

ЕИТИРО НАМБУ
КВАРКИ

**НА ПЕРЕДНЕМ КРАЕ
ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

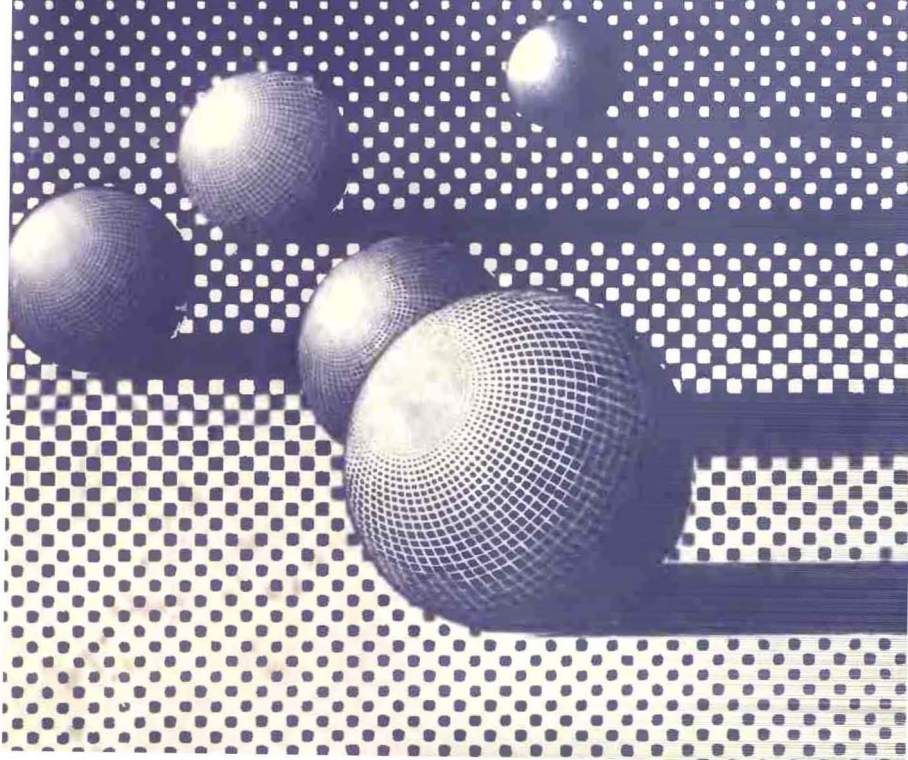
**Перевод с японского
канд. физ.-мат. наук И. И. Иванчика**

**под редакцией
д-ра физ.-мат. наук Р. М. Мир-Касимова**

МОСКВА «МИР» 1984

ЁИТИРО НАМБУ

КВАРКИ



クォーク

素粒子物理の最前線

南部陽一郎 著

ブルーボックス

ББК 22.382
Н 24
УДК 539.12

Намбу Ё.
Н 24 **Кварки. Пер. с японск.—М.: Мир, 1984.—**
225 с., ил.

Научно-популярная книга известного японского физика-теоретика Ё. Намбу рассказывает о современном состоянии физики элементарных частиц и основных этапах ее развития от интуитивного представления об атомах до модели Великого объединения всех видов взаимодействий. Сложные физические идеи объясняются с помощью простых и остроумных аналогий, без применения математического аппарата.

Н $\frac{1704070000-399}{041(01)-84}$ 81—84, ч. 1

ББК 22.382
530.4

Редакция литературы по физике

© Коданся, 1981
© Перевод на русский язык, «Мир», 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

В своем развитии физика стремится найти наиболее общие, основополагающие законы природы. Стремление к этой цели неотделимо от поиска минимальных фундаментальных составляющих материи. Интуитивное убеждение, что такие составляющие существуют и число их невелико, бытовало еще со времен зарождения науки. По мере накопления фактов и знаний росла уверенность, что и силы взаимодействия между элементарными составляющими должны описываться сравнительно просто.

В течение последних ста лет физики обнаружили четыре уровня организации материи. Вначале стало ясно, что все вещество состоит из атомов. Само название (атомос — по-гречески «неделимый») говорит о том, что в то время атомы считались наиболее простыми, бесструктурными элементами материи. Вскоре, однако, выяснилось, что это не так. К концу XIX в. было известно уже около ста химических элементов (т. е. различных атомов). Свойства этих элементов подчинены закономерностям, позволившим систематизировать атомы в соответствии с периодическим законом Менделеева.

