает некоторые элементы един-

ства в слишком уж раздробленной картине элементарных частиц.

Физики, однако, не ограничились объединением частиц в мультиплеты. Они стремились глубже проникнуть в сущность этого объединения. В процессе решения этой проблемы была введена новая величина — изотопический спин I . Что это за величина и какова ее роль в систематизации элементарных частиц?

Изотопический спин

Каждому зарядовому мультиплету сопоставляется определенное значение изотопического спина. Если мультиплет содержит одну частицу, то изотопический спин считают равным нулю. Мультиплету из двух частиц (например, дублету нуклонов, состоящему из протона и нейтрона) приписывается изотопический спин $I = 1/2$, мультиплету из трех частиц (например, триплету π -мезонов) — изотопический спин $I = 1$, мультиплету из четырех частиц (квартету) — изотопический спин $I = 3/2$ и т. д. Таким образом, если в зарядовый мультиплет входит n частиц, то ему приписывается изотопический спин

$$I = 1/2 (n - 1).$$

«Изо» — означает равный, «топос» — место. Слово «изотопический» указывает на принадлежность частиц к одному и тому же «месту» — к определенному мультиплету.

Ну а причем здесь спин? Если иметь в виду обычный спин, т. е. собственный вращательный момент, то ни при чем. Сходство ограничивается лишь тем, что формальный математический аппарат, описывающий зарядовую независимость сильного взаимодействия с помощью введения изотопического спина, такой же, как и для обычного механического спина. Вспомним, что если спин равен $1/2$ в единицах \hbar , то возможны две его ориентации. Проекция спина на любое направление принимает значения $+\hbar/2$ и $-\hbar/2$. Электрон и другие частицы с тем же значением спина могут находиться в двух различных спиновых состояниях.

Точно так же изотопическому спину $I = 1/2$ соответствует группа из двух частиц, находящихся в разных зарядовых состояниях. Поэтому ничто не мешает нам приписывать каждому из членов изоспинового семейства определенное значение «проекции изотопического спина на ось Z ». Протону приписать значение проекции $I_Z = +1/2$, а нейтрону $I_Z = -1/2$. Правда, речь идет уже о проекциях на координатную ось не обычного пространства, а некоего фор-

мального изотопического пространства. Не будем, впрочем, во все это углубляться. Суть аналогии между изотопическим и обычным спинами, надо надеяться, более или менее ясна.

π -мезонное семейство характеризуется изотопическим спином $I = 1$. Каждому из мезонов соответствует свое значение проекции I_Z . Для π^+ -мезона $I_Z = +1$, для π^0 -мезона $I_Z = 0$, а для π^- -мезона $I_Z = -1$. Здесь мы видим аналогию с тем, как частица с целым спином может находиться в трех различных спиновых состояниях, которым соответствуют значения проекции спина на ось Z , равные $+1, 0, -1$ в единицах \hbar (рис. 15).

Все эти сведения можно суммировать в одной таблице. Впоследствии эта таблица будет расширена. В нее будут включены другие семейства сильно взаимодействующих частиц.

Итак, мы познакомились с тем, что такое изотопический спин и его проекции. А зачем же его было вводить? Вот главная причина. Изотопический спин, введенный так, как только что было описано, при сильных взаимодействиях является сохраняющейся величиной. Суммарное количество

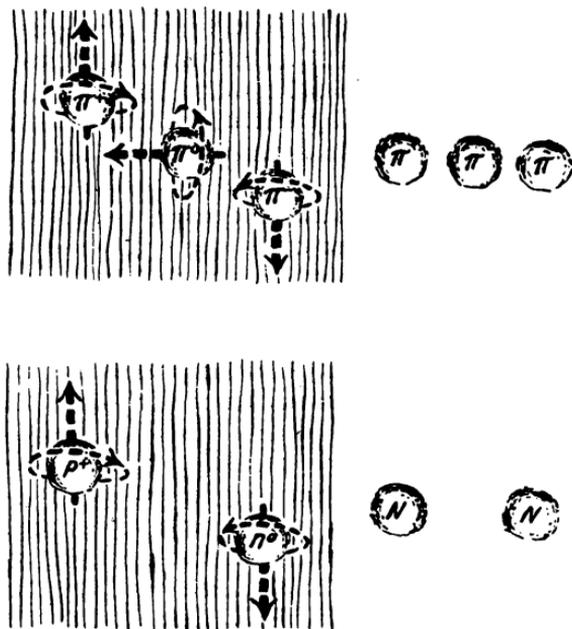
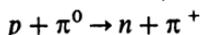


Рис. 15. Три пиона и два нуклона различаются проекциями изотопического спина. Без электромагнитного взаимодействия все три пиона и два нуклона были бы неразличимы.

Обозначение частиц	Число частиц в мультиплете	Изотопический спин	Заряд частиц	Проекция изотопического спина
p	2	$\frac{1}{2}$	+1	$+\frac{1}{2}$
n			0	$-\frac{1}{2}$
π^+ π^0 π^-	3	1	+1 0 -1	+1 0 -1

изотопического спина остается неизменным во всех процессах, всех превращениях элементарных частиц, вызванных сильными взаимодействиями. Так, например, при реакции



величина изотопического спина не изменяется. До реакции $I = \frac{1}{2} + 1 = \frac{3}{2}$ и после реакции $I = \frac{1}{2} + 1 = \frac{3}{2}$.

Сохранение изотопического спина приводит к большому числу очень важных следствий, особенно в теории атомного ядра и ядерных реакций. Однако эти следствия слишком сложны для того, чтобы можно было здесь на них останавливаться. Физически сохранение изотопического спина означает зарядовую независимость сильных взаимодействий и ничего больше. Закон сохранения изотопического спина — это единственный закон сохранения, выполняющийся только при сильных взаимодействиях. Другие взаимодействия, например электромагнитные, меняют его величину. Почему? Это пока не ясно.

Можно ли забыть про гравитацию

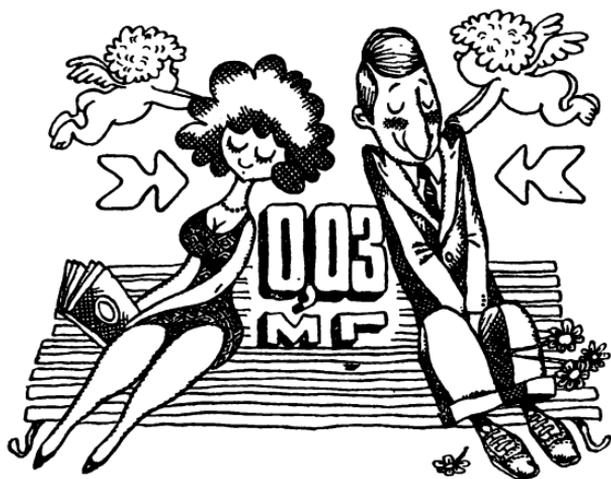
Мы познакомились, хотя довольно поверхностно, с электромагнитными и сильными взаимодействиями. Эти силы оказывают влияние на движение частиц, вызывают рассеяние их друг на друге. Эти же силы обуславливают целый ряд превращений частиц друг в друга. Однако, кроме электромагнитных и ядерных, имеются еще гравитационные силы. С их действием превосходно знакомы все. Эти силы удерживают нас на Земле. Для преодоления гравитации и выхода в космос потребовались и потребуются еще героические усилия человечества. Угроза, которую таят в себе гравитационные силы, понятна всякому, кто был в горах или хотя бы подходил

к краю балкона. Эти силы велики, но... велики лишь потому, что огромна Земля.

Вообще же гравитационные силы слабейшие из слабых. Приведем один пример. Два человека среднего веса при расстоянии между ними в один метр притягиваются с силой около трех сотых миллиграмма. Если бы оказалось возможным передать от одного человека другому 1% электронов, содержащихся в теле, то сила электростатического притяжения между ними была бы равна силе тяготения между двумя земными шарами, расположенными вплотную друг к другу. Представляете, насколько гравитационные силы слабее электромагнитных. Сила гравитационного притяжения электрона к протону в атоме водорода в 10^{39} раз меньше электрической.

По причине такой уникальной слабости гравитационных сил в масштабах микромира считается, что ими можно полностью пренебречь. Вся современная физика элементарных частиц — это физика без гравитации.

Тем не менее нужно сказать несколько слов и о гравитационном взаимодействии. Обычная классическая теория гравитационного поля не учитывает квантовых эффектов. Согласно же квантовой теории любое поле, в том числе и гравитационное, должно обладать корпускулярными свойствами. Каждому полю соответствуют частицы. Значит, гравитационному полю должны соответствовать свои частицы — переносчики гравитационного взаимодействия. Эти частицы были названы гравитонами. Согласно наметившимся представлениям у гравитонов нет массы покоя и



скорость распространения этих частиц равна скорости света; их спин должен равняться $2\hbar$.

Но никто гравитонов не наблюдал и никаких экспериментов по превращению гравитонов в другие частицы не было проведено. Слишком уж слабым является взаимодействие гравитонов (если они есть) с частицами.

Не исключено, что в дальнейшем гравитон окажется полноправной элементарной частицей, играющей важную роль в недоступных нам пока процессах внутри элементарных частиц. Фактов нет, а теоретические соображения имеются. Во всяком случае, в тех процессах, которые мы знаем, гравитационными силами можно пренебречь. Гравитоны никак себя не обнаружили, и мы далее говорить о них не будем.

Гравитация и эволюция звезд

Хочется лишь попутно сказать несколько слов о роли гравитационных сил в эволюции звезд. Хотя гравитационные силы чрезвычайно слабы, с их действием в больших объемах вещества связано выделение огромных количеств энергии. Дело в том, что, в отличие от ядерных и слабых взаимодействий, эти силы медленно убывают с расстоянием.

Дальнодействующими, правда, являются и электромагнитные силы. Но все макроскопические тела в целом электрически нейтральны. Поэтому на больших расстояниях действие электромагнитных сил не сказывается (исключение составляет лишь взаимодействие посредством электромагнитных волн).

Гравитационные силы удерживают планеты вблизи Солнца и управляют движением звезд в галактиках. Они в конечном счете определяют строение Вселенной. Эти же силы играют чрезвычайно большую роль в эволюции огромных скоплений элементарных частиц — звезд.

Звезды по современным представлениям формируются из облаков водорода, конденсируемого силами всемирного тяготения. Первоначально температура облака невелика. По мере того как облако сжимается, потенциальная энергия его частиц уменьшается, а кинетическая энергия растет. Звезда разогревается и вследствие этого все более интенсивно излучает электромагнитные волны. Но, несмотря на потерю энергии на излучение, температура звезды растет. Так продолжается до тех пор, пока температура не достигает нескольких десятков миллионов градусов. После этого начинаются реакции термоядерного синтеза, в результате которых водород превращается в гелий, а затем и в более

тяжелые ядра. Если масса звезды лишь ненамного превышает массу Солнца, то сжатие постепенно замедляется вследствие увеличения внутреннего давления в звезде и температура, достигнув максимума, начинает уменьшаться. За сравнительно короткое (по астрономическим масштабам) время звезда полностью высвечивается. В этот период своей эволюции она называется белым карликом. Плотность вещества белых карликов громадна: 10^8 г/см³. Наиболее известным белым карликом является спутник Сириуса — небольшая звезда, теряющаяся в лучах своего яркого соседа. В конце концов белый карлик превращается в холодную «болванку». Весь процесс, начиная от газового облака, длится несколько миллиардов лет.

Если масса исходного водородного облака значительно меньше массы Солнца, то при гравитационном сжатии облако не разогревается до температур, при которых начинаются термоядерные реакции, и уже через несколько миллионов лет начинается охлаждение. Такой объект уже не заслуживает названия звезды.

Совершенно иначе протекает эволюция звезд, масса которых значительно превышает массу Солнца. Расстояние между частицами в этом случае уменьшаются столь значительно, а температура становится настолько высокой, что начинается новый процесс. Протоны захватывают электроны и превращаются в нейтроны, испуская одновременно нейтрино. Образуется нейтронная звезда, продолжающая сжиматься под действием гравитационных сил. Ее плотность достигает чудовищной величины порядка 10^{14} г/см³. Это плотность вещества в ядре.

Может случиться, что резкое сжатие звезды настолько повысит ее температуру, что произойдет взрыв. Тогда будет наблюдаться рождение сверхновой звезды. Излучение ее настолько интенсивно, что звезда видна на небе даже днем.

При взрыве звезда сбрасывает поверхностные слои, и после взрыва образуется стабильная нейтронная звезда размером в несколько километров, вращающаяся с угловой скоростью порядка секунды. Такая звезда излучает электромагнитные волны в определенном направлении: вероятнее всего в направлении магнитной оси звезды. Для внешнего наблюдателя излучение звезды будет пульсировать с частотой, равной частоте ее вращения вокруг оси (рис. 16). Такие звезды поэтому получили название пульсаров. Они были открыты недавно. На первых порах излучение пульсаров даже принимали за сигналы внеземных цивилизаций.

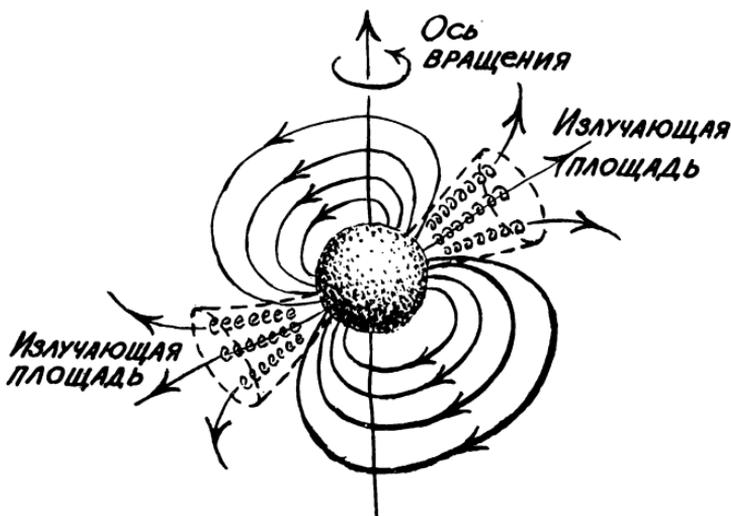


Рис. 16. Одна из возможных схем расположения излучающих областей пульсаров.

Если масса звезды превышает удвоенную массу Солнца и разрушения звезды на начальных этапах сжатия не произошло, то она будет неограниченно сжиматься. Когда ее радиус достигнет критического размера $R_k = 2M\gamma/c^2$ (здесь M — масса звезды, γ — гравитационная постоянная, c — скорость света), то ее поле тяготения станет настолько большим, что ни один фотон не сможет покинуть поверхности звезды. Происходит так называемый гравитационный коллапс¹). Перед внешним наблюдателем при этом должна предстать следующая картина.

Звезда сначала быстро, а затем все медленнее сжимается. Свечение звезды быстро затухает и в конце концов прекращается совсем. Свет не в силах преодолеть гравитационное притяжение и оторваться от звезды. Звезда превращается в абсолютно черный шар с радиусом около километра. Ее можно обнаружить только по статическому гравитационному полю. Никакой информации о событиях, происходящих внутри коллапсирующей звезды, получить нельзя. А там могут происходить в принципе потрясающие явления. Отрицательная потенциальная энергия частицы в поле тяготения станет равной по абсолютной величине положительной энергии покоя m_0c^2 . Полная энергия обратится в нуль. А это

¹) Коллапс — значит «упавший».

ведь означает, что рождение новых частиц не будет ограничиваться законом сохранения энергии.

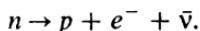
Имеются определенные указания на то, что черная дыра открыта экспериментально в созвездии Лебедь X — 1. Вообще же, возможно, одна наша Галактика содержит миллионы черных дыр.

**Немного
о слабых
взаимодействиях**

Любое взаимодействие (электромагнитное или ядерное) в конце концов сводится к актам рождения и поглощения одних частиц другими. Так, два электрона взаимодействуют через фотоны, испуская и поглощая их. Точно так же ядерное взаимодействие нуклонов обязано рождению и поглощению ими π -мезонов. Большая сила этих взаимодействий определяется быстротой процесса испускания и поглощения.

Далеко не каждое рождение или смерть элементарной частицы обусловлены какой-либо из этих двух сил. Есть процессы, за которые не несут ответственности ни электромагнитные, ни ядерные силы. Причем таких процессов совсем немало, скорее, наоборот, очень много.

К подобным процессам относится, в частности, распад нейтрона:



Распад нейтрона на протон, электрон и антинейтрино не может быть вызван ядерными силами, так как электрон не испытывает сильных взаимодействий и поэтому не может быть рожден за их счет. Рождение электронов возможно под действием электромагнитных сил. Но ведь есть еще антинейтрино, которое лишено электрического заряда и не участвует в электромагнитных взаимодействиях! Такая же ситуация возникает при распаде π - и μ -мезонов с испусканием нейтрино или антинейтрино.

Следовательно, должны быть какие-то другие взаимодействия, ответственные за распад нейтрона (и многих других частиц). Так на самом деле и есть. В природе существует четвертый тип сил — слабые взаимодействия. Именно эти силы являются главным действующим лицом в трагедиях гибели частиц. Это — преимущественно распадные силы. Мы о них еще будем подробнее говорить в дальнейшем. Пока же коснемся лишь главных фактов.

Слабыми эти взаимодействия названы потому, что они действительно слабы: примерно в 10^{14} раз слабее ядерных!

Характерное время слабых взаимодействий 10^{-9} с вместо 10^{-23} с для сильных. Означает это вот что. Нейтрон непрерывно переходит в протон, испуская электрон и антинейтрино, и опять воссоединяется в единое целое за время около 10^{-9} с. Это — виртуальный процесс, такой же, как и излучение π -мезонов при сильных взаимодействиях. Разница лишь в том, что у нейтрона имеется достаточный избыток массы для того, чтобы испускать и реальные частицы. Происходит это, правда, крайне редко. На миллион миллионов виртуальных процессов приходится один реальный. Фейнмановская диаграмма распада нейтрона имеет форму крестика (рис. 17). Стрелки, направленные к вершине, обозначают, как всегда на диаграммах Фейнмана, начальные частицы, а стрелки от вершины — конечные продукты реакции.

Слабые взаимодействия столь ничтожны по величине, что ими можно просто пренебречь там, где работают сильные или электромагнитные взаимодействия. Но есть много процессов, которые могут быть вызваны только слабыми взаимодействиями. Вот тут-то они и встают во весь рост.

Из-за малой величины слабые взаимодействия не влияют на движение частиц заметным образом. Не ускоряют их и не замедляют. Насколько нам известно, слабые взаимодействия не способны удерживать какие-либо частицы друг возле друга, образуя связанные состояния. Тем не менее это силы в таком же смысле, как и электромагнитные и ядерные силы. Главное ведь в любом взаимодействии — это рождение и уничтожение частиц. А именно эти функции (особенно последнюю) слабые взаимодействия выполняют, не торопясь, но совершенно неукоснительно.

Заметим еще, что слабые взаимодействия совсем не редкость. Напротив, они до крайности универсальны. В них участвуют все частицы. Заряд, или, точнее, константа слабых взаимодействий, имеется у всех частиц. Но только для частиц, участвующих в других взаимодействиях, способность к слабым взаимодействиям незначительна. Лишь нейтрино ни к каким взаимодействиям, кроме слабых, не способны (за исключением, конечно, ультраслабых — гравитационных). Поэтому все реакции, в которых происходит рождение или

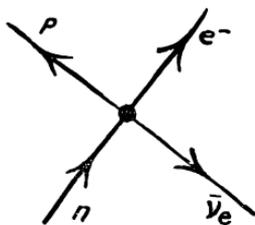


Рис. 17. Фейнмановская диаграмма распада нейтрона.

уничтожение нейтрино, наверняка вызваны слабыми взаимодействиями.

Значение слабых взаимодействий в эволюции Вселенной совсем не мало. Если бы слабые взаимодействия внезапно выключились, то погасло бы Солнце и другие звезды. Энергия в звездах выделяется при образовании гелия из водорода. Для течения этой реакции необходимо, чтобы половина протонов — ядер атомов водорода — превратилась в нейтроны. Ведь ядро гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов. Превращение протона в нейтрон, позитрон и нейтрино происходит за счет слабых взаимодействий.

**«Быстрые»
и «медленные»
лучше, чем «слабые»
и «сильные»**

Названия взаимодействий — «слабые» и «сильные» — удачны, но все же в определенном смысле они не вполне оправданы.

Действительно, если, скажем, человек слаб, то он никогда не сможет совершить выдающегося действия вроде поднятия двухпудовой гири. Слабые же взаимодействия слабы совсем не в том смысле, что ничто выдающееся в микромире им не под силу. Они могут вызывать развал любой частицы, обладающей массой покоя, если только это допускается законами сохранения. Соблюдение последнего условия весьма существенно. В противном случае нейтроны в ядрах были бы нестабильными и в природе не было бы ничего, кроме водорода.

Все дело в том, что действия слабых взаимодействий проявляются очень редко. В этом смысле они скорее медленные, чем слабые, и напоминают тяжелоатлета, способного поднять огромную штангу, но только очень и очень медленно.

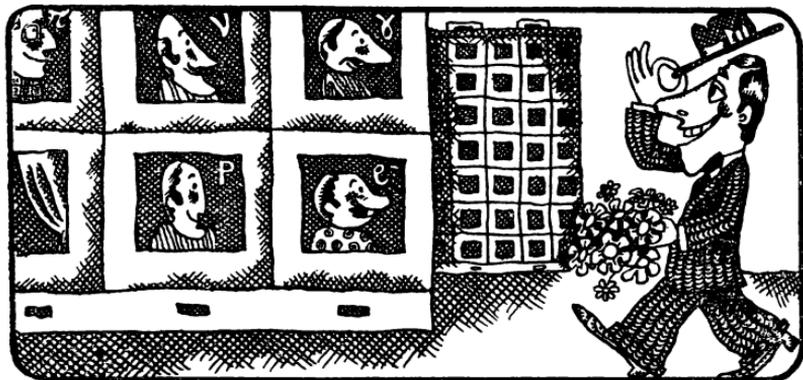
Сильные взаимодействия — это самые быстрые взаимодействия, и вызываемые ими превращения элементарных частиц происходят очень часто. Электромагнитные взаимодействия работают медленнее, чем сильные, но все же неизмеримо быстрее, чем слабые.

Однако при больших энергиях сталкивающихся частиц порядка ста миллиардов электрон-вольт слабые взаимодействия перестают быть слабыми по сравнению с электромагнитными. Об этом будет рассказано в дальнейшем.

Вот пока и все сведения о силах. Сказанного достаточно для понимания общих принципов классификации частиц. К рассмотрению всей совокупности частиц в целом мы сейчас и перейдем.

5 ГЛАВА,

в которой наконец-то читатель может познакомиться со всеми элементарными частицами сразу



Так слушайте же меня, дабы понять то, что вы сейчас увидите.

Бернард Шоу. «Цезарь и Клеопатра».

Тридцать пять

В настоящее время твердо установлено существование 35 сравнительно стабильных частиц, имеющих время жизни, значительно превышающее характерное ядерное время ($10^{-22} - 10^{-23}$ с). Конечно, цифра 35 не может считаться окончательной. Об одном кандидате — гравитоне — упоминалось. Есть еще достойные кандидаты, которых уже сейчас начинают включать в таблицу элементарных частиц.

Масса

все же главное

Список из 35 частиц никак нельзя назвать коротким. Как следует в нем расположить частицы?

С самого начала за основу была принята масса, и частицы стали располагать в порядке возрастания их масс.

Аналогичный принцип был положен в свое время Менделеевым в основу систематики атомов. Потом оказалось, что

основной величиной при построении периодической системы элементов является заряд атомного ядра, а не масса атома. Лишь из-за того, что масса ядра, как правило, растет с увеличением его заряда, Менделеев пришел к своему периодическому закону. Но были случаи, когда ему приходилось на основе анализа свойств элементов, вопреки общему правилу, располагать элементы с меньшей массой за элементами с большей массой.

Какие же основания имеются для того, чтобы положить массу частиц в основу их систематизации? Может быть, при этом повторяется или даже усугубляется неточность, которую допустил Менделеев, выбрав массу в качестве критерия при систематизации химических элементов? Хотя строение элементарных частиц нам неизвестно, можно все же утверждать, что имеются основания для того, чтобы считать массу главной характеристикой частицы.

Масса — это не просто неизвестного происхождения мера инертности. Она в основном определяется теми взаимодействиями, в которых участвует частица, а также той ролью, которую играет частица в этих взаимодействиях. Способность же частицы к определенным взаимодействиям — самая яркая ее характеристика.

Группы частиц

Итак, основная характеристика частицы — масса. Массой обладают все без исключения частицы, в то время как другие величины у одних имеются, а у других отсутствуют¹⁾. Именно по массе частицы были не только расставлены в определенном порядке, но и объединены в отдельные группы: легкие, средние и тяжелые.

Очень важно, что объединение частиц в группы по массе одновременно в значительной мере соответствует их классификации по типам взаимодействий. Вернее, по той роли, которую играют частицы во взаимодействиях, или по их способностям к различным взаимодействиям.

Впрочем, довольно слов. Таблица элементарных частиц перед нами (вероятно, вы уже в нее заглядывали).

Бросим сначала взгляд сверху вниз вдоль левой половины таблицы, не обращая внимания пока на правую. Все частицы разделены на четыре группы разной величины.

¹⁾ Фотон и нейтрино не обладают массой покоя, но при движении имеют массу. В покое они просто не существуют.

Таблица элементарных частиц

Наименование частиц	Символы		Масса (в электронных массах)	Спин (в ед. \hbar)	Электрический заряд (в ед. e)	Время жизни (с)	Основные способы распада
	частицы	анти-частицы					
Фотон	γ	γ	0	1	0	стабилен	
Лептоны	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	$1/2$	0	стабильно	
	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	$1/2$	0	стабильно	
	e^-	e^+	1	$1/2$	-1	стабилен	
	μ^-	μ^+	206,7	$1/2$	-1	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu} + \nu_\mu$
Пи-мезоны	π^0	π^0	264,1	0	0	$0,8 \cdot 10^{-16}$	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$
	π^+	π^-	273,1	0	1	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
Мезоны	K^+	K^-	966,4	0	1	$1,23 \cdot 10^{-8}$	$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (63%) $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ (21,5%)
	K^0	\bar{K}^0	974,1	0	0	$K_S^0 - 0,86 \cdot 10^{-10}$ $K_L^0 - 5,38 \cdot 10^{-8}$	$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ (5,5%) $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ (69,4%) $K_S^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ (12,7%) $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ (27,1%) $K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ (12,7%) $K_L^0 \rightarrow \pi^- + \mu^+ + \nu_\mu$ (26,6%) $K_L^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$ (5,5%)

Мезоны	η_0	η_0	1074	0	0	10^{-17}	$\eta^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ или $\eta^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ (35,3%) $\eta^0 \rightarrow \pi^0 + \gamma + \gamma$ (31,8%) $\eta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ (27,4%) $\eta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \gamma$ (5,5%)
Барыоны	Протон	p	1836,1	$1/2$	1	Стабилен	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
	Нейтрон	n	1838,6	$1/2$	0	$0,9 \cdot 10^3$	
	Гиперон	Λ^0	2184,1	$1/2$	0	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ (67,7%) $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0$ (31,6%)
	лямбда	Λ^0					
Гипероны	сигма	Σ^+	2327,6	$1/2$	1	$0,8 \cdot 10^{-10}$	$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$ (51%)
		Σ^0	2333,6	$1/2$	0	10^{-14}	$\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$ (49%)
		Σ^-	2343,1	$1/2$	-1	$1,49 \cdot 10^{-10}$	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$
Гипероны	кси	Ξ^0	2572,8	$1/2$	0	$3,03 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$
		Ξ^-	2585,6	$1/2$	-1	$1,66 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
Омега-минус-частица	Ω^-	Ω^-	3273	$3/2$	-1	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$ $\Omega^- \rightarrow \Xi^- + \pi^0$ $\Omega^- \rightarrow \Lambda^0 + K^-$

Фотон

Таблица открывается сверхлегкой частицей — фотоном. Фотон, оставаясь в одиночестве, сам является целой группой.

Его роль — перенос электромагнитных взаимодействий. Именно в этих взаимодействиях он и участвует. Правда, по предположению, он участвует еще, как и все остальные частицы, в слабых взаимодействиях. Но вызванные слабыми взаимодействиями процессы с участием фотонов редки. Экспериментально они пока не наблюдались.

Лептоны

Следующая группа состоит из легких частиц — лептонов. В нее входят восемь частиц: электронное и мюонное нейтрино, электрон, μ -мезон и соответствующие этим частицам античастицы. Массы частиц меняются в широких пределах: от нуля (для нейтрино) до 206,7 электронной массы (для мюона). Поэтому в данном случае нельзя сказать, что главным объединяющим эти частицы признаком является близость масс.

Электрон и μ -мезон участвуют в электромагнитных взаимодействиях, а нейтрино — только в слабых. Роль электронов в строении вещества известна всем. Они слагают оболочки атомов. Нейтрино — необходимая компонента распада очень многих частиц. В дальнейшем этой частице будет посвящена целая глава, из которой вы, в частности, узнаете, чем отличаются электронное и мюонное нейтрино друг от друга.

Резонно задать вопрос: что же является определяющим при объединении этих частиц в одну группу? По массе нейтрино ближе к фотону, чем к электрону, а μ -мезон кажется скорее «родственником» π -мезонов.

Заметим прежде всего, что все лептоны имеют полужелтый спин, отличный от спина ближайших соседей — фотона и мезонов. Это, конечно, важный объединяющий признак, но вряд ли его можно считать главным. Гораздо существеннее то, что μ -мезон не участвует в сильных взаимодействиях, как все остальные мезоны, а нейтрино не имеет никакого отношения к электромагнитным взаимодействиям, составляющим «смысл жизни» фотона. Но и это еще не все. Главное состоит в том, что все 8 лептонов характеризуются особым квантовым числом — лептонным зарядом. Какова природа этого квантового числа, пока неизвестно, но зато хорошо известно, как оно проявляется. Через несколько страниц узнаете и вы об этом ровно столько, сколько знают сейчас самые эрудированные физики. Настолько это просто.

Мезоны

Эта группа состоит также из восьми частиц. Но что мезонов именно 8, не случайно. Классификация сильно взаимодействующих частиц достаточно развита, чтобы это обосновать.

Трое из них — наши старые знакомые: π -мезоны. Кроме того, имеется четыре K -мезона, примерно в три раза более тяжелых, чем π -мезоны. Они образуют два зарядовых мультиплетта (дублеты): K^+ , K^0 и K^- , \bar{K}^0 .

Самая тяжелая частица этой группы η^0 -мезон (эта-нуль-мезон) подобно π^0 -мезону совпадает с собственной античастицей.

Все частицы группы мезонов подобно π -мезонам являются квантами ядерного поля, переносчиками сильных взаимодействий. Радиус действия ядерных сил обратно пропорционален массе частицы — переносчика взаимодействия. Поэтому K - и η^0 -мезоны могут осуществлять взаимодействие только на сверхмалых расстояниях. Главными переносчиками ядерных взаимодействий остаются π -мезоны.

Таким образом, мезоны, как, впрочем, и все остальные, более тяжелые, чем лептоны, частицы, участвуют в сильных взаимодействиях (конечно, наряду с их участием в электромагнитных и слабых взаимодействиях).

Обратите еще внимание на то, что спин всех мезонов равен нулю, а спин фотона — единице. Целое значение спина характерно для частиц, являющихся переносчиками взаимодействий. Построено же вещество из частиц с полуцелым спином.

Барионы

Это — последняя, самая обширная группа частиц. В нее входят из тридцати пяти частиц двадцать. Барионы — самые тяжелые сильно взаимодействующие частицы. Взаимодействие между барионами осуществляется мезонами.

Самыми легкими из барионов являются частицы нуклонного дублета — протон и нейтрон. Далее следуют более тяжелые частицы — гипероны. Все они группируются в зарядовые мультиплеты.

Первый мультиплет гиперонов состоит всего из одной частицы. Это — Λ^0 -частица (лямбда-нуль). Далее в порядке возрастания массы следуют триплеты Σ -частиц: Σ^+ , Σ^0 , Σ^- и $\bar{\Sigma}^+$, $\bar{\Sigma}^0$, $\bar{\Sigma}^-$. Как во всяком мультиплете, эти частицы различаются только своими электрическими зарядами. По отношению к сильным взаимодействиям они выступают как одна частица.

Еще более тяжелые гипероны Ξ -частицы (кси-частицы) образуют зарядовые дублеты: Ξ^- , Ξ^0 и $\bar{\Xi}^-$, $\bar{\Xi}^0$.

У всех перечисленных частиц спин равен $\hbar/2$.

Замыкает всю группу барионов Ω^- -частица (омега-минус-частица). Это последняя из открытых частиц, вошедшая в таблицу лишь в 1964 г.

Все сильно взаимодействующие частицы — мезоны и барионы — часто называют адронами¹⁾.

**Элементарные частицы
все же, может быть,
элементарны
на самом деле**

Обратим теперь внимание на правую часть таблицы. Посмотрите, число характеристик частиц невелико: масса, спин, электрический заряд, среднее время жизни и основные способы распада. Не все,

правда, характеристики выписаны в нашей таблице, но добавить сюда можно немного.

Это дает повод думать, что перечисленные в таблице частицы все же, может быть, в самом деле элементарны. Очень сложная структура элементарных частиц характеризовалась бы, видимо, большим числом параметров.

**О временах жизни
частиц**

Из 35 частиц только 9 частиц (два сорта нейтрино, электрон, протон, их античастицы и фотон) стабильны. Все остальные распа-

даются за то или иное время. Обратите внимание на то, что самое короткое время жизни у η^0 - и ρ^0 -мезонов, а также Σ^0 - и Σ^0 -гиперонов; оно составляет всего 10^{-17} — 10^{-14} с. Распад этих частиц вызван электромагнитными силами. Это видно уже из того, что в числе продуктов распада почти всегда имеются γ -кванты. Все остальные распады происходят гораздо более медленно и вызываются слабыми взаимодействиями.

Не думайте, что время жизни порядка 10^{-10} с, например, абсолютно ничтожно. Оно мало по нашим макроскопическим масштабам, а по масштабам микромира оно, в сущности, огромно. За это время частица проходит путь около одного сантиметра, если ее скорость, как это часто бывает, мало отличается от скорости света. Размеры частицы не превосходят 10^{-13} см. Значит, путь, пройденный частицей, в десятки тысяч миллиардов раз превышает ее

¹⁾ Слово «адрон» образовано от греческого $\alpha\delta\rho\acute{\nu}\xi$, что означает крепкий или сильный. Термин был предложен советским физиком Л. Б. Окунем.

размеры. Человек, идущий со скоростью 5 км/ч, преодолел бы расстояние, превышающее его размеры в такое же число раз, примерно за миллион лет.

Если вы достаточно внимательны, то не могли не заметить, что время жизни частиц, распадающихся за счет слабых взаимодействий, варьируется в широких пределах — от макроскопического времени 16 мин для нейтрона (это уже сравнимо с временем жизни бабочки-однодневки) до 10^{-10} с для гиперонов и К-мезонов. А ведь говорилось, что скорость процесса является характеристикой силы.

Дело здесь в следующем. Оказывается, что скорость превращения частицы определяется не только силой, вызывающей это превращение, но и той энергией, которая выделяется при реакции. Если разность масс покоя распадающейся частицы и продуктов ее распада мала¹⁾, то мала и скорость распада. Для нейтрона эта разность масс составляет примерно одну электронную массу, а для гиперона Λ^0 , например, гораздо больше — около 43 электронных масс. Если в каждом случае учесть величину выделяющейся энергии, то окажется, что скорость всех распадов, вызванных слабыми взаимодействиями, одна и та же.

Мир из 12 частиц

Всего элементарных частиц с большими временами жизни 35. Однако, как отметил Гелл-Манн, для физического объяснения мира достаточно дюжины частиц. Прежде всего необходимы электроны, протоны и нейтроны. Из них построены все атомы вещества. Эти частицы имеют своих антиподов — античастицы:

позитрон, антипротон и антинейтрон.

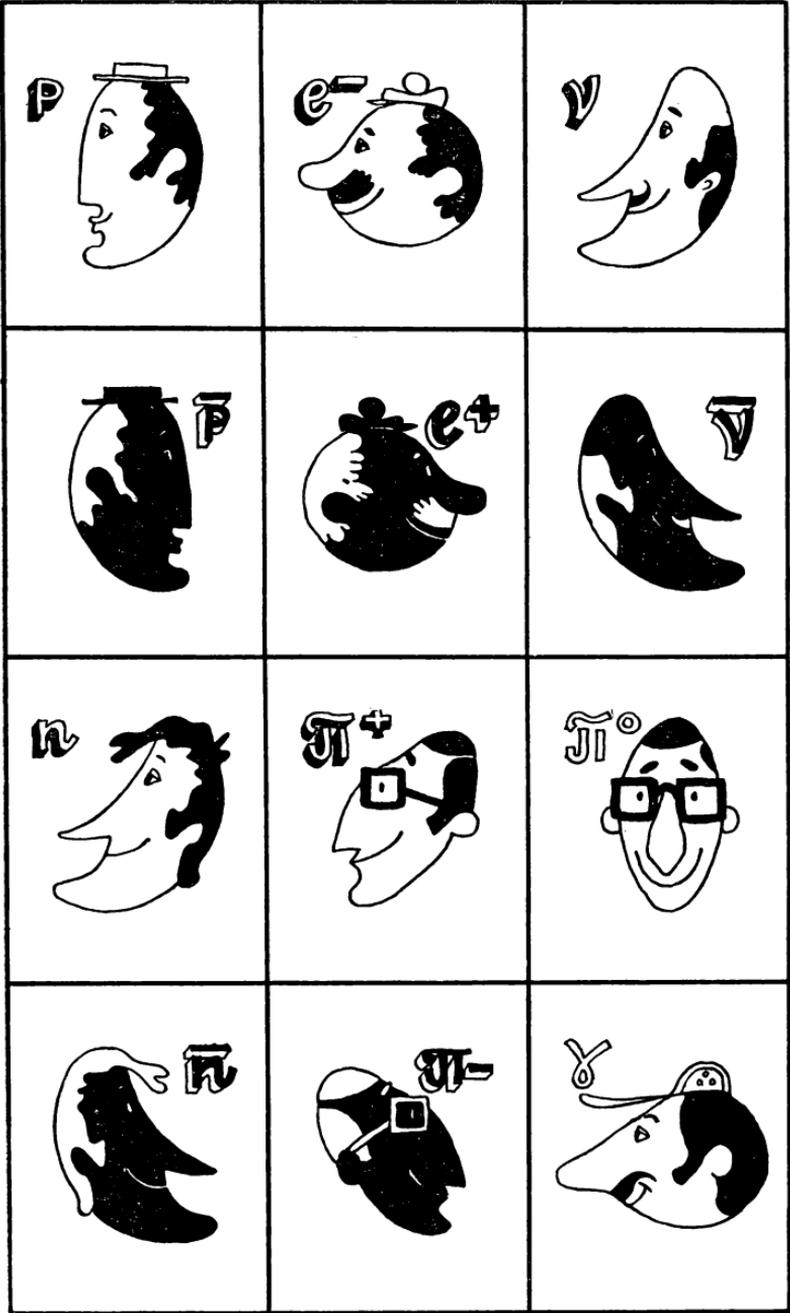
Но без фотонов атомы распались бы на электроны и ядра, а π -мезоны необходимы для устойчивости ядер. Поэтому к указанным выше шести частицам надо добавить еще четыре частицы — переносчика взаимодействий.

Далее, опыт говорит, что нейтроны распадаются. Для объяснения этого распада необходимо нейтрино. Иначе не будут выполняться законы сохранения. Значит, нужны еще две частицы:

нейтрино и антинейтрино.

Всего — двенадцать частиц. Почти в три раза меньше, чем их есть на самом деле.

¹⁾ Эта разность в соответствии с формулой $E = mc^2$ и определяет выделяющуюся энергию.



Непонятная щедрость

Почему существуют два сорта нейтрино, а не один, какова роль μ -мезона, пока неизвестно. Не совсем ясен смысл существования и некоторых других частиц. Создается впечатление, что природа проявила некоторые излишества. Видимо, дело в том, что мы пока еще мало, слишком мало знаем об элементарных частицах и поэтому не можем понять, в чем здесь дело.

Впрочем, можно подойти к этому вопросу с другой стороны. Допустим на минуту, что никаких ускорителей не существует и космические лучи не содержат частиц сверхвысоких энергий. Тогда при наших земных условиях, при температурах низких сравнительно со звездными не было бы многих известных сейчас частиц. Не было бы даже π - и μ -мезонов как реальных частиц. Для их рождения просто не хватало бы энергии. Они могли бы существовать только как виртуальные частицы. Число реальных частиц было бы резко ограничено. Любопытно, что в этих условиях ученые смогли бы предсказать только π -мезоны, что и было сделано Юкавой до создания ускорителей. Предсказать же μ -мезон, мюонное нейтрино и ряд других частиц было бы вряд ли возможно.

В земных условиях, подчеркивает выдающийся физик В. Вайскопф, где энергия частиц составляет всего несколько электрон-вольт, наибольшее значение имеют процессы, изучаемые в атомной физике. В этих условиях рождаться и исчезать могут только фотоны. В центре звезд энергии частиц достигают миллионов электрон-вольт, и происходящие там процессы подчинены закономерностям, рассматриваемым в ядерной физике. В недрах звезд происходят реакции термоядерного синтеза: легкие ядра сливаются, образуя тяжелые. При этом в больших количествах рождаются нейтрино. Фотоны достигают столь больших энергий, что способны рождать пары электрон — позитрон. Но где во Вселенной могут происходить процессы рождения тяжелых частиц? Необходимая для этого кинетическая энергия должна иметь величину порядка энергии покоя этих частиц, т. е. миллиарды электрон-вольт. Но кинетические энергии частиц в звездах по порядку величины равны их потенциальной энергии в звездных гравитационных полях. А последняя сравнима с энергией покоя частиц лишь при коллапсе звезд. Таким образом, физика высоких энергий нужна для изучения таких звезд, которых мы вообще не можем увидеть.

При больших энергиях столкновения частиц приводят к рождению π -мезонов и других частиц (μ -мезоны возникают в основном при распаде π -мезонов). Можно представить себе мир, в котором увеличение энергии сталкивающихся частиц приводит лишь к увеличению числа рождающихся π -мезонов. Природа избрала другой путь. Пионы действительно рождаются с ростом энергии во все больших количествах, но одновременно появляются и более тяжелые частицы. Значит, природа по каким-то причинам предпочитает «упаковывать» избыточную энергию в виде энергии покоя тяжелых частиц, а не легких.

Впрочем, можно считать, что все тяжелые частицы уже существуют (или полусуществуют) в виртуальном состоянии в мире малых энергий, и увеличение энергии столкновения приводит к тому, что обнаруживается уже имевшееся.

Загадочного в мире гораздо больше, чем думал не только Горацио, но и сам принц Гамлет.

6 ГЛАВА,

из которой станет ясно,
что мир держится
на законах сохранения



Но силу их мы чуем,
Их слышим благодать.

Ф. И. Тютчев. «Стихотворения»

**О том, чего
не может быть**

Три типа сил вызывают рождение и распад элементарных частиц, вызывают их превращения.

Однако фундаментальным вопросом является следующий: какие превращения частиц возможны? Ответ на него неожиданно прост. Сильные электромагнитные и слабые взаимодействия могут вызвать любые превращения, при которых не нарушаются законы сохранения. Все, что может произойти без нарушения законов сохранения, происходит в действительности. В рамках этих законов частицы могут вести себя как угодно.

Если раньше думали, что фундаментальные законы определяют то, что может (и должно) произойти, то теперь приходится считать самыми главными те законы, которые утверждают, что не может произойти. Такими законами являются законы сохранения.

В конечном счете кардинальное изменение представлений о фундаментальных законах определяется вероятностным характером движения и взаимных превращений элементарных частиц. Именно вероятностный характер законов не позволяет утверждать наверняка, что произойдет при столкновении двух частиц. Так, при столкновении двух быстрых протонов могут появиться самые разнообразные частицы. Может быть рождено два π -мезона и пара K -мезонов или пять π -мезонов и т. д. В большой серии одинаковых опытов проявляются все возможности. Вероятности конечных результатов столкновения различны, но все они не равны нулю, если не противоречат законам сохранения.

Отметим, что ни одна реакция между реальными частицами не может, в частности, противоречить закону сохранения энергии.

Большая свобода имеется для виртуальных процессов. Для них выполнение закона сохранения энергии не является обязательным (остальные законы сохранения должны выполняться).

Почему некоторые частицы стабильны?

При первом знакомстве с элементарными частицами обычно поражает, почему большинство из них нестабильно. В действительности же удивляться нужно не этому.

Взаимопревращения — главная черта бытия элементарных частиц.

Под действием трех типов сил никогда не прекращаются виртуальные превращения частиц друг в друга. Если не нарушаются законы сохранения, то рано или поздно произойдет реальное превращение: тяжелая частица распадется на более легкие.

При этом ничто не запрещает обратный процесс. Встретившись вместе, дочерние частицы сольются и превратятся в материнскую. Однако такая встреча очень маловероятна. Частицы разлетаются от места рождения, и так как мир не очень густо населен частицами, встреча их со своими братьями и сестрами, как правило, не успеет произойти. Они распадутся раньше, чем встретятся, если только не являются стабильными. Все процессы микромира, в частности превращения частиц, обратимы, но обратный распаду процесс в обычных условиях маловероятен. Лишь при сверхплотных состояниях вещества обратные процессы происходят столь же часто, как и прямые. В недрах тяжелых звезд это, по-видимому, так.

Следует ожидать, что любая рожденная частица не может долго существовать. Так и есть на самом деле, за некоторыми исключениями.

Почему все же существуют стабильные частицы? Именно этому следует удивляться, а не распаду частиц. То, что фотон и нейтрино стабильны, понять несложно. Они легче легкого. Их масса покоя равна нулю, и на более легкие частицы они распадаться не могут. Все другие частицы, казалось бы, должны распадаться на фотоны и нейтрино. Закону сохранения энергии это не противоречит.

Однако две частицы — электрон и протон — избегают саморазрушения. Почему? Только из-за ограничений, связанных с необходимостью выполнения законов сохранения. Других причин нет или мы их не знаем.

Что такое законы сохранения?

Впрочем, сначала надо немного сказать о том, что такое законы сохранения.

Собрание фактов, какими бы важными и интересными они ни были сами по себе, еще не образует науки. Задача науки состоит в отыскании общих законов природы и в объяснении с их помощью различных процессов.

Таковыми общими законами являются, например, законы динамики Ньютона для макроскопических тел или законы квантовой механики.

Простейшей формой общего закона является постоянство какой-либо величины. Такого рода законы в физике называют законами сохранения. Поиски сохраняющихся величин являются в высшей степени важным направлением исследования.

Главное значение законов сохранения состоит, прежде всего, в том удивительно всеобъемлющем характере, которым они обладают. Другие общие законы физики применимы только в ограниченной области. Так, законы Ньютона не способны объяснить движение элементарных частиц, а также движение макроскопических тел со скоростями, близкими к скорости света. Законы же сохранения охватывают движение тел любой массы и с любой скоростью.

Нельзя сказать, что на основе одних только законов сохранения можно целиком объяснить течение любого процесса. Но роль этих законов не сводится лишь к тому, чтобы указать, какие процессы невозможны. Законами сохранения объясняются до крайности просто очень многие особенности процессов.

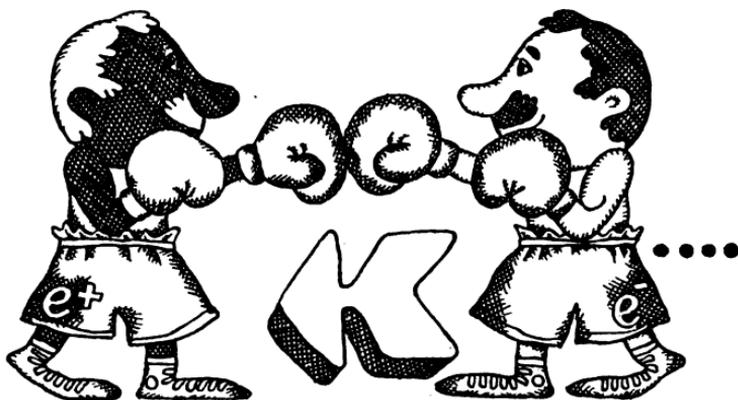
Законы сохранения незаменимы, когда исследователь начинает проникать во вновь открытую сферу неизведанного. Так было при зарождении физики элементарных частиц. Сущность явлений лежала во тьме, только отдельные, часто отрывочные факты приоткрывали завесу неизведанного. В этих условиях законы сохранения являлись единственной надежной путеводной нитью для исследователя. Не зная еще сути явлений в новой области, ученые с полным правом могли утверждать, что и здесь сохранение известных нам количеств имеет место. В дальнейшем, по мере проникновения в глубь микромира, были открыты новые, специфические для микромира законы сохранения, которые позволили разобраться в огромном количестве наблюдаемых превращений элементарных частиц.

Сохранение импульса

О законе сохранения энергии уже было сказано достаточно. Теперь рассмотрим кратко закон сохранения импульса и закон сохранения момента импульса.

Закон сохранения импульса или количества движения более или менее знаком всем, ибо входит в школьную программу. Мы не будем на нем долго задерживаться.

Импульс — это векторная величина, равная произведению массы тела на его скорость. Полный импульс любой системы тел обладает простым замечательным свойством: он остается неизменным, пока на систему не действуют посторонние тела. Этот закон применим как к макротелам, так и к микрообъектам.

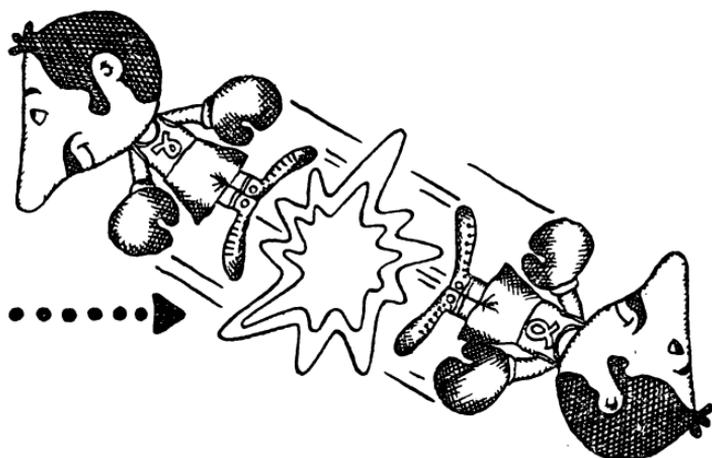


Ограничимся одним примером сохранения импульса. Пусть электрон медленно подошел к позитрону и обе частицы исчезли. Произошла аннигиляция. Вместо них в противоположные стороны полетели два фотона. Почему образуются две частицы, а не одна? И почему они летят в разные стороны, а не вместе? Для ответа на эти вопросы совершенно не нужно знать, что происходит в недрах самого электрона при его взаимодействии с позитроном. Ведь действующие здесь силы являются внутренними силами системы. Они не могут изменить полный импульс, который до рождения фотонов был равен нулю. Но если появится лишь один фотон, то его импульс, конечно, будет отличен от нуля. Ведь световая частица не может покоиться. Следовательно, должно появиться не меньше двух фотонов, разлетающихся в разные стороны.

Сохранение момента импульса

Момент импульса, или момент количества движения, является мерой интенсивности вращательного движения. Любое тело, вращающееся вокруг своей оси, обладает моментом количества движения. Быстро вращающийся волчок, земной шар, вальсирующая пара имеют те или иные моменты импульса. Момент импульса — векторная величина. Вектор момента направлен вдоль оси вращения.

Тело может не только вращаться вокруг своей оси, но и обращаться вокруг какого-либо другого тела. Так, Земля совершает за сутки один оборот вокруг своей оси и, кроме того, за год — один оборот по орбите вокруг Солнца. Наря-





ду с собственным моментом импульса она имеет и орбитальный момент.

Если внешние силы не создают момента сил, то полный момент количества движения системы сохраняется. Чтобы изменить положение оси тяжелого быстро вращающегося волчка в пространстве, нужно применить силу.

Как и закон сохранения импульса, закон сохранения момента импульса применим как к макроскопическим телам, так и к элементарным частицам.

Мы уже говорили о спине частиц – собственном моменте импульса. Наряду со спином, частицы могут обладать и орбитальным моментом количества движения. Орбитальный момент элементарных частиц квантуется. Его значения являются целыми кратными постоянной Планка \hbar .

Если орбитальный момент не изменяется при превращениях частиц, то суммарный спин системы остается постоянным. Вот как, например, происходит распад покоящегося π^+ -мезона на μ^+ -мезон и нейтрино. Спин π^+ -мезона равен нулю. После распада мюон и нейтрино разлетаются в строго противоположные стороны и орбитальный момент их относительного движения равен нулю. Поэтому должен равняться нулю и полный спиновый момент. Разлетающиеся μ^+ -мезон и нейтрино оказываются закрученными в противоположные стороны.

В более сложных случаях распада частицы могут иметь и орбитальный момент. Тогда сохраняется суммарный момент импульса: орбитальный плюс спиновый.

Сохранение электрического заряда

Следующая группа законов сохранения носит особый характер. За исключением закона сохранения электрического заряда, все они

были открыты в самое последнее время.

В макроскопической формулировке закон сохранения заряда выглядит так: электрический заряд в замкнутой системе остается постоянным. С микроскопической точки зрения это означает, что при всех превращениях элементарных частиц разность между числом положительно и отрицательно заряженных частиц остается постоянной. Если возникает заряженная частица, то одновременно мы обязательно наблюдаем рождение частицы, имеющей заряд противоположного знака. При распаде любой частицы алгебраическая сумма зарядов остается неизменной. Например, при распаде нейтрона наряду с положительным протоном появляется отрицательный электрон.

Мы не знаем, почему электрический заряд в природе сохраняется. Но, зная, что он сохраняется, мы можем понять причину стабильности электронов. Электрон — самая легкая из заряженных частиц и по этой причине не может распадаться. Более легкие частицы — фотон и нейтрино — не заряжены. Распад электрона поэтому неминуемо приводил бы к нарушению закона сохранения заряда. Обеспечение стабильности электрона — самая, пожалуй, большая заслуга закона сохранения заряда.

Что такое закон сохранения барионного заряда

Закон сохранения барионов (протонов и всех более тяжелых частиц) был установлен экспериментально, путем анализа громадного числа фактов превращений элементарных частиц.

Разность числа барионов и антибарионов в любой системе остается неизменной. Рождаться и уничтожаться могут только пары барион — антибарион. При распаде любого бариона (см. таблицу элементарных частиц) в продуктах распада обязательно присутствует более легкий барион.

Вот примеры некоторых реакций распада:

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

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^{-},$$

$$\Sigma^{+} \rightarrow p + \pi^0,$$

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma.$$

Протон не распадается дальше только потому, что является самым легким из барионов. Стабильность ядер, а значит, и всей Вселенной держится на сохранении числа барионов.

Можно ввести особое квантовое число, которое для барионов принимает значение $+1$, а для всех антибарионов -1 , и назвать его барионным зарядом. Тогда сохранение числа барионов есть сохранение алгебраической суммы барионных зарядов. Все частицы, имеющие барионный заряд, сильно взаимодействуют. Электроны и другие лептоны его лишены. Нет барионного заряда и у переносчиков ядерных взаимодействий — π - и K -мезонов, подобно тому как нет электрического заряда у фотонов.

Как прост этот закон и как непонятны причины его существования!

Что же служит столь мощным тормозом для распада протона? У него ведь большой избыток энергии покоя по сравнению с легкими частицами и разнообразные возможности распада на мезоны и лептоны. Закон сохранения барионного заряда — это лишь констатация определенного факта без какой-либо попытки объяснить его.

Закон сохранения лептонного заряда

Закон сохранения лептонного заряда вполне аналогичен закону сохранения барионного заряда. Разность между числом лептонов и антилептонов сохраняется при любых превращениях элементарных частиц. Так, например, при распаде нейтрона появляется два лептона: электрон и антинейтрино. Причем появление именно антинейтрино, а не нейтрино обусловлено законом сохранения числа лептонов.

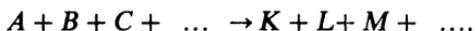
Если всем лептонам приписать лептонный заряд $+1$, а всем антилептонам — заряд -1 , то в различных реакциях алгебраическая сумма лептонных зарядов должна оставаться неизменной.

С открытием двух сортов нейтрино, о котором мы будем говорить в следующей главе, закон сохранения лептонного заряда усложняется. Оказалось, что есть два вида лептонных зарядов. Впрочем, об этом лучше рассказать позднее.

Также в дальнейшем вы познакомитесь еще с двумя законами сохранения, и если к тому времени не забудете о сохранении изотопического спина при сильных взаимодействиях, то будете иметь представление о полном наборе законов сохранения.

Алгебра реакций между частицами

Наряду с законами сохранения при реакциях между частицами выполняются два правила весьма общего характера. Об одном из них уже говорилось. Это обратимость всех реакций. Если протекает реакция



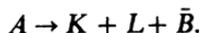
то возможна и обратная реакция



Второе правило несколько сложнее. В уравнениях реакций между частицами можно любую частицу перенести из левой части уравнения в правую или, наоборот, из правой части в левую, заменив ее античастицей. При этом мы получим новую реакцию, которая обязательно протекает в природе. Если, например, идет реакция



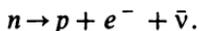
то возможна также реакция



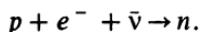
В этом нет ничего неожиданного. При такой перестановке ни один закон сохранения заведомо не нарушается. Действительно, операция переноса частицы из одной стороны уравнения в другую равноценна прибавлению к обеим сторонам уравнения одинаковых частиц, являющихся античастицами по отношению к одному из компонентов реакции и последующей аннигиляции частицы и античастицы. Нельзя только такую операцию проводить, если в левой части уравнения есть лишь одна частица, поскольку после переноса этой частицы в другую сторону уравнения останется нуль, что не может быть согласовано с законом сохранения энергии.

Эти простые правила определяют своего рода алгебру физики элементарных частиц. Приведем два примера.

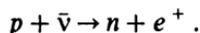
Как известно, нейтрон распадается на три частицы:



Возможен обратный процесс, когда эти три частицы сливаются в одну:



Теперь перенесем электрон в правую часть уравнения, заменив его позитроном:



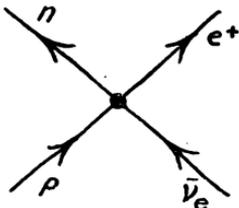


Рис. 18. Фейнмановская диаграмма взаимодействия антинейтрино с протоном.

Протон поглощает антинейтрино и превращается в нейтрон и позитрон. Именно эта реакция и дала возможность впервые экспериментально обнаружить антинейтрино. Фейнмановская диаграмма этой реакции показана на рис. 18.

А теперь посмотрим, на что должен распадаться π^0 -мезон. За счет сильного взаимодействия протон виртуально может превратиться в протон и π^0 -мезон:

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

Обратная реакция состоит в соединении протона с π^0 -мезоном:

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

Протон переносим вправо, заменяя его антипротоном:

$$\pi^0 \rightarrow p + \bar{p}.$$

Как известно, протон с антипротоном могут аннигилировать, давая два фотона:

$$p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Следовательно, конечный результат будет таким:

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

т. е. π^0 -мезон распадается на два фотона, что и происходит в действительности.

«Для новичка подобная цепь рассуждений, замечает Гелл-Манн, может показаться простой перестановкой символов. Не надо, однако, забывать, что перестановка эта возможна как итог детальных (и часто очень сложных) вычислений самих вероятностей. Так что в конце концов мы приходим к разумно точному предсказанию того, что должно произойти, сколько времени это займет и т. д.»

7 ГЛАВА,

в которой рассказывается об одной из самых примечательных частиц нейтрино и одной из самых непонятных частиц-мезоне



Все это было так таинственно и непонятно, что я не посмел отказаться.

Антуан де Сент-Экзюпери. «Маленький принц»

Немного истории

Новое слово нейтрино впервые появилось на страницах научных журналов около 40 лет назад. Необычным путем вошла новая частица в науку, удивительными оказались ее свойства, и не исключено, что именно с ней связаны самые глубокие тайны природы. Эту частицу пришлось «изобрести», чтобы не рухнул фундамент, на котором покоится здание физики. Четверть века вела она призрачное существование на страницах книг и журналов. Совершенно необходимая для объяснения многих легко наблюдаемых превращений, она сама длительное время оставалась неуловимой. Лишь в 1956 г. она была открыта экспериментально.

Нейтрино по-русски означает нейтрончик. Так назвал эту частицу итальянский физик Энрико Ферми. А летом 1962 г.

выяснилось, что нейтрино не одинок. Их стало двое. Если учесть, что каждой частице соответствует двойник — античастица, то всего частиц этого вида четыре: два нейтрино и два антинейтрино.

Нейтрино и сохранение энергии

При β -распаде радиоактивных ядер из них вылетают электроны. Но, странное дело, если сравнить энергию начального ядра с суммой энергий конечного ядра и вылетевшего электрона, то обнаруживается неувязка. Энергия начального ядра всегда больше суммы энергий конечного ядра и электрона.

После открытия нейтрона стало ясно, что β -распад ядер обусловлен тем, что один из нейтронов ядра превращается в протон и при этом испускает электрон. Оказалось, однако, что энергия нейтрона всегда больше суммарной энергии рожденных им частиц. Неужели часть энергии бесследно исчезает?

Тогда швейцарский физик Вольфганг Паули поставил вопрос, а что, если вместе с протоном и электроном при распаде нейтрона рождается какая-то частица-невидимка, которая уносит с собой недостающую энергию? Эта частица остается незамеченной потому, что, не имея электрического заряда и массы покоя, она не способна отрывать электроны от атома, расщеплять ядра, т. е. не может производить наблюдаемые эффекты, по которым мы обычно судим о появлении частицы.

Конечно, нелепо утверждать, будто частица, какой бы удивительной она ни была, вообще ни с чем не взаимодействует, поскольку в таком случае введение нейтрино в физику означало бы завалированный отказ от закона сохранения энергии. Выходило бы, что энергия теряется вместе с нейтрино безвозвратно и навсегда. Вот почему Паули предположил, что нейтрино просто очень слабо взаимодействует с веществом и поэтому может пройти сквозь большую толщу материала, не обнаруживая себя.

Нейтрино — единственная частица, способная участвовать только в слабых взаимодействиях.

Масса покоя нейтрино оказалась равной нулю, как и масса покоя фотона. За этими словами кроется простой смысл: покоящихся нейтрино нет. Они всегда движутся со скоростью света. Подсчитали, как взаимодействует нейтрино с веществом в слое определенной толщины. Увы, результат оказался не утешительным. Земной шар для нейтрино

более прозрачен, чем самое лучшее оптическое стекло для света. Лишь одно из каждых 10^{10} нейтрино, проходящих через центр Земли, имеет некоторую вероятность прореагировать с другой частицей. А вот железная стена толщиной более 150 миллионов километров (расстояние от Земли до Солнца) поглотила бы нейтрино с энергией порядка 10^9 электрон-вольт наверняка. И тем не менее нейтрино было обнаружено на Земле!

Нейтрино открыто!

Как же было открыто нейтрино (точнее, его двойник — антинейтрино) экспериментально?

Общая теория реакций между частицами предсказывала, что при попадании антинейтрино в протон возникнут позитрон и нейтрон. Вероятность такого процесса мала из-за чудовищной проникающей способности антинейтрино. Но если антинейтрино будет очень много, то можно надеяться их обнаружить. Громадные потоки антинейтрино возникают при работе атомного реактора, когда при делении ядер урана появляется множество свободных нейтронов, которые затем распадаются. Ежесекундно рождается не меньше 10^{18} антинейтрино.

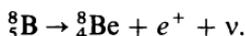
И вот возле реактора (опыт был проведен в США в 1956 г.) в землю был закопан ящик со свинцово-парафиновыми стенками, защищавшими содержимое этого ящика от посторонних излучений. В ящик было помещено 200 л воды, окруженной слоем жидкого сцинтиллятора (сцинтиллятор — вещество, дающее вспышки света при прохождении сквозь него γ -квантов).

Позитрон, появившийся при попадании антинейтрино в один из протонов молекулы воды, немедленно аннигилирует с одним из электронов, давая два гамма-кванта. Гамма-кванты вызывают вспышки сцинтиллятора, которые регистрируются 150 фотоумножителями. Рожденный при реакции нейтрон после некоторого блуждания (несколько миллионов долей секунды) захватывается ядром кадмия, который специально добавляют к воде из-за его способности сильно поглощать нейтроны. После этого ядро кадмия излучает несколько гамма-квантов, сигнализируя тем самым о появлении нейтрона. По возникновении двух разлетающихся в разные стороны гамма-квантов, а спустя небольшой промежуток времени еще нескольких было установлено существование антинейтрино с той степенью очевидности, какая только возможна в мире элементарных частиц. Не очень наглядно, правда, зато совершенно бесспорно.

Солнечные нейтрино

В четвертой главе говорилось о роли слабых взаимодействий во Вселенной. Вызванные ими реакции — необходимое звено в цепи термоядерных реакций внутри звезд, приводящих к образованию гелия из водорода. А именно за счет этих реакций выделяется энергия, обеспечивающая свечение звезд на протяжении миллиардов лет. При реакциях, обусловленных слабыми взаимодействиями, рождаются нейтрино.

Конечно, проще всего обнаружить поток нейтрино от ближайшей к нам звезды — Солнца. Наиболее перспективна попытка регистрации нейтрино, возникающего при распаде радиоактивного бора:

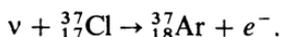


Радиоактивный бор — один из промежуточных элементов в цепи реакций, проводящих к образованию ядра гелия из четырех протонов.

Поток этих нейтрино имеет довольно большую энергию порядка нескольких миллионов электрон-вольт. Это важно, так как вероятность взаимодействия нейтрино с другими частицами растет с энергией. Вблизи Земли поток нейтрино достигает величины 10^6 частиц на квадратный сантиметр за секунду. Это не так уж много для столь проникающих частиц, как нейтрино. Тем не менее можно построить детектор, способный регистрировать солнечные нейтрино. Правда для этого не годится детектор, описанный выше.

Первые опыты были проведены в США в 1967–1968 гг. В шахте копей Южной Дакоты на глубине 1480 м была создана установка для детектирования солнечных нейтрино. Толща Земли должна была препятствовать проникновению к детектору всех частиц из космоса, кроме нейтрино.

Детектирование нейтрино предполагалось осуществить с помощью радиохимического метода, предложенного советским ученым Б. Понтекорво. Использовалась реакция



Под действием нейтрино ядро хлора превращается в ядро радиоактивного аргона с периодом полураспада 35 суток.

Цилиндрический бак содержал 380 000 литров жидкого перхлорэтилена (C_2Cl_4). Возникший аргон извлекался с помощью продувания через бак 20 000 литров гелия. Затем аргон вымораживался охлаждением до температуры 77 К

и адсорбировался активированным углем. После этого атомы аргона регистрировались по их радиоактивному распаду с помощью счетчиков.

Эксперимент длился более года, а затем был повторен в 1972 г. Однако солнечные нейтрино обнаружить не удалось. В то же время теоретические расчеты показывали, что поток нейтрино от Солнца достаточно интенсивен, чтобы установка регистрировала около одного нейтрино за двое суток.

До сих пор остается неясным, в чем здесь дело. Возможно, что при теоретической оценке потока нейтрино температура внутри Солнца полагалась слишком большой: $15 \cdot 10^6$ К. Интенсивность нейтринного потока очень сильно зависит от температуры и уже в случае температуры $13 \cdot 10^6$ К отрицательные результаты опыта объяснимы.

Эксперименты продолжаются и рано или поздно вопрос станет ясным. В нашей стране создана и вводится в эксплуатацию нейтринная Баксанская станция. В ущелье Баксан на Кавказе в монолитной скале проделан двухкилометровый тоннель и сооружена научная лаборатория, защищенная от частиц космических лучей скалой, толщиной в несколько километров. В лаборатории располагается аппаратура для регистрации солнечных нейтрино и нейтрино из космоса.

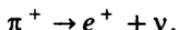
Академиком М. А. Марковым высказана очень интересная идея просвечивания земного шара потоком нейтрино. Можно направить поток нейтрино, полученных на Брукхейвенском ускорителе элементарных частиц в США, сквозь земной шар в сторону Баксанской станции и регистрировать здесь нейтрино. Будет ли осуществлен этот проект, пока неизвестно.

Самая удивительная частица

Нейтрино появляется не только при распаде нейтрона. Превращение многих других элементарных частиц нарушают законы сохранения, если не принимать во внимание рождение нейтрино или антинейтрино. Например, если подсчитать баланс энергии и других сохраняющихся величин для распада π -мезона, наблюдающегося в камере Вильсона, то опять обнаружится неувязка, как и при распаде нейтрона. Значит, и здесь рождается нейтрино.

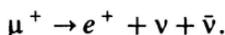
Впрочем, при распаде π -мезона появляется еще более непонятная частица, чем нейтрино. Давайте попробуем предсказать, как должен распадаться π^+ -мезон. Мы уже знаем, что все реакции, не запрещаемые законами сохранения,

возможны. Значит, вполне допустима реакция



Она состоит в том, что положительный пион распадается на позитрон и нейтрино. При этом выполняется закон сохранения энергии. Также выполнены законы сохранения электрического и лептонного зарядов.

Такая реакция и идет в действительности. Но только 0,014% пионов распадается подобным образом, а 99,986% пионов распадается на μ -мезон и нейтрино. Лишь впоследствии μ -мезон, частица в 207 раз более тяжелая, чем электрон, распадается на позитрон, нейтрино и антинейтрино (рис. 19):



Впрочем, удивительным здесь является не то, что пион распадается преимущественно на мюон и нейтрино. Из теории слабых взаимодействий как раз вытекает, что получение при распаде пиона сравнительно тяжелого мюона гораздо более вероятно, чем получение более легкой частицы — электрона. Удивительно то, что в природе вообще появляется мюон.

Как уже говорилось ранее, мюон — абсолютный двойник электрона во всем, кроме массы. То, что одна из частиц стабильна, а другая распадается (мюон живет около 10^{-6} с), не принципиально. Просто мюону есть на что распасться без нарушения законов сохранения, а электрону не на что.

Почему же μ -мезон, ничем не отличаясь от электрона, имеет столь огромную массу? Это совершенно непонятно.

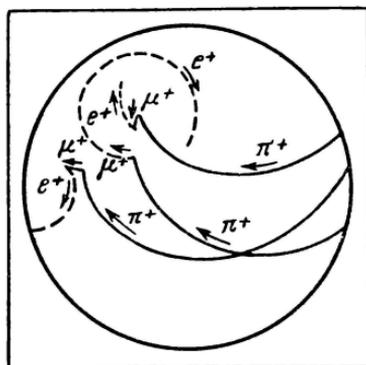
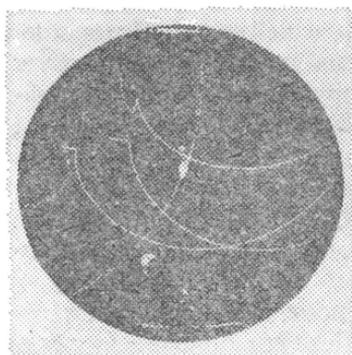


Рис. 19. Распад π - и μ -мезонов в пузырьковой камере.

На примерах остальных частиц мы, казалось бы, прочно уверовали в то, что только различие во взаимодействиях частиц может вызвать разницу их масс. Здесь же никакого различия во взаимодействиях нет!

Остается предположить, что существование μ -мезона связано с еще не познанными явлениями. Пакистанский физик Абдус Салам по поводу μ -мезона высказался следующим образом: «Наши современные теории — это всего лишь ступени, ведущие к внутренней гармонии, всеобъемлющей симметрии. Сегодня μ -мезон может показаться лишним. Однако, открыв его истинную природу, мы придем в восхищение от того, сколь гармонично он укладывается в общую схему, сколь неотъемлемой частью чего-то более глубокого, более значительного и более совершенного он является. Вера во внутреннюю гармонию природы в прошлом приносила свои плоды. Я уверен, что так будет и в будущем».

**Невидимка
обретает
партнера**

Однако кое-что мы уже начали понимать. Совсем недавно физики были в недоумении по поводу характера распада μ -мезона. Он распадается на электрон (или позитрон), нейтрино и антинейтрино. Для сохранения лептонного заряда одного нейтрино недостаточно. Но почему бы μ -мезону не распадаться на электрон и фотон по схеме



Ведь при такой реакции все законы сохранения тоже были бы выполнены. Теперь мы, по крайней мере отчасти, знаем, почему этот процесс невозможен.

Вы обратили внимание на то, что нейтрино может появляться либо в компании с электроном (например, при распаде нейтронов), либо в компании с μ -мезоном (например, при распаде пионов). В первом случае говорят об электронном нейтрино, а во втором о мюонном. Оба эти нейтрино принято было считать тождественными, хотя и не было фактов, которые бы прямо это доказывали.

А вдруг все же имеется два сорта нейтрино? Такой вопрос оказался актуальным лишь в тот момент, когда появилась реальная возможность решить его экспериментально. Идея опыта была предложена советским физиком Бруно Понтекорво.

Теория предсказывала, что в случае тождественности электронного и мюонного нейтрино при попадании антинейтрино в протон может наряду с нейтроном родиться или

позитрон, или μ -мезон:

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

или

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

Если же нейтрино сталкивается с нейтроном, то могут быть рождены вместе с протоном или электрон, или же μ -мезон:

$$n + \nu \rightarrow p + e^-,$$

или

$$n + \nu \rightarrow p + \mu^-.$$

В опытах 1956 г. рождение μ -мезонов не могло произойти по той причине, что антинейтрино из реакторов имеют недостаточную энергию для осуществления этого процесса. Если бы удалось получить антинейтрино с большой энергией, то мюоны должны были бы рождаться столь же часто, как и позитроны.

Для увеличения энергии электронного антинейтрино нужно резко увеличить скорость нейтронов. Но как? Ведь ускорителей для нейтронов не существует. Все методы ускорения пригодны только для заряженных частиц. Оказался возможным другой путь. Можно получить мюонные нейтрино и антинейтрино большой энергии, если порождающие их пионы имеют достаточные скорости. Быстрые же пионы возникают при бомбардировке мишени протонами, ускоренными до больших энергий. Конечно, мало надежды на получение высокой плотности пучка антинейтрино высоких энергий, ибо интенсивность протонного пучка в ускорителе не идет ни в какое сравнение с интенсивностью нейтронных потоков в реакторе. Но делу помогает резкое увеличение числа реакций, вызванных слабыми взаимодействиями, по мере увеличения энергии сталкивающихся частиц.

Смысл эксперимента сводился вот к чему. Если оба нейтрино тождественны, то мюонные нейтрино и антинейтрино будут порождать как мюоны, так и электроны или позитроны. Если же они различны, то следует ожидать, что будут рождаться только мюоны.

Опыт был поставлен в 1962 г. в США. Протоны разгонялись в ускорителе до энергий порядка 15 млрд. эВ (или 15 ГэВ). Пучок протонов бомбардировал мишень из бериллия, а в ней происходило рождение π -мезонов. Распадаясь, пионы давали антинейтрино и нейтрино большой энергии.

Для регистрации частиц, порожденных нейтрино, была применена искровая камера особой конструкции. Ни одно

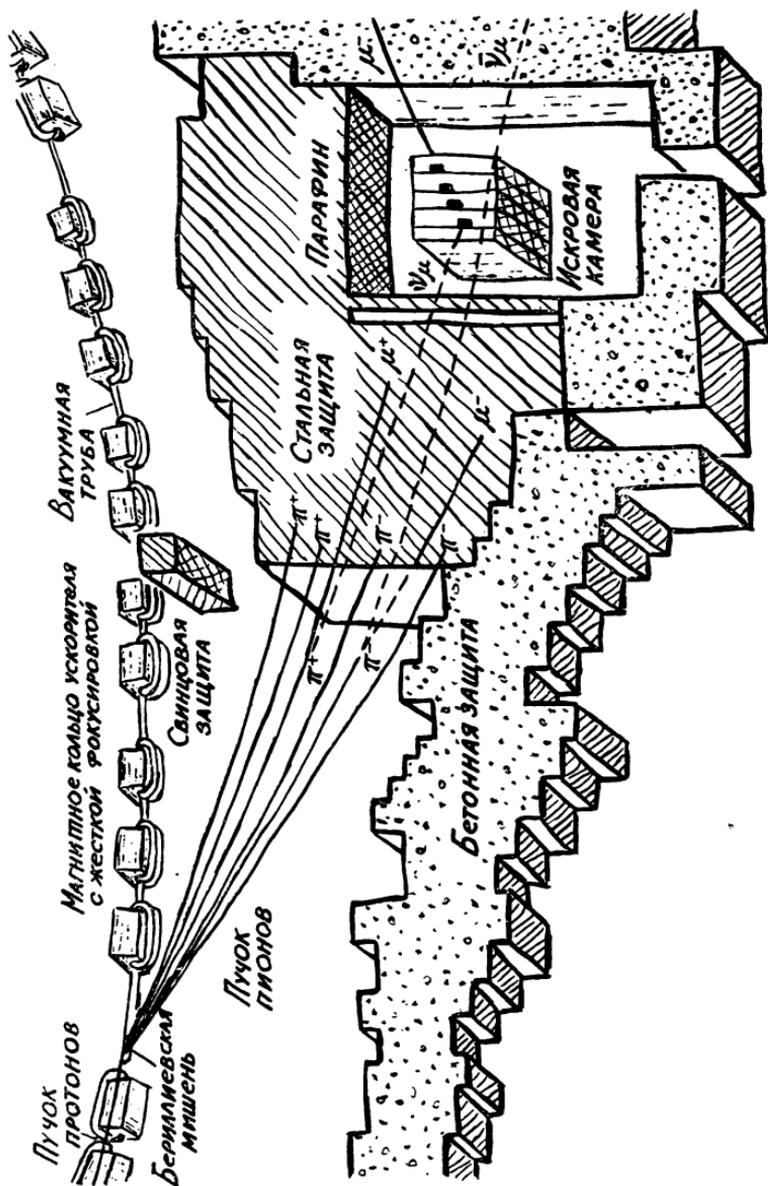


Рис. 20. Схема опыта по обнаружению двух сортов нейтрино.

другое регистрирующее устройство не могло содержать несколько тонн протонов и нейтронов, необходимых для наблюдения заметного числа реагирующих нейтрино.

Камера содержала 10-тонный пакет алюминиевых пластин, между которыми создавалось высокое напряжение. В том месте, где пролетает быстрая заряженная частица, пронизывающая пластины, возникает искровой разряд (см. рис. 4). Пионы, мюоны, нейтрино и антинейтрино, прежде чем попасть в камеру, проходили слой брони толщиной 13,5 м (от старого броненосца). При этом мезоны поглощались; для нейтрино же этот слой был абсолютно прозрачен¹⁾. При взаимодействии нейтрино и антинейтрино с нейтронами и протонами ядер алюминия рождались новые частицы.

Вся камера была окружена счетчиками частиц, которые включали напряжение между пластинами только в том случае, если регистрируемая ими частица была порождена нешимся из ускорителя нейтрино. В тот же момент фотографировался искровой след пролетевшей частицы. Возможность регистрации частиц, случайно попавших в камеру извне (скажем, космических лучей), исключалась. Наблюдения велись 6 месяцев, и за это время было обнаружено рождение 50 мюонов (рис. 20). Ни одного электрона или позитрона не появилось на свет. Это означало, что мюонные нейтрино могут рождать только мюоны. Существование двух типов антинейтрино, и соответственно нейтрино было строго доказано.

Два типа лептонного заряда

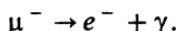
Пока не ясно, с чем связано различие между электронным и мюонным нейтрино. Природа поставила здесь перед учеными новую задачу, которую еще предстоит решить. Но одно ясно: существует не один, а два типа лептонных зарядов и каждый из них сохраняется независимо от другого.

Электрону и электронному нейтрино следует приписать электронный лептонный заряд $+1$, а их античастицами — заряд -1 , μ^- -мезону и мюонному нейтрино — мюонный лептонный заряд $+1$; μ^+ -мезону и мюонному антинейтрино — заряд -1 . При любых реакциях между частицами сохраняются порознь как сумма электронных лептонных зарядов, так и сумма мюонных лептонных зарядов. Руководствуясь этими законами сохранения лептонных за-

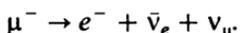
¹⁾ Ускоритель работал на половинной мощности. Иначе заградительную стену пришлось бы увеличить до чудовищных размеров.

рядов, можно объяснить все известные реакции, в которых участвуют лептоны.

Мюонное антинейтрино не может породить при столкновении с протоном нейтрон и позитрон по той причине, что мюонный лептонный заряд не будет сохраняться. По той же причине не может идти реакция



При распаде μ^- -мезона образуются электрон, электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$ и мюонное нейтрино ν_μ :

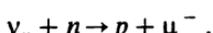


Нейтрино, рожденные в атмосфере Земли и в космосе

Солнечные нейтрино пока не обнаружены. Но уже зарегистрированы нейтрино высокой энергии, рождаемые в верхних слоях атмосферы. Советский ученый

М. А. Марков обратил внимание на то, что при столкновениях протонов космических лучей с ядрами атомов воздуха должны рождаться π - и K -мезоны. Распадаясь, они дают мюонные нейтрино высокой энергии.

В 1965 г. эти нейтрино были обнаружены учеными США в золотоносной шахте Южной Африки на глубине 3200 м. Затем опыты были повторены в Индии, и к 1973 г. насчитывалось свыше сотни реакций рождения мюонными нейтрино μ -мезонов при столкновениях нейтрино с нейтронами:



Регистрировались только частицы, попавшие в детектор под малыми углами к горизонту и, следовательно, прошедшие через большую толщу Земли. Это позволило избавиться от фона мюонов, рожденных в атмосфере. Детектор регистрировал мюоны, рожденные нейтрино в толще Земли. Он состоял из группы ящиков, наполненных сцинтиллирующей под действием мюонов жидкостью. Каждый ящик снабжался четырьмя фотоумножителями для регистрации вспышек. Ящики были расположены так, чтобы отличить мюоны, движущиеся горизонтально (и значит, рожденные нейтрино в толще Земли) от движущихся вертикально мюонов космических лучей. Вся установка напоминала грубый телескоп (нейтринный телескоп).

В настоящее время разрабатываются устройства, позволяющие регистрировать нейтрино большой энергии, идущие непосредственно из космоса. В частности, кратковременные

всплески потоков нейтрино должны сопровождать коллапс звезд.

Ученых привлекает возможность глубоководного детектирования нейтрино с помощью регистрации черенковского излучения электронов и мюонов, образующихся в результате взаимодействия нейтрино с ядрами молекул воды. На глубине 5 км (чтобы избавиться от фона космических лучей) в объеме кубического километра планируется расположить в узлах решетки с периодом 20 м огромное число фотоумножителей (порядка 100 000).

Одновременно планируется создание акустического детектора нейтрино высоких энергий в океане. Рождаемые нейтрино быстрые заряженные частицы создают узкий нагретый канал, возбуждающий в воде звуковую волну. Звуковые волны поглощаются в воде слабее, чем свет. Это позволяет использовать в качестве детектора большой объем океана около 100 км³. В этом объеме предполагается разместить около 100 000 гидрофонов для улавливания звука.

Стоимость подобных установок огромна. Но с их помощью ученые надеются получить уникальную информацию из космоса. Нейтрино — единственные частицы, которые в принципе позволяют «заглянуть» внутрь звезд, «просветить» ядра галактик. Никакая другая частица не способна пронизать всю Вселенную. Сейчас мы на пороге зарождения «нейтринной астрономии». Главная проблема — это создание надежных приемников нейтрино. Особенно нейтрино малых энергий.

Введение нейтрино спасло законы сохранения энергии и других механических величин. Но оно же разрушило другой очень важный принцип.

Нейтрино и зеркальная симметрия мира

До 1956 г. все были уверены в зеркальной симметрии мира. Зеркальное изображение любого объекта считалось тоже возможным объектом природы. Точно так же считалось, что любой процесс, происходящий в природе, может протекать и так, как он выглядит в зеркале. Нет никакого принципиального различия между правым и левым, так как при зеркальном отражении правое заменяется левым и наоборот.

Правда, в органическом мире, как хорошо известно, зеркальная симметрия отсутствует. Так, например, сердце человека находится слева. Однако подобные факты можно объяснить случайными обстоятельствами, имевшими место



на начальной стадии развития жизни на Земле. Нисколько не противоречит фундаментальным законам природы существование организмов, являющихся зеркальными копиями существующих живых существ. Так, в частности, встречаются, хотя и очень редко, люди, у которых сердце расположено справа.

Зеркальная симметрия природы на языке квантовой теории выглядит как выполнение особого закона сохранения, закона сохранения четности.

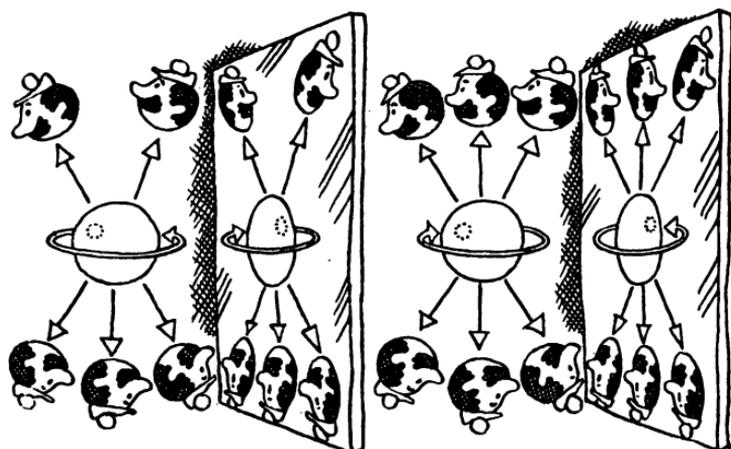
И вот в 1956 г. американские физики Ли и Янг обратили внимание на то, что собственно, нет никаких опытных фактов, подтверждающих, что зеркальная симметрия имеется в процессах, вызванных слабыми взаимодействиями. Симметрия при электромагнитных и сильных взаимодействиях не вызывает сомнений. А вот при слабых?! Однако уверенность физиков в симметрии мира была очень твердой. Любопытным в этом отношении является письмо Паули к Вайскопфу от 17 января 1957 г. «Я не верю в то, — писал Паули, — что Бог — слабый левша, и готов держать пари на крупную сумму за то, что эксперименты дадут результаты, соответствующие наличию симметрии».

Однако спустя два дня в США были сделаны опыты, совершенно отчетливо показавшие, что при слабых взаимодействиях нет симметрии правого и левого. 27 января Паули писал: «Теперь, когда первое потрясение миновало, я начинаю приходить в себя. Действительно, все было весьма драматично. Во вторник, 21 числа, в 8 часов вечера я пред-

полагал прочитать лекцию о нейтринной теории. В 5 часов вечера я получил 3 экспериментальные работы. Я был потрясен не столько тем, что Бог предпочитает левую руку, сколько тем, что он сохраняет симметрию между левым и правым, когда он проявляет себя сильным. Короче говоря, мне представляется сейчас самой актуальной проблемой выяснение вопроса о том, почему сильные взаимодействия симметричны относительно левого и правого».

До некоторой степени это вскоре было выяснено и оказалось связанным с новыми необычными свойствами нейтрино, которые рождаются как раз за счет слабых взаимодействий.

Однако вначале несколько слов о самих опытах. Идея их такова. Атомные ядра, в том числе и радиоактивные, закручены определенным образом. Они имеют собственный механический момент импульса — спин. При β -распаде из ядер вылетают электроны. Если в природе существует зеркальная симметрия, то направление вылетающих из ядра электронов не должно зависеть от направления вращения ядра. Действительно, пусть спины ядер ориентированы так, что все они вращаются против часовой стрелки, если смотреть на них сверху вниз (подобная ориентация может быть создана при низких температурах в сильном магнитном поле). И пусть большинство электронов вылетает вниз. При зеркальном отражении всей картины направление вращения ядер изменится на обратное, а направление преимущественного испускания электронов останется тем же. Налицо нарушение зеркальной симметрии, которого не было бы, если

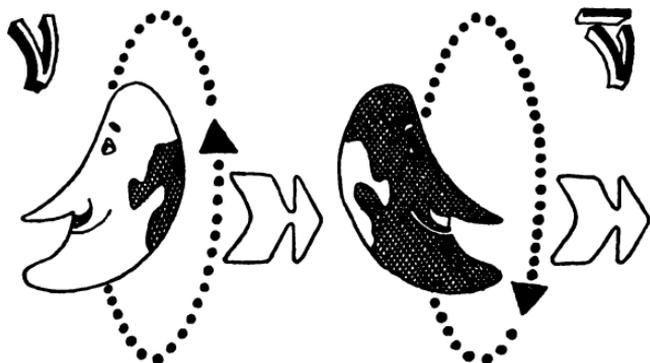


бы электроны с равной вероятностью испускались вверх и вниз.

Но опыты Ву по наблюдению радиоактивного распада кобальта (Co^{60}) показали, что большинство ориентированных ядер кобальта (60%) испускают электроны вниз. Повторенные затем во многих лабораториях мира, эти опыты не оставили сомнений в нарушении зеркальной симметрии.

Объясняется этот замечательный опыт свойствами нейтрино, вылетающих вместе с электронами из ядра при β -распаде. Пустое пространство зеркально симметрично, но нейтрино — единственная частица, не обладающая зеркальной симметрией. Нейтрино и антинейтрино закручены строго определенным образом. Они подобны спирали или винту. Направление их движения и направление вращения связаны однозначно. Антинейтрино образует правый винт с направлением движения, а нейтрино — левый, в то время как, скажем, электрон может вращаться как вправо, так и влево по отношению к направлению движения. Учитывая спиральность нейтрино, можно объяснить, почему электроны из ядер вылетают в определенном направлении.

Впоследствии было обнаружено нарушение зеркальной симметрии при распаде π - и μ -мезонов. Здесь также появляются нейтрино, и они-то своей закрученностью вызывают отступление от сохранения четности. Однако дело обстоит не всегда так просто. Нарушение зеркальной симметрии наблюдается, например, при рождении и распаде Λ^0 -частицы. А в этих процессах нейтрино совсем не участвуют. Слабые взаимодействия всегда вызывают отступления от зеркальной симметрии. В тех случаях, когда рождение нейтрино не происходит, простое и наглядное объяснение нарушения зеркальной симметрии дать трудно.



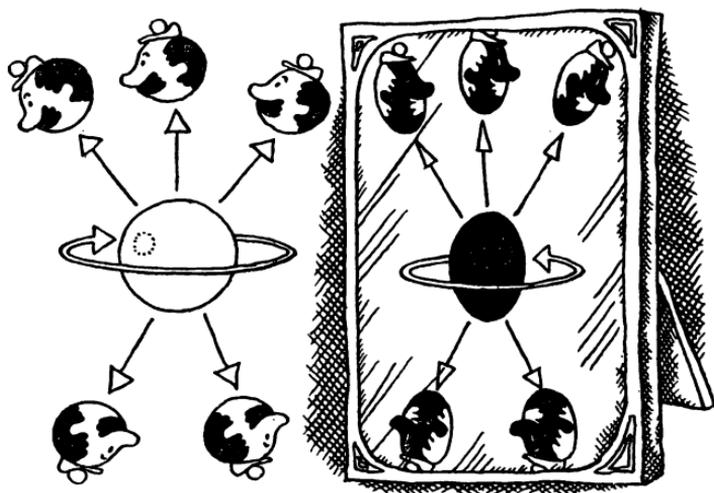
Зарядовое сопряжение

Величайшая асимметрия нашего мира с точки зрения физики элементарных частиц состоит в том, что весь мир построен из частиц. Античастицы сравнительно редкие гости. А ведь согласно фундаментальным законам природы они имеют равные с частицами права на существование. Антипротоны и антинейтроны могут образовать антиядра. Вместе с позитронами антиядра могут создавать антиатомы и куски антивещества.

Мы ничего не знаем о том, каким образом вещество Вселенной оказалось отсепарированным от антивещества. Но если бы такой сепарации не было, то не было бы ни нас с вами, ни видимой Вселенной. Опасность аннигиляционного взрыва не допускает соседства вещества и антивещества. Может быть, антивещество есть где-то там, за границами видимой части Вселенной, откуда до нас не доходят никакие вести.

Тем не менее до 1957 г. физики были убеждены, что при замене всех частиц античастицами мы получили бы мир, в котором все происходило бы точно так же, как и в нашем. Считали, что природа симметрична относительно зарядового сопряжения.

Однако вспомним свойства нейтрино. При зарядовом сопряжении все нейтрино заменяются антинейтрино и наоборот. Но из-за закрученности этой частицы процессы в мире, в котором нейтрино заменены антинейтрино, будут происходить уже по-иному. Они будут выглядеть так, как при зер-



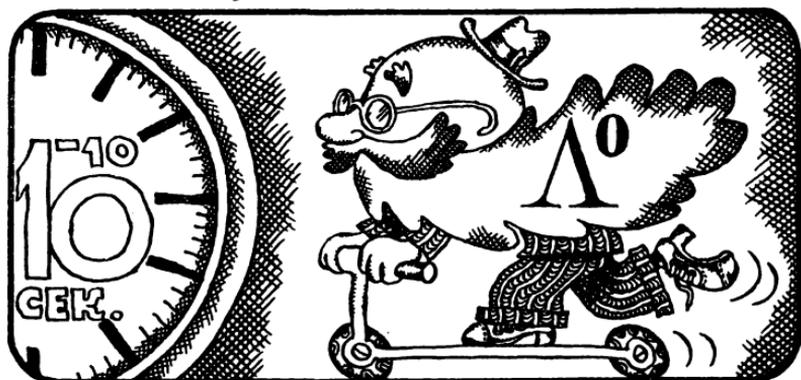
кальном отражении, которое как раз и меняет закрученность нейтрино. Следовательно, естественно допустить, что распад антикобальта будет происходить точно так же, как и распад кобальта, видимый в зеркале.

Объединяя две асимметрии (зеркальную и зарядовую) в одну, мы приходим к более высокой симметрии, получившей название принципа комбинированной четности. Согласно этому принципу зеркальное изображение любого процесса в природе также является возможным процессом, если только все частицы заменить античастицами.

Если раньше думали, что отражение тела в зеркале отличается от самого тела только заменой левого на правое, то, согласно новым представлениям, изображение должно состоять из антивещества. Зеркальное изображение нейтрино — антинейтрино, электрона — позитрон и т. д. В зеркале вы видите свое анти-я: левое заменено на правое, а частицы — на античастицы.

8 ГЛАВА,

в которой рассказы-
вается о частицах, не
без основания называ-
емых странными



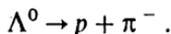
Не существует истинно прекрасного без не-
которой доли странности.

Френсис Бэкон

Новые частицы появляются только парами

Начиная с 1947 г. таблица элементарных частиц начала стремительно пополняться новыми видами. Произошло это совсем не потому, что ученые стали лучше понимать повадки частиц и поэтому охота за ними стала более успешной. Просто были построены более мощные ускорители частиц, и в лабораториях физиков появились очень энергичные частицы в столь большом количестве, как никогда ранее. На протяжении 8 лет было открыто 16 новых частиц; это так называемые К-мезоны и гипероны.

Среди них имеются и нейтральные частицы — K^0 -мезоны и Λ^0 -гипероны, невидимые в камере. Они дали о себе знать V-образными треками, которые образуют продукты их распада, несущие электрические заряды (рис. 21):



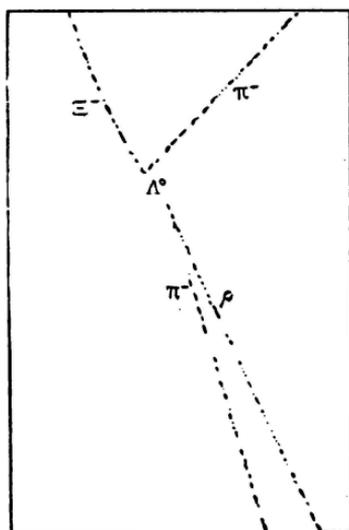
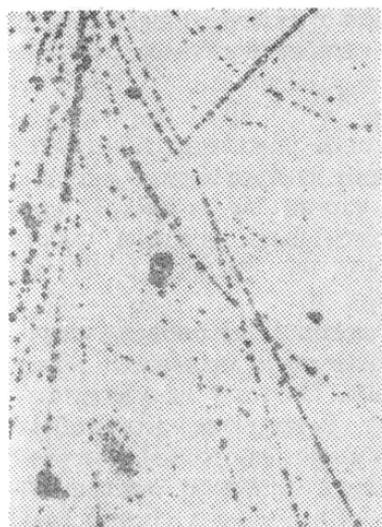


Рис. 21. Пример распада странных частиц. Отрицательная Ξ^- -частица распадается на нейтральную Λ^0 -частицу и отрицательный пион. Λ^0 -частица распадается на протон и второй отрицательный пион.

Вскоре была отмечена странная особенность вновь открытых частиц: они рождаются только парами или еще большими группами (рис. 22). Физики давно привыкли к то-

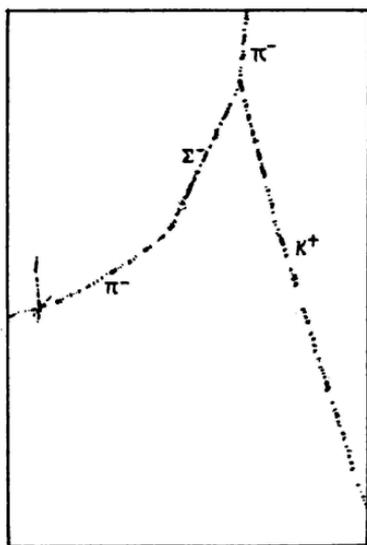
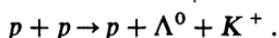


Рис. 22. Совместное рождение странных частиц.

му, что парами рождаются частицы и античастицы. Здесь же не было ничего подобного. Вот типичный пример реакции:



При столкновении двух протонов рождается Λ^0 -частица и K^+ -мезон. Остается также один из протонов.

Состав пар рождающихся частиц не является произвольным. Так, Λ^0 -частица может быть рождена вместе с K^+ -мезоном или Σ^+ -гипероном, но никогда с K^- -мезоном или Σ^- -гипероном.

Невероятное долголетие

Масса покоя K -мезонов и гиперонов значительно превышает массу нуклонов. Поэтому не удивительно, что рождаются они только при взаимодействии частиц (обычно протонов) высокой энергии. Новые частицы — продукт сильного взаимодействия. Иначе они не рождались бы в больших количествах. Можно было предположить, что эти частицы не могут долго жить. За счет тех же сильных взаимодействий они должны распадаться, если ... если это допускается законами сохранения. Так, Λ^0 -частица должна быстро распадаться на протон и отрицательный пион. Реакция в действительности и идет таким образом, ибо ни законы сохранения механических величин, ни законы сохранения различного рода зарядов не нарушаются. Но странным образом процесс распада оказывается сильно заторможенным — в сотни и тысячи миллиардов раз. Время жизни Λ^0 -гиперона оказывается весьма большим (порядка 10^{-10} с) в сравнении с временем жизни, которое должно было бы быть, если бы распад был вызван сильными взаимодействиями (10^{-22} — 10^{-23} с). Случись такое удлинение жизни у человека, его возраст превосходил бы возраст Солнечной системы. Сильные и электромагнитные взаимодействия могут рожать эти частицы (точнее, пары частиц), но по каким-то причинам не могут их уничтожить.

Взгляните на времена жизни новых частиц и сравните их с временем жизни заряженных π -мезонов, распадающихся за счет слабых взаимодействий. K -мезоны распадаются за такое же время. Примерно таким же является и время распада гиперонов. Вы догадываетесь, что это не случайно?

Да, именно так! Распады новых частиц, как показали самые тщательные исследования, обусловлены слабыми взаимодействиями. Потому-то эти частицы живут долго. Здесь еще раз можно наглядно убедиться, что слабые взаи-

модействия — это очень медленные, но отнюдь не ничтожные силы. Совершать они могут деяния, перед которыми пасуют мощнейшие (или быстрее) из сил природы.

Рождение парами и долголетие — странные свойства новых частиц. Поэтому физики назвали эти частицы странными частицами. Это название за ними укоренилось.

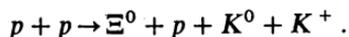
Причина долголетия

Умудренные опытом, физики начали понимать, что если не происходит того, что, казалось бы, неизбежно должно быть, то надо искать новый закон сохранения. Такой закон и был открыт американским физиком Гелл-Манном и японским ученом Нишиджима.

Эти ученые предположили, что странные частицы являются носителями еще одного квантового числа, которое сохраняется при сильных и электромагнитных взаимодействиях, но не сохраняется при слабых. Число это так прямо и было названо странностью. Закон сохранения странности объясняет как парное рождение странных частиц, так и их долголетие. Правда, сам он не имеет до сих пор какого-либо ясного истолкования.

Все можно объяснить, если предположить, что частицы Λ^0 , Σ^+ , Σ^- , Σ^0 , K^- , K^0 имеют странность, равную -1 , частицы $\bar{\Lambda}^0$, $\bar{\Sigma}^+$, $\bar{\Sigma}^-$, $\bar{\Sigma}^0$, K^+ , K^0 — странность $+1$, частицы Ξ^- , Ξ^0 — странность -2 , частицы $\bar{\Xi}^-$, $\bar{\Xi}^0$ — странность $+2$, а нуклоны, π - и η^0 -мезоны лишены странности.

При любой реакции, вызванной сильными или электромагнитными взаимодействиями, алгебраическая сумма странностей остается неизменной. Поэтому при столкновениях сильные взаимодействия могут породить сразу не менее двух частиц со странностями противоположного знака. Например, при столкновении протонов рождаются Λ^0 - и K^+ -частицы, имеющие странности разных знаков, но не Λ^0 и K^- . При возникновении Ξ^0 -частицы одновременно появляются еще два странных мезона:



Частица Ξ^0 имеет странность -2 , а K^0 и K^+ — в сумме имеют странность $+2$. Поэтому такая реакция может идти за счет сильных взаимодействий.

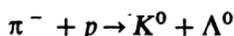
Но сильные взаимодействия не могут разрушить странную частицу. Для распада на другие странные частицы просто не хватает энергии, а более легкие частицы лишены

странности. Поэтому ядерные и электромагнитные взаимодействия бессильны что-либо сделать¹⁾). Лишь слабые взаимодействия в конце концов приканчивают странные частицы.

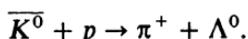
Открытие закона сохранения странности позволило не только разобраться в поведении K -мезонов и гиперонов, но и предсказать многие из этих частиц, в частности Σ^0 - и Ξ^0 -гипероны.

Удивительные K^0 - и \bar{K}^0 -мезоны

Удалось еще предсказать удивительные даже для странных частиц свойства K^0 - и \bar{K}^0 -мезонов. Эти частицы, и только эти, различаются лишь знаком странности. В остальном они тождественны. Поскольку странность сохраняется только в сильных и электромагнитных взаимодействиях (но не в слабых), K^0 и \bar{K}^0 должны вести себя как разные частицы лишь при реакциях рождения, за которые как раз ответственны сильные взаимодействия. Так, например, в реакции



рождается именно K^0 -мезон со странностью $+1$, а не античастица \bar{K}^0 , имеющая странность -1 . При столкновении с протоном только \bar{K}^0 (но не K^0) может породить Λ^0 -гиперон:



Этого требует закон сохранения странности.

При распадах же K^0 и \bar{K}^0 должны вести себя одинаково, так как распад вызван слабыми взаимодействиями, не сохраняющими странности.

Это достаточно понятно, но все обстоит в действительности гораздо запутаннее. Нейтральные K -мезоны по отношению к распадам ведут себя не как одна частица, а как две с различными способами распада, разными временами жизни и даже с несколько различными массами. Только это не K^0 - и \bar{K}^0 -частицы, а K_L^0 и K_S^0 -мезоны, которые вы можете видеть в таблице элементарных частиц. Природа одним способом разделяет нейтральные K -мезоны при рождении и со-

¹⁾ Исключение составляет распад Σ^0 -гиперона: $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$. Энергии здесь хватает для рождения Λ^0 -частицы и γ -кванта. Реакция вызывается электромагнитными силами. Ядерные силы не могут изменить изотопический спин, а он равен единице у Σ^0 -частиц и нулю у Λ^0 -гиперона.

вершено другим — при распаде. Вряд ли в этой книжке можно достаточно ясно рассказать, в чем здесь дело. Тем не менее попробуем хотя бы отчасти пояснить ситуацию.

По отношению к слабым взаимодействиям K^0 и \bar{K}^0 -мезоны должны вести себя как одна частица. Поэтому каждый нейтральный K -мезон, готовый распасться, можно представить как смесь из K^0 и \bar{K}^0 -мезонов. Вернее, как две различные смеси, имеющие разную комбинированную четность. Вот объяснить, что это такое, как раз самое трудное.

Помните? Комбинированная четность сохраняется. Это значит, что если заменить частицы античастицами и отразить всю картину в зеркале, то после такой двойной операции все события в микромире должны протекать так, как и до проведения этих операций. Так вот величины, характеризующие в квантовой механике состояния частиц (они называются волновыми функциями), ведут себя по-разному при операции замены частиц на античастицы с одновременным зеркальным отражением. В одних случаях волновая функция не меняется вовсе — четность положительна, а в других случаях она меняет знак — четность отрицательна.

Состояние K_L^0 -мезона можно представить символически как сумму состояний равной интенсивности K^0 и \bar{K}^0 -мезонов:

$$K_L^0 = \frac{K^0 + \bar{K}^0}{\sqrt{2}},$$

а состояние K_S^0 -мезона — как разность тех же состояний равной интенсивности ¹⁾:

$$K_S^0 = \frac{K^0 - \bar{K}^0}{\sqrt{2}}.$$

Различаются K_L^0 - и K_S^0 -мезоны именно комбинированной четностью: у K_S^0 -частицы она положительна, а у K_L^0 -частицы — отрицательна.

Частицы же, различающиеся комбинированной четностью, должны вести себя при распадах по-разному. K_S^0 -мезоны могут распадаться на два π -мезона, ибо система из двух π -мезонов имеет положительную четность, а K_L^0 -мезон — только на три π -мезона, ибо четность системы из

¹⁾ Коэффициент $1/\sqrt{2}$ — это так называемый нормировочный множитель. Его смысл мы здесь выяснять не будем.

трех π -мезонов отрицательна. Комбинированная четность должна при слабых взаимодействиях сохраняться.

Различие в каналах распада приводит к различию во временах жизни. K^0_L -мезоны почти в сто раз живут дольше, чем K^0_S -мезоны.

В свою очередь K^0 - и \bar{K}^0 -частицы можно представить как смеси K^0_L и K^0_S -мезонов равной интенсивности:

$$K^0 = \frac{K^0_L + K^0_S}{\sqrt{2}},$$

$$\bar{K}^0 = \frac{K^0_L - K^0_S}{\sqrt{2}}.$$

Эти символические равенства простым образом получаются из предыдущих.

Все сказанное отнюдь не плод странной фантазии. Эксперимент говорит, что именно так и есть на самом деле.

Допустим, что при столкновении быстрых π^- -мезонов с протонами мишени рождаются K^0 -мезоны. Это частицы со странностью $+1$, и они не могут, сталкиваясь с протонами, рождать Λ^0 -гипероны. Но что произойдет дальше? K^0 -мезон — это смесь K^0_L и K^0_S -частиц. K^0_S -мезоны быстро распадаются, и на расстоянии в несколько метров от мишени останутся только K^0_L -мезоны. Теперь учтем, что K^0_L -мезоны — это смесь K^0 - и \bar{K}^0 -мезонов в равных количествах. Значит, на расстоянии в несколько метров от мишени мы будем иметь равное число K^0 - и \bar{K}^0 -мезонов. Но \bar{K}^0 -мезоны могут реагировать с протонами второй мишени, достаточно удаленной от первой, давая Λ^0 -гипероны. А ведь вначале \bar{K}^0 -мезонов в пучке не было. Все это в точности наблюдалось на опыте.

Фактически получается, что слабые взаимодействия способны в вакууме превращать K^0 -мезоны в \bar{K}^0 -мезоны и обратно:

$$K^0 \rightleftharpoons \bar{K}^0.$$

Это возможно из-за того, что в слабых взаимодействиях странность не сохраняется.

Удивительные события на этом не прекращаются. За второй мишенью число \bar{K}^0 -мезонов меньше числа K^0 -мезонов, так как часть \bar{K}^0 прореагирует с протонами. Значит, пропорция между K^0 и \bar{K}^0 , при которой они давали чистые

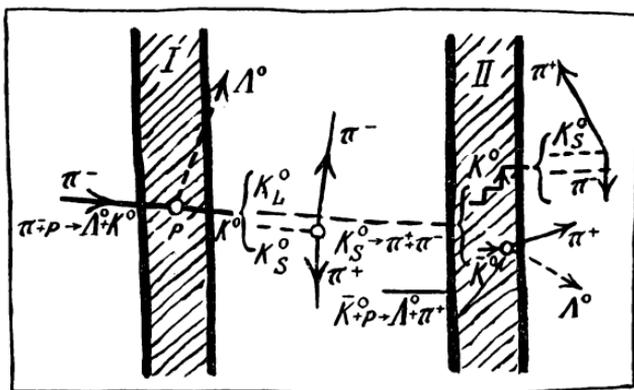


Рис. 23. Схема рождения и распада нейтральных К-мезонов.

K_L^0 -мезоны, будет нарушена. Следовательно, появятся K_S^0 -мезоны, и можно будет опять наблюдать распады на два π -мезона (рис. 23).

Необычно здесь все до крайности. В макромире это соответствовало бы следующей картине. Из рощи вылетела стая серых ворон. Но в этой стае каждая ворона — это, в сущности, смесь в равной пропорции орла и ястреба. По дороге ястребиная часть ворон вымирает и дальше летят уже орлы, которых, однако, вдвое меньше, чем было ворон раньше. При этом каждый орел — это смесь серой и белой вороны в равных количествах. Во второй роще часть белых ворон погибает. Вылетает серых ворон больше, чем белых. А это в свою очередь означает, что появились ястребы, давно погибшие возле первой рощи. Сплошная фантазмагория. Тем не менее для K^0 -мезонов все происходит на самом деле именно так.

Новое потрясение

Летом 1964 г. стало известно о новых исследованиях, которые снова (уже в какой раз!) потрясли фундамент теории элементарных частиц. Опять отличились нейтральные K^0 -мезоны. На расстоянии в 19 м от мишени, в которой происходило рождение пучка K^0 -мезонов, наблюдался их распад на два π -мезона, а не на три, как это должно было бы быть. Причем наблюдалось это с малой вероятностью (около 0,2%), но все же бесспорно.

На таком большом расстоянии K_S^0 -мезонов не могло быть. На два π -мезона распались, следовательно, K_L^0 -мезоны. А это означает ни мало, ни много, как

нарушение комбинированной четности в слабых взаимодействиях. Недавно установленный закон сохранения нарушается.

В чем здесь дело, пока не ясно. Высказывают предположение, что этот распад вызван особыми, сверхслабыми силами. Но что это за силы? Никаких других проявлений этих сил пока не обнаружено.

Согласно существующей теории нарушение комбинированной четности должно приводить к необратимости по времени явлений в микромире. Это уже одно из самых фундаментальных потрясений основ, которое когда-либо происходило в физике.

Со времени нового открытия прошло около пятнадцати лет, но пока окончательно ничего выяснить не удалось.

9 ГЛАВА,

в которой впервые говорится о том, что слабые и электромагнитные взаимодействия – это, возможно, одно и то же



В одном мгновенье видеть Вечность,
Огромный мир – в зерне песка,
В едином миге – бесконечность,
И небо – в чашечке цветка.

У. Блейк

Универсальность слабых взаимодействий

Жизнь странных частиц прекращается слабыми взаимодействиями. Без них странные частицы были бы не менее стабильными,

чем электроны и протоны.

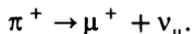
Уже говорилось, что слабые взаимодействия универсальны, присущи всем частицам. Но они при сравнительно небольших энергиях столь медленно работают, что не могут конкурировать с ядерными и электромагнитными силами. Не могут в тех процессах, которые способны протекать под действием более мощных сил природы. Но в двух случаях именно слабые взаимодействия являются решающими. Это процессы, в которых рождаются нейтрино, и процессы, в которых изменяется странность. Здесь остальные взаимодействия бессильны. Нейтрино не испытывает никаких взаимо-

действий, кроме слабых, а странность не может изменить ничто, кроме слабых взаимодействий. Все эти процессы идут с одной внутренней скоростью, определяются одной и той же константой взаимодействия.

Откуда берется такая универсальность, при которой абсолютно разные превращения характеризуются одной и той же константой связи? Это стало проясняться не сразу.

В слабых взаимодействиях, согласно современным представлениям, всегда участвуют четыре частицы с полуцелым спином — четыре фермиона, как часто называют такие частицы. Универсальность слабых взаимодействий состоит в том, что взаимодействие любых двух фермионных пар построено одинаковым образом и характеризуется одной и той же константой связи. Длительное время считалось необходимым, чтобы разность зарядов каждой пары взаимодействующих фермионов равнялась единице. Лептоны группируются в свои пары (электрон — электронное нейтрино, μ -мезон — мюонное нейтрино), а барионы в свои. Но в каждой паре слабое взаимодействие одно и то же. Такие пары движущихся частиц называют слабыми заряженными токами.

В случаях распада нейтрона и μ -мезона четырехфермионный характер взаимодействия очевиден. Все четыре взаимодействующих фермиона налицо. Однако это не всегда так. Вот, например, как выглядит распад π^+ -мезона:



Здесь непосредственно участвует только два фермиона: μ^+ и ν_μ .

Тем не менее и эту реакцию можно считать вызванной четырехфермионным взаимодействием, но только она идет в два этапа. На первом этапе, ничтожно малом по времени, π^+ -мезон виртуально рождает пару протон — антинейтрон. И уже затем слабое взаимодействие превращает эту пару в μ -мезон и мюонное нейтрино:

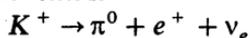


Промежуточная стадия этой реакции не наблюдается и поэтому четырехфермионный характер взаимодействия

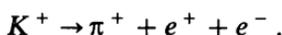
оказывается замаскированным. Сходным образом можно объяснить и другие реакции¹⁾.

Существуют, однако, лептонные и барионные пары с разностью зарядов между частицами, равной нулю. Например, пары $\nu_\mu, \nu_\mu; e, e; p, p$ и т. д. Такие пары движущихся частиц называются нейтральными токами. Почему же считалось, что слабые взаимодействия не осуществляются нейтральными токами, а только заряженными?

Если бы нейтральные токи существовали, то следовало бы ожидать, что наряду с распадами положительных, K -примеру, K^+ -мезонов по схеме



должны происходить и распады по схеме



В первом примере распад K^+ -мезона с изменением странности вызывается заряженными токами, а в последнем — нейтральным током. Это следует из того, что в первой реакции заряд адронов меняется, а в последней нет.

Опыт же показал, что распады с изменением странности, обусловленные нейтральными токами, не наблюдаются.

Определенная трудность в теории слабых взаимодействий состоит в следующем. Число лептонов равно всего лишь четырем, и соответственно число возможных лептонных пар невелико. Число же барионов велико, а число различных барионных пар еще больше. О том, как это затруднение было преодолено, мы расскажем в конце книги.

**Частица, о которой
известно все,
кроме того,
существует ли она**

Обратили ли вы внимание на то, что все предыдущие типы взаимодействия осуществлялись посредством тех или иных полей, точнее, посредством обмена квантами соответствующих полей. Слабое

взаимодействие в изложенной выше трактовке является исключением. Считается, что все четыре фермиона взаимодействуют в одной точке без всяких посредников.

Так ли это на самом деле? Может быть, существует поле слабых взаимодействий и соответственно существуют кванты этого поля, — еще один вид элементарных частиц? Да, была высказана гипотеза, согласно которой взаимодей-

¹⁾ Мы увидим впоследствии, что современная интерпретация данной реакции и других, ей подобных, иная. Наука не стоит на месте.

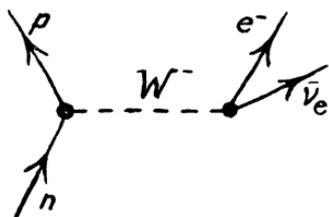


Рис. 24. Фейнмановская диаграмма распада нейтрона с участием промежуточного бозона.

ствие между парами фермионов осуществляется с помощью особых частиц, называемых промежуточными векторными бозонами. Векторные бозоны — это частицы, имеющие целый спин, равный \hbar . Если взаимодействие осуществляется только заряженными слабыми токами, то бозоны должны иметь электрический заряд. Масса их должна быть очень велика, так

как, согласно квантовой теории, область действия любой силы обратно пропорциональна массе частиц — переносчиков взаимодействия. Слабые же взаимодействия являются самыми короткодействующими. Радиус их действия значительно меньше 10^{-15} см.

Как и другие частицы, промежуточный бозон не может быть стабильным. Время его жизни должно быть порядка 10^{-18} с. Распадаться промежуточный бозон может на μ -мезон и нейтрино, электрон и нейтрино или же на несколько π -мезонов. Рождают бозоны могут высокоэнергичные нейтрино в поле ядра. На диаграмме Фейнмана распад нейтрона с участием промежуточного бозона выглядит так, как показано на рис. 24.

Пока эти частицы не обнаружены, хотя попытки найти их уже предпринимались. Видимо масса промежуточных бозонов столь велика, что современные ускорители не могут сообщить частицам энергию, достаточную для рождения квантов поля слабых взаимодействий. Мы знаем об этой частице очень много. Не знаем лишь главного: существует ли она вообще.

Трудности теории слабых взаимодействий

Универсальная теория слабых взаимодействий, о которой только что было рассказано, создана в 1957 г. М. Гелл-Манном, Р. Фейнманом и другими на основе обобщения огромного экспериментального материала. Она объясняла все известные к тому времени факты, касающиеся превращений частиц, вызванных слабыми взаимодействиями.

Однако положение внутри теории не было блестящим. Теория давала согласующиеся с экспериментом результаты только в первом приближении, когда взаимодействие рассматривалось как малое возмущение состояния свободных

(невзаимодействующих) частиц. Попытки учесть взаимодействие более точно приводили к бессмысленным результатам. Поправочные члены оказывались бесконечно большими.

Такое же примерно положение существовало в теории электромагнитных взаимодействий. Результаты теории в первом приближении получались осмысленными. Уточненный же расчет приводил к лишнему смыслу бесконечным выражениям. В частности, как уже говорилось в четвертой главе, получались бесконечные значения для масс заряженных частиц.

Однако ситуация в квантовой теории электромагнитных взаимодействий оказалась все же гораздо более удовлетворительной, чем в теории слабых взаимодействий. Возникающие в теории бесконечности удалось устранить — «замести под ковер», по выражению Фейнмана. Все бесконечности сводятся к двум: масса заряженной частицы за счет взаимодействия с собственным электромагнитным полем и ее заряд оказываются бесконечно большими. Но если не обращать на это внимания и в окончательные результаты расчета вместо даваемых теорией бесконечных значений подставлять известные из опыта массы и заряды частиц, то предсказания теории оказываются в превосходном согласии с экспериментом.

Этот процесс замены выделенных бесконечностей конечными значениями называется перенормировкой. Теория электромагнитных взаимодействий, как говорят, перенормируема.

А вот теория слабых взаимодействий оказалась перенормируемой. Появляющиеся бесконечности не удавалось свести к нескольким, а затем избавиться от них с помощью



замены бесконечных значений параметров теории конечными значениями, известными из опыта.

При малых энергиях слабые взаимодействия действительно слабы и первое приближение теории вполне достаточно для объяснения наблюдаемых фактов. Но при больших энергиях это уже не так. Поэтому актуальна следующая задача: если пока не удастся построить последовательную теорию, не содержащую бесконечностей, то надо создать хотя бы перенормируемую теорию, подобную теории электромагнитных взаимодействий.

Значительный прогресс в этом отношении был достигнут в 1967 г. Достигнут на очень обнадеживающем пути углубления наших представлений о единстве мира.

Чем слабые взаимодействия отличаются от электромагнитных

На первый взгляд слабые взаимодействия радикально отличаются от электромагнитных.

Во-первых, при низких энергиях слабые взаимодействия являются действительно слабыми

по сравнению с электромагнитными. Они уступают электромагнитным по силе в десятки миллиардов раз. Если бы распад нейтрона или β -радиоактивных ядер был обусловлен электромагнитными взаимодействиями, то он происходил бы в десятки миллиардов раз быстрее. Свободный нейтрон существовал бы не 16 минут, а 10^{-7} секунды.

Во-вторых, слабые взаимодействия проявляются только на чрезвычайно малых расстояниях, много меньших 10^{-14} см. Радиус же действия электромагнитных сил бесконечно велик, подобно радиусу действия гравитационных сил.

Далее, считалось, что слабые взаимодействия между элементарными частицами обусловлены заряженными токами. В то же время электромагнитные взаимодействия вызваны нейтральными токами. Суть этих утверждений в том, что фотон — переносчик электромагнитных взаимодействий — нейтральная частица, а промежуточные бозоны (если они существуют), согласно теории Гелл-Манна, Фейнмана и др., должны быть заряжены. Наконец, в электромагнитных взаимодействиях странность сохраняется, а в слабых — нет.

Черты единства

Несмотря на все эти различия, даже с чисто внешней стороны можно усмотреть черты единства слабых и электромагнитных взаимодействий.

Теория слабых взаимодействий с самого начала строилась по аналогии с электромагнитными взаимодействиями.

Уже в первой теории этих взаимодействий, построенной Э. Ферми в 1933 г., энергия слабого взаимодействия считалась пропорциональной произведению барионных и лептонных токов, подобно тому как энергия электромагнитных взаимодействий пропорциональна произведению электромагнитного тока (электромагнитным током называют движущиеся электрически заряженные частицы) на характеристику электромагнитного поля — векторный потенциал. Все токи представляют собой в математическом отношении векторные величины.

Другая черта общности слабых и электромагнитных взаимодействий заключается в их универсальности. В этих взаимодействиях участвуют как лептоны, так и адроны. В сильных же взаимодействиях участвуют только адроны. Однако до 1967 г. полагали различия между обоими типами взаимодействий более существенными, чем их сходство.

**Единая теория
слабых
и электромагнитных
взаимодействий**

Новый и очень важный шаг в развитии теории слабых взаимодействий был сделан американским ученым С. Вайнбергом и несколько позднее пакистанским ученым А. Саламом, работающим в Триесте. Ими была выдвинута смелая гипотеза о единстве слабых и электромагнитных взаимодействий.

В основе гипотезы Вайнберга и Салама лежало предположение, высказывавшееся ранее, о том, что слабые взаимодействия осуществляются путем обмена промежуточными векторными бозонами. Уже это предположение сближает слабые взаимодействия с электромагнитными. Те и другие осуществляются через посредство частиц с целым спином, равным \hbar .

Суть новой гипотезы состоит в следующем: природа слабого и электромагнитного взаимодействия едина в том смысле, что на самом глубоком уровне истинная их сила одинакова и промежуточные векторные бозоны взаимодействуют с лептонами и адронами на малых расстояниях точно так же, как и фотоны с заряженными частицами. Не нужно вводить различные «заряды» (или константы взаимодействия) для слабых и электромагнитных взаимодействий. В обоих случаях интенсивность взаимодействия определяется электрическим зарядом.

Соответственно на очень малых расстояниях слабые взаимодействия должны проявляться с той же силой, что и электромагнитные. Почему тогда эти взаимодействия все

же оправдывают свое название? Почему вызываемые ими процессы протекают гораздо медленнее, чем электромагнитные процессы?

Дело в том, что радиус слабых взаимодействий гораздо меньше, чем электромагнитных. Из-за этого они кажутся слабее электромагнитных. Вспомним, что радиус l действия сил, как вытекает из соотношения неопределенностей, связан с массой покоя m частиц-переносчиков взаимодействия формулой $m = h/lc$ (см. стр. 56). У фотонов масса покоя равна нулю и радиус взаимодействия электромагнитных сил бесконечно велик. Малый радиус слабых взаимодействий означает, что масса промежуточных бозонов — переносчиков этих взаимодействий — очень велика — несколько десятков протонных масс.

Образно говоря, если «фотонная шуба» простирается на сколь угодно большие расстояния от заряженных частиц, то «область обитания» переносчиков слабых взаимодействий крайне мала. И только в этой области слабые взаимодействия сравниваются с электромагнитными. Но сверхмалые расстояния между взаимодействующими частицами встречаются не часто. Гораздо вероятнее, что частицы пролетают друг от друга на расстояниях, больших радиуса слабого взаимодействия $l_c = \frac{h}{m_w c}$, где m_w — масса промежуточных бозонов. Лишь при больших энергиях сталкивающихся частиц вероятность их сближения повышается и интенсивность слабых взаимодействий увеличивается. Малый радиус



слабых взаимодействий маскирует их истинную силу. Формально это отражается в теории в том, что эффективная константа взаимодействия обратно пропорциональна квадрату массы промежуточных векторных бозонов.

Калибровочная симметрия

Все сказанное до сих пор о единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий до некоторой степени (будем надеется) понятно читателю. Может быть этим и стоило бы ограничиться. Однако пока мы фактически даже не коснулись важнейших положений теории Вайнберга — Салама. Эти положения настолько далеки от привычных представлений, что трудно решиться приступить к последующему рассказу. Все же попытаемся дать хотя бы самое общее представление о том, как же строится единая теория различных на первый взгляд взаимодействий.

Можно говорить об электромагнитных и слабых взаимодействиях, как о чем-то едином лишь в том случае, если фотон и промежуточные векторные бозоны являются представителями одного и того же семейства. Иначе истинная сила их взаимодействия с различными частицами на малых расстояниях не может быть одинаковой.

Фотон и промежуточные бозоны окажутся представителями одного семейства, если потребовать, чтобы уравнения движения, описывающие поведение взаимодействующих частиц, удовлетворяли некоему новому принципу симметрии.

Принципы симметрии в физике элементарных частиц уже давно играли важнейшую роль. Простейшие из них — это пространственно-временные симметрии. Законы природы, выражаемые уравнениями движения частиц, не должны меняться при изменении начала отсчета времени, сдвиге всей системы в пространстве или поворотах ее на те или иные углы. С этими симметриями связаны законы сохранения энергии, импульса и момента импульса.

Кроме того, на процессы в природе не должно оказывать влияние равномерное прямолинейное движение. В этом существо принципа относительности.

Еще большую роль играют так называемые внутренние симметрии, лишенные непосредственной наглядности. К их числу относится зарядовое сопряжение, о котором упоминалось ранее, а также «калибровочная инвариантность». Калибровочно-инвариантными являются, как давно уже было известно, электромагнитные взаимодействия. Суть ее в том, что вращения в некоем формальном «зарядовом простран-

стве» не меняют законов электромагнитных взаимодействий и законов движения электрически заряженных частиц. Из калибровочной инвариантности следует сохранение электрического заряда. Если положить во главу угла теории требование калибровочной инвариантности (наряду с другими принципами симметрии), то отсюда можно получить основные законы электромагнитных взаимодействий. В частности, отсюда следует нулевая масса переносчиков этих взаимодействий — фотонов.

Вайнберг и Салам обобщили принцип калибровочной инвариантности таким образом, что фотон и промежуточные векторные бозоны оказались членами одного семейства частиц — переносчиков электромагнитных и слабых взаимодействий. Вот, пожалуй, и все, что можно сказать на уровне самых общих представлений. Углубление в суть новой теории без привлечения сложной математики невозможно.

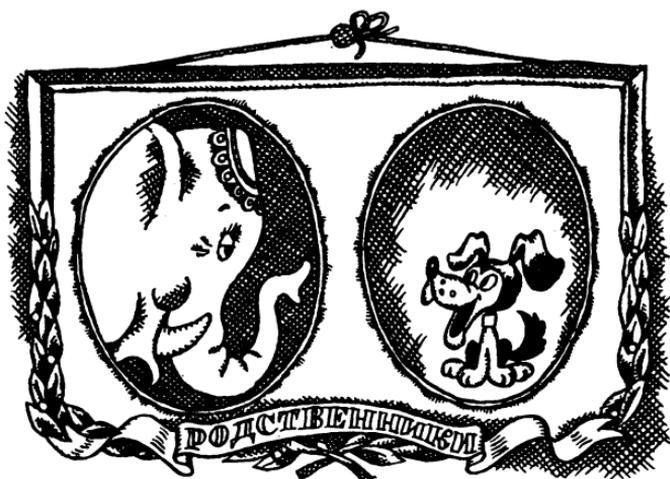
Однако необходимо отметить, что в новой калибровочно-инвариантной теории массы покоя промежуточных векторных бозонов, как и масса покоя фотона, должны быть равными нулю.

Спонтанное нарушение симметрии

Казалось бы развитие теории зашло в тупик. С одной стороны в единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий массы покоя промежуточных бозонов должны быть равны. С другой же стороны, в действительности эти массы должны быть очень велики, для того чтобы объяснить наблюдаемый на опыте короткодействующий характер слабых сил.

Разрешение трудности состоит в отчетливом разграничении действительного и кажущегося. С такого рода различиями мы встречаемся не только в мире элементарных частиц. Очень часто для обнаружения близости или родства различных вещей и процессов недостаточно просто посмотреть на них, недостаточно беглого знакомства. Необходимо понять корни общности и причины различий. Нелегко, например, увидеть единое в маленьких искорках, вспыхивающих в темноте, когда вы снимаете нейлоновую рубашку, и молнии длиной в несколько километров. Или усмотреть родство между земляникой и арбузом, огромным слоном и крохотной собачкой.

Механизм, за счет которого промежуточные векторные бозоны приобретают массу, называют спонтанным (т. е.



самопроизвольным) нарушением симметрии. Означает это следующее.

Принцип обобщенной калибровочной инвариантности определяет форму законов природы на самом глубоком, насколько нам сейчас известно, уровне. Но оказывается принципы симметрии, справедливые на изначальном уровне, не проявляются на уровне наблюдаемых непосредственно на опыте величин, например, масс частиц. Различие масс фотонов и промежуточных бозонов не заложено в изначальных законах природы, а появляется в результате спонтанного нарушения симметрии.

Спонтанное нарушение симметрии не впервые встретилось в физике при создании единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий. Оно происходит всегда при образовании твердого кристаллического тела, вызванного охлаждением жидкости.

Законы квантовой механики, описывающей движения атомов, слагающих кристалл, не меняются при пространственных сдвигах и поворотах. Ни одно из направлений в пространстве не выделено. Но при образовании кристалла эти симметрии сами собой нарушаются. Кристалл — анизотропное тело, и свойства его по различным направлениям различны. Существуют выделенные направления — кристаллические оси. Это происходит из-за того, что основному состоянию с минимальной энергией соответствует упорядоченное расположение атомов, а не беспорядочное, как в жидкости.

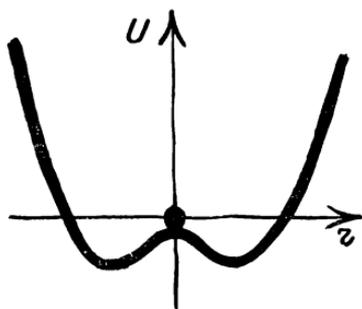


Рис. 25. Неустойчивое положение шарика в системе, обладающей осевой симметрией.

равновесии. Система при этом обладает осевой симметрией. Однако данное положение равновесия крайне неустойчиво. Предоставленный самому себе шарик под влиянием сколь угодно малого возмущения скатится на вогнутое дно. Это положение шарика устойчиво, так как ему соответствует минимальное значение потенциальной энергии в поле тяжести Земли. Первоначальная осевая симметрия состояния оказывается спонтанно нарушенной.

Аналогично в самых общих чертах механизм спонтанного нарушения калибровочной симметрии приводит к появлению масс у промежуточных векторных бозонов и тем самым к различиям во внешних проявлениях слабых и электромагнитных взаимодействий.

Предсказание слабых нейтральных токов

Итак, слабые и электромагнитные взаимодействия можно объединить в рамках одной теории. Эта теория выявляет новые важнейшие черты единства природы. Но если бы теория Вайнберга — Салама только объясняла известные факты с более привлекательной общей точки зрения, то ценность ее была бы невелика. И нельзя было бы сказать, отражает ли она действительное устройство мира правильно.

Новая теория, претендующая на объединение различных сил, обязана давать новые результаты. Так было при создании электродинамики, когда выяснилось, что электрические и магнитные взаимодействия — проявление единого целого. Теория, созданная Максвеллом, предсказала фундаментальный факт — существование электромагнитных волн.

Упорядоченная система атомов обнаруживает множество специфических свойств, обязанных своим появлением спонтанному нарушению пространственной симметрии. Так, только благодаря этому возможен ферромагнетизм и существование постоянных магнитов.

Приведем еще один, совсем тривиальный пример спонтанного нарушения симметрии (рис. 25). Шарик, находящийся в центре приподнятого дна бутылки, будет находиться в

Мы столько внимания уделили единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий лишь потому, что эта теория, с одной стороны, частично ликвидирует трудности старой теории Гелл-Манна и Фейнмана, а с другой стороны, предсказывает новые факты.

Теория Вайнберга — Салама предсказывает существование нейтральных токов. Из теории непосредственно вытекает существование трех видов промежуточных векторных бозонов: положительно заряженного, отрицательно заряженного и нейтрального. Процессы, обусловленные заряженными токами, осуществляются посредством обмена заряженными промежуточными бозонами. Именно благодаря этому в процессе взаимодействия меняются заряды адронов и лептонов. Это ясно видно на фейнмановской диаграмме распада нейтрона и рождения антинейтрино (см. рис. 24).

При взаимодействиях за счет обмена нейтральными бозонами электрические заряды ни адронных, ни лептонных пар, естественно, не меняются. А это и означает существование нейтральных токов, отвергаемое старой теорией.

Новая теория предсказывает массы промежуточных векторных бозонов: заряженные бозоны W^\pm должны быть примерно в 40 раз тяжелее протонов, а нейтральные бозоны W^0 тяжелее протонов в 80 раз. Именно при таких массах теория слабых взаимодействий оказывается перенормируемой подобно теории электромагнитных взаимодействий. Это означает, что все бесконечности, появляющиеся в ходе расчетов, можно отсепарировать и исключить. В результате любые процессы, вызванные слабыми взаимодействиями, можно рассчитать с любой степенью точности. Фактически значительный интерес к теории Вайнберга — Салама возник после того, как в 1971 г. была доказана ее перенормируемость.

В 1973 г. произошло еще более важное событие. Предсказанные единой теорией слабых и электромагнитных взаимодействий нейтральные токи были открыты экспериментальным путем.

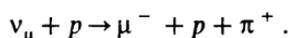
Открытие нейтральных слабых токов

Какова идея этих экспериментов? Надо исследовать процессы, в которых ни сильные, ни электромагнитные взаимодействия не участвуют. Вероятность процессов, вызванных этими взаимодействиями, на много порядков превышает вероятность процессов, обусловленных слабыми взаимодействиями, и это не позволяет достоверно отделить явления, вызванные заряженными слабыми токами, от явлений, обусловленных нейтральными

токами. Выход из этих трудностей состоит в нейтринных экспериментах. Нейтрино, как вы знаете, участвуют только в слабых взаимодействиях, и никаких трудностей с исключением эффектов, вызванных другими взаимодействиями, нет. Нейтрино высоких энергий можно получить на ускорителе. Об этом говорилось, когда речь шла об открытии двух сортов нейтрино.

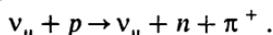
Как же отличить нейтринные реакции, вызванные заряженными токами, от реакций, вызванных нейтральными токами? Имеются различные возможности. Можно изучать взаимодействия нейтрино с адронами (протонами или нейтронами), а можно и с электронами.

При взаимодействии, к примеру, мюонного нейтрино с протоном посредством заряженных токов меняются электрические заряды как адронов, так и лептонов. В результате обязательно появляется мюон:



Реакция идет за счет обмена заряженным W^{+} -бозоном. Ее фейнмановская диаграмма показана на рис. 26.

При обмене же нейтральным W^0 -бозоном мюон не может появиться, так как заряд лептонов не меняется и в конечных продуктах реакции остается нейтрино:



Фейнмановская диаграмма этого процесса, вызванного нейтральным током, показана на рис. 27. Таким образом, задача экспериментатора сводится к тому, чтобы отличить одну реакцию от другой. Конечно, сделать это далеко не просто из-за того, что вероятность взаимодействия нейтри-

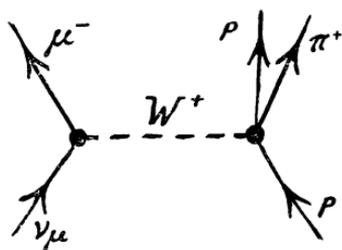


Рис. 26. Фейнмановская диаграмма взаимодействия мюонного нейтрино с протоном через посредство W^{\pm} -бозона.

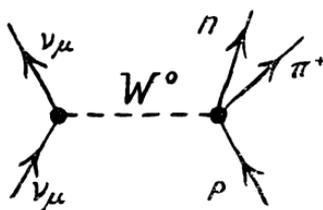
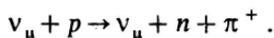


Рис. 27. Фейнмановская диаграмма взаимодействия мюонного нейтрино с протоном через посредство W^0 -бозона.

но с веществом очень мала. Поэтому первые опыты не привели к обнаружению нейтральных слабых токов и одно время думали, что таких токов не существует.

Однако эксперименты, поставленные сначала в ЦЕРНе (Европейской организации ядерных исследований в Женеве) в 1973 г., а затем и в других лабораториях США и СССР, с достоверностью привели к открытию слабых нейтральных токов.

В ЦЕРНе в качестве мишени и одновременно детектора использовалась большая пузырьковая камера, наполненная жидким фреоном (CF_3Br). Было проанализировано около 300 000 фотографий и обнаружено 428 реакций с мюоном в конечном состоянии и 102 фотографии без мюонов, т. е. реакций, вызванных нейтральными слабыми токами. На рис. 28 можно видеть одно из таких событий:



Нейтрино и нейтрон не оставляют следов, а родившийся π^{+} -мезон распадается на мюон и нейтрино. Впоследствии μ^{+} -мезон распадается на электрон и нейтрино. Сильное магнитное поле, в которое была помещена камера, закручивает электрон по спирали.

В лаборатории Ферми в США нейтральные слабые токи были обнаружены с помощью большого ионизационного

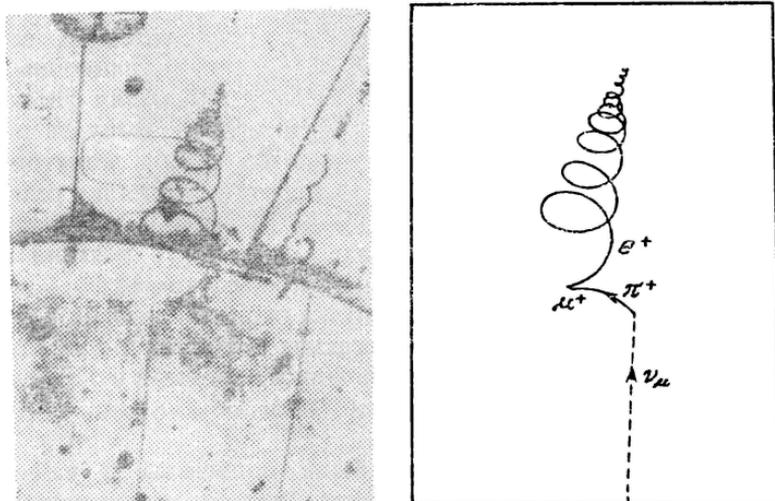


Рис. 28. Реакция между мюонным нейтрино и протоном, вызванная нейтральным слабым током.

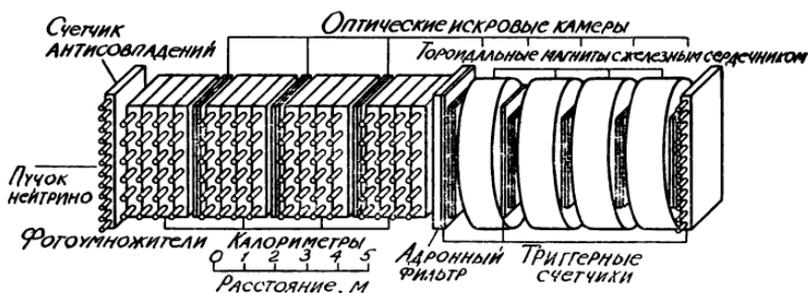


Рис. 29. Схема большого ионизационного калориметра.

калориметра. Этот детектор состоял из четырех камер, содержащих 33 тонны сцинтиллирующей жидкости, испускающей свет при прохождении через нее заряженных частиц (рис. 29). Огромная масса жидкости обеспечивала эффективную мишень для нейтрино. При взаимодействии нейтрино с протонами и нейтронами в калориметре рождались заряженные частицы. Никакие другие частицы, кроме нейтрино, не могли попасть из ускорителя в детектор, так как они отфильтровывались земляной насыпью, пройдя в ней путь 1 км. Световые вспышки сцинтиллятора фиксировались фотопумножителями, помещенными внутрь камер. Между контейнерами со сцинтиллирующей жидкостью помещались искровые камеры, в которых непосредственно наблюдались треки частиц.

За калориметром размещался мюонный детектор, состоявший из четырех больших магнитов, сцинтилляционных счетчиков и искровых камер. Этот детектор позволял фиксировать рождающиеся мюоны и определять их импульс по искривлению траектории в поле магнитов. Если в детекторе обнаруживался мюон, то это означало, что нейтринная реакция вызвана заряженным током. Если же мюоны не фиксировались, то это свидетельствовало о том, что реакция в калориметре вызвана нейтральным слабым током.

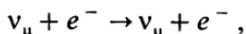
При плотности нейтринного пучка около 10^9 частиц в секунду наблюдалась лишь одна реакция в минуту. В 991 случае при нейтринной реакции появлялись мюоны, а в 220 случаях их не было. Эти реакции были обусловлены нейтральными токами.

Нейтринные эксперименты были проведены в нашей стране на Серпуховском ускорителе. Реакции регистрировались большой пузырьковой камерой «Скат» объемом 7 м^3 , наполненной пропан-фреоновой смесью. За один цикл уско-

рения рождалось около 10^{10} нейтрино. Но только в среднем один раз за 20 циклов удавалось зарегистрировать нейтринную реакцию.

Большое значение имело обнаружение нейтральных токов в чисто лептонных реакциях, т. е. в реакциях без участия адронов. Мюонные нейтрино могут рассеиваться электронами только за счет обмена нейтральными промежуточными бозонами. Закон сохранения мюонного лептонного заряда запрещает испускание мюонным нейтрино W^+ -бозона с превращением ν_μ в электрон.

Представляющая интерес реакция



очень маловероятна, но она может идти за счет нейтральных слабых токов. Диаграмма Фейнмана этого процесса показана на рис. 30.

Первые успешные эксперименты были проделаны в ЦЕРНе на пузырьковой камере «Гаргамель». Было сделано 1,3 миллиона снимков и на трех из них удалось зафиксиро-

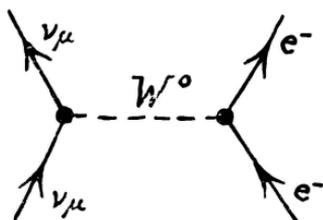


Рис. 30. Фейнмановская диаграмма рассеяния мюонного нейтрино на электро-
электроне.

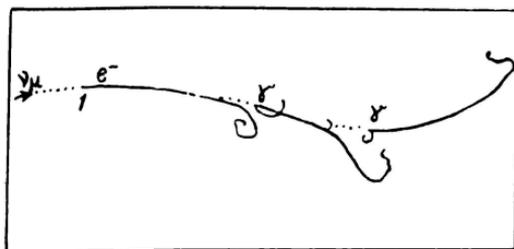
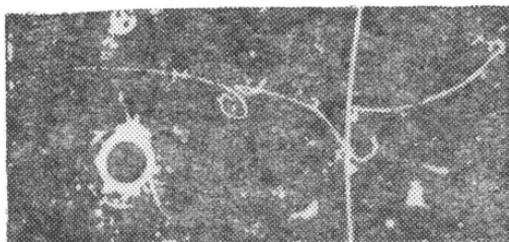


Рис. 31. Реакция рассеяния мюонного нейтрино на электро-
электроне.

вать рассеяние мюонного нейтрино на электронах. Нейтрино выбивает электрон атома жидкости камеры и тем самым обнаруживает себя. Этот процесс показан на рис. 31. Нейтрино влетает в камеру слева. Выбитый электрон закручивается в магнитном поле по спирали. Треки справа — это электронно-позитронные пары, рожденные фотонами, которые были испущены электронами при замедлении их в жидкости камеры.

Таким образом, существование нейтральных слабых токов строго доказано. Но промежуточные векторные бозоны до сих пор не обнаружены экспериментально. Существование их — это пока лишь гипотеза, правда очень правдоподобная.

Промежуточные векторные бозоны трудно обнаружить из-за того, что их время жизни предположительно около 10^{-18} с. Частицы, живущие менее 10^{-13} с, даже при движении со скоростью, близкой к скорости света, не оставляют видимых треков в камере из-за того, что их пробег слишком мал: менее десятой миллиметра. Как это ни покажется странным, косвенно можно регистрировать гораздо более короткоживущие частицы с временами жизни $10^{-20} - 10^{-23}$ с (о способе их регистрации будет рассказано в следующей главе). А вот промежуточные бозоны можно надеяться обнаружить в первую очередь по продуктам распада на электрон и антинейтрино или на мюон и антинейтрино.

10 ГЛАВА,

самая короткая, посвящается самым короткоживущим частицам



Сколько их, куда их гонят?

А. С. Пушкин. «Бесъ»

Самые короткоживущие

Наряду с 35 долго живущими частицами есть еще образования, живущие столь мало, что их обычно не решаются называть элементарными частицами. Это резонансы. Термин «резонанс» говорит скорее не о природе частиц, а о способе их обнаружения. Число резонансов огромно. Уже сейчас оно давно перевалило за несколько сотен и продолжает неуклонно расти.

Весьма примечателен способ, с помощью которого они были открыты. Живут резонансы $10^{-22} - 10^{-23}$ с. За это время пройденный ими путь лишь очень незначительно превышает диаметр нуклона. Здесь уже ни о каких следах в камере Вильсона или пузырьковой камере не приходится и мечтать.

Живут резонансы столь мало потому, что ни один закон сохранения не мешает им распадаться под влиянием

сильных взаимодействий. Их время жизни является естественным для сильно взаимодействующих частиц.

Как же сумели обнаружить резонансы и измерить их ничтожное время жизни?

**И неуловимое
можно обнаружить**

В 1960 г. группа сотрудников Калифорнийского университета (США) с помощью пузырьковой камеры изучала реакцию между быстрыми K -мезонами, полученными на ускорителе, и протонами жидкого водорода внутри камеры. Реакция протекала по схеме (рис. 32):



Было получено несколько сотен фотографий треков участвующих в этой реакции частиц. Затем с помощью вычислительной машины была подсчитана зависимость числа рожденных π^+ - и π^- -мезонов от их энергии.

Занялись этим не случайно. Именно таким образом можно было надеяться обнаружить сверхкороткоживущие частицы.

Идея такова: если бы при столкновении K^- и p рождалось сразу три частицы, как это видно на фотографиях, то энергия π^+ -мезонов могла бы принимать самые различные значения: от близкого к нулю до некоторого максимально-

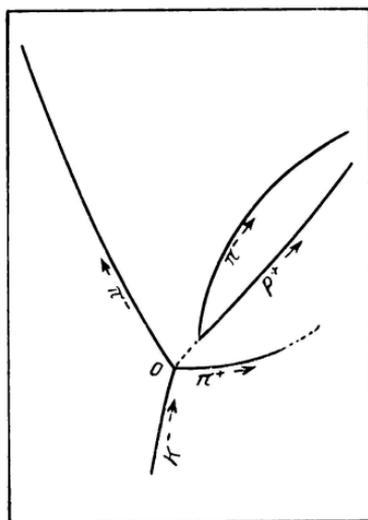


Рис. 32. Рассеяние K -мезона на протоне, в процессе которого рождается резонансная частица.

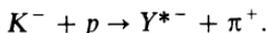


Рис. 33. Обнаружение частицы-резонанса по графику зависимости числа π -мезонов от энергии.

го, допускаемого законом сохранения энергии. Начальная энергия K^- -мезона и протона распределялась бы между рождающимися частицами различными способами.

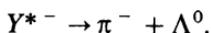
В действительности оказалось, что кривая зависимости числа рожденных пионов от энергии имела резкий максимум (рис. 33). Большая часть мезонов рождалась с вполне определенной энергией.

Объяснить это можно единственным образом. На первом этапе исследуемой реакции рождаются только две частицы:



При этом законы сохранения энергии и импульса однозначно определяют энергию каждой частицы. Стало быть, π^+ -мезоны должны рождаться с определенной энергией.

На втором этапе реакции промежуточное образование Y^{*-} , которое и является резонансом, распадается на Λ^0 -гиперон и π^- -мезон:



Происходит это так быстро, что на фотоснимке треков кажется, что все три частицы π^+ , π^- и Λ^0 вылетают из одной точки. Если бы резонанс Y^{*-} не образовывался, то резкого максимума на кривой, выражающей зависимость числа мезонов от энергии, не было бы¹⁾.

¹⁾ В некотором числе случаев рождаются сразу три частицы. Именно поэтому имеются мезоны с различными энергиями.

По балансу энергии и импульса можно определить энергию покоя появляющегося резонанса Y^{*-} и его массу. В энергетических единицах масса Y^{*-} равна 1832 млн. эВ.

Теперь о времени жизни резонанса. Максимум кривой распределения энергии π -мезонов имеет ширину около 60 млн. эВ. Это можно объяснить тем, что энергия, или масса покоя, Y^{*-} -резонанса не является строго фиксированной. А по принципу неопределенностей чем больше неопределенность в энергии системы, тем меньше ее время жизни:

$$\Delta t \sim h/\Delta E.$$

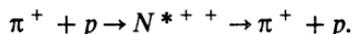
Зная ΔE , находим время жизни резонанса Y^{*-} . Оно, оказывается, имеет величину порядка 10^{-23} с. Y^{*-} -резонанс имеет отрицательный заряд. Но при столкновениях K -мезонов с нуклонами возникают также положительные и нейтральные резонансы Y^{*+} и Y^{*0} . Все три частицы имеют близкие массы и образуют зарядовый триплет с изотопическим спином, равным единице¹⁾.

Типы резонансов

Y^{*} -резонансы — это не первые из обнаруженных образований такого рода. Еще в 1952 г. Энрико Ферми обнаружил резонанс при рассеянии пионов на нуклонах. Вероятность рассеяния, в частности положительных пионов, на протонах резко возрастает при энергии пионного пучка в 195 млн. эВ (рис. 34).

Форма кривой очень напоминает зависимость амплитуды обычных вынужденных механических колебаний от частоты. Эта аналогия и послужила основой для наименования короткоживущих частиц резонансами.

Опять-таки объяснить появление максимума на кривой зависимости числа рассеянных пионов от их энергии можно, лишь предположив, что реакция идет в два этапа. Сначала π -мезон сливается с нуклоном, образуя резонанс, который в дальнейшем распадается:



По ширине резонансной кривой определяется время жизни частицы N^{*++} . Оно также имеет величину порядка 10^{-23} с.

Резонанс N^{*++} несет двойной электрический заряд. При исследовании рассеяния π -мезонов на нуклонах были

¹⁾ Эти три резонанса часто обозначают символами Σ^{*-} , Σ^{*0} , Σ^{*+} .

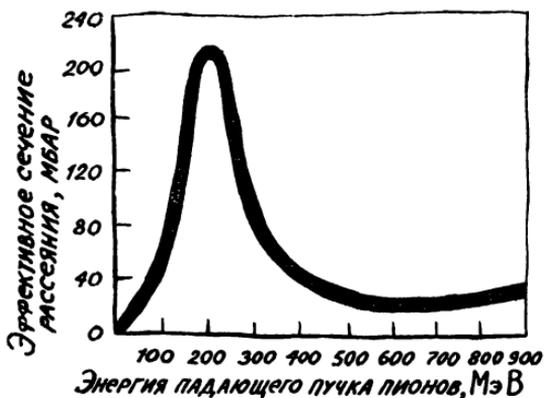
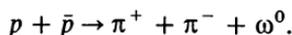


Рис. 34. Пион-протонный резонанс.

обнаружены еще три резонанса: N^{*-} , N^{*0} и N^{*+} . Все четыре N -резонанса ¹⁾ образуют мультиплет с изотопическим спином $3/2$.

Резонансы, о которых мы пока говорили, это так называемые барионные резонансы. Существуют еще мезонные резонансы. Они лишены барионного заряда и распадаются только на мезоны.

Одна из таких частиц была обнаружена при рассеянии антипротонов на протонах. Реакция опять-таки идет в два этапа. Сначала возникает два π -мезона и резонанс ω^0 :



Этот резонанс лишен заряда и имеет целый спин. За 10^{-23} с он распадается на три π -мезона:



Не будем дальше перечислять все известные сейчас резонансы. Отметим лишь, что каждой из относительно стабильных сильно взаимодействующих частиц соответствует группа резонансов с бóльшей массой. Резонансы можно рассматривать как некие возбужденные состояния стабильных частиц. Так, резонанс ω^0 — возбужденное состояние π -мезонов, резонансы N^* — возбужденные состояния нуклонов, а резонансы Y^* — возбужденные состояния Σ -гиперонов.

¹⁾ Их обозначают также символами Δ^{++} , Δ^- , Δ^0 и Δ^+ .

Элементарная ли частица резонанс?

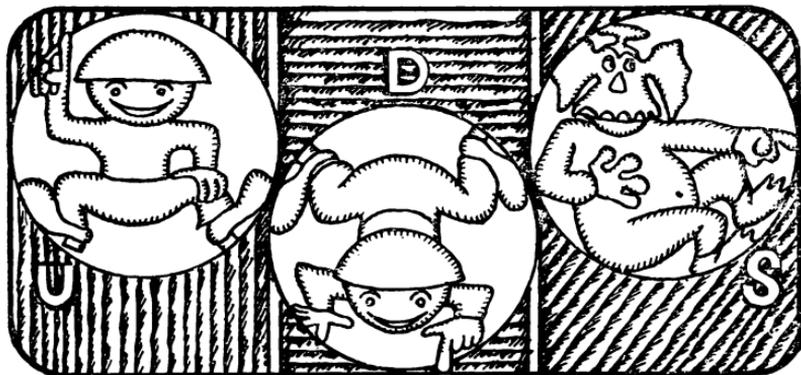
В принципе можно представить себе по крайней мере две возможности. Первая из них такова: резонансы — совсем не новый тип элементарных частиц, а представляют собой компактные образования из сильно взаимодействующих частиц. Именно из тех, на которые они распадаются. Так, например, нуклонный резонанс — это нечто вроде π -мезонного атома, в котором место электрона занимает мезон, а роль кулоновских сил играют ядерные силы. Только время жизни этого атома столь мало, что π -мезон за это время вряд ли успеет совершить даже несколько оборотов вокруг ядра. С этой точки зрения резонанс действительно можно рассматривать как возбужденное состояние нуклона, имеющего в «шубе» виртуальных мезонов один реальный мезон.

Другая возможность состоит в том, чтобы рассматривать резонансы как элементарные частицы, ничем не уступающие своим более долговечным собратьям. Ведь все они характеризуются определенной массой, электрическим зарядом, спином, барионным зарядом, изотопическим спином, странностью и четностью. Как мы увидим в дальнейшем, эта точка зрения представляется более вероятной.

Несомненно, открытие резонансов сильно усложнило и без того сложную картину семейства элементарных частиц. Но это, по-видимому, временное усложнение. Можно надеяться, что после длительного монотонного усложнения картины мы вдруг не без помощи резонансов увидим все более отчетливо. Густой «резонансный туман» должен рассеяться. Эти надежды основаны на той классификации сильно взаимодействующих частиц, которая уже создана.

11 ГЛАВА,

в которой рассказывает о систематике сильно взаимодействующих частиц, а также о том, что такое кварк



Три кварка мистеру Марку.

Джойс. «Поминки по Финнегану»

Супермультиплеты Давайте повнимательнее присмотримся к сильно взаимодействующим частицам. Привлекает внимание группа из восьми мезонов, группа из восьми барионов и группа из восьми антибарионов. Каждая из этих групп разбивается, естественно, на зарядовые мультиплеты. Различие в массах частиц внутри каждого из зарядовых мультиплетов можно отнести за счет электрического заряда.

Указанные три группы друг от друга сильно отличаются. Во-первых, у них разный спин: нуль у мезонов, $\hbar/2$ у барионов и антибарионов. Различные значения у всех трех групп имеет барионный заряд¹⁾. Одинаковый спин и одинаковый барионный заряд — это то общее, что объединяет частицы в группах²⁾. Разность масс у частиц одной группы не так уж

¹⁾ Ω^- -частицу пока рассматривать не будем.

²⁾ Если различать частицы только по спину и барионному заряду, то все мезоны (частицы и античастицы) окажутся в одной группе, а барионы и антибарионы — в разных.

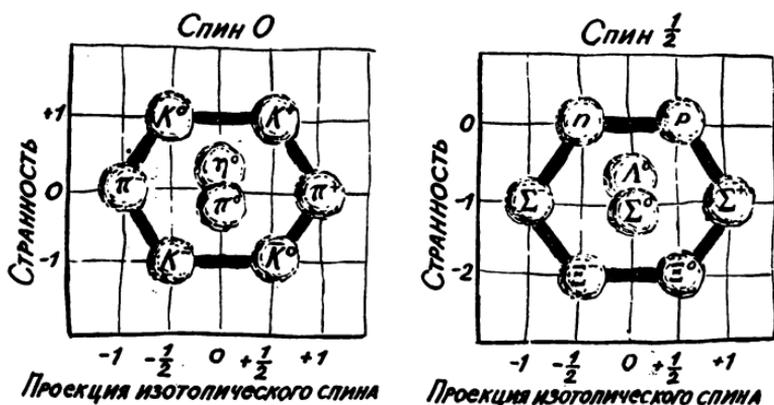


Рис. 35. Мезонный октет (слева) и барионный октет (справа).

велика (особенно между соседними зарядовыми мультиплетами).

Напршивается мысль: каждую группу рассматривать как нечто единое, как некий сверхмультиплет, супермультиплет.

Ну, а чем же отличаются частицы разных зарядовых мультиплетов, входящих в один супермультиплет? Само собой разумеется, массой и изотопическим спином. А еще чем? Только странностью и ничем больше.

Если по горизонтальной оси отложить значения проекции изотопического спина, которая характеризует заряд, а по вертикальной оси отложить значения странности, то получатся любопытные фигуры правильной геометрической формы (рис. 35). Забавно, не правда ли? Но это более чем просто забавно.

Резонансные супермультиплеты

В один супермультиплет объединяются также барионные резонансы, о которых мы говорили. Это N^* - и Y^* -резонансы, или в более современных обозначениях Δ - и Σ^* -резонансы. Их объединяет общее значение спина $3/2$ и одинаковый барионный заряд $+1$. К этому же супермультиплету надо отнести еще Ξ^{*-} и Ξ^{*0} -резонансы, не упомянутые ранее. Они образуют зарядовый дублет с тем же спином и таким же барионным зарядом.

Самое замечательное в том, что зарядовые мультиплеты в этом супермультиплете отличаются друг от друга по массе на одну и ту же величину — 146 млн. эВ (в энергетических

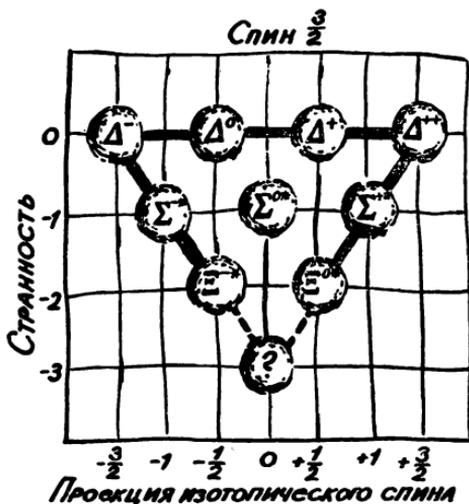


Рис. 36. Резонансный декаплет.

единицах). Зарядовые мультиплеты отличаются друг от друга также значениями странности: у Δ -резонансов она равна нулю, у Σ^* -резонансов — единице, у Ξ^* -резонансов — двум.

Если по горизонтальной оси откладывать проекцию изотопического спина, а по вертикальной — странность, то получится трапеция, которая превратилась бы в треугольник, поставленный на вершину, если бы существовала частица со странностью -3 , спином $3/2$ и барионным числом $+1$ (рис. 36).

Свой супермультиплет образуют мезонные резонансы. Имеются и другие резонансные супермультиплеты, но на них мы останавливаться не будем.

Кварки

Как видите, наведен некоторый новый порядок в обширном множестве элементарных частиц, обший как для относительно стабильных частиц, так и для резонансов.

Теперь посмотрим на всю проблему систематики элементарных частиц с новой точки зрения. Вернее, не такой уж новой, но существенно обновленной после открытия резонансов.

Обнаружено огромное количество сильно взаимодействующих частиц. Они характеризуются такими внутренними квантовыми числами, как электрический и барионный заряды и странность. Эти числа сохраняются в сильных

и электромагнитных взаимодействиях. А что если все сильно взаимодействующие частицы являются составными и законы сохранения квантовых чисел являются лишь выражением сохранения числа фундаментальнейших частиц — составных частей обычных элементарных частиц?

Эта идея оказалась весьма плодотворной и позволила очень наглядно представить себе систематику сильно взаимодействующих частиц, созданную в последнее время.

Первый и самый главный вопрос. Сколько таких субэлементарных частиц должно быть? Конечно, хотелось бы, чтобы их было поменьше. Составить несколько сотен частиц всего лишь из двух-трех было бы очень заманчиво. Оказывается, как нашли Гелл-Манн и Цвейг, достаточно всего лишь трех частиц.

Субэлементарных частиц мало, но зато свойства их до крайности необычны. Поэтому Гелл-Манн дал им название весьма необыкновенного происхождения. В романе английского писателя Джойса «Поминки по Финнегану» главному герою чудится, будто он король Марк из средневековой легенды, у которого племянник Тристан похитил жену Изольду. Король Марк гонится за Изольдой на корабле. Над ним кружатся чайки (которые, впрочем, может быть, вовсе не чайки, а судьи) и злобно кричат: «Три кварка мистеру Марку!». И все громче их загадочный, страшный клич: «Три кварка, три кварка, три кварка, три кварка!». Кварки — бесы. Выбрав это название для субэлементарных частиц, Гелл-Манн, по-видимому, хотел подчеркнуть проблематичность существования этих частиц.

Для кварков приняты обозначения: p , n , λ ¹⁾. Необычайность кварков в том, что они имеют дробные электрические и барионные заряды. В таблице приведены значения зарядов

Символ кварка	Электрический заряд	Странность	Барионный заряд
p	$+2/3$	0	$1/3$
n	$-1/3$	0	$1/3$
λ	$-1/3$	-1	$1/3$

и странностей кварков. Спин всех трех кварков равен $\hbar/2$, так как только из частиц с полужелым спином можно соста-

¹⁾ Часто вместо обозначений p , n , λ употребляются обозначения u , d , s в соответствии с английскими словами up (верхний), down (нижний), sideways (боковой).

вить частицы со спином нуль и единица, который имеют мезоны и мезонные резонансы.

Наряду с кварками надо допустить существование антикварков с зарядами и странностью противоположного знака.

**Предсказание
Ω-частицы**

Теперь займемся конструированием элементарных частиц из кварков. Проще всего это сделать не для долгоживущих частиц, а для барионных резонансов. Здесь с задачей может справиться ребенок, умеющий складывать дроби.

Спин этих резонансов $3/2$. Значит, каждый из них должен состоять из трех кварков с параллельными спинами. Странность Δ-резонансов равна нулю. Значит, они не должны содержать λ-кварков, Σ*-резонансы имеют по одному λ-кварку, а Ξ*-резонансы — по два λ-кварка.

Нетрудно сообразить, что из трех кварков с одинаковой ориентацией спина можно получить следующие 10 различных комбинаций:

$$\begin{array}{ccc} rrr & rrp & rpp & ppp \\ rrl & rpl & ppl & \\ rll & pll & & \\ & & & ll\lambda \end{array}$$

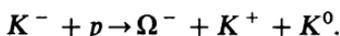
Все эти комбинации имеют целые заряды и различные странности.

В комбинациях, заполняющих первые три строки, легко увидеть уже рассмотренные Δ-, Σ*- и Ξ*-резонансы. Но есть и нечто новое. Это — символ λλλ. Что это такое? Новая частица, разумеется!

Давайте предскажем свойства λλλ-резонанса. Теперь мы это можем сделать почти столь же успешно, как и настоящие физики. Его спин равен $3/2$; электрический заряд — минус 1, странность — минус 3. Более того, можно предсказать и массу. Как?

Если сравнить массы резонансов в соседних строках, то окажется, что они тем больше, чем ниже строка. Причем разности между массами частиц, расположенных в соседних строках, как уже говорилось, примерно одинаковы и равны 0,16 массы нуклона, или 146 млн. эВ (в энергетических единицах). Это можно объяснить, если допустить, что p- и n-кварки имеют одинаковые массы, а λ-кварк — на 146 млн. эВ большую. Зная массу Ξ*-резонансов, можно предсказать, что масса λλλ-частицы должна равняться 1676 млн. эВ.

И вот 31 января 1964 г. такая частица была экспериментально найдена в Брукхейвенской лаборатории в США при исследовании столкновений K -мезонов большой энергии с протонами. Это как раз Ω^- -частица, последняя в нашей таблице элементарных частиц. Ω^- -частица была обнаружена в реакции



Свойства ее точно совпали с предсказанными.

Хотя Ω^- -частица, согласно классификации, относится к резонансам, живет она совсем не 10^{-23} с, а несравненно больше. Распад происходит по схеме



за время 10^{-10} с. Таким образом, Ω^- -частица должна быть отнесена к долгоживущим элементарным частицам. Именно поэтому она помещена в таблицу элементарных частиц, а не резонансов.

Большое время жизни Ω^- -частицы определяется ее большой странностью (-3). Распад «по сильным каналам», сохраняющим странность, для нее запрещен, поскольку сумма масс покоя любых частиц, имеющих общую странность, -3 , больше массы покоя Ω^- -частицы.

На примере Ω^- -частицы отчетливо видно, что принципиального различия между резонансами и частицами, по традиции называемыми элементарными, нет. Если законы сохранения запрещают резонансу быстрый распад, то он становится обычной, но только весьма тяжелой, элементарной частицей.

Барионы и мезоны из кварков

Теперь посмотрим, как можно построить из кварков барионы и мезоны. Здесь дело обстоит несколько сложнее, чем при построении

барионных резонансов.

Барионы с их полуцелым спином могут быть построены не менее чем из трех кварков, как и барионные резонансы.

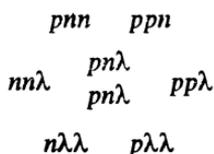
Получить спин $\hbar/2$ несложно. Для этого нужно только предположить, что два кварка имеют параллельные спины, а спин третьего направлен в противоположную сторону.

Для большей части барионов дело обстоит просто. Возьмем, к примеру, нейтрон. Его заряд и странность равны ну-

лю. Значит, он должен быть составлен из одного p -кварка и двух n -кварков, т. е. он должен иметь структуру pnn . Ξ^- -гиперон содержит один n -кварк и два λ -кварка, т. е. имеет структуру $n\lambda\lambda$.

Аналогично может быть определена структура других барионов.

Но почему барионов 8, а не 10, как барионных резонансов? Вот при объяснении этого факта возникают сложности, на которых мы останавливаться не будем. Все комбинации кварков, образующие барионы, можно расположить в виде шестиугольной схемы:

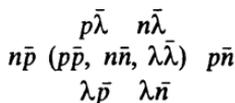


Легко сопоставить каждой комбинации кварков определенный барион. Всего приведено как раз 8 комбинаций.

Λ^0 - и Σ^0 -гипероны представлены одинаковой комбинацией кварков $p\lambda\lambda$. Две различные частицы получаются из-за того, что взаимная ориентация спинов всех трех кварков может быть различной.

Перейдем теперь к мезонам. Их спин и барионный заряд равны нулю. Поэтому они должны быть построены из пар кварк — антикварк. Частицы таких пар характеризуются противоположной ориентацией спинов и противоположными знаками барионных зарядов. Именно это обеспечивает нулевое значение спина и барионного заряда пары.

Например, π^+ -мезон — это не что иное, как комбинация $p\bar{n}$, K^+ -мезон состоит из p -кварка и λ -антикварка и т. д. Возможные комбинации кварк — антикварк можно опять-таки расположить в шестиугольную схему



Здесь все просто, кроме ситуации в центре. От ее объяснения нам, к сожалению, придется отказаться.

Коротко можно лишь сказать, что π^0 - и η^0 -мезоны (они как раз и занимают центр шестиугольника) представляют собой различные комбинации состояний из одинаковых пар кварк — антикварк.

Но существуют ли они?

Итак, действительно, известные частицы можно построить из кварков. Можно, если ...если квар-

ки существуют на самом деле.

Новая систематика сильно взаимодействующих частиц, основанная на введении супермультиплетов, безусловно, в какой-то мере отражает истину. Не случайно же она позволила предсказать Ω^- -частицу. И если даже завтра будет доказано, что кварков не существует, что наглядная кварковая интерпретация новой систематики частиц действительности не соответствует, это не зачеркнет завоеванного.

Пока же кварки ищут. Сначала искали очень интенсивно, теперь — с меньшим воодушевлением. Но поиски продолжаются. Проще, казалось бы, их не искать, а создавать на ускорителях. Однако это не удалось. Видимо, их масса пока очень велика и мощности современных ускорителей недостаточны. Возможны и другие причины, о которых мы расскажем позднее.

Сверхмощными ускорителями располагает пока только природа. Отдельные частицы в космических лучах обладают столь большой энергией, что они, конечно, могут породить свободные кварки, если только кварки существуют в природе. Поэтому кварки следует искать в атмосфере у поверхности Земли и в водах океана. Ведь кварк имеет дробный заряд в $1/3$ или $2/3$ электронного заряда. Обычные заряженные частицы не могут его полностью нейтрализовать.

Интересные опыты по обнаружению кварков ставил В. Брагинский в Московском университете. По идее эти опыты близки к известным опытам Милликена. Они сводились к поиску частиц с дробным электрическим зарядом. Опыты дали отрицательный результат.

Однако, несмотря на это, уверенность в существовании кварков за последние три года увеличилась. Была теоретически предсказана необходимость введения еще одного четвертого кварка, и частицы, содержащие (предположительно) этот кварк, были открыты. Обо всем этом будет рассказано в следующей, последней главе.

12 ГЛАВА,

в которой рассказывает-
ся об открытии новых J/ψ -
мезонов, очарованном
кварке, а также о том,
как кварки окрасились во
все цвета радуги



Три черта было, ты четвертый —
Последний чудный черт в цвету!

О. Э. Мандельштам. «Скрипачка».

Трудности

Надо сказать, что с кварковой моделью сильно взаимодействующих частиц, о которой только что было рассказано, далеко не все обстоит благополучно. Частицы складывались из кварков буквально так же, как ребенок складывает башню из кубиков. Но ведь кварки обязательно движутся и взаимодействуют друг с другом, и их движение не может не влиять на свойства образованных ими частиц. Мы же это движение не учитывали и ничего не говорили о силах, связывающих кварки в устойчивые системы — адроны.

Кроме того, оставалось неясным, почему кварки объединяются либо в пары кварк — антикварк (мезоны), либо же объединяются в тройки (барионы). Почему не существует частиц из двух или четырех кварков?

Наконец, кварковая модель, о которой говорилось в предыдущей главе, находится в явном противоречии

с фундаментальным принципом квантовой механики — принципом Паули. Особенно отчетливо это видно на примере Ω^- -частицы. Приходится считать, что все три λ -кварка, составляющие эту частицу, находятся в одном и том же состоянии. В частности, их спины должны быть ориентированы одинаково, для того чтобы суммарный спин Ω^- -частицы равнялся $3/2 \hbar$. Принцип Паули строго запрещает это для частиц с полуцелым спином.

Цвет

Для согласования кварковой модели адронов с принципом Паули был предложен новый, усложненный вариант модели. Эта модель была предложена в 1965 г. Н. Н. Боголюбовым, Б. В. Струминским, А. Н. Тавхелидзе в СССР и независимо Й. Намбу, М. И. Ханом и др. в США. В этой модели каждый из кварков может появляться в трех различных состояниях, идентичных по всем квантовым числам, кроме нового особого квантового числа, названного «цветом» (например, кварки могут быть красными, зелеными и синими). Принятая терминология, как видите, довольно причудлива. Разумеется, квантовое число цвет, не имеет ни малейшего отношения к тому, что принято называть цветом в повседневной жизни, да и в привычной нам обыкновенной физике. Кварки никак нельзя мыслить в виде окрашенных шариков.

Кстати, определенный тип кварка (p , n или λ) все чаще именуют «ароматом». Кварки, как говорят, различаются по цвету и аромату. Пожалуй, подобная необычная терминология в какой-то мере отражает отсутствие убежденности в реальности кварков. Согласно этой терминологии каждый аромат кварка может проявляться в трех различных цветовых состояниях, имеющих одинаковые массы, спины, электрические заряды и все другие квантовые числа. Антикварки имеют цвета, дополнительные к цветам кварков: сине-зеленый, пурпурный и желтый.

Бесцветность

На первый взгляд может показаться, что утроение числа кварков должно привести к значительному увеличению возможного числа адронов, составленных из этих кварков. Но в действительности это не так. Чтобы результаты новой кварковой модели согласовались с действительностью, вводится принцип «бесцветности». Согласно этому принципу все адроны должны быть бесцветными или белыми. Это означает, что каждый барион должен состоять из трех кварков различных цветов. Так как кваркам при-

писываются основные цвета спектра, то такая комбинация может быть названа белой, поскольку при смешении основных цветов получается белый цвет. При таком построении барионов принцип Паули выполняется автоматически.

Мезоны также бесцветны: каждый из них состоит из кварка и антикварка, цвета которых дополнительные. Причем цвет и антицвет кварков любого аромата непрерывно меняются. Аналогично цвета кварков в барионах не фиксированы и претерпевают непрерывные изменения. Гипотеза бесцветности однозначно приводит к определенным правилам конструирования барионов и мезонов из кварков и автоматически исключает комбинации из двух или четырех кварков. Из них нельзя составить белые адроны.

Правила композиций адронов после введения постулата бесцветности остаются теми же, что и раньше, но получают некоторое обоснование. Правда сам постулат убедительного теоретического обоснования пока не имеет. Косвенное же экспериментальное подтверждение гипотезы цветных кварков удастся получить. При аннигиляции электронно-позитронных пар высокой энергии в одних случаях появляются адроны, а в других пары μ^- - μ^+ -мезонов. Отношение числа случаев рождения адронов к числу рождений мезонов зависит, согласно теории, от количества различных кварков. Гипотеза цветных кварков приводит к неплохому согласию с экспериментом, в то время как первоначальная кварковая модель дает заведомо неверные результаты.

Взаимодействие кварков. Глюоны

Кварки внутри адронов не могут не взаимодействовать друг с другом. Взаимодействие это, очевидно, является сильным. Иначе адроны без труда можно было бы расщепить на составляющие их кварки. Теория этих взаимодействий, называемая часто квантовой хромодинамикой, успешно развивается. Получены обнадеживающие результаты, хотя говорить о сколько-нибудь удовлетворительной, законченной теории еще слишком рано.

Согласно основным идеям квантовой хромодинамики взаимодействие кварков осуществляется посредством обмена особыми частицами — глюонами (от английского слова glue — клей). Глюоны «склеивают» кварки воедино. Экспериментально они не открыты.

Подобно фотонам глюоны имеют спин, равный единице, лишены электрического заряда и не имеют массы покоя. Они являются векторными бозонами, подобно фотону и

бозонам W^+ , W^- , W^0 , предположительным переносчикам слабых взаимодействий. То, что основные виды взаимодействий: электромагнитное, слабое и сильное — осуществляются посредством частиц с целым спином \hbar , указывает на черты единства всех взаимодействий и вселяет надежду, что единая теория этих сил рано или поздно будет построена.

При обмене глюонами кварки меняют свой цвет, но не аромат. Например, красный u -кварк, испуская глюон, превращается в зеленый u -кварк или синий, но не может превратиться в d - или s -кварк. Именно беспрестанный обмен глюонами приводит к тому, что кварки в адронах непрерывно меняют свой цвет, оставляя адрон во все моменты времени бесцветным. Цвет — главная характеристика кварка в сильных взаимодействиях.

Набор глюонов, обеспечивающих перенос всех цветов между всеми кварками, по необходимости оказывается довольно обширным. Согласно предсказаниям теории их должно быть восемь. В то же время, как вы помните, электромагнитные взаимодействия обусловлены обменом частицами одного сорта — фотонами, а слабые взаимодействия обменом тремя сортами промежуточных векторных бозонов: W^+ , W^- и W^0 . В отличие от фотонов, глюоны взаимодействуют друг с другом.

Глюон в адроне может превратиться в виртуальную пару кварк — антикварк, и эти превращения происходят постоянно. В результате наряду с реальными кварками, называемыми валентными, внутри адронов имеется поле виртуальных кварковых пар. Эти пары реально проявляют себя, влияя на процесс рассеяния электронов на нуклонах.

Виртуальная пара кварк — антикварк — это виртуальный мезон. Обмен виртуальными мезонами, как вам известно, обуславливает взаимодействие барионов. Например, связывает протоны и нейтроны внутри атомного ядра. Обсуждавшиеся нами ранее сильные взаимодействия адронов должны сводиться с точки зрения кварковой модели к первичным межкварковым взаимодействиям. По словам Ш. Глэшоу, одного из американских теоретиков в области хромодинамики, «...взаимодействие бесцветных адронов — не более чем слабый остаток от основного взаимодействия цветных кварков. Точно так же как Ван-дер-Ваальсовы силы между нейтральными молекулами — только слабый след электромагнитных сил, которые притягивают электроны к ядру, сильные силы, действующие между адронами, — лишь слабый след сил, действующих внутри отдельного адрона».

Кварки внутри адронов

Можно надеяться обнаружить кварки внутри нуклонов (протонов и нейтронов) по рассеянию на них электронов и нейтрино высоких энергий. При больших энергиях наблюдается глубоко неупругое рассеяние, когда из нуклонов выбивается много вторичных частиц.

Если кварки имеют размеры, значительно меньшие размеров нуклонов, то можно рассматривать их как точечные частицы. И эти частицы, как впервые предсказал советский физик М. А. Марков, можно прощупать при рассеянии частиц высоких энергий.

Подобно тому, как в опытах Резерфорда по рассеянию α -частиц было обнаружено малое образование внутри атома — атомное ядро, в опытах по рассеянию электронов на нуклонах сначала было обнаружено пространственное распределение электрического заряда в нуклонах (об этих опытах было рассказано в четвертой главе), а затем с увеличением энергии рассеиваемых частиц (электронов и нейтрино) до 50 миллиардов электрон-вольт удалось установить существование точечных образований в нуклонах. Эти образования, названные первоначально Р. Фейнманом партонами (т. е. просто «частями»), по всей видимости и есть кварки.

Любопытно, что кварковая модель позволяет очень просто делать важные предсказания. Пионы состоят из пары кварк — антикварк, а нуклоны из трех кварков. Если все кварки и антикварки взаимодействуют друг с другом одинаково, то отношение вероятностей взаимодействия пиона с нуклоном при рассеянии и нуклона с нуклоном должно равняться $2/3$. Близкое к этому значение отношения вероятностей наблюдается на опыте.

Почему не обнаружены свободные кварки?

Однако, свободные кварки, как уже говорилось ранее, с достоверностью пока не наблюдались. Конечно, может быть их масса очень велика: десятки нуклонных масс. Тогда энергия связи кварков в нуклоне огромна и мощности современных ускорителей не хватает для расщепления протонов и нейтронов на отдельные кварки. А в природе свободных кварков очень мало.

Сравнительно недавно, в мае 1977 г. появилось, правда, сообщение о том, что группа физиков Стэнфордского университета в США обнаружила дробный электрический заряд на нескольких шариках из ниобия в опытах, подобных опытам Милликена с каплями масла. Но большинство физиков



с сомнением отнеслось к результатам этих опытов. Необходимого подтверждения данные эксперимента пока не получили.

В настоящее время более правдоподобной и привлекательной кажется иная точка зрения. Свободных кварков в природе не существует и не может существовать. Кварки не могут вылетать из адронов.

Развивается несколько теорий, объясняющих невозможность разделения адронов на кварки. В основе всех этих теорий лежит утверждение о том, что межкварковые силы, в отличие от всех других сил в природе, не убывают с расстоянием. При увеличении расстояния они остаются постоянными, а может быть даже и возрастают. Если это справедливо, то извлечь кварк из адрона нельзя. Точно так же нельзя было бы разделить атомы в молекуле, если бы потенциальная энергия взаимодействия атомов имела фор-



Рис. 37. Зависимость потенциальной энергии взаимодействия атомов от расстояния между ними (жирная кривая).

му ветви параболы при любых расстояниях между атомами (рис. 37).

Удаление электрона из атома (ионизация атома) требует энергии порядка 10 эВ. Расщепление ядра требует гораздо большей энергии — несколько миллионов электрон-вольт. Удаление же одного кварка на расстояние 3 см от протона требует энергии около 10^{13} миллиардов электрон-вольт. Этой энергии достаточно для того, чтобы поднять человека на высоту 10 м над Землей.

Однако задолго до этого начнет действовать особый механизм рождения частиц. Когда при удалении кварка из нуклона потенциальная энергия достигнет достаточно высокого уровня, начнут образовываться за счет этой энергии реальные пары кварк — антикварк (рис. 38, а, б, в). Кварк остается в нуклоне и восстанавливает эту частицу, а антикварк объединяется с удаляемым кварком и образует бесцветный мезон (рис. 38, г). Вместо удаления кварка из нуклона происходит рождение мезона.

Свободные кварки, равно как и свободные глюоны, согласно развиваемой теории, абсолютно не наблюдаемы.

«Если эта интерпретация ненаблюдаемости кварков верна, — замечает Ш. Глэшоу, — то она дает интересную возможность ограничить бесконечное дробление структуры материи. Атомы можно разложить на электроны и ядра, ядра — на протоны и нейтроны, а протоны и нейтроны на кварки, но теория неразделимости кварков предполагает,

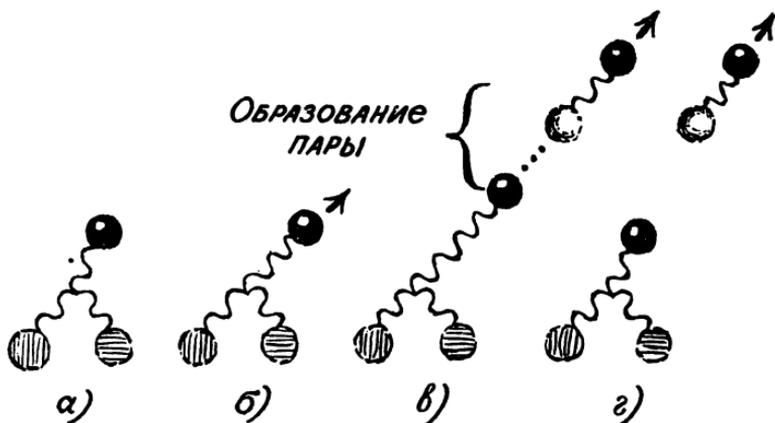


Рис. 38. Схема рождения мезона при попытке удаления одного из кварков из адрона.

что на этом все кончается. Трудно представить себе, как частица может иметь внутреннюю структуру, если даже она не может быть образована».

Асимптотическая свобода

Согласно излагаемой теории, чем ближе расположены кварки друг относительно друга, тем меньше их энергия взаимодействия. Энергия уменьшается по мере сближения кварков, хотя и не обращается в нуль. На малых расстояниях сильное взаимодействие ослабляется. Данная ситуация получила название асимптотической свободы. На малых расстояниях кварки движутся почти независимо друг от друга. В этом и состоит их свобода.

При рассеянии электронов высокой энергии на протонах, о котором упоминалось ранее, протон ведет себя как совокупность почти свободных кварков. Электрон движется почти со скоростью света и поэтому «чувствует» кварки очень малое время. За это время кварки почти не смещаются. Результаты рассеяния хорошо согласуются с представлением о почти свободных кварках в нуклонах.

Модель струны

Предложены различные, довольно остроумные модели, призванные объяснить увеличение энергии взаимодействия кварков с ростом расстояния между ними. Пока такие модели довольно примитивны, но зато достаточно наглядны. Мы остановимся только на одной модели, модели струны.

В простейшем варианте этой модели адрон рассматривается как гибкая растянутая струна, находящаяся в быстром вращении. Струна лишена массы покоя, но обладает кинетической и потенциальной энергией. Натяжение струны постоянно, но она не сокращается за счет быстрого вращения. Центробежные силы препятствуют сокращению струны (рис. 39). На концах струны расположены кварк и

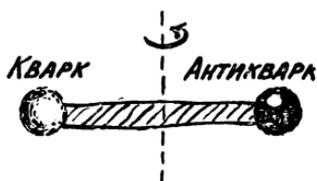


Рис. 39. Модель строения адрона в виде струны.



Рис. 40. Разрыв струны приводит к рождению нового мезона.

антикварк, несущие квантовые числа адрона, в то время как энергия и импульс адрона в основном сосредоточены в струне.

При удалении кварка от антикварка струна растягивается и ее потенциальная энергия увеличивается. Если струна разорвется, то в местах разрыва опять появляются кварк и антикварк, а свободных кварков не возникает (рис. 40). В результате рождается еще один мезон.

Из чего состоит струна? С точки зрения квантовой хромодинамики она представляет собой тонкую трубку глюонного поля.

Силовые линии электрического поля заряженной частицы расходятся во все стороны от нее (рис. 41). Из-за этого взаимодействие с расстоянием убывает. Если бы удалось все силовые линии сжать в одну трубку так, чтобы они не рассеивались в пространстве, то сила электрического взаимодействия была бы постоянна при любом расстоянии между заряженными частицами. Видимо, глюонное поле и концентрируется в таких узких трубках или струнах. С данной точки зрения необычной является не сама сила, а конфигурация поля.

Подобная конфигурация магнитного поля известна физикам. Сверхпроводники, как известно, выталкивают магнитное поле. Если же поместить внутри сверхпроводника оба полюса магнита, то силовые линии не будут расходиться от полюсов, как обычно, а сконцентрируются в узкой трубке между полюсами (рис. 42). В этой области сверхпроводимость оказывается разрушенной.

Можно предположить, что влияние сверхпроводящей среды на магнитное поле аналогично влиянию вакуума на

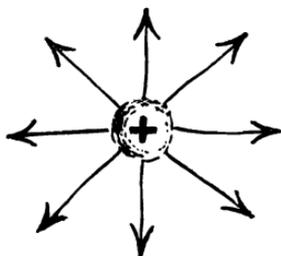


Рис. 41. Силовые линии электрического поля заряженной частицы.

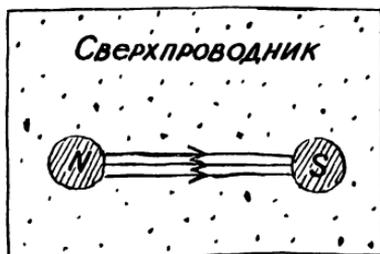


Рис. 42. Силовые линии магнитного поля внутри сверхпроводника.

глюонное поле. На этой основе развивается квантовая теория межкварковых взаимодействий.

Однако конфигурация поля в виде струны очевидна только для мезонов, состоящих из кварка и антикварка. С барионами, состоящими из трех кварков, дело обстоит значительно сложнее, и конфигурация глюонного поля в этом случае не ясна. Может быть два кварка находятся на концах струны, а один посередине? Или барион имеет конфигурацию трехлучевой звезды и т. д.? Пока никаких определенных ответов на эти и многие другие вопросы нет. Возможно, модель струны, замечает Й. Намбу, окажется слишком наивной и ее придется оставить.

Разрабатываются и другие модели. Например, модель «мешка» или «пузыря», согласно которой кварки находятся внутри некоей оболочки, раздувают ее при движении, но не в состоянии проникнуть сквозь оболочку.

До построения удовлетворительной теории, объясняющей невылет кварков из адронов, видимо, еще далеко.

Слабые взаимодействия кварков

Адроны наряду с сильными взаимодействиями участвуют также в слабых. С точки зрения кварковой модели адронов это означает, что в слабом взаимодействии участвуют кварки.

Обмен глюонами, ответственный за сильные взаимодействия, меняет только цвет кварка, оставляя все его остальные свойства неизменными. При слабом взаимодействии кварки обмениваются промежуточными векторными бозонами W^+ , W^- , W^0 . Этот обмен приводит к изменению аромата кварка, т. е. почти всех его свойств.

Распад нейтрона за счет слабого взаимодействия в кварковой модели выглядит так. Один из двух n -кварков нейтрона испускает W^- -мезон и превращается в p -кварк. В результате образуется протон, состоящий из одного n -кварка и двух p -кварков. W^- -мезон распадается на лептоны: электрон и антинейтрино.

Таким образом, слабые взаимодействия осуществляют определенную связь между кварками и лептонами — частицами, которые в первую очередь можно считать истинно элементарными.

Связь между кварками и лептонами через посредство промежуточных векторных бозонов очевидна: эти частицы могут превратить нейтрино одного вида в электрон, а нейтрино другого вида в мюон. Точно так же они могут преобразовать n -кварк в p -кварк или λ -кварк и т. д.

Кварковая модель ликвидирует затруднения в теории слабых взаимодействий, связанные с огромным числом различных адронов и соответственно адронных токов. Трём кваркам соответствует лишь два заряженных тока n, p и λ, p и три нейтральных $p, p; n, n$ и λ, λ .

Более того, как вы скоро увидите, теория слабых взаимодействий кварков позволила предсказать существование еще одного, четвертого кварка и установить кварк-лептонную симметрию.

Открытие

J/ψ (джей-пси)-мезона

Событием огромной важности для физики элементарных частиц явилось открытие в ноябре 1974 г. новой тяжелой частицы, названной J/ψ -мезоном. Существование этой частицы не предсказывалось теоретиками, а ее свойства во многих отношениях оказались весьма необычными. Уже много лет в физике элементарных частиц не происходило ничего подобного.

J/ψ -мезон был открыт как резонанс, т. е. был обнаружен по увеличению вероятности взаимодействия между другими частицами при определенной энергии. Открытие было сделано почти одновременно С. Тингом с сотрудниками в Брукхейвенской лаборатории (США) и Б. Рихтером с сотрудниками в Стэнфорде (США). За это открытие Тингу и Рихтеру в 1976 г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

Группа Тинга производила бомбардировку бериллиевой мишени протонами с энергией в несколько десятков ГэВ (миллиардов электрон-вольт). Среди продуктов реакции наблюдались, в частности, электронно-позитронные пары. Самым удивительным, по словам Тинга, было то, что большинство e^+, e^- -пар имело вполне определенную энергию и импульс. Это могло быть только в том случае, если электронно-позитронные пары рождались в результате распада какой-то частицы с массой 3,1 ГэВ (около 3,3 протонной массы).

На рис. 43 изображена зависимость числа e^+, e^- -пар от энергии. Ширина резонансной кривой не превышала 5 МэВ, т. е. наблюдаемый резонанс был чрезвычайно узким. В обнаружении этого узкого резонанса как раз и состояла главная трудность эксперимента.

Вновь открытая частица была названа Тингом J -мезоном. Таких тяжелых мезонов физики до этого не наблюдали. Спин J -мезона оказался равным \hbar .

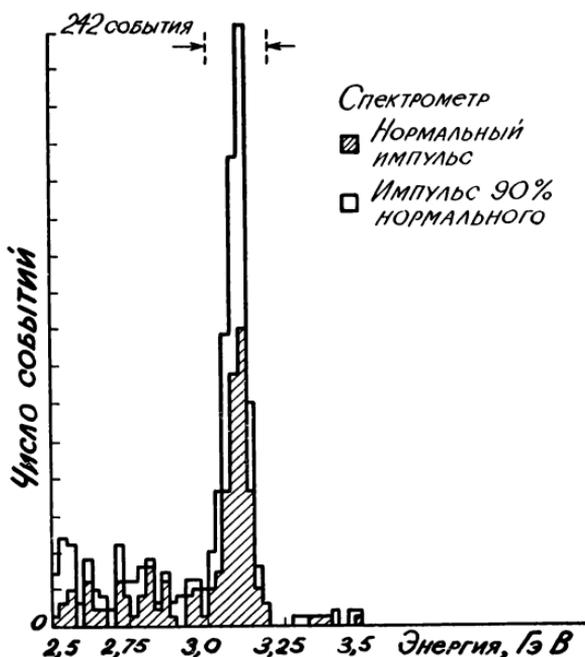


Рис. 43. Резонансная кривая рождения пар e^+e^- при бомбардировке мишени протонами.

Еще более замечательным оказалось время жизни J -мезона: около 10^{-20} с. По микроскопическим масштабам это время совсем не мало. Оно в тысячу раз превышает время жизни частиц, распадающихся за счет сильных взаимодействий. Это время было определено по ширине резонансного пика методом, о котором рассказывалось в десятой главе. Большое время жизни новой частицы вызвало наибольший интерес физиков.

В Стэнфорде сверхтяжелый мезон был открыт на совсем другой установке, во многих отношениях более удобной, чем примененная Тингом. Группа Рихтера наблюдала аннигиляцию электронов и позитронов высокой энергии во встречных пучках. Такие пучки формируются в специальных накопительных кольцах, в которые впрыскиваются сгустки электронов и позитронов из ускорителя. Столкновения частицы происходят на двух участках накопительного кольца.

Аннигиляция электронно-позитронных пар с энергией 3,1 ГэВ сопровождалась резонансным рождением либо адронов, либо лептонных пар μ^+ , μ^- и e^+ , e^- . Резонансы были очень узкими, и интерпретировать их можно было

единственным образом. При аннигиляции рождается новая частица, которая затем распадается либо на адроны, либо на лептонные пары. Эта частица была названа Рихардом ψ -мезоном. Она оказалась тождественной J -мезону Тинга и за ней утвердилось наименование J/ψ -мезона.

Время жизни J/ψ -мезона особенно точно было измерено в Стэнфорде. Здесь же вскоре открыли ψ' -мезон с еще большей массой 3,7 ГэВ, живущей примерно в три раза меньше, чем J/ψ -частица. Впоследствии были открыты другие, сходные с J/ψ -мезоном частицы.

Большое по макроскопическим масштабам время жизни J/ψ и других новых тяжелых мезонов свидетельствовало о том, что быстрый распад со временем 10^{-23} с не допускается каким-то новым правилом запрета. Подобно тому, как для объяснения заторможенности распада странных частиц было введено квантовое число «странность», физики сочли необходимым ввести новое квантовое число, ответственное за торможение распада J/ψ -мезона и других тяжелых мезонов.

Очарованный кварк

Возможность существования еще одного квантового числа, характеризующего адроны, обсуждалось уже давно, более 10 лет назад. Это число получило весьма экзотическое наименование: «очарование» или, не прибегая к переводу, просто «чарм» (charm по английски означает очарование). Ну, а если имеется новое квантовое число, то с точки зрения кварковой модели адронов ему должен соответствовать новый кварк. Этот кварк называется очарованным или чармированным и обозначается буквой c . Здесь прямая аналогия со странным кварком λ , носителем квантового числа — странность.

Согласно утвердившимся среди физиков представлениям J/ψ -мезон представляет собой комбинацию очарованный кварк — антикварк: $c\bar{c}$. Очарование антикварка по знаку противоположно очарованию кварка. В результате суммарное очарование J/ψ -мезона равно нулю. Этот мезон обладает, как говорят, «скрытым очарованием».

Большую массу J/ψ -мезона можно объяснить, допустив, что c -кварк тяжелее всех остальных кварков. Предположительно его масса 1,5 ГэВ. Это примерно в 3 раза больше массы λ -кварка.

Спин очарованного кварка равен $\hbar/2$, как и у других кварков, барионный заряд $1/3$, а электрический заряд $+2/3 e$, как и у p -кварка.



Рис. 44. Схема распада J/ψ -частицы на мюоны через промежуточный фотон.



Рис. 45. Схема распада J/ψ -частицы на адроны через промежуточный фотон.

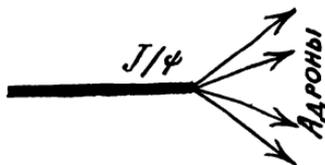


Рис. 46. Схема распада J/ψ -частицы на адроны без образования промежуточного фотона.

Распад J/ψ -частицы происходит за счет аннигиляции очарованного кварка с антикварком. Это может быть обусловлено как электромагнитными взаимодействиями, так и сильными. В первом случае сначала рождается виртуальный фотон, который затем распадается или на пару лептонов e^+ , e^- или μ^+ , μ^- (рис. 44), или на адроны (в основном на несколько пионов) (рис. 45). Во втором случае промежуточных фотонов не возникает и J/ψ распадается сразу на адроны (рис. 46).

Распад J/ψ за счет электромагнитных взаимодействий имеет обычное для этих взаимодействий время. Необычным является то, что и распад за счет сильных взаимодействий имеет то же время. Это, видимо, связано с замедлением реакции превращения очарованных кварков в обычные кварки. Если бы J/ψ -мезон состоял из обычных кварков, то он распадался бы за счет сильных взаимодействий со временем 10^{-23} с.

Чармоний

Итак, J/ψ -мезон — это образование из c -кварка и \bar{c} -антикварка. Такое образование получило название чармония по аналогии с позитронием — связанным состоянием из позитрона и электрона. Позитроний, а следовательно, и чармоний — квантовые системы, подобные атому. Они обладают дискретными уровнями энергии.

Можно предположить, что J/ψ -мезон — это лишь одно из квантовых состояний чармония. Возможны и другие состояния с другими энергиями, а значит, и массами. Мезон ψ'

является как раз одним из таких состояний с большей энергией, чем у J/ψ .

Считая, что пара c, \bar{c} находится в некоей потенциальной яме, обусловленной межкварковыми силами, можно с помощью обычной квантовой механики рассчитать возможные энергетические состояния чармония. Такие расчеты были сделаны и были предсказаны массы различных состояний и возможные переходы между состояниями. Впоследствии эти состояния с массами от 4,5 ГэВ до 2,8 ГэВ (нижшее, основное состояние) были открыты экспериментально.

При переходах из одного состояния в другое испускаются фотоны (γ -кванты), энергия которых в сотни миллиардов раз превышает энергию фотонов, испускаемых атомами. Хорошее согласие теоретических предсказаний, основанных на кварковой модели, с экспериментом служит убедительным доводом в пользу гипотезы о существовании очарованного кварка.

Кварк-лептонная симметрия

Мы уже упоминали о том, что гипотеза о существовании очарованного кварка была выдвинута задолго до открытия J/ψ -мезона. Впервые это было сделано японским теоретиком Хара в 1963 г., а затем независимо американскими физиками Ш. Глэшоу и Бьеркеном. Они и ввели термин очарование. Основания для введения нового кварка поначалу были довольно формальными.

Хорошо известно, что лептоны делятся на две связанные друг с другом пары: электрон, электронное нейтрино и мюон, мюонное нейтрино. Внутри каждой пары одна частица может превратиться в другую путем обмена промежуточным векторным бозоном W^+ или W^- . Если же кварков только три, как предполагалось сначала, то налицо определенная несимметрия между лептонами и кварками. Один кварк остается «холостым».

Симметрию можно восстановить, если добавить еще один четвертый кварк. Тогда тоже имелось бы две пары кварков, и каждая частица одной пары превращалась бы в другую частицу той же пары путем обмена W -мезоном. Наряду с парой p, n должна существовать пара λ, c . Так и был предсказан очарованный кварк.

Сильный аргумент в пользу существования этого кварка был получен в 1964 г. С его помощью удалось объяснить, почему слабые нейтральные токи не вызывают реакций с изменением странности. Например, не приводят к распаду

K^+ -мезона на пион и электронно-позитронную пару. (Об этом говорилось в девятой главе.) Оказалось, что введение четвертого кварка приводит к двум возможным механизмам взаимодействия, меняющим странность без изменения заряда в лептонных и адронных парах. И оба эти механизма взаимно компенсируют друг друга, если c -кварку присписать заряд $2/3 e$. Вещь, невозможная в мире макротел, но вполне допустимая для микрообъектов, поведение которых управляется законами квантовой механики.

Открытие J/ψ -мезона сделало существование c -кварка не менее вероятным, чем существование всех остальных кварков.

Между лептонами и кварками имеется много общего. Все эти частицы имеют полуцелый спин; тех и других по четыре; и, наконец, все они наиболее достойные кандидаты на звание истинно элементарных частиц. В современной физике они рассматриваются как точки, лишённые внутренней структуры.

Но остается фундаментальным вопрос, который Ш. Глэшоу формулирует следующим образом. «Как кварки, так и лептоны, все являющиеся элементарными частицами, могут быть подразделены на две подгруппы. В одну можно включить p - и n -кварки и электроны с электронным нейтрино. Этим четырех частиц достаточно, чтобы построить весь мир; их достаточно для создания атомов и молекул и даже для того, чтобы заставить светиться Солнце и другие звезды. Другая подгруппа будет состоять из странного и очарованного кварков и мюона с мюонным нейтрино. Некоторые из них наблюдались в космических лучах, но главным образом они создаются в мощных ускорителях. Казалось бы природа могла обойтись только первой подгруппой для своих целей. Разумеется, вторая подгруппа не создана лишь для развлечения и умственных упражнений физиков, но какова цель такого дублирования? На этот вопрос у нас нет ответа».

Очарованные частицы

Если очарованные кварки действительно существуют, то должна наблюдаться группа очарованных частиц: мезонов и барионов. Очарованные частицы — это частицы, содержащие c -кварк с суммарным очарованием, не равным нулю.

Очарованные мезоны содержат один c -кварк в паре с антикварком \bar{p} , \bar{n} или $\bar{\lambda}$, или же \bar{c} -антикварк в паре с p -, n - или λ -кварком. Всего может быть шесть очарованных мезонов.

Барионы могут содержать от одного до трех c -кварков, и их число достигает нескольких десятков.

К настоящему времени все шесть очарованных мезонов открыты в экспериментах по аннигиляции электронов и позитронов высокой энергии во встречных пучках: D^+ , D^- , D^0 , \bar{D}^0 , F^+ , F^- . Их квантовые числа поразительным образом совпадают с предсказанными теоретиками. Открытие очарованных мезонов можно рассматривать как выдающийся успех кварковой модели адронов.

Были сообщения об открытии Λ_c -бариона, очарованного аналога Λ^0 -бариона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении ко второму изданию этой книги, вышедшему в 1973 г., говорилось: «Надо сказать, что за последние восемь лет никаких новых важных открытий не было сделано. Экспериментальное открытие двух сортов нейтрино в 1962 г. и открытие несохранения комбинированной четности в 1964 г. — последние события первостепенной важности в физике элементарных частиц. С 1964 г. не было найдено ни одной новой элементарной частицы, время жизни которой значительно повысило бы время жизни резонансов. Не было и больших достижений в теории элементарных частиц».

За шесть прошедших лет положение радикально изменилось. Были открыты слабые нейтральные токи, приводящие к таким эффектам, как рассеяние мюонного нейтрино на электронах. Открыты, начиная с J/ψ -мезона, целая группа элементарных частиц со временем жизни, в тысячу раз превышающим время жизни резонансов. Фактически уже сейчас нужно эти частицы включить в таблицу относительно стабильных элементарных частиц. Число элементарных частиц превысило 35 и продолжает расти.

Значительны успехи в теории элементарных частиц. Единая теория слабых и электромагнитных взаимодействий получила солидное экспериментальное подтверждение, хотя по-прежнему не может считаться с несомненностью достоверной. Кварковая модель строения адронов получает все новые и новые экспериментальные подтверждения. После многих лет застоя большой прогресс достигнут в теории сильных взаимодействий, которые теперь рассматриваются как межкварковые взаимодействия.

Очень вероятно, что подлинно элементарными частицами, неделимыми уже дальше, являются лептоны и кварки. Все огромное множество адронов построено из кварков.

Модель четырех цветных кварков и четырех лептонов позволяет в общих чертах понять структуру материи. Ученые вплотную подошли к решению новой проблемы, проблемы структуры элементарных частиц.

Но, как всегда в физике, быстрый скачок вперед сопровождается новыми неожиданными открытиями, которые усложняют ту более или менее стройную, единую картину мира, которая вырисовывается перед исследователями.

Во встречных пучках при аннигиляции электронов и позитронов высокой энергии в 1975 г. с достоверностью открыты новые тяжелые лептоны, названные τ -лептонами (тау-лептонами). Эти положительно и отрицательно заряженные частицы имеют массу $\approx 1,9$ ГэВ (в 18 раз тяжелее мюона). Если наши общие представления о лептонах справедливы, то должны существовать новые нейтрино ν_τ и соответственно новые антинейтрино $\bar{\nu}_\tau$, связанные с τ -лептоном.

Распадается τ^+ -лептон, к примеру, по следующим каналам:

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

$$\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau,$$

$$\tau^+ \rightarrow \bar{\nu}_\tau + \text{адроны}.$$

τ -нейтринный лептонный заряд предположительно сохраняется. Время жизни тяжелых лептонов пока не определено.

При бомбардировке протонами высокой энергии неподвижной мишени обнаружены сверхтяжелые нейтральные мезоны, названные «ипсилонами» с массой порядка 9,4 ГэВ. Найдено три модификации этих мезонов с близкими массами. Чтобы включить ипсилоны в рамки кварковой модели, надо предположить, что существуют кварки более массивные, чем s -кварк. Для сохранения кварк-лептонной симметрии требуется введение двух новых кварков, соответствующих паре τ -лептон, ν_τ -нейтрино. Эти кварки уже получили наименование: топ (вершина по-английски) и боттом (дно).

Итак, с увеличением энергии сталкивающихся частиц обнаруживается рождение новых все более и более тяжелых частиц. Это усложняет и без того непростую картину мира элементарных частиц. Появляются новые проблемы, хотя множество старых проблем остается нерешенным

Вероятно, основной нерешенной проблемой следует считать проблему кварков: могут ли они быть свободными или же пленение их внутри адронов является абсолютным. Если же кварки принципиально не могут быть выделены и обнаружены в свободном состоянии, то как убедиться, что они с несомненностью существуют?

Далее, остается не доказанным экспериментально существование промежуточных векторных бозонов W^+ , W^- и W^0 , столь необходимых для уверенности в справедливости единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий.

Существуют ли реально глюоны?

И нет ли других переносчиков взаимодействий, кроме несомненно существующих фотонов и гипотетических W -бозонов и глюонов?

Каково максимальное число лептонов и кварков? Ограничено ли оно сверху по массе или нет?

Интересные проблемы в связи с кварковой моделью адронов возникают в теории эволюции Вселенной. Наша Вселенная расширяется и ее средняя плотность убывает. Примерно 17 миллиардов лет назад Вселенная была очень плотной и горячей.

При плотности, превышающей ядерную плотность $3 \cdot 10^{14}$ г/см³, адроны, видимо, не могут существовать. Вещество Вселенной должно представлять собой в это время горячую жидкость из кварков, антикварков и глюонов. Лишь по мере расширения Вселенной начали образовываться адроны.

Быть может, анализ этого процесса позволит, наконец, решить великую загадку природы: почему в наблюдаемой нами части Вселенной имеются только частицы, а античастицы отсутствуют? С чем связана эта асимметрия?

Современную ситуацию в физике элементарных частиц хорошо иллюстрирует следующее высказывание Б. А. Арбузова и А. А. Логунова в «Успехах физических наук» за ноябрь 1977 г.: «По-видимому, мы находимся в настоящее время на пороге нового уровня понимания явлений в мире элементарных частиц и их внутренней структуры. Однако нельзя сказать, что этот уровень уже достигнут. Еще остаются нерешенные проблемы как теоретического, так и экспериментального плана, и для решения их требуется дальнейшее развитие ускорительной базы экспериментальных исследований, создание ускорителей со сверхвысо-

кими энергиями и напряженные усилия физиков как экспериментаторов, так и теоретиков. Если картина структуры элементарных частиц и их взаимодействий (о которой шла речь в этой книге.— Г. М.) подтвердится, мы, несомненно, получим ключ к пониманию многообразных явлений природы, начиная от глобальных астрофизических проблем и кончая проблемами взаимодействия мельчайших частиц материи.

Несомненно, что выяснение строения элементарных частиц будет представлять собой столь же значительный шаг, как и открытие строения атома и ядра».

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1 ГЛАВА, вводная, но очень важная и, быть может, самая трудная	5
2 ГЛАВА, в которой делается попытка взять быка за рога — увидеть элементарные частицы	16
3 ГЛАВА, из которой можно усмотреть, что величие идей физики XX века граничит с недоступностью их для понимания	27
4 ГЛАВА, из которой можно узнать, что заставляет частицы превращаться друг в друга	49
5 ГЛАВА, в которой наконец-то читатель может познакомиться со всеми элементарными частицами сразу	72
6 ГЛАВА, из которой станет ясно, что мир держится на законах сохранения	83
7 ГЛАВА, в которой рассказывается об одной из самых примечательных частиц — нейтрино и одной из самых непонятных частиц — μ -мезоне	93
8 ГЛАВА, в которой рассказывается о частицах, не без основания называемых странными	110
9 ГЛАВА, в которой впервые говорится о том, что слабые и электромагнитные взаимодействия — это, возможно, одно и то же	119
10 ГЛАВА, самая короткая, посвящается самым короткоживущим частицам	137
11 ГЛАВА, в которой рассказывается о систематике сильно взаимодействующих частиц, а также о том, что такое кварк	143
12 ГЛАВА, в которой рассказывается об открытии новых J/ψ -мезонов, очарованном кварке, а также о том, как кварки окрасились во все цвета радуги	151
Заключение	168

Геннадий Яковлевич МЯКИШЕВ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

М., 1979 г., 176 стр. с илл.

Редактор *Т. Г. Корышева*

Технический редактор *В. Н. Кондакова*

Корректоры *О. А. Сигал, Л. С. Сомова*

ИБ № 11282

Сдано в набор 27.02.79. Подписано к печати 18.10.79.
Т-18629. Бумага 84×108¹/₃₂, тип. № 1. Гарнитура таймс.
Высокая печать. Условн. печ. л. 9,24. Уч.-изд. л. 9,24.
Тираж 140 000 экз. Заказ № 517. Цена книги 35 коп.

Издательство «Наука»

Главная редакция

физико-математической литературы

117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового
Красного Знамени Ленинградское производственно-тех-
ническое объединение «Печатный Двор» имени
А. М. Горького «Союзполиграфпрома» при Государст-
венном комитете СССР по делам издательств, полигра-
фии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136,
Чкаловский пр., 15

В книге в простой и доступной форме излагается физика элементарных частиц. Прочтя эту книгу, можно получить не только представление о мире элементарных частиц, но и почувствовать ту напряженную, полную неожиданных открытий и смелых гипотез атмосферу, в которой живут физики, изучающие элементарные частицы.

В третьем издании книги отражены важнейшие достижения физики элементарных частиц за последние годы. Рассказано о единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий, открытии новых сильновзаимодействующих частиц и последних достижениях в выяснении структуры элементарных частиц.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, как учащихся средней школы, так и на всех окончивших школу, но не утративших интерес к устройству мира, в котором все мы живем.