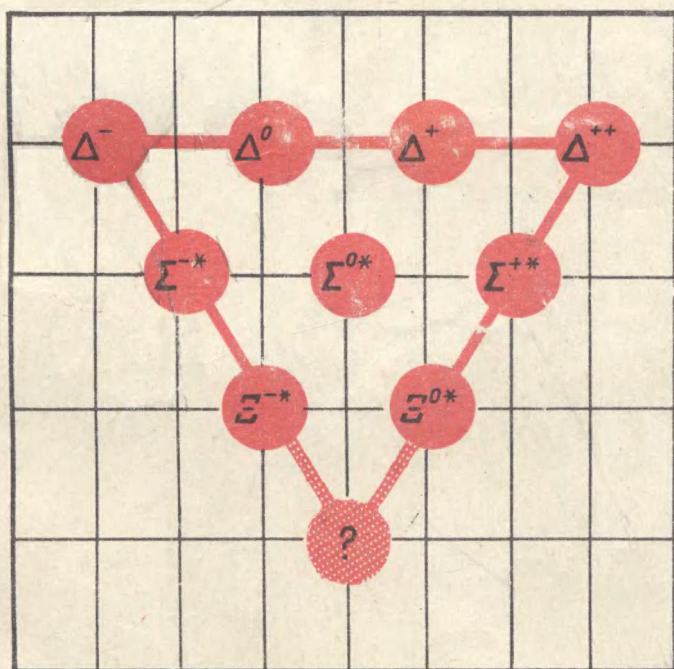


МДР знаний

Элементарные частицы



МИР ЗНАНИЙ

Г. Я. МЯКИШЕВ

Элементарные частицы

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ

МОСКВА „ПРОСВЕЩЕНИЕ“ 1973



Scan AAW

530.3
М 99

Мякишев Г. Я.
М 99 **Элементарные частицы.** Изд. 2-е, переработ. . М.,
«Просвещение», 1973.

143 с. с ил. (Мир знаний).

В книге в популярной форме рассказывается о развитии и современном состоянии физики элементарных частиц. Она предназначена для учащихся старших классов средней школы и учителей физики. Во второе издание внесены небольшие исправления и дополнения.

М $\frac{0763-287}{\text{М}103 (03)-73}$ 248—73

530,3

© Издательство «Просвещение», 1973 г.

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 их 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.

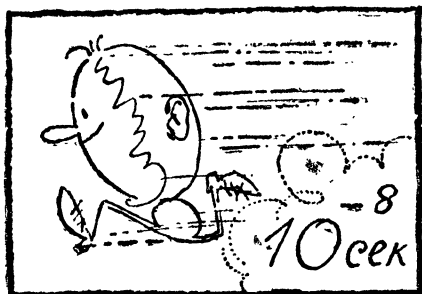
Понять происходящие в микромире явления можно только на основе великих теорий XX в.: теории относительности и квантовой механики. Основам этих теорий также уделено должное внимание.

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 о тех трудностях, с которыми встретились ученые при попытке построения теории элементарных частиц, о задачах, вставших перед ними.

ГЛАВА ПЕРВАЯ,

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 несколько 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 фо-

лиантами. 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 копытца 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 превращения 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, кото-

рым 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



В сущности эти превращения того же типа, что и превращения кукольного домика, сделанного из кубиков, в железнодорожный мост из тех же кубиков, но расположенных по-другому.

мы имеем новое сочленение старых частей. Даже сказочные превращения, собственно, не противоречат каким-либо фундаментальным законам природы. Из атомов, слагающих брата Иванушку, в принципе вполне можно построить козленочка, да еще останутся лишние. Ни один фундаментальный закон природы при этом не будет затронут. Ведь сумела же сама 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 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 их наблюдать нельзя. Итак, уже в начале книги вы встретились со словами «превращения элементарных частиц».



Вы чиркнули спичкой — и она вспыхнула. Вот при этом-то и происходит настоящее превращение материи.

Элементарная частица... А что это такое? Когда Демокрит называл 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 перегасовка атомов. Все в мире течет, все изменяется, кроме самих атомов, бытие которых остается незыблемым.

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 две другие частицы — протон и нейтрон. Поначалу все эти частицы стали рассматриваться точь-в-точь, как Демокрит рассматривал атомы, — неделимыми и неизменными первоначальными сущностями, основными кирпичиками мироздания.

Однако ситуация привлекательной ясности длилась недолго. Все оказалось намного сложнее. Изменных частиц нет совсем. И более того, сейчас просто 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, вскоре 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 убийствен-

ный 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 17 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 собраты — позитроны и антипротоны, при столкновении с которыми происходит взаимное уничтожение частиц. Фотон, испущенный вашей настольной лампой, живет не более 10^{-8} сек. 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 познания 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 материю.

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 в том же самом смысле, как атомы, 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 расчленить электрон? Можно придумать только один способ. Это тот же способ, с помощью которого ребенок хочет узнать, что находится внутри пластмассовой игрушки, — сильный удар.

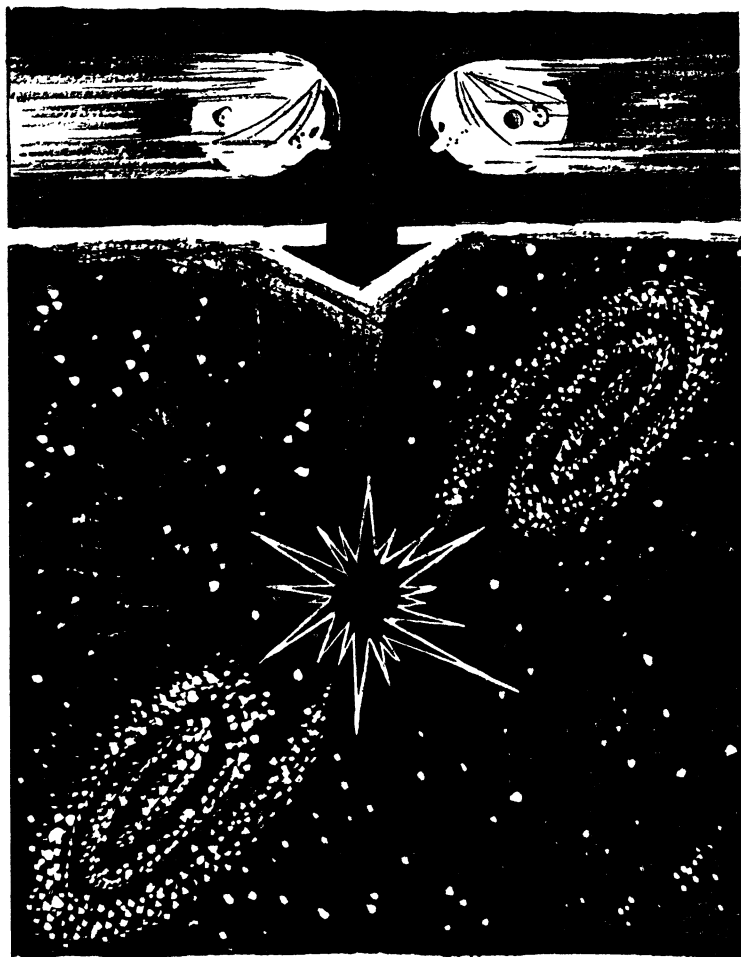
Разумеется, по электрону нельзя ударить молотком. Для этого нужен другой электрон, летящий с колоссальной скоростью, или какая-либо иная движущаяся с большой скоростью элементарная частица. Сейчас построены ускорители, сообщаемые электронам и протонам скорости, очень близкие к той максимальной, которая 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 рожают 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 пригом 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 рожают целые миры, из которых потом могут возникнуть звезды и галактики. Случается ведь, что одна 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



Можно себе представить поистине фантастическую картину: две сверхэнергичные частицы при столкновении рожают целые миры, из которых потом могут возникнуть звезды и галактики.

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 повода считать, что они состоят из продуктов собственного распада. Отношение частиц-потомков к частице-предку совсем не напоминает отношения разбитого горшка к целому сосуду.

Возьмем, например, нейтрон. Свободный нейтрон живет в среднем 17 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 содержаться 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 эти 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 не-



В этой небольшой таблице элементарных частиц нельзя искать действительного сходства. Но приведенные в ней условные изображения частиц используются в ряде последующих рисунков.

стабильной 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 возможно 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 на-



...Нельзя, к примеру, плавно изменять свойства нейтрино так, чтобы заполнить пропасть, отделяющую его от ближайшего соседа в таблице элементарных частиц — электрона.

чала примешиваться доля беспокойства. Триумфы стали следовать буквально друг за другом. Сейчас уже открыто 35 относительно стабильных частиц с временем жизни не меньшим 10^{-17} сек. Число же короткоживущих частиц с временем жизни порядка 10^{-22} — 10^{-23} сек перевалило за двести.

Существование большого числа частиц заставляет думать, что не все они в равной мере элементарны. Многие из них, вероятно, являются составными. Какие именно — пока достоверно не известно. Во всяком случае, уже сейчас предложена модель, согласно которой многие элементарные частицы, хотя и не все, построены всего лишь из шести 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 в последнее время 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.

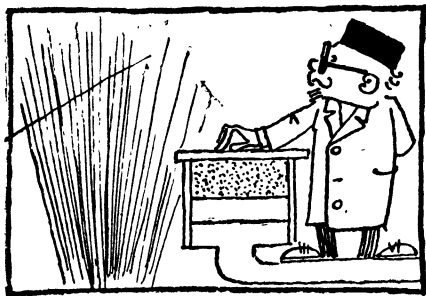
При превращении элементарных частиц меняются масса, заряды частиц и многие другие величины, характеризующие их свойства. Однако мир элементарных частиц, в котором само бытие частиц скоротечно, вправлен в жесткие рамки законов сохранения. Законы сохранения нигде в физике не играют столь огромной роли, 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 пытаясь 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.

ГЛАВА ВТОРАЯ,

*в которой делается попытка взять быка
за рога—увидеть
элементарные
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 первопричину 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 пошло с Галилея, когда начали опытным путем отыскивать количественно формулируемые законы природы.

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, 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.

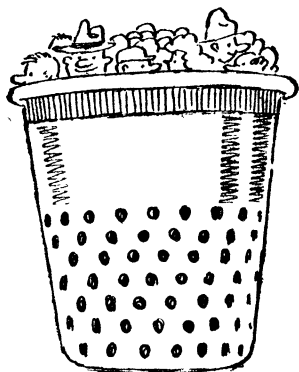
С тех пор прошло несколько десятков лет, и каждый собственными глазами может не только убедиться в существовании атомов, но и наблюдать в камере Вильсона их превращения.

Теперь всем понятно, 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. Недавние опыты по рассеянию электронов на протонах позволили оценить размеры протона. 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 размеры имеет и нейтрон. О размерах электрона можно лишь сказать, что они не превышают 10^{-14} 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 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 отслеживать отдельные элементарные частицы и даже наблюдать 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 эпилоге 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 весь

ма успешно. Для этого, правда, приходится конструировать и создавать гигантские экспериментальные установки, такие, например, как ускорители заряженных частиц. Сооружение их сравнимо по стоимости с постройкой города на десятки тысяч жителей.

Счетчики элементарных частиц. 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-вто-

рых, вместо визуальной регистрации вспышек света в сцинтилляторе было предложено применять изобретенный к тому времени фотоэлектронный умножитель (ф. э. у.), имеющий коэффициент усиления около ста миллионов.

Сцинтилляционный счетчик представляет собой комбинацию сцинтиллятора (твердого или жидкого) и фотоумножителя (рис. 1)¹. Излучаемый сцинтиллятором при прохождении частицы свет попадает на фотокатод ф. э. у. 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 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):

$$\cos \Theta = \frac{c}{v}.$$

Этот эффект можно использовать для регистрации элементарных частиц путем улавливания с помощью чувствительного фотоумножителя черенковского излучения, возникающего в газе, жидкости или прозрачном твердом теле.

¹ Рисунки, номера которых приведены в тексте арабскими цифрами, помещены в конце книги.

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.

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 частицы, а по числу капелек на единице длины трека оценить величину скорости.

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 при-

существовании 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. 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. I) ¹.

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 были открыты 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

¹ Рисунки, номера которых приведены в тексте римскими цифрами, помещены на вклейках.

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, практически невозможно.

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 неон). На пластины подается высокое напряжение, чуть ниже пробойного. При пролете быстрой частицы вдоль ее траектории между пластинами проскакивают искры, создавая огненный трек (рис. 10).

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 регистрируют 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 и за это время по сигналу счетчиков не успевает срабатывать 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 проволочек на расстоянии около одного миллиметра друг от друга (рис. 4). Искра при ударе в какую-либо проволочку вызывает в ней слабый ток, который фиксируется с помощью того или иного устройства и подается в вычислительную машину. Номера проволочек, в которых возник ток, определяют траекторию частицы. Таким образом вычислительная машина сразу же получает сведе-

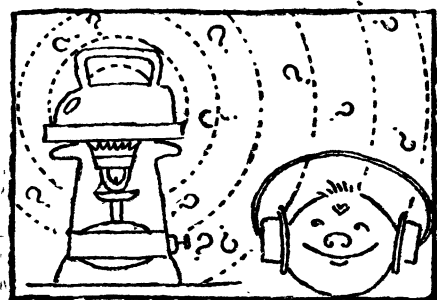
ния о процессах в камере и может тут же анализировать полученные данные. Это чрезвычайно сокращает время между экспериментом и получением обработанной информации.