Исследования, проведенные в начале нашего столетия, показали, что атомы состоят из тяжелых ядер, занимающих ничтожную часть их объема, и электронов, образующих «облако» вокруг ядра. Особенности структуры этого «облака» (электронные оболочки) и определяют химические свойства атомов, отраженные в периодической системе.

Некоторое время считалось, что ядра в свою очередь состоят из протонов и нейтронов, которые связываются в ядро большими по величине силами с малым радиусом действия. Эти силы обеспечивают устойчивость ядер и не проявляются на атомном и макроскопическом уровнях организации материи. Попытки выяснить внутреннюю структуру

6 ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

протонов и нейтронов вначале привели к открытию большого числа (несколько сотен) родственных им частиц — адронов. Частицы класса адронов (включающего протоны и нейтроны) объединены общностью типа их взаимодействия (о нем говорят как об адронном, или сильном, взаимодействии). Электрон, а также обнаруженные позднее родственные ему частицы — лептоны в сильных взаимодействиях не участвуют.

Наконец, примерно два десятилетия назад физики осознали, что и адроны следует рассматривать как сложные системы, построенные из кварков. Классификация многочисленных адронов как раз и базируется на их кварковой структуре. В последнее время высказывается гипотеза, что кварки и лептоны также не предел и существуют еще более фундаментальные частицы (так называемые протокварки или преоны), из которых они построены.

По мере углубления наших знаний о частицах, естественно, меняются и представления о природе сил, действующих между ними. В настоящее время физики считают, что существует четыре вида сил: гравитационные, электромагнитные, цветовые (силы межкваркового взаимодействия) и короткодействующие силы слабого взаимодействия. Между электромагнитными и слабыми силами обнаружена глубокая связь, которая позволяет считать их различными проявлениями единого электрослабого взаимодействия.

Создание теорий, единым образом описывающих разные силы, уже дважды происходило в физике. Первым объединением сил следует считать осознание Ньютоном того факта, что сила тяжести и силы, управляющие движением планет, — это разные проявления силы всемирного тяготения. Вторым явилась теория Максвелла, объединившая электрические и магнитные силы. Вряд ли есть необходимость напоминать, какую колоссальную роль в развитии науки сыграли эти открытия. Теория электрослабых взаимодействий создана уже в наши дни. Работа над ней еще не полностью закончена: ее многочисленные выводы требуют тщательного анализа. Эта книга (на японском языке) уже вышла из печати, когда экспериментаторы обнаружили тяжелые W - и Z -частицы, которые были предсказаны теорией электрослабых взаимодействий и служат важным ее подтверждением.

Физика элементарных частиц продолжает бурно развиваться. Среди основных проблем, которые предстоит решить,

можно назвать, в частности, такие, как объединение электрослабых взаимодействий с цветовым и гравитационным, а также построение теории развития Вселенной на базе теории элементарных частиц.

Книга, перевод которой предлагается читателю, принадлежит перу известного японского физика Ёитиро Намбу, внесшего важный вклад в современное развитие теории элементарных частиц. По словам автора, он попытался проследить тенденции развития этой области физики за последние 50 лет и рассказать о ее новейших достижениях. Ясно, что это непростая задача. К тому же, желая сделать изложение доступным широкому кругу читателей, Намбу отказался от использования многих сложных понятий и необходимого для их формулировки математического аппарата. Результатом явился, на наш взгляд, прекрасный образец научно-популярной литературы. С одной стороны, это книга, которая будет понята любым образованным внимательным читателем, с другой — вполне последовательное изложение современных физических представлений. Проводя аналогии и давая простые примеры, автор очень точно чувствует ту грань, за которой чрезмерно упрощенное изложение может привести к неверному пониманию.

Эта книга будет полезна всем, кто интересуется современным состоянием науки о микромире. Она может повлиять на выбор будущей специальности школьниками старших классов. Думается, что ее с удовольствием прочтут и специалисты.

Несколько слов об авторе. Ё. Намбу — видный представитель знаменитой японской физической школы. В настоящее время работает в Институте ядерных исследований им. Э. Ферми Чикагского университета. Ё. Намбу является творцом многих глубоких идей, играющих ключевую роль в теории элементарных частиц. Так, он один из авторов идеи о спонтанном нарушении симметрии в теории элементарных частиц. Важное понятие — цвет и основанная на нем теория цветовых взаимодействий (хромодинамика) также связаны с его именем.

Представляется существенным следующий момент. Очевидно, что оценка вклада отдельных ученых в достижения науки — задача нелегкая. К тому же Ё. Намбу и не ставил ее в данной книге. Поэтому трудно упрекнуть его в том, что, гордясь по праву достижениями японской научной школы и

8 ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

зная хорошо работы американских физиков, он иногда не называет имена ученых из других стран (в частности, из Советского Союза), внесших значительный вклад в развитие физики элементарных частиц. При переводе сделана попытка несколько исправить положение, давая в соответствующих местах подстрочные примечания.

Хочется также отметить большую работу, проделанную переводчиком книги И. И. Иванчиком, который постарался сохранить своеобразный стиль изложения автора.

Р. М. Мир-Касимов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Конечная цель физики элементарных частиц — выяснение структуры вещества и формулировка законов, управляющих его поведением. В своей книге я пытаюсь проследить тенденции развития этой науки за прошедшие 50 лет и рассказать о ее последних достижениях.

Как японцу мне приятно отметить, что моя страна внесла большой вклад в развитие физики элементарных частиц. Кроме Юкавы и Томонаги, имена которых известны всем, мировое признание получили многие другие японские ученые, не просто выполнившие первоклассные работы, а в полном смысле слова определившие направление развития всей теории элементарных частиц.

Я тоже воспитан в традициях японской научной школы и не стану просто представлять здесь новейшие знания в готовом, законченном виде, а постараюсь показать, каким путем коллективная мысль физиков пришла к современным выводам. Разумеется, этого нельзя сделать, не предполагая у читателя наличия некоторых специальных знаний. Но моя цель будет достигнута, если читатель поймет хотя бы то, как идет процесс исследования.

За последние 50 лет в физике элементарных частиц произошли огромные изменения. Протон и мезоны уже не считаются элементарными частицами, в этом качестве теперь выступают вместо них кварки. Появилась возможность объединить различные типы взаимодействий, ранее казавшиеся не связанными друг с другом. Еще более сильное впечатление производит то, что эволюцию Вселенной как целого нельзя более рассматривать в отрыве от проблем физики микромира.

Ясно, что теория может развиваться только совместно с экспериментом. Современные ускорители в миллионы раз превосходят по энергии прежние синхротроны. Теперь это — гигантские предприятия со штатом в несколько тысяч чело-

10 ПРЕДИСЛОВИЕ

век, требующие международного финансирования. Но ученые постоянно грезят о машинах следующего поколения. Если мир между народами Земли сохранится, то эти мечты, возможно, станут реальностью. Тогда Япония, внесшая такой большой вклад в теорию, сможет принять деятельное участие также и в экспериментах с элементарными частицами.

Когда эта книга уже была написана, умер Юкава. С его смертью отошла в прошлое целая эпоха. Мне хотелось бы надеяться, что моя книга послужит руководством для тех молодых читателей, которые решат посвятить свою жизнь дальнейшему развитию физики элементарных частиц.

В заключение хочу поблагодарить проф. Леви-Сетти и д-ра Т. Ямаути за предоставленные ими фотографии, позволившие иллюстрировать рукопись книги.

Октябрь 1981 г.

Ёитиро Намбу



О ПОНЯТИИ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЧАСТИЦЫ

Вопросы, которые могут и не иметь ответа

Слова «элементарные частицы», несомненно, где-нибудь да слышали не только лица, специально интересующиеся физикой, но и те, кого она никогда не привлекала. Например, у нас в Японии так называется отдел местной хроники газеты «Асахи». Разумеется, название «Элементарные частицы» выбрано для газетного отдела не потому, что между содержанием помещаемых в нем репортажей и смыслом соответствующего физического термина имеется какая-то связь; дело в необычайной чарующей силе этих слов, привлекательность которых для рядового японца, по-видимому, объясняется хорошо известным ему и вызывающим чувство национальной гордости фактом всемирного признания японской традиции в теории элементарных частиц, берущей свое начало от мезонной теории Юкавы.

В период создания теории Юкавы я учился в старших классах школы. К тому времени, когда в университете мне нужно было выбирать конкретную физическую специальность, слова «элементарные частицы» уже стали обычным физическим термином, и вместе с несколькими однокурсниками я обратился к профессору с просьбой о специализации по «теории элементарных частиц». Соответствующее английское название — elementary particle. Слово «элемент» можно перевести как «фундаментальная составная часть» или «единица» (для химических элементов в японском языке принят термин «гэнсо»); говоря об «элементах» (elements), подразумевают

12 О ПОНЯТИИ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЧАСТИЦЫ

такие составные части вещества, из которых построены все его разновидности и которые сами уже не имеют внутренней структуры. Гипотеза о существовании «элементов» всегда естественно возникала у людей, стремившихся объяснить устройство внешнего мира, а развитие этого понятия в современных естественных науках происходило, в частности, под сильным влиянием греческой натурфилософии.

Что же такое элементарность? Небольшое размышление позволяет разбить этот вопрос на два: существуют ли «элементы» и, если да, то каковы они? Читатель, вероятно, уже догадался, что решением подобных вопросов и занимается физика элементарных частиц. Понятно, что ответ на них не может быть простым. Да и возможен ли он вообще? До возникновения естественных наук элементами признавали, например, землю, воду, огонь и ветер (воздух) (традиция, восходящая к греческому мыслителю Аристотелю); отголоском учения о четырех элементах является, по-видимому, представление, по которому влияние природы на человека, в особенности вред, причиняемый ему ненастьем, бурями, грозами, землетрясениями, объясняется действием элементов. Вероятно, поэтому в некоторых языках, в том числе английском, слово «элемент» означает также природную стихию.

В наше время, конечно, никто не думает, что земля, вода, огонь и ветер — элементы. Можно сказать, и мнение это вполне обосновано, что при развитии естественных наук постоянно идет поиск наименьших единиц строения вещества путем, в сущности, все более тонкого его дробления; правда, буквальное понимание дробления немедленно заводит нас в тупик. Так, нельзя достичь предела деления вещества, резкая его ножом и исследуя затем с помощью оптического микроскопа. Ведь даже крупички с поперечником около одного микрона имеют разнообразные размеры и форму, т. е. внутреннее строение (не элементарны), а самые совершенные ножи и оптические микроскопы не позволяют проникнуть в области размерами намного меньше микрона. И вообще ясно, что для изучения областей все меньших размеров требуются все более острые ножи, а поскольку нож сам состоит из «элементов», то его острие нельзя сделать тоньше диаметра последних; таким образом, получается порочный круг.

В XIX в. больших успехов достигла химия, т. е. система знаний о химических превращениях вещества, и впервые было сформулировано представление об атоме, близкое современному. Сама идея о том, что все вещество построено из неизменных «элементов» — атомов (*átomos* — по-греч. «неделимый»), была высказана еще древнегреческим философом

Демокритом, но в химии понятие атома естественно возникло при изучении химических реакций. Принципы, положенные в основу учения о химических элементах, в корне отличаются от упомянутой выше наивной идеи простого механического деления вещества. Обсудим их подробнее.

О сохраняющихся величинах и законах природы

При смешивании в различных пропорциях химических веществ A, B, C, D, \dots , вообще говоря, идут химические реакции, например



Естественно желание узнать правила, определяющие продукты реакции по свойствам исходных компонентов; в качестве первого шага на пути к установлению таких правил надо посмотреть, подчиняются ли упомянутые реакции каким-либо закономерностям.

Соответствующие исследования прежде всего показали, что масса веществ, вступающих в реакцию, равна массе продуктов реакции. Иными словами, соотношения (1), (2) можно понимать как обычные равенства между массами веществ A, B, C, \dots . Мы встретились здесь с одним из законов сохранения, действующих в природе,— законом сохранения массы. Наличие закона сохранения означает, что, несмотря на полное изменение свойств вступающих в реакцию веществ, какая-то характеристика последних (в данном случае масса) остается при реакции неизменной.

При поиске других, более тонких, закономерностей химических реакций выявилось следующее. Оказалось, что, например, существуют такие реакции вида (1), в которых реагенты A и B надо всегда смешивать так, чтобы отношение их масс равнялось $1/2$: если взять, скажем, равные по массе количества веществ A и B , то половина вещества A останется непрореагировавшей. Точно так же должно выполняться определенное соотношение между массами веществ A, D, E, F , участвующих в реакции (2). И в общем случае имеется определенная связь между массами реагентов, выражаемая отношением целых чисел, специфическим для каждой химической реакции.

Попытка понять, в чем смысл закона отношений целых чисел для масс веществ, вступающих в реакцию, равносильна

14 О ПОНЯТИИ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЧАСТИЦЫ

попытке самостоятельно еще раз проследить основную линию развития химии в XIX в. И хотя ответ всем уже известен, при обдумывании такой проблемы на ум, естественно, приходят вопросы следующего типа. Прежде всего похоже, что должно действительно существовать элементарное вещество, масса которого в разных химических реакциях характеризуется наименьшим целым числом; если это так, то не построены ли из него все прочие встречающиеся в природе вещества? Далее, не потому ли массы реагентов относятся как целые числа, что само это элементарное вещество образовано из неких мельчайших фундаментальных единиц? И что получится, если, назвав такие фундаментальные единицы атомами, попытаться применить гипотезу о их существовании к объяснению самых разнообразных встречающихся в науке ситуаций?...

Реальная химия, конечно, гораздо сложнее. Существует не один, а много сортов атомов. Среди них легчайшие — атомы водорода, но хотя массы всех атомов (химических элементов) отличаются от массы атома водорода в целое число раз, более сложные атомы не составлены из водородных. Точные измерения показывают, что отношения масс атомов к массе атома водорода выражаются целыми числами лишь приближенно. Утверждение о сохранении массы при химических реакциях тоже не вполне строгое и так далее: в реальной науке возникает много самых разнообразных проблем.

Что значит «действительно существовать»?

Обсудим доказательства реальности существования атомов. Поскольку химики-экспериментаторы давно умели выделять в чистом виде водород, кислород, углерод и т. п., у них не возникало сомнения в существовании элементов как особых веществ. Другое дело — проблема атомной структуры вещества. Размеры этих атомов были неизвестны, и вообще никто их не видел. Поэтому атомная теория в химии многим казалась лишь гипотезой, не более обоснованной, чем атомная теория Демокрита.

И все же отличия от теории Демокрита были огромны. Прежде всего правильность выводов новой атомной теории поддавалась количественной экспериментальной проверке. Далее, по мере развития исследований получил всестороннее обоснование сам факт существования атомов, были определены их размеры и даже появилась возможность в известном смысле непосредственно увидеть атомы.

Например, иллюзию непосредственного «наблюдения» ато-

мов создает созерцание следов, оставляемых частицами в пузырьковой камере. Вполне может оказаться, что иной образованный читатель, знающий порядок величины атома (10^{-8} см), успокоится на выводе о невозможности увидеть его, но верно ли, что впечатление о непосредственном наблюдении атомов в пузырьковой камере — не более чем иллюзия?

Перед вашими глазами лежит моя книга, однако вы не станете категорически утверждать, что книга эта реально существует только потому, что она довольно велика. При созерцании книги в наш мозг поступают импульсы, возбуждаемые отраженным ею светом, который самой книге ни коим образом не тождествен. В пузырьковой камере след появляется в результате процесса, включающего ударную ионизацию молекул жидкости пролетающими сквозь нее заряженными частицами, образование капелек тумана на ионизированных молекулах как центрах конденсации и отражение света от капелек, успевших вырасти до достаточно большого размера. Процесс этот сложнее процесса, позволяющего увидеть книгу, но можно ли утверждать, что он принципиально отличен от него?

Проблемой «реального существования» с древних времен занимались философы; ее исходный пункт заключен в наивном вопросе, вынесенном в заголовок данного раздела. При ответе на него ученые придерживаются здравого смысла, рассуждая по существу так же, как рассуждаем мы в повседневной жизни. Если возникает сомнение в реальности лежащей перед глазами книги, можно, протянув руку, пощупать ее. Если и тогда не рассеивается впечатление, что перед нами галлюцинация, можно спросить у соседа, видит ли он точно такую же книгу. Когда всевозможные проверки не приводят к противоречиям, мы говорим, что книга действительно существует. Придя к такому выводу однажды, мы избавляемся от необходимости повторять каждый раз утомительную процедуру придирчивых проверок: вопрос о реальности книги снимается и удаляется из сознания. Но при первом столкновении с каким-либо новым явлением, не встречавшимся в предыдущей практике, например при наблюдении НЛО¹⁾, нам вновь придется думать, как к нему относиться. Скорее всего, надо будет провести серию проверок, подобную описанной выше.

Примерно таковы же в конечном счете доказательства реальности существования атомов. Допуская у них те или

¹⁾ Неопознанный летающий объект.— *Прим. перев.*

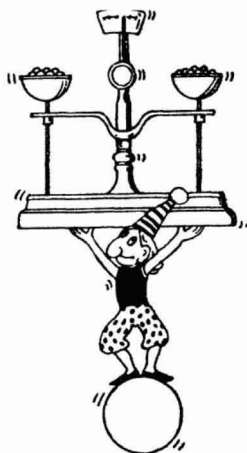
иные свойства и производя всевозможные проверки, ученые все более доверяли гипотезе атомного строения вещества. По мере расширения и усложнения экспериментальных проверок теоретических моделей увеличивались знания о свойствах атомов. Иными словами, не отвергая в принципе идею о реальности существования атомов, ученые непрерывно уточняли и исправляли ее формулировку. Неудачная гипотеза обычно очень скоро приводит к несоответствиям, для устранения которых приходится прибегать к разным неприятным натяжкам. Поскольку гипотеза, вновь и вновь требующая введения искусственных дополнительных предположений, скорее всего, порочна в своей основе, лучше всего пересмотреть все базирующиеся на ней расчеты и внести в них исправления в самом начале. И наоборот, удачная, правильная гипотеза позволяет находить решения все новых возникающих в ходе исследования вопросов. Все это немного похоже на разгадывание кроссворда, когда, начиная с легких и бесспорных мест, прежде всего отгадывают простые слова. Поначалу дело вроде идет хорошо, но по мере заполнения кроссворда кое-где возникают противоречия. В течение какого-то времени изменения простых слов никак не приводят к успеху. Но вдруг нисходит озарение и отыскивается ключ к решению. Последующая разгадка ведется почти автоматически.

Когда такого состояния достигает физическая гипотеза, мы начинаем воспринимать ее как несомненный объективный факт. Но физика — наука не замкнутая, а находящаяся в постоянном развитии, она не может пребывать в устойчивом неизменном состоянии. Где-нибудь обнаруживается неувязка, и основанные на предыдущем опыте гипотезы становятся непригодными. Тогда приходится пересматривать методы получения старых результатов, но теоретические схемы, надежно выдерживавшие до того строгие проверки, в принципе не должны отбрасываться. Поскольку они отказывают только в новых обстоятельствах, их стремятся включить в качестве частного случая в более широкую теоретическую концепцию.

Вернемся, однако, к нашей первоначальной теме. И сейчас не будет ошибкой сказать, что элементами вещества являются атомы, но уже во времена моего студенчества настоящими «элементарными частицами» считали объекты типа мезонов Юкавы. А теперь вместо них все чаще говорят о кварках и лептонах. Если спросить современных физиков, они, скорее всего, ответят, что именно кварки и лептоны — истинные «фундаментальные частицы».

Что же такое кварки и лептоны и как они связаны с атомами и мезонами? Рассказ об этом — цель данной книги; одновременно он будет и рассказом о прогрессе атомной физики в нашем веке. Но мы не будем придерживаться исторической последовательности развития идей, а, наоборот, начав с современного положения, по ходу дела проследим необходимые связи с прошлым.

,



КВАРКИ И ЛЕПТОНЫ

Совершенно новые фундаментальные частицы — кварки, которых пока никто еще не наблюдал

Необычное имя — «кварки» — дал новым частицам один из авторов гипотезы кварков Гелл-Манн. О происхождении этого названия мы еще поговорим в другом месте, а здесь укажем, что в настоящее время кварки рассматривают как один из типов «фундаментальных частиц». Правда, кварки пока еще не полностью перешли из разряда «гипотетических» в разряд «реальных» объектов.

Мы уже говорили, что фундаментальные частицы — это современные «элементы», т. е. самые основные единицы строения вещества. Утверждение о гипотетичности кварков — не более чем дань осторожности и осмотрительности, так как нельзя сказать, что кварковая гипотеза не в состоянии объяснить всю совокупность известных на сегодняшний день явлений. Оно означает лишь, что эта гипотеза не достигла еще статуса, например, гипотезы об атомах, атомных ядрах или электронах, в существовании которых теперь никто не сомневается.

Сомнения в существовании кварков остаются потому, что, хотя они и наделяются специфическими, не встречающимися у других известных частиц свойствами, никому еще не удалось наблюдать кварки непосредственно, т. е. подтвердить их свойства путем выделения этих частиц из вещества. С обычными же частицами можно экспериментировать в свободном состоянии. Атомы и электроны тоже ведь в