О чем мы не будем говорить. Много еще можно было бы говорить о других устройствах для регистрации элементарных частиц. О толстослойных фотоэмульсиях, 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, где это совершенно необходимо.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ,

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

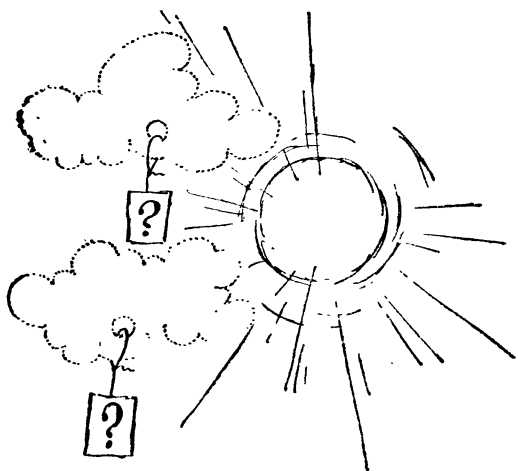


Часто говорят, что «природа проста». Неверно! Это наш ум стремится к простоте, чтобы не тратить лишних усилий.

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 об-

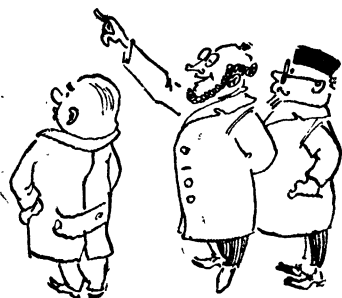
наружить зависимость скорости распространения света от направления светового луча относительно летящей в пространстве Земли, и необъяснимая существующей теорией зависимость теплоемкости газов от температуры.

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 человека, бегущего по эскалатору метро, относительно Земли не зависит от скорости самой лестницы. Скорость же света относительно наблюдателя, в противоречии с обычными представлениями, не зависит от того, движется ли наблюдатель навстречу световой 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 враща-



Кельвин с большой уверенностью писал о безоблачном научном горизонте, на котором его взор смог усмотреть лишь два маленьких облачка.

тельными степеням свободы. Благодаря этому на каждую степень свободы приходится меньшая энергия и соответственно температура газа 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 прерыв-

ные значения. Это позволило построить теорию теплового излучения и решить загадку зависимости теплоемкости от температуры.

Таким образом, непригодность классической физики для объяснения некоторых 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. Рушились 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/сек.

С другой стороны, еще со времен Галилея был хорошо известен и многократно проверен на различных механических экспериментах принцип относительности. Согласно этому принципу равномерное прямолинейное движение системы никак не влияет на течение механических про-

цессов 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 в любой другой, которая движется относительно данной и 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 Ло-



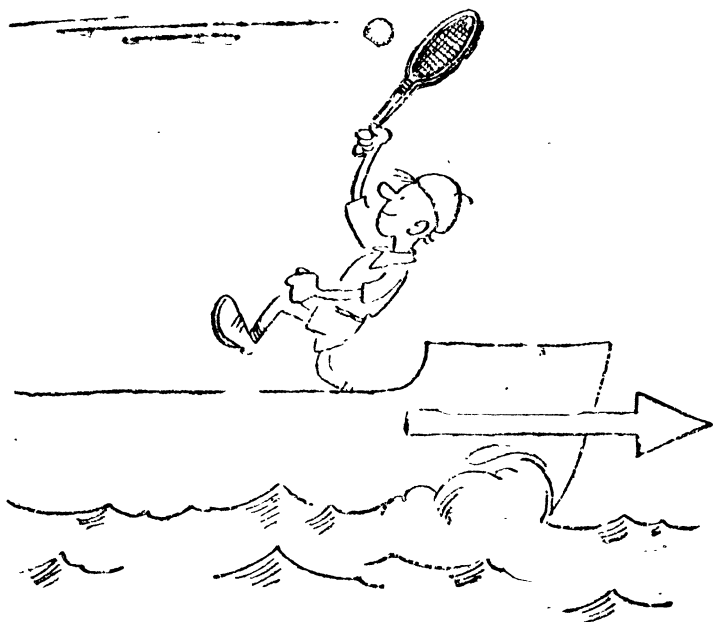
На пароходе вы можете спокойно играть в теннис, независимо от

ренца 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.

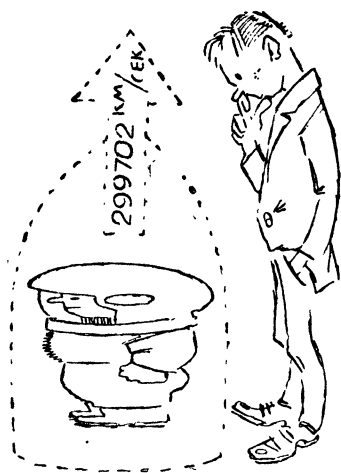
Согласно новым представлениям длина, промежуток времени, масса и многие другие величины, долгое время считавшиеся абсолютными, в действительности имеют определенное значение только по отношению к определенной системе отсчета. Они, как говорят, относительны. Причем эти свойства величин заметно сказываются лишь



того, стоит ли он на якоре или пересекает Атлантический океан.

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 $299\,702\text{ км/сек}$ (на 90 км/сек 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, удлинится в десять раз по сравнению с временем жизни медленного мезона.



Если бы тело космонавта, летящего со скоростью $299\,702\text{ км/сек}$, было расположено в направлении движения, то его рост в системе отсчета, связанной с Землей, не превышал бы двух сантиметров (при нормальной толщине).

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 $299\,702\text{ км/сек}$, 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 был. Но если бы он посмотрел на нас, то увидел бы, что все предметы и люди на Земле под-

верглись 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 известный физик 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 скоростью v масса будет равна:

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

По мере приближения v к c масса стремится к бесконечности (рис. 5). Именно поэтому ни одно тело 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 десятки 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.

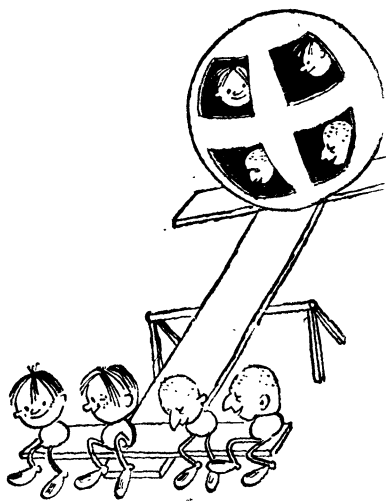
Лишь превращения атомных ядер и элементарных частиц сопровождаются такими большими изменениями

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 элементарные 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 изолиро-



Масса ядра гелия на целый процент меньше массы составляющих это ядро двух протонов и двух нейтронов в свободном состоянии.

ванной 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 анти-нейтрину.

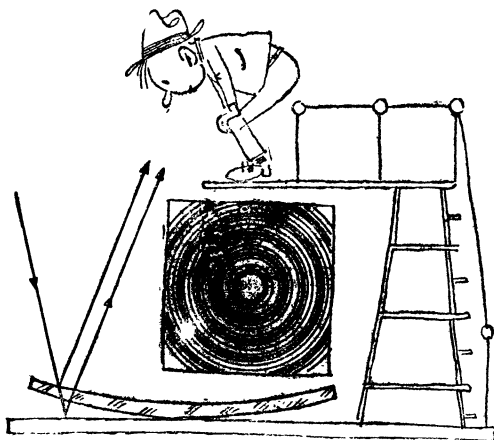
Совершенно ясно, что при распаде масса исходной частицы должна быть больше суммы масс частиц, на которые она распадается (речь идет о массах покоя). Жесткие ограничения подобного рода ставит закон сохранения энергии и в других случаях. Но в мире элементарных частиц может существовать и сверхпарадоксальная 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), лишенного массы покоя. Чтобы расщепить полученную частицу на те же исходные части, нужна энергия, превышающая энергию покоя любой из исходных частиц.

Как же теперь 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 не мыслима.

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



Световые волны, отраженные от пластинки и линзы, проходят разный путь и, складываясь, взаимно гасят или усиливают друг друга.

Квантовая теория приводит к еще более удивительным выводам. Вот одна из вероятных картин строения элементарных частиц, соответствующая квантовой теории: каждая частица состоит в определенном смысле из всех остальных частиц! Как мы увидим дальше, это вполне возможно.

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, что световые волны, отраженные от пластинки и линзы, проходят разный путь и, складываясь, взаимно гасят или усиливают друг друга в зависимости от того, на сколько одна волна отстает от другой.

Дифракция света состоит в огибании светом препятствий, имеющих размеры, сравнимые с длиной волны. Из-за дифракции, в частности, нельзя с помощью микроскопа разглядеть детали предметов, значительно меньшие длины волны.

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·сек), поэтому мала и энергия одного кванта. Так, желтый свет излучается порциями всего по 2 эв каждая.

Из того факта, что свет излучается порциями, еще не вытекает прерывистая структура самого светового луча. «Если пиво всегда продают в бутылках, содержащих пинту, — говорил 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.

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.

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.

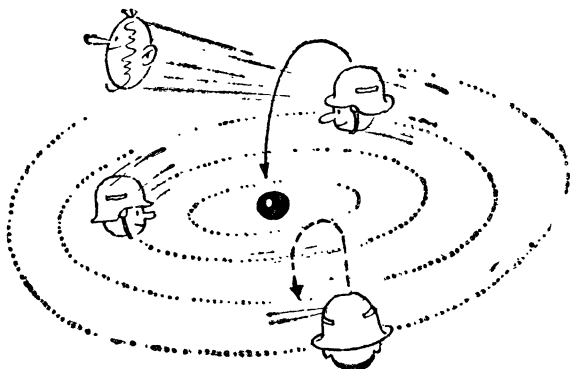
Фотон — особенная частица. Подобно электрону, он обладает энергией и импульсом, но полностью лишен массы покоя. Покоящихся фотонов нет.

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 образовать волну только потому, что между ними существуют силы взаимодействия. Фотоны же непосредственно никак не взаимодействуют друг с другом, если не считать очень слабого гравитационного притяжения. Поэтому наличие у фотона тех или иных свойств, в частности волновых, не может зависеть от присутствия по соседству других фотонов.

Волны и частицы! Нет — волночастицы. 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 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 дол-



Двигаясь по стационарной орбите, электрон не излучает. Фотон излучается лишь при перескоке электрона с одной орбиты на другую.

жен непрерывно излучать, терять энергию и быстро упасть на ядро. Ничтожно 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.

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 не сложно. Импульс фотона выражается формулой

$$p = mc,$$

так как фотон всегда движется со скоростью света. Но согласно формуле Эйнштейна

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

Следовательно,

$$p = \frac{E}{c}.$$

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

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{ch}{E}.$$

Отсюда непосредственно вытекает, что

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

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 ее необычность, 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 материи, 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 приближенно 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 определен, например, импульс, тем большая неопределенность будет в значении координаты. Если через Δp обозначить неопределенность импульса вдоль оси x , а через Δx — неопределенность, с которой задается координата, то принцип неопределенностей Гейзенберга запишется в следующей форме:

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

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



Выражение «длина волны в данной точке» не может иметь никакого смысла.

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 частица движется вдоль какой-то линии. Теряют смысл классические понятия ускорения и силы. 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 $10^{-24} \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ 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/сек, 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 неопределенности для энергии и времени. Чем меньше промежуток времени Δt , в течение которого протекает какой-либо процесс, тем больше неопределенность в значении энергии частицы ΔE :

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

Это соотношение означает, что проверка выполнения закона сохранения энергии с точностью, превышающей $\Delta E = \frac{h}{\Delta t}$, 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 часто 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



Наше воображение не создает новых образов, а лишь комбинирует известные. Так возникли образы ведьм и кентавров.

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 оказалась 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 просто 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 17 мин, но это совершенно не означает, что все они, просуществовав 17 мин, дружно распадутся. Совсем 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 парамет-

ров, 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: $\hbar = \frac{h}{2\pi}$). Спин электрона, так же как и протона, нейтрона и многих других частиц, является полуцелым, т. е. он равен $\frac{\hbar}{2}$. 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 проекция на любое направление, как показывает опыт, может принимать только два значения: $+\frac{\hbar}{2}$ и $-\frac{\hbar}{2}$. Знак указывает на то, что вращение электрона образует с любым направлением правый или левый винт. Если спин частицы является целым, то его проекция на всевозможные направления может принимать три значения: $+\hbar, 0, -\hbar$ (рис. 6).

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, что и электрон.

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

Что нужно помнить. Из всего сказанного о квантовых законах микромира нужно запомнить четыре факта:

1) корпускулярно-волновой дуализм (двойственность) свойств микрообъектов;

2) принцип неопределенностей;

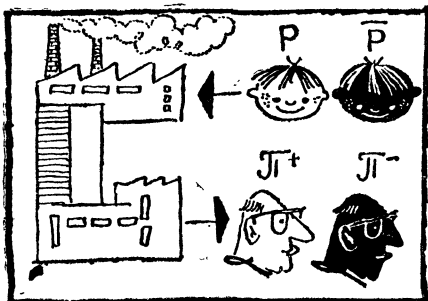
3) вероятностный характер законов микромира;

4) спин элементарных частиц.

Все это нужно для знакомства с объектами микромира.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ,

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,

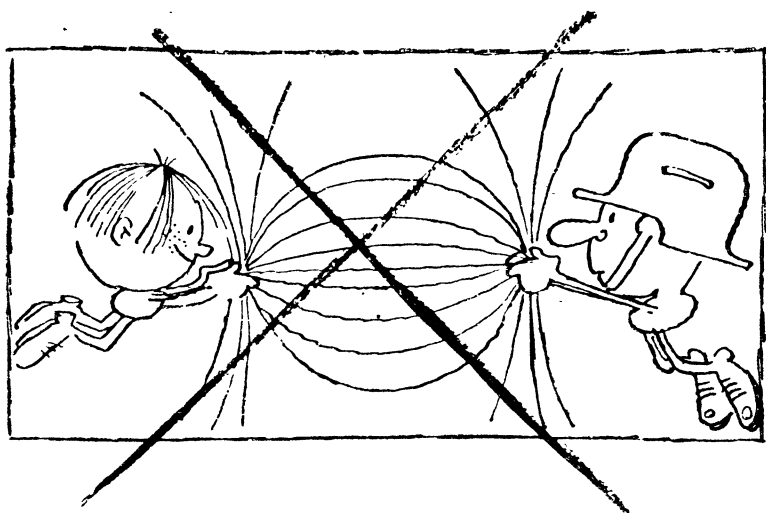
Однако корпускулярно-волновой дуализм заставляет искать черты прерывного в непрерывном. Поле должно иметь и корпускулярное «лицо». И с этой, корпускулярной точки зрения, характерной для квантовой теории, нужно осмыслить взаимодействие. Оно будет выглядеть так: одна заряженная частица все время испускает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

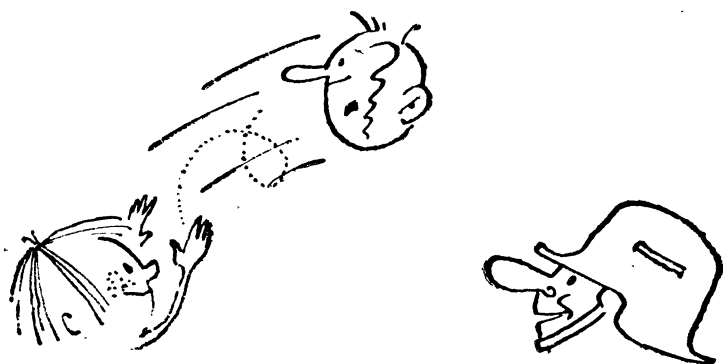
На грани бытия и небытия. Но как себе можно представить испускание фотона заряженной частицей? Ведь нельзя же представлять себе электрон как нечто, подобное старинным часам с кукушкой, из которых эта птичка выскакивает по прошествии каждого часа. Фотона до его испускания внутри электрона не было. Фотон 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 $\Delta E \sim$



Взаимодействующие частицы заняты чем-то напоминающим игру в волейбол.



$\sim \frac{h}{\Delta t}$. Если процесс длится малое время, то неопределенность энергии любой системы достаточно велика и испускание электроном фотона оказывается в принципе дозволённым процессом.

Фотон испускается и вновь поглощается за столь малое время, что выигрыш в энергии остается незамеченным и, в общем-то, можно считать энергию сохраняющей-

ся. Это время составляет всего лишь 10^{-21} сек. 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 некоторой 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 сообщать электрону дополнительную энергию, ускоряя его движение.

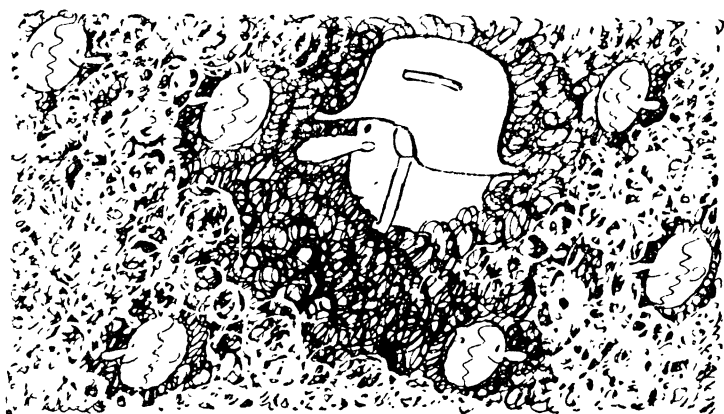
Итак, электромагнитное взаимодействие — это результат того, что одна заряженная частица испускает фотоны, а другая их поглощает.

«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.

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 ча-

¹ Виртуальный по-русски означает возможный.



Электрон окружен фотонной «шубой».

стицы 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.

Частицы и античастицы. В 1930 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 невечным. 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, который раз, это оказалось совершенным 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 электрического, есть еще другие заряды. У некоторых частиц их не мало.) 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 -, K_L^0 -, и K_S^0 -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 -, η^0 -, K_L^0 - и K_S^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 составляющие.

До 1932 г. вопрос о строении ядра оставался без ответа. Было известно, что ядро простейшего атома, атома водорода, представляет собой положительно заряженную

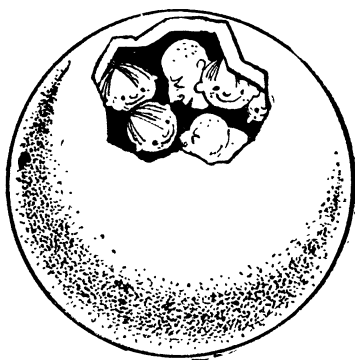
элементарную частицу — протон. Но из чего состоят другие ядра? Можно было думать (так сначала и думали), что наряду с протонами в ядро входит некоторое число электронов. Избыток числа протонов над числом электронов равен заряду ядра и соответственно числу электронов в атомной оболочке.

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 составляют атомные ядра. Теперь протонно-нейтронная модель ядра является бесспорной.

Частицы удерживаются внутри ядра какими-то силами взаимодействия. Причем весьма и весьма не малыми. 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.



Теперь протонно-нейтронная модель ядра является бесспорной.

...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 некоторым 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 отвергнутой 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 разме-

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

$$\epsilon \sim \Delta E \sim \frac{\hbar}{\Delta t}.$$

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:

$$\Delta t = \frac{l}{c}.$$

Следовательно, искомая энергия кванта ядерного взаимодействия выразится так:

$$\epsilon = \frac{\hbar c}{l}.$$

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

$$m = \frac{\epsilon}{c^2} = \frac{\hbar}{lc}.$$

Здесь уже все величины известны из опыта. Подставив значения постоянной Планка \hbar , радиуса взаимодействия l и скорости 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 «родственник», неясно 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, отрицательные и нейтральные. Масса нейтрального π -мезона равна 264,2 электронных массы, а положительных и отрицательных π -мезонов — 273,2. 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.

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} сек.

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 окружающих 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



Нуклон окружен пи-мезонной «шубой».

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 распределение заряда внутри заряженной сферы. Так как электрон не испытывает ядерных взаимодействий, то таким методом определяется характер распределения внутри нуклона именно 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 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. 7).

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. Не только π -мезоны структурно входят в состав нуклона. Немалую роль должны играть и другие частицы. 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 очень 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 мультиплету — важнейшая отметка в паспорте элементарной частицы. Объединение отдельных частиц в мультиплеты обнаруживает некоторые элементы единства 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

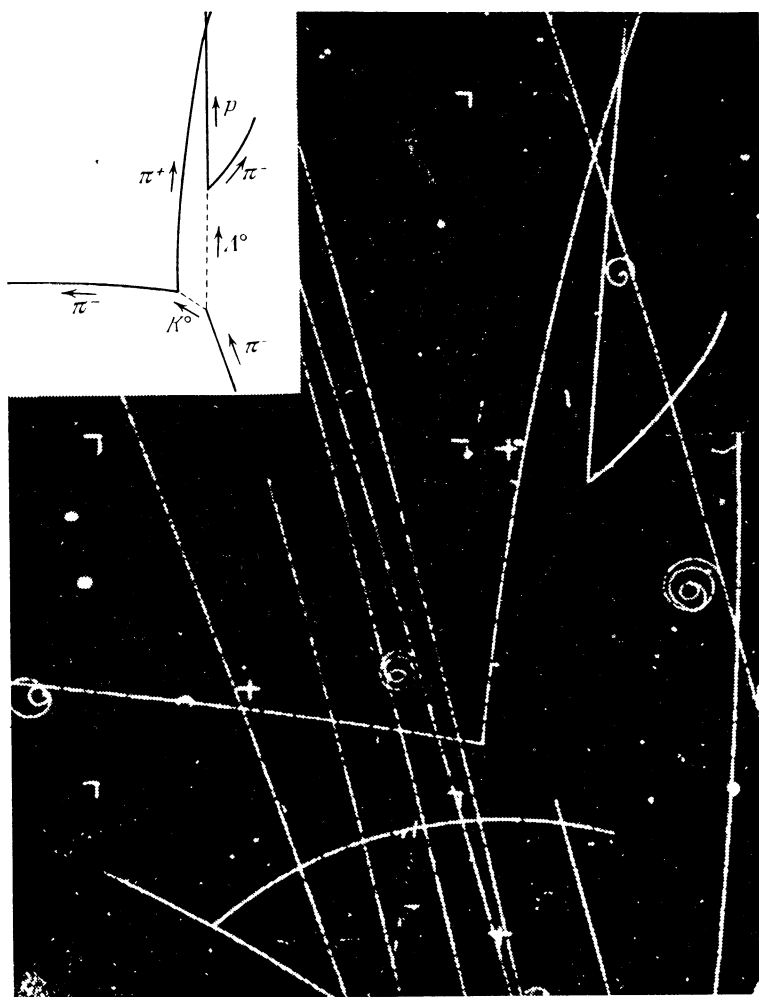


Рис. 1. Распад π -элементарных частиц в процессе слабого взаимодействия, зарегистрированный в пузырьковой камере. В камеру входит отрицательный пи-мезон (π^-) высокой энергии, полученной на бэватрофе. Он сталкивается с протоном жидкого водорода. При столкновении рождаются нейтральный K -мезон (K^0) и лямбда-частица (Λ^0). Не обладая зарядом, эти частицы не оставляют следов. Нейтральный K -мезон распадается на отрицательный пи-мезон и положительный пи-мезон, а лямбда-частица — на протон (p) и отрицательный пи-мезон.

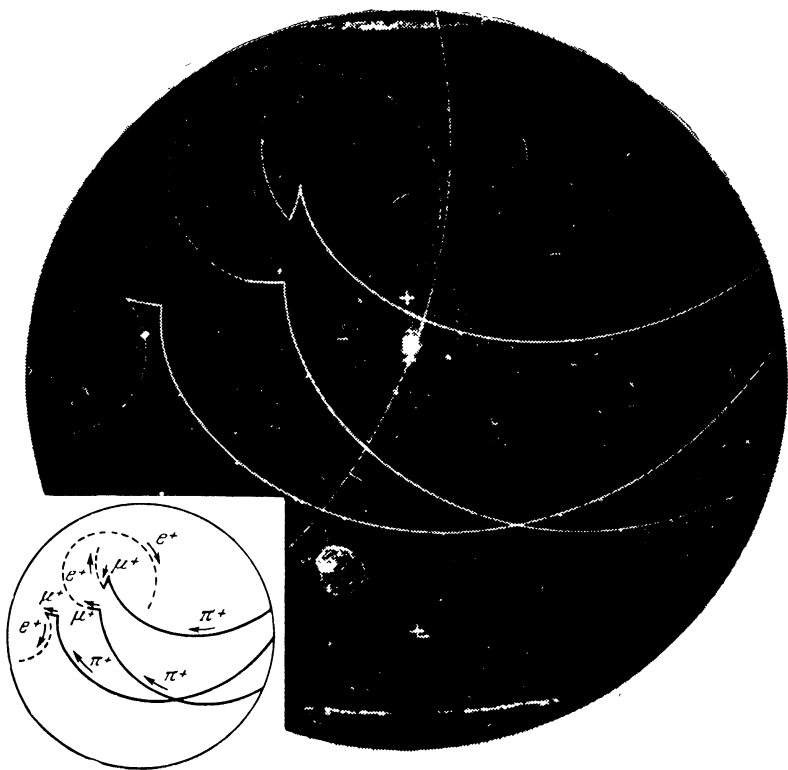


Рис. II. Распад π - и μ -мезонов в пузырьковой камере. Каждый из трех положительных π -мезонов распадается на положительный мюон и нейтрино. Нейтрино трека не оставляет. Мюоны же регистрируются в виде коротких треков. Далее каждый из мюонов распадается на позитрон, нейтрино и антинейтрино. След оставляет только позитрон.

спин $I = \frac{1}{2}$, мультиплету из трех частиц (например, триплету π -мезонов) — изотопический спин $I=1$, мультиплету из четырех частиц (квартету) — изотопический спин $I = \frac{3}{2}$ и т. д. Таким образом, если в зарядовый мультиплет входит n частиц, то ему приписывается изотопический спин

$$I = \frac{1}{2} (n - 1).$$

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 $\frac{1}{2}$ в единицах \hbar , то возможны две его ориентации. Проекция спина на любое направление принимает значения $+\frac{\hbar}{2}$ и $-\frac{\hbar}{2}$. Электрон и другие частицы с тем же спином могут находиться в двух различных спиновых состояниях.

Точно так же изотопическому спину $I = \frac{1}{2}$ 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 $I_z = +\frac{1}{2}$, а нейтрону $-I_z = -\frac{1}{2}$. Правда, речь идет уже о проекциях на координатную ось не обычного пространства, а некоего формального изотопического пространства. Не будем, впрочем, во все это углубляться. Суть аналогии между изотопическим спином и обычным спином, надо надеяться, достаточно 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. 8).

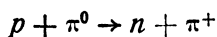
Все эти сведения можно суммировать в одной таблице.

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^+	3	1	+1	+1
π^0			0	0
π^-			-1	-1

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 проекция. 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 изотопического спина остается неизменным во всех процессах, всех превращениях элементарных частиц, вызванных сильными взаимодействиями. Надо только иметь в виду, что изотопический спин — это вектор и суммарный изотопический спин есть векторная сумма слагаемых, относящихся к разным частицам. Неизменной остается длина вектора полного изотопического спина.

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

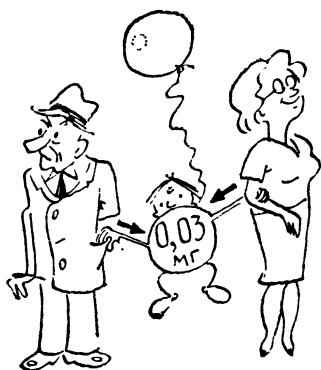
них останавливаться. Физически сохранение изотопического спина означает зарядовую независимость сильных взаимодействий и ничего больше. Закон сохранения изотопического спина — это единственный закон сохранения, выполняющийся только при сильных взаимодействиях. Другие взаимодействия, например электромагнитные, 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 же у обоих людей число электронов оказалось бы всего лишь на 1% больше числа протонов, то, как отмечает Р. Фейнман, сила электростатического взаимодействия 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 кор-



Два человека среднего веса при расстоянии между ними в один метр притягиваются с силой около трех сотых миллиграмма.

пускулярными 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 превра-

щению гравитонов в другие частицы не было проведено. Слишком уж слабым является взаимодействие гравитонов (если они есть) с остальными элементарными 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 о них не будем говорить в дальнейшем.

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 связано выделение в больших объемах вещества 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 (ис-

ключение 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, его потенциальная энергия уменьшается и кинетическая энергия растет. Звезда разогревается и вследствие этого все более интенсивно излучает электромагнитные волны. Но, несмотря на потерю энергии на излучение, температура ее продолжает расти. Так продолжается до тех пор, пока температура не достигает нескольких 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 незначительно 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 белых карликов громадна: 10^8 г/см^3 ! 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. Расстояния между частицами в этом случае уменьшаются столь значительно, а температура становится настолько высо-

кой, 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/см^3 . Это плотность вещества в ядре. Дальнейшая эволюция такой звезды может протекать следующим образом. Звезда, как правило, вращается, и при сжатии скорость ее вращения увеличивается. Если звезда не вполне симметрична, то со временем ее асимметрия увеличивается и звезда может распасться на несколько быстро вращающихся осколков. Период вращения осколков равен нескольким миллисекундам.

Излучение асимметричной звезды до ее распада будет в любом заданном направлении пульсировать с частотой, равной частоте ее вращения вокруг оси (рис. 9). Такие звезды поэтому получили название пульсаров. Они были открыты совсем недавно. На первых порах излучение пульсаров даже принимали за сигналы внеземных цивилизаций. Период пульсации излучения имеет величину порядка одной секунды.

Если же разрушения звезды не произойдет, то она будет неограниченно сжиматься. Когда ее радиус достигнет критического размера $R_k = \frac{2M\gamma}{c^2}$ (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. Огромная потенциальная энергия частицы в поле тя-

¹ Коллапс — значит «упавший».

готения станет равной по абсолютной величине положительной энергии покоя m_0c^2 . Полная энергия обратится в нуль. А это ведь означает, что рождение новых частиц не будет ограничиваться законом сохранения энергии. Пока такие звезды не обнаружены.

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 не мало, скорее наоборот, очень много.

К подобным процессам относится, в частности, распад нейтрона:

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

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} сек

вместо 10^{-23} сек 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} сек. Это — виртуальный процесс, такой же, как испускание 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.

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. 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 не существенна. Лишь нейтрино ни к каким взаимодействиям, кроме слабых, не способны (за исключением, конечно, ультраслабых — гравитационных). Поэтому все реакции, в которых происходит рождение или уничтожение нейтрино, наверняка вызваны слабыми взаимодействиями.

«Быстрые» и «медленные» лучше, чем «слабые» и «сильные». Названия взаимодействий — «слабые» и «сильные» — удачны, но все же в определенном смысле они не вполне оправданны.

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.

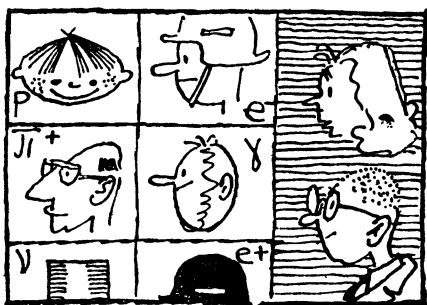
Все дело в том, что последствия слабых взаимодействий проявляются очень редко. В этом смысле они скорее медленные, чем слабые, и напоминают тяжелоатлета, способного поднять огромную штангу, но только очень и очень медленно.

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

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.

ГЛАВА ПЯТАЯ,

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} сек).

Конечно, цифра 35 не может считаться окончательной. Об одном кандидате — гравитоне уже упоминалось. Есть еще несколько достойных и солидных кандидатов.

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.

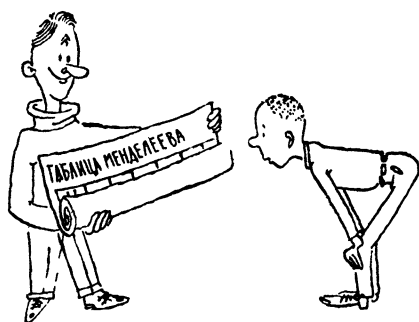
Аналогичный принцип был положен в свое время Менделеевым в основу систематики атомов. Потом оказалось, что основной величиной при построении периодической системы элементов является заряд атомного ядра, а не масса атома. Лишь из-за того, что масса ядра, как правило, растёт с увеличением его заряда, Менделеев 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 классифика-



Аналогичный принцип был положен в свое время Менделеевым в основу систематики атомов.

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

ТАБЛИЦА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

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

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

Барыоны

ции по типам взаимодействий. Вернее, по той роли, которую играют частицы во взаимодействиях, или по их способности к различным взаимодействиям.

Впрочем, довольно слов. Таблица элементарных частиц перед вами (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.

Фотон. Таблица открывается сверхлегкой частицей — фотоном. Фотон, оставаясь в одиночестве, сам образует целую группу.

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 электронных масс (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 материи известна всем. Они составляют 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 полуцелый 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 обосновать¹.

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

Самая тяжелая частица этой группы η^0 -мезон (этаноль-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.

¹ Почему число лептонов равно 8, пока не выяснено.

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-ноль). 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 — образуют зарядовые дублеты: Ξ^- , Ξ^0 и $\bar{\Xi}^-$, $\bar{\Xi}^0$.

У всех перечисленных частиц спин равен $\frac{\hbar}{2}$.

Замыкает всю группу барионов Ω^- -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 в самом деле элементарны. Очень сложная структура элементарных частиц характеризовалась бы большим числом параметров.

О временах жизни частиц. Из 35 частиц только 9 частиц (два сорта нейтрино, электрон, протон, их античасти-

¹ Термин «адроны» был предложен советским физиком Окунем. Он создан на основе английского слова *hard*, что означает тяжелый или сильный (тяжелые частицы как раз являются сильно взаимодействующими). В результате перестановки букв (для благозвучия) появился термин «адроны».

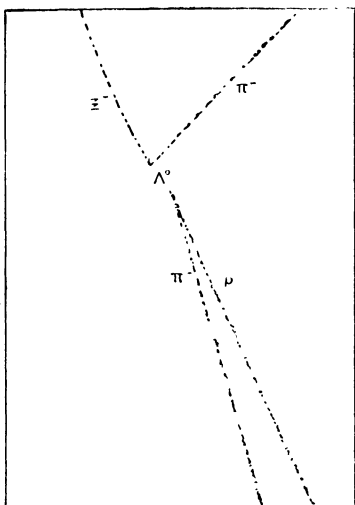
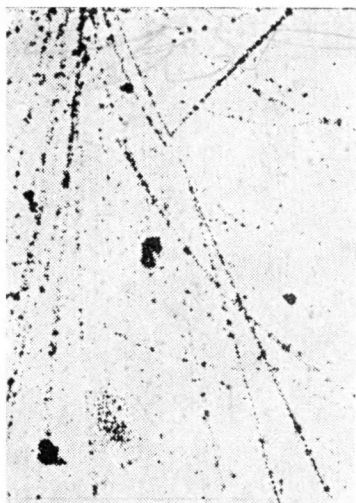


Рис. III. Пример распада странных частиц. Отрицательная Σ -частица распадается на нейтральную Λ^0 -частицу и отрицательный пион. Λ^0 -частица распадается затем на протон и второй отрицательный пион.

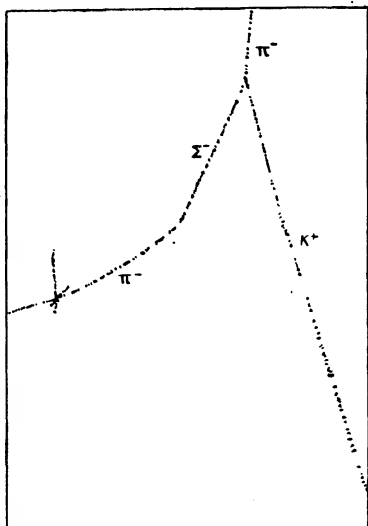


Рис. IV. Совместное рождение странных частиц. Σ^- и K^+ -частицы образовались одновременно, когда пион ударил по протону в пузырьковой камере. Далее Σ^- -частица распалась на пион и невидимый нейтрон.

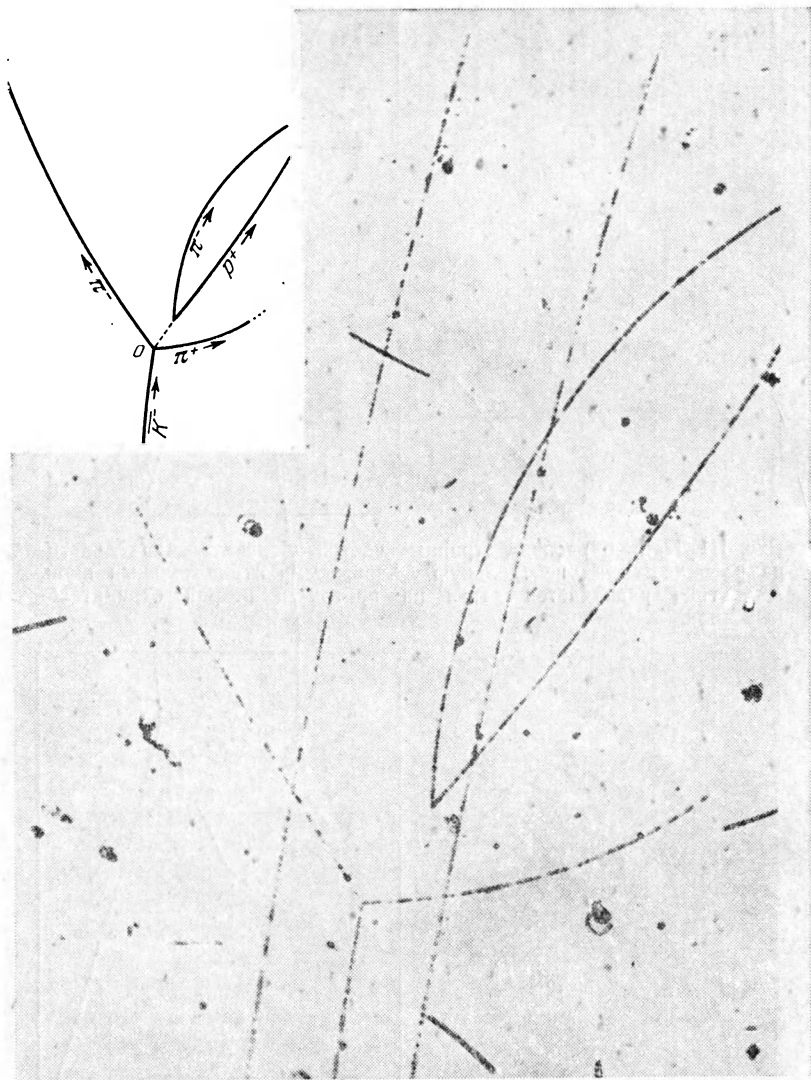


Рис. V. В пузырьковой камере при соударении отрицательного K -мезона с протоном в точке O образуются резонансная Y^* -частица и отрицательный пион (π^-). Резонансная частица распадается, прежде чем она сможет оставить трек, на нейтральную Λ^0 -частицу, тоже не оставляющую трека (пунктир на схеме), и положительный пион (π^+). Λ^0 -частица, в свою очередь, распадается на протон и отрицательный пион (π^-).

цы и фотон) стабильны. Все остальные распадаются 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 $\bar{\Sigma}^0$ -гиперонов; оно составляет всего 10^{-17} — 10^{-14} сек. 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} сек, 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 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 17 мин для нейтрона (это уже сравнимо с временем жизни бабочки-однодневки) до 10^{-10} сек 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.

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

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.

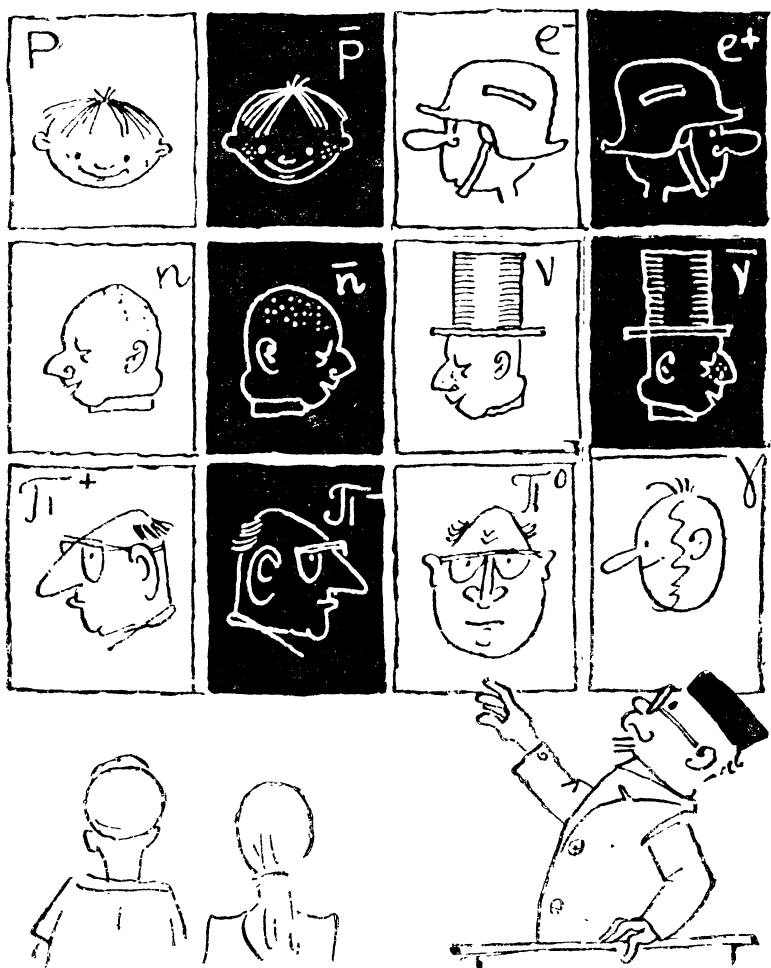
Но без фотонов атомы распались бы на электроны и ядра, а π -мезоны необходимы для устойчивости ядер. Поэтому к указанным выше шести частицам надо добавить еще 4 частицы-переносчика взаимодействий.

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.

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



Для физического объяснения мира достаточно дюжины частиц.

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.

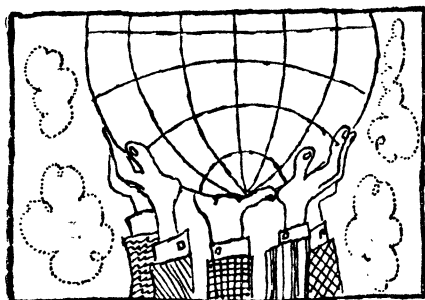
При больших энергиях столкновения частиц приводят к рождению π -мезонов и других частиц (μ -мезоны возникают в основном при распаде π -мезонов). Можно представить себе мир, в котором увеличение энергии сталкивающихся частиц приводит лишь к увеличению числа рождающихся π -мезонов. Природа избрала другой 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.

ГЛАВА ШЕСТАЯ,

*из которой станет ясно, что мир держится
на законах сох-
ранения*



*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 только такие 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 те-

перь 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 не стабильно. 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 распадается 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 маловероя-

тен. Лишь при сверхплотных состояниях вещества обратные процессы происходят столь же часто, как и прямые. В недрах тяжелых звезд это, вероятно, 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. Понски 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

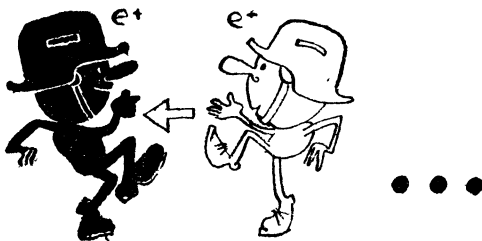
процесса. Но роль этих законов не сводится лишь к тому, чтобы указать, какие процессы невозможны. Законами сохранения объясняются до крайности просто очень многие особенности процессов.

Законы сохранения незаменимы, когда исследователь начинает проникать во вновь открытую сферу неизвестного. 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 надеждой, 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 законы сохранения импульса и 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.



Электрон медленно приблизился к позитрону...

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 полного импульса, 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. Наряду с собственным моментом импульса она имеет и орбитальный момент.

Если внешние силы не создают момента сил, то полный момент количества движения системы сохраняется.



...Произошла аннигиляция, и в противоположные стороны полетели два фотона.

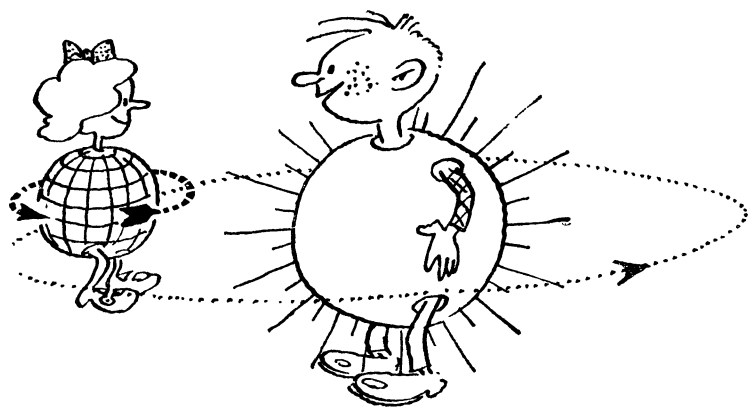
Чтобы изменить положение в пространстве оси тяжелого быстро вращающегося волчка, нужно применить силу.

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.



Земля совершает за сутки один оборот вокруг своей оси и, кроме того, за год — один оборот по орбите вокруг Солнца.

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. Объяснение 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 разнообразны 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.

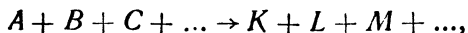
Если всем лептонам приписать лептонный заряд $+1$, а всем антилептонам — заряд -1 , то в различных реакциях алгебраическая сумма лептонных зарядов должна оставаться неизменной.

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.

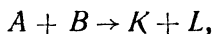
Об одном из них уже говорилось. Это обратимость всех реакций. Если протекает реакция



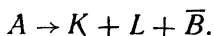
то возможна и обратная реакция



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



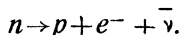
то возможна также реакция



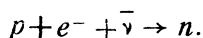
В этом нет ничего неожиданного. При такой перестановке ни один закон сохранения заведомо не нарушается. Действительно, операция переноса частицы из одной стороны уравнения в другую равноценна прибавлению к обеим сторонам уравнения одинаковых частиц, являющихся античастицами по отношению к одному из компонентов 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 ноль, 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:

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

Протон поглощает антинейтрино и превращается в нейтрон и позитрон. Именно эта реакция и дала возможность впервые экспериментально обнаружить антинейтрино.

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:

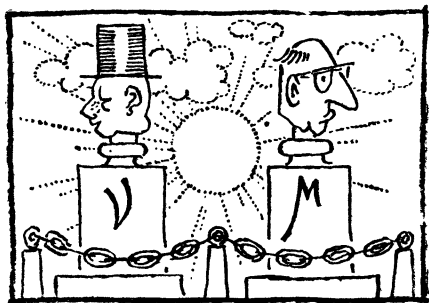
$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma,$$

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.».

ГЛАВА СЕДЬМАЯ,

в которой рассказывается об одной из самых примечательных частиц—нейтринно и одной из самых непонятных частиц— μ -мезоне



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

АНТУАН ДЕ СЕНТ-ЭКЗЮПЕРИ
«МАЛЕНЬКИЙ ПРИНЦ»

Немного истории. Новое слово *нейтринно* впервые появилось на страницах научных журналов около 30 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 открывать 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 завуалированный 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 далеко 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 в плотной стене, толщина которой превысила бы в 10 раз размеры нашей Галактики, нейтрино поглощалось бы 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 миллионных долей секунды) захватывается ядром кадмия, который специально добавляется к воде из-за его способности сильно поглощать нейтроны. После этого ядро кадмия излучает несколько гамма-квантов, сигнализируя тем самым о появлении нейтрона. По возникновению двух разлетающихся в разные стороны гамма-квантов, а спустя небольшой промежуток времени

еще нескольких было установлено существование анти-нейтрино с той степенью очевидности, какая только возможна в мире элементарных частиц. Не очень наглядно, правда, зато совершенно бесспорно.

Самая удивительная частица. Роль нейтрино не сводится только к объяснению распада нейтрона. Превращения 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:

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu.$$

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 лишь 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. II):

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

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 око-

ло 10^{-6} сек), не принципиально. Просто мюону есть на что распадаться 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. 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

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

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 анти-

нейтрино 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 разогнались в ускорителе до энергий порядка 15 млрд. эв. Пучок протонов бомбардировал мишень из бериллия, а в ней уже 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 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 (рис. 10). 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 несшимся 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. 11). 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,

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

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 античастицам — 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 зарядов, 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

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

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

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

Нейтрино и зеркальная симметрия мира. Введение нейтрино «спасло» законы сохранения энергии и других механических величин. Но оно же разрушило другой очень важный принцип.

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.

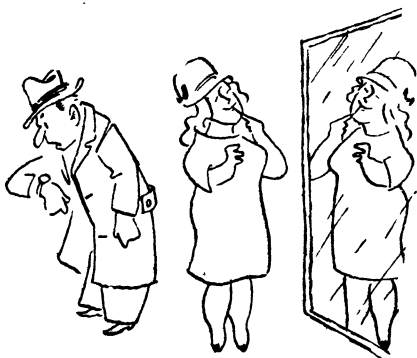
Правда, в органическом мире, как хорошо известно, зеркальная симметрия отсутствует. Так, например, сердце человека находится слева. Однако подобные факты можно объяснить случайными обстоятельствами, имевшими место на начальной стадии развития жизни на Земле. Нисколько не противоречит фундаментальным законам природы существование организмов, являющихся зер-

кальными 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 предполагал 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».

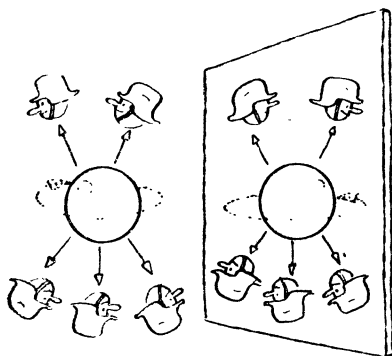


При зеркальном отражении правое заменяется левым и наоборот.

До некоторой степени это вскоре было выяснено и оказалось связанным с новыми несбычными 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 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 сильно магнитном поле). И пусть большинство электронов вылетает вниз. Тогда при зеркальном отражении всей картины направление вращения ядер изменится на обратное, а направление преимущественного испускания электронов остается 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 ней-

трино, в отличие от электронов, имеет спин, направленный в ту же сторону, что и спин ядра. При β -распаде нейтрино вылетает в противоположном направлении от электрона. Таким образом, при β -распаде нейтрино вылетает вверх, а электрон — вниз. При зеркальном отражении направление вращения ядра меняется на обратное, но направление вылета нейтрино остается тем же. Таким образом, направление вылета электронов также остается тем же. Налицо нарушение зеркальной симметрии.

трино — 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.

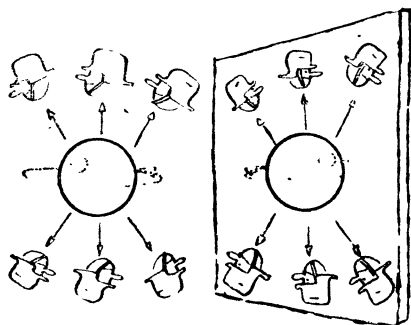
Впоследствии было обнаружено нарушение зеркальной симметрии при распаде π - и μ -мезонов. Здесь также появляются нейтрино и они-то своей закрученностью вызывают отступление от сохранения четности.

Однако далеко не все еще стало понятным. 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, причина этих отступлений не ясна.

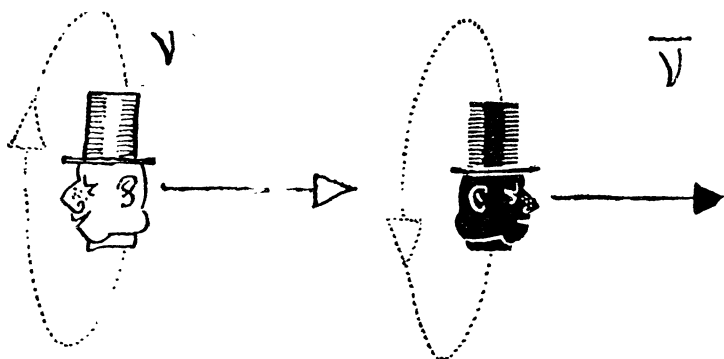
Зарядовое сопряжение. Величайшая асимметрия нашего мира с точки зрения физики элементарных частиц состоит в том, что весь он построен из частиц. Античастицы сравнительно редкие гости. А ведь согласно фундамен-

тальным законам природы они имеют равные с частицами права на существование. Антипротоны и антинейтроны могут образовывать 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



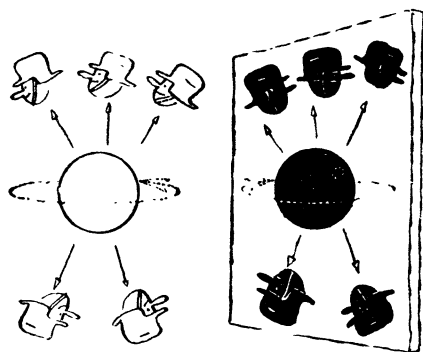
Нарушения зеркальной симметрии не было бы, если бы электроны выпускались вверх и вниз с равной вероятностью.



Антинейтрино образует правый винт с направлением движения, а нейтрино — левый.

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.



Зеркальное изображение любого процесса в природе также является возможным процессом, если только все частицы заменить античастицами.

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 зеркальном 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 ассиметрии (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.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ,

в которой рассказывается о частицах не без основания называемых странными, а также сообщаются дополнительные сведения о слабых взаимодействиях



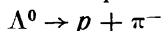
Не существует истинно прекрасного без некоторой доли странности.

ФРЕНСИС БЭКОН

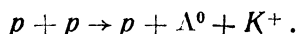
Новые частицы появляются только парами. Начиная с 1947 г. таблица элементарных частиц начала стремительно пополняться новыми видами. Произошло это совсем не потому, что ученые стали лучше понимать повадки частиц и поэтому охота за ними стала более успешной. Просто были построены более мощные ускорители 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 K -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 продук-

ты их распада, несущие электрические заряды (рис. III):



Вскоре была отмечена странная особенность вновь открытых частиц: они рождаются только парами или еще большими группами (рис. IV). Физики давно привыкли к тому, 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 одни 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 механические законы сохранения, 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} сек) в сравнении с временем жизни, которое должно было бы быть, если бы распад был вызван сильными взаимодействиями (10^{-22} — 10^{-23} сек). Случись такое удлинение жизни у человека, его возраст превосходил бы возраст солнечной системы. Сильные и электромагнитные взаимодействия могут рождать 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 взаимодействия — 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 называли 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 ученым 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^- , \bar{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 столкновении странных 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:

$$p + p \rightarrow \Xi^0 + p + K^0 + K^+.$$

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 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

$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$$

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:

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

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 от-

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.

ношению 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 совершенно 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 огразить 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 интенсивности¹:

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

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

Различаются K_L^0 - и K_S^0 -мезоны именно комбинированной четностью: у K_L^0 -частицы она положительна, а у K_S^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 трех π -мезонов отрицательна. Комбинированная четность должна при слабых взаимодействиях сохраняться.

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

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

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

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

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_L^0 - и K_S^0 -частиц. K_L^0 -мезоны быстро распадаются, и на расстоянии в несколько метров от мишени останутся только K_S^0 -мезоны. Теперь учтем, что K_S^0 -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 K^0 прореагирует с протонами. Значит, пропорция между K^0 и \bar{K}^0 , при которой они давали чистые K_S^0 -мезоны, будет нарушена. Следовательно, появятся K_L^0 -мезоны и можно будет опять наблюдать распады на два π -мезона (рис. 12).

Необычно здесь все до крайности. В макром мире 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 -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_L^0 -мезонов не могло быть. На два π -мезона распадались, следовательно, K_S^0 -мезоны. А это означает ни мало, ни много, как *нарушение комбинированной четности в слабых взаимодействиях*.

ях. 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 девяти лет, но пока окончательно ничего выяснить не удалось.

Универсальность слабых взаимодействий. Жизнь странных частиц прекращается слабыми взаимодействиями. Без них эти частицы были бы не менее стабильными, чем электроны и протоны.

Уже говорилось, что слабые взаимодействия универсальны, присущи всем частицам. Но они 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 взаимодействий, 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 только в последнее время.

В слабых взаимодействиях согласно современным представлениям всегда участвуют четыре частицы с полуцелым спином $\frac{\hbar}{2}$, 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. Нужно только, чтобы

каждая пара взаимодействующих фермионов содержала одну заряженную и одну нейтральную частицу. Лептоны группируются в свои пары (электрон — электронное нейтрино, μ -мезон — мюонное нейтрино), а барионы в свои. Но в каждой такой паре слабое взаимодействие одно и то же.

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:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu.$$

Здесь непосредственно участвует только два фермиона: μ^+ и ν_μ . Тем не менее и эта реакция вызвана 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:

$$\begin{array}{c} \text{Слабое четырехфермионное} \\ \text{взаимодействие} \\ \hline \pi^+ \rightarrow p + \bar{n} \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \hline \text{Сильное} \\ \text{взаимодействие} \end{array}$$

Промежуточная стадия этой реакции не наблюдается и поэтому четырехфермионный характер взаимодействия оказывается замаскированным. Сходным образом обстоит дело и при других реакциях.

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 современной 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 взаимодействие между парами фермионов осуществляется с

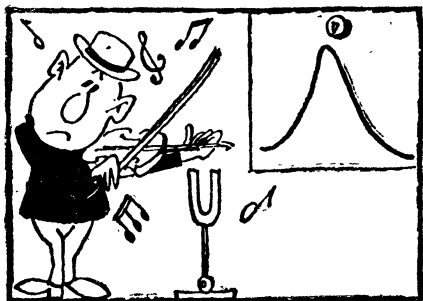
помощью особых частиц, названных промежуточными бозонами. Бозоны — это частицы, имеющие целые спины (в единицах \hbar). Как вытекает из теории, в частности из законов сохранения, бозоны должны иметь электрический заряд. Масса их должна превышать массу K -мезонов, так как иначе K -мезоны могли бы распадаться с испусканием промежуточного бозона и γ -кванта. В действительности же это не наблюдается.

Как и другие частицы, промежуточный бозон не может быть стабильным. Время его жизни должно составить около 10^{-17} сек. 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.

Пока эти частицы не обнаружены, хотя попытки найти их уже предпринимались. Мы знаем об этой частице очень много. Не знаем лишь главного: существует ли она вообще.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ,

самая короткая, посвящается самым короткоживущим частицам



Сколько их, куда их гонят?

А. С. ПУШКИН
«БЕСЫ»

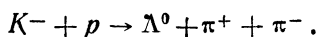
Самые короткоживущие. Наряду с 35 довольно долго живущими частицами есть еще образования, живущие столь мало, что их обычно не решаются называть элементарными частицами. Это резонансы. Термин «резонанс» говорит скорее не о природе частиц, а о способе их обнаружения. Число резонансов огромно. Уже сейчас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

Весьма примечателен способ, с помощью которого они были открыты. Живут резонансы 10^{-22} — 10^{-23} сек. 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. V):



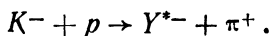
Было получено несколько сотен фотографий треков участвующих в этой реакции частиц. Затем с помощью вычислительной машины была подсчитана зависимость числа рожденных π^+ - и π^- -мезонов от их энергии.

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

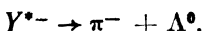
В действительности оказалось, что кривая зависимости числа рожденных пионов от энергии имела резкий максимум (рис. 13). Большая часть мезонов рождалась с вполне определенной энергией.

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.

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:

$$\Delta t \sim \frac{h}{\Delta E}.$$

Зная ΔE , находим время жизни резонанса Y^{*-} . Оно, оказывается, имеет величину порядка 10^{-23} сек.

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 единице².

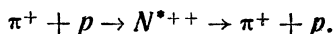
Типы резонансов. Y^{*-} -резонансы — это не первые из обнаруженных образований такого рода. Еще в 1952 г. Энрико Ферми обнаружил резонанс при рассеянии пионов на нуклонах. Вероятность рассеяния, в частности положительных пионов, на протонах резко возрастает при энергии пионного пучка в 195 млн. эв (рис. 14).

Форма кривой очень напоминает зависимость амплитуды обычных вынужденных механических колебаний от частоты. Эта аналогия и послужила основой для наименования короткоживущих частиц резонансами.

¹ В некотором числе случаев рождаются сразу три частицы. Именно поэтому имеются мезоны с различными энергиями.

² Эти три резонанса часто обозначают символами Σ^{*-} , Σ^{*0} , Σ^{*+} .

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:

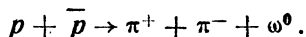


По ширине резонансной кривой определяется время жизни частицы N^{*++} . Оно также имеет величину порядка 10^{-23} сек.

Резонанс N^{*++} несет двойной электрический заряд. При исследовании рассеяния π -мезонов на нуклонах были обнаружены еще три резонанса: N^{*-} , N^{*0} и N^{*+} . Все четыре N -резонанса¹ 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} сек 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 большей 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.

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

¹ Их обозначают также символами. Δ^{++} , Δ^- , Δ^0 и Δ^+ .

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.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ,

в которой рассказывается о систематике сильно взаимодействующих частиц, а также о том, что такое кварк



Три кварка мистеру Марку.

ДЖОНС
«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, $\frac{\hbar}{2}$ у барионов и антибарионов. Различные значения у всех

трех групп имеет барионный заряд¹. Общий спин и одинаковый барионный заряд — это то общее, что объединяет частицы в группах². Разность масс у частиц одной группы не так уж велика (особенно между соседними зарядовыми мультиплетами).

Напрашивается мысль: каждую группу рассматривать как нечто единое, как некий супермультиплет, 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 — значения странности, то получатся любопытные фигуры правильной геометрической формы (рис. 15). 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 $\frac{3}{2}$ 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 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 усеченная трапеция, которая превратилась бы в треугольник, поставленный на вершину, если бы су-

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.

ществовала частица со странностью —3, спином $\frac{3}{2}$ и барионным числом +1 (рис. 16).

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, общий 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 две сотни 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 загадоч-

ный, 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 . Необычайность кварков в том, что они имеют дробные электрические и барионные заряды. В таблице приведены значения зарядов и странностей кварков.

Символ кварка	Электрический заряд	Странность	Барионный заряд
p	$+\frac{2}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
n	$-\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
λ	$-\frac{1}{3}$	-1	$\frac{1}{3}$

Спин всех трех кварков равен $\frac{\hbar}{2}$, так как только из частиц с полуцелым спином можно составить 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 $\frac{3}{2}$. 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:

$$\begin{array}{ccccccc}
 ppp & & ppn & & pnp & & nnn \\
 & pp\lambda & & pn\lambda & & nn\lambda & \\
 & & p\lambda\lambda & & n\lambda\lambda & & \\
 & & & \lambda\lambda\lambda & & &
 \end{array}$$

Все эти комбинации имеют целые заряды и различные странности.

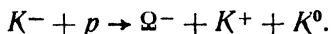
В комбинациях, заполняющих первые три строки, легко увидеть уже рассмотренные Δ -, Σ^* - и Ξ^* -резонансы. Но есть и нечто новое. Это — символ $\lambda\lambda\lambda$. Что это такое? Новая частица, разумеется!

Давайте предскажем свойства $\lambda\lambda\lambda$ -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.

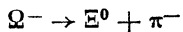
Зная массу Ξ^* -резонансов, можно предсказать, что масса $\lambda\lambda\lambda$ -частицы должна равняться 1676 млн. эв.

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} сек, а несравненно больше. Распад происходит по схеме



за время 10^{-8} сек. 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.

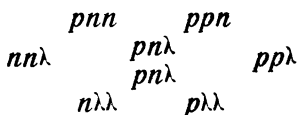
Барионы с их полуцелым спином могут быть построены не менее, чем из трех кварков, как и барионные резонансы.

Получить спин $\frac{\hbar}{2}$ 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 нулю. 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. Все комбинации кварков, образующие барионы, можно расположить в виде шестиугольной схемы:



Легко сопоставить каждой комбинации кварков определенный барион. Всего приведено как раз 8 комбинаций. Прежде всего обратите внимание на то, что в этой таблице отсутствуют комбинации из трех одинаковых кварков. Три одинаковых кварка, как следует из квантовой механики, обязаны иметь параллельные спины и поэтому могли бы образовывать только резонансы со спином $3/2$.

Далее, Λ^0 - и Σ^0 -гипероны представлены одинаковой комбинацией кварков $p n \lambda$. Две различные частицы полу-

чаются 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 шестигугольную схему.

$$\begin{array}{ccc} p\bar{\lambda} & & n\bar{\lambda} \\ p\bar{r} & (p\bar{r}, & n\bar{n}, & \lambda\bar{\lambda}) & r\bar{n} \\ & \lambda\bar{p} & & \lambda\bar{n} \end{array}$$

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 шестигугольника) 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 кварки 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 покоя очень велика и мощности современных ускорителей недостаточны.

Сверхмощными ускорителями располагает пока только природа. Отдельные частицы в космических лучах об-

ладают 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 $\frac{1}{3}$ или $\frac{2}{3}$ 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.

Трудности. Надо сказать, что с кварковой моделью сильно взаимодействующих частиц не все обстоит благополучно. То, о чем мы говорили, это статическая модель частиц. Частицы складывались из кварков буквально так же, как ребенок складывает башню из кубиков. Но ведь кварки обязательно движутся, и их движение не может не влиять на свойства образованных ими частиц. Мы же это движение не учитывали.

Да и не можем как следует учесть, так как фактически ничего не известно о силах, связывающих кварки. Можно лишь сказать, что эти силы огромны. Ведь иначе расщепить частицу на кварки ничего бы не стоило. Масса кварка, как полагают, в 7—10 раз превышает массу нуклона. Поэтому при образовании протона из трех кварков должна выделяться огромная энергия, эквивалентная приблизительно 30 массам покоя нуклонов. С таким концентрированным выделением энергии ученые пока не сталкивались. От кварка в нуклоне остается лишь бледная тень. Все его заряды сохраняются, но почти вся масса улетучивается. Это достаточно необычно, но все же не невозможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Что же такое элементарная частица? Этому уже была посвящена вводная глава. Пожалуй, полезно ее теперь прочесть еще раз. Вы знаете несколько больше, и она должна стать более понятной.

Нам сейчас очень много известно об элементарных частицах, об их свойствах и законах поведения. Но общее впечатление после прочтения книги, вероятно, то же, что и после вводной главы. Что такое элементарная частица, неясно. Существуют разные предположения, не всегда хорошо согласующиеся друг с другом. Однако кое-что кажется довольно достоверным. В частности, очень мало вероятно, что все частицы составлены из более элементарных субчастиц. Некоторые, возможно, да, но не все же!

Ни одна попытка определить теоретически спектр масс элементарных частиц не привела к успеху. Уже десятки лет прикладываются усилия в этом направлении. Но решение задачи остается делом будущего. Этого события физики ожидают с напряженным, неослабевающим вниманием.

Остается нерешенным координатный вопрос: все ли открытые частицы элементарны в равной мере? Царит ли полная демократия в мире элементарных частиц, или существуют частицы-аристократы типа кварков, — единственные, имеющие право претендовать на звание элементарных?

Ясно одно: все частицы теснейшим образом связаны друг с другом, и нет ни малейшей надежды досконально понять одну из них, а затем уже начать разбираться во всех остальных. Их можно понять только все сразу.

Связи между элементарными частицами так прочны, что каждая частица может рассматриваться как компози-

ция всех остальных. Возьмем, например, протон. Эта частица окружена облаком виртуальных π - и K -мезонов. Более тяжелые K -мезоны примыкают к сердцевине протона, а на периферии находятся π -мезоны. Значит, π - и K -мезоны структурно входят в протон. Однако не только эти частицы, но и все остальные! Виртуальные фотоны также окружают протон. Эти фотоны могут порождать пары электрон — позитрон, а мезоны — пары нуклон — антинуклон, равно как и пары любых странных гиперонов и резонансов. Значит, все частицы в какой-то мере входят в протонную «шубу» и влияют на свойство протона.

Получается замкнутый круг: свойства одной частицы определяются всеми остальными. Размыкается ли где-нибудь этот круг, имеются ли простейшие частицы, из которых построены все остальные, или же таких частиц нет, пока не знает никто.

Надо сказать, что за последние восемь лет никаких новых важных открытий не было сделано. Экспериментальное открытие двух сортов нейтрино в 1962 г. и открытия 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 провисило бы время жизни резонансов. Не было и больших достижений в теории элементарных частиц.

Выплыло наружу лишь еще одно загадочное обстоятельство, не нашедшее пока объяснения. Согласно теории K_L^0 -мезон может распасться на два μ -мезона с зарядами противоположных знаков. Ни один из известных законов сохранения при этом не нарушается. Но самые тщательные эксперименты дали неожиданный результат: распад не был обнаружен. На миллион случаев распада K_L^0 -мезона не было зарегистрировано ни одного распада на мюоны. Для объяснения этого результата выдвигаются самые разнообразные гипотезы, начиная от предположения о существовании новых неизвестных сил либо новых нейтральных частиц, на которые могут распадаться K_L^0 -мезоны, и кончая допущением, что основы современной теории элементарных частиц несправедливы.

В последние годы наиболее сенсационные открытия были сделаны в астрофизике. Достаточно упомянуть открытие пульсаров (о них говорилось на стр. 70) — быст-

ро вращающихся нейтронных звезд с направленным мощным радиоизлучением.

Ситуация в физике элементарных частиц по-прежнему остается напряженной, и решение ее, хотя бы частичное, не должно заставить себя долго ждать. Что произойдет в будущем? Откроют ли экспериментально какие-либо новые свойства элементарных частиц, способные пролить свет на уже известные факты, или же на основе известных сведений будет построена более или менее цельная теория, сказать сейчас нельзя. Ученые предпринимают усилия в самых различных направлениях. Совершенствуются ускорители элементарных частиц. Не прекращают работу теоретики.

Проблема элементарных частиц оказалась весьма сложной. И если для построения теории атома понадобилось создание квантовой механики, коренным образом изменившей наши представления о законах природы, то, вероятно, еще более радикальные преобразования наших взглядов на природу необходимы для построения более или менее цельной теории элементарных частиц.

ПРИЛОЖЕНИЕ

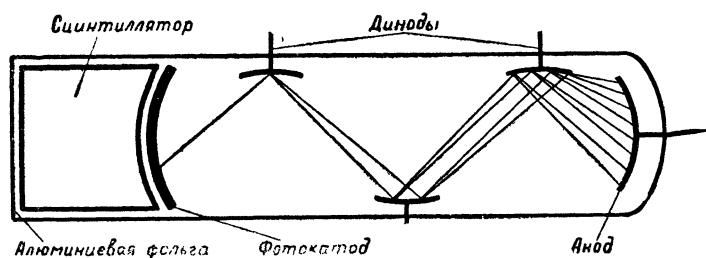


Рис. 1. Сцинтилляционный счетчик.

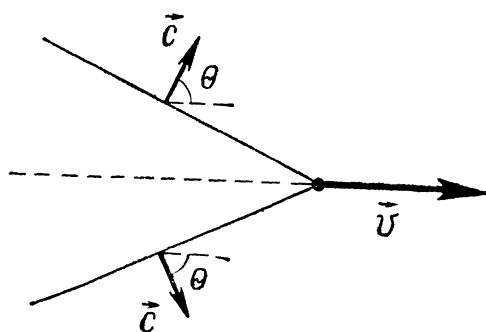


Рис. 2. Фронт световой волны, испускаемой частицей, которая движется со скоростью, превышающей скорость света в данной среде.

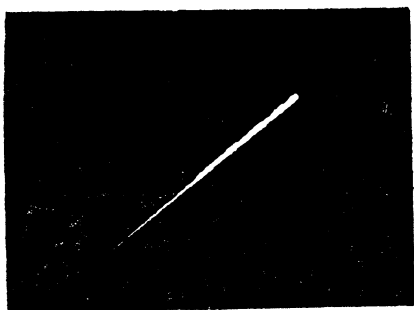


Рис. 3. Трек частицы в широкозазорной искровой камере.

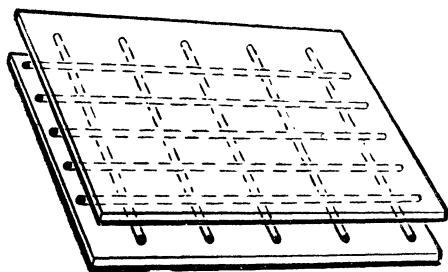


Рис. 4. Схема искровой камеры с проводочными электродами.

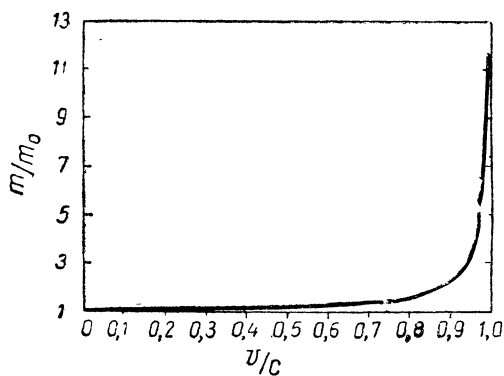


Рис. 5. Возрастание массы движущейся частицы с увеличением скорости ее движения.

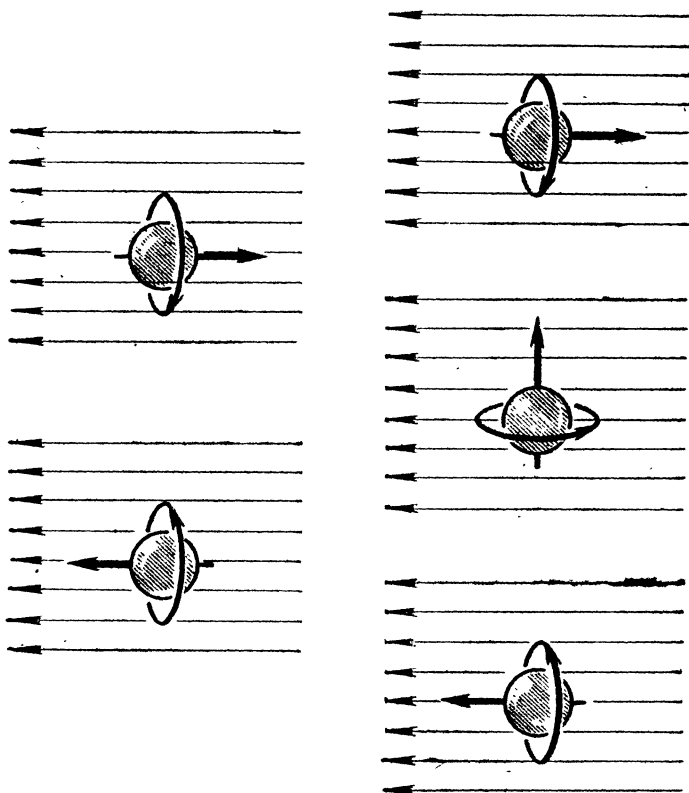


Рис. 6. Вращающаяся частица может принимать только некоторые фиксированные положения по отношению к внешнему магнитному полю. Частицы со спином $1/2$ (вверху) могут располагаться так, чтобы спин был направлен по полю или против поля. Частицы же со спином 1 (внизу) имеют три возможных положения, соответствующие ориентации спина по полю, перпендикулярно полю и против поля.

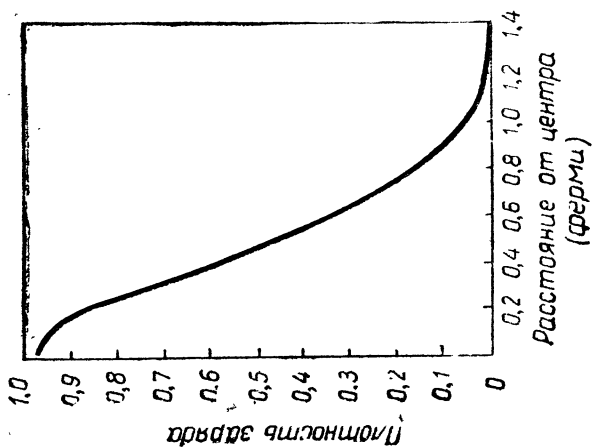


Рис. 7. Изменение плотности заряда протона по мере удаления от его центра ($1 \text{ ф} = 10^{-13} \text{ см}$).

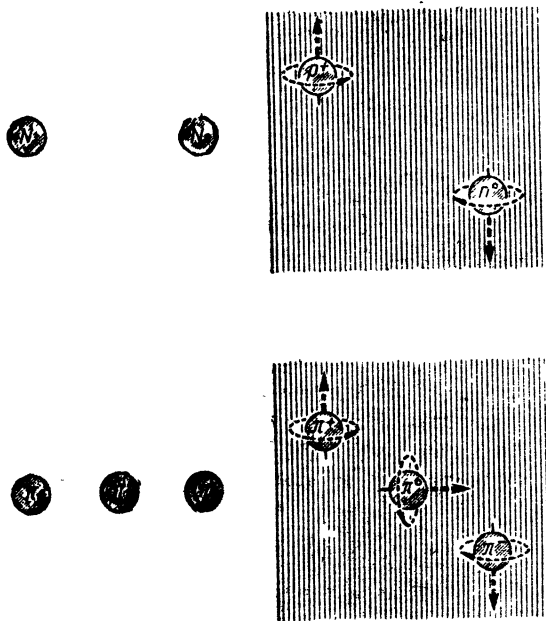


Рис. 8. Разные состояния частицы обнаруживаются только в результате некоторого взаимодействия. В отсутствие электромагнитного взаимодействия все нуклоны, как и все пионы, неразличимы. Если же эти взаимодействия принимаются во внимание, изотопический спин разделяет нуклоны на протоны и нейтроны, а пионы — на три различных типа (по заряду).

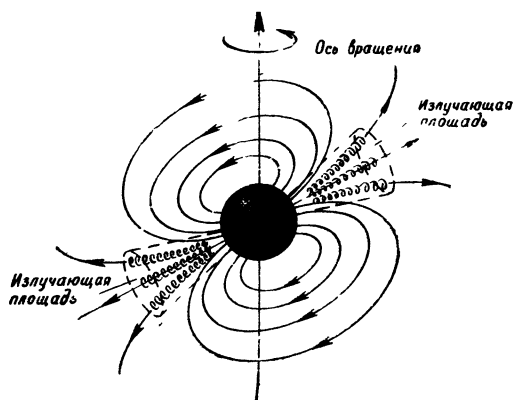


Рис. 9. Одна из возможных схем расположения излучающих областей пульсаров.

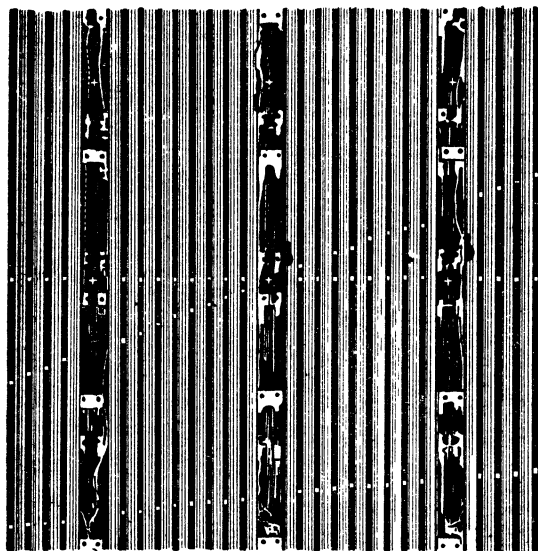


Рис. 10. Следы частиц, порожденных нейтрино в искровой камере.

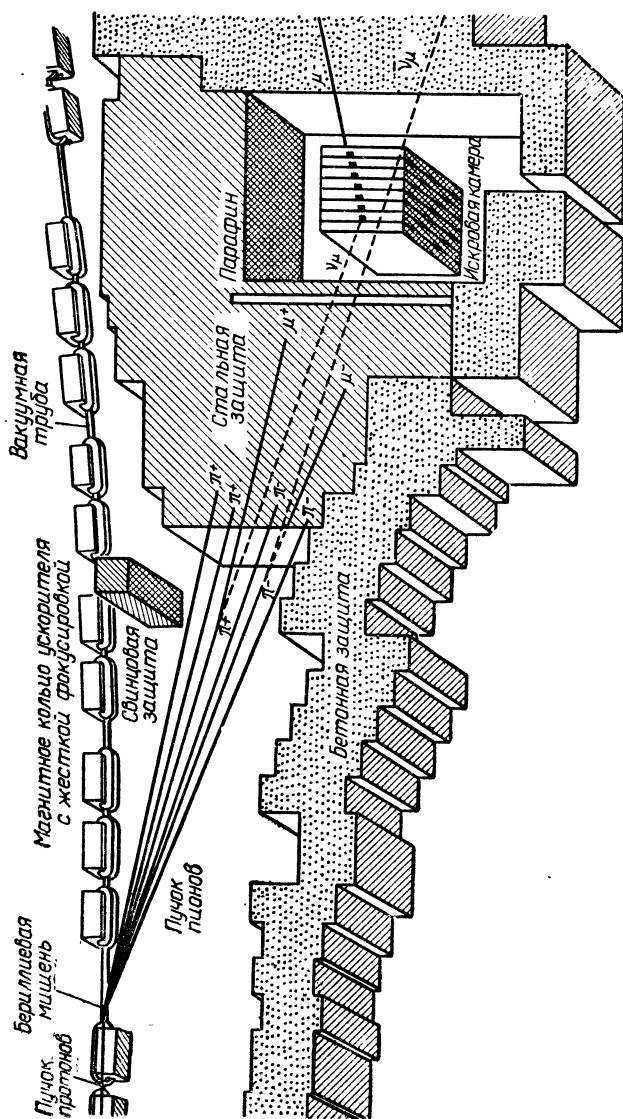


Рис. 11. Схема опыта по обнаружению двух сортов нейтрино. Пучок протонов с энергией 15 млрд. эв направляется в бериллиевую мишень. При соударении с мишенью возникает интенсивный пучок ионов. Около 10% пионов распадалось на мюоны и нейтрино, прежде чем врезаться в стенку из брони толщиной 13,5 м. Пионы и мюоны задерживались этой стенкой. Нейтрино же легко проникали за стенку и попадали в искровую камеру. Камера «запускалась» при появлении мюона (толстый пунктирный трек), возникшего в результате взаимодействия нейтрино или антинейтрино.

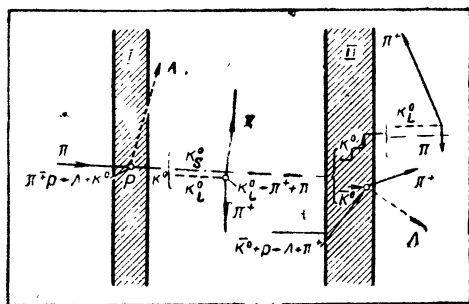


Рис. 12. Схема рождения и распада нейтральных K -мезонов.

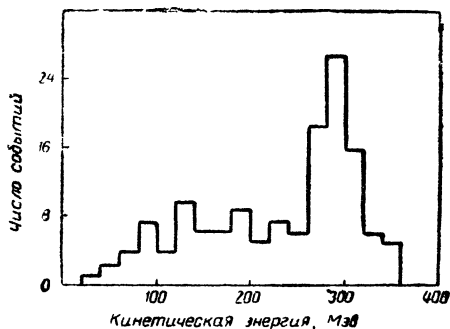


Рис. 13. Обнаружение частицы-резонанса по графику зависимости числа π -мезонов от энергии.

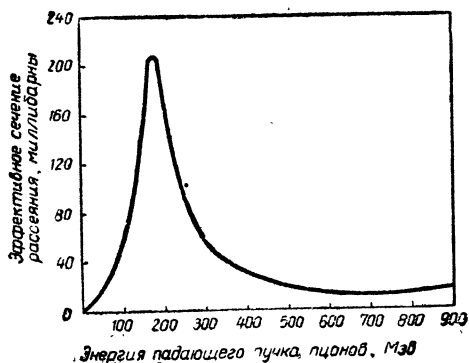
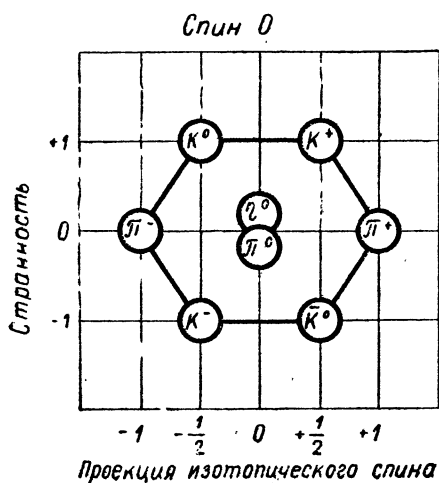
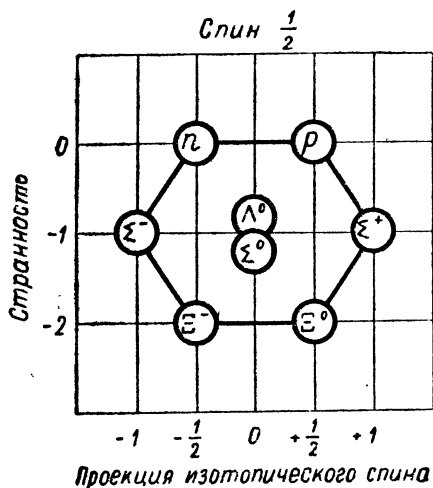


Рис. 14. Пион-протонный резонанс. Эффективное сечение (или вероятность) рассеяния положительного пиона на протонах, измеряемое в миллибарнах, начинает резко возрастать, начиная примерно со 100 Мэв, достигает максимума при 195 Мэв и затем почти так же резко спадает.



Мезонный октет.



Барионный октет.

Рис. 15. Если по горизонтальной оси отложить значения проекции изотопического спина, а по вертикальной — значение странности, то в этой координатной плоскости частицы с данным спином располагаются так, что образуют правильные геометрические фигуры.

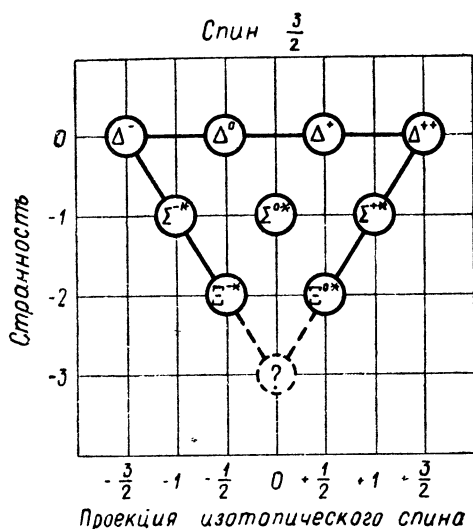


Рис. 16. Резонансы со спином $3/2$ располагались в координатной плоскости «странность — проекция изотопического спина» так, что образовали усеченную трапецию, которая превратилась бы в треугольник, если бы существовала частица со странностью -3 , спином $3/2$ и барионным числом $+1$. Такая частица экспериментально найдена в 1964 г. Это — Ω^- -гиперон.

О Г Л А В Л Е Н И Е

<i>Глава первая</i> , вводная, но очень важная и, быть может, самая трудная	5
<i>Глава вторая</i> , в которой делается попытка взять быка за рога — увидеть элементарные частицы	18
<i>Глава третья</i> , из которой можно усмотреть, что величие идей физики XX века граничит с недоступностью их для понимания	27
<i>Глава четвертая</i> , из которой можно узнать, что заставляет частицы превращаться друг в друга	51
<i>Глава пятая</i> , в которой наконец-то читатель может познакомиться со всеми элементарными частицами сразу	74
<i>Глава шестая</i> , из которой станет ясно, что мир держится на законах сохранения	85
<i>Глава седьмая</i> , в которой рассказывается об одной из самых примечательных частиц — нейтринно и одной из самых непонятных частиц — μ -мезоне	95
<i>Глава восьмая</i> , в которой рассказывается о частицах, не без основания называемых странными, а также сообщаются дополнительные сведения о слабых взаимодействиях	108
<i>Глава девятая</i> , самая короткая, посвящается самым короткоживущим частицам	118
<i>Глава десятая</i> , в которой рассказывается о систематике сильно взаимодействующих частиц, а также о том, что такое кварк	123
<i>Заключение</i>	131
<i>Приложение</i>	134

Геннадий Яковлевич Мякишев
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Редактор *Г. Р. Лисенкер*

Оформление художника

Л. С. Вендрова

Художественный редактор

Т. Н. Алябьева

Технический редактор *В. С. Якунина*

Корректор *Т. А. Кузнецова*

▲10699 Сдано в набор 20/VII 1972 г.
Подписано в печать 28/XI 1973 г. 84×103¹/₃₂.
Типогр. №3 Печ. л. 4,5+вкл. 0,125. Усл.
печ. л. 7,56+вкл. 0,21. Уч.-изд. л. 6,85+
+вкл. 0,22. Тираж 100000 экз. Заказ 2587.
Цена 19 коп.

Издательство «Просвещение»
Государственного комитета
Совета Министров РСФСР по делам
издательств, полиграфии
и книжной торговли.
Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41

Типография № 2 Росглавополиграфпрома,
г. Рыбинск, ул. Чкалова, 8.

19 коп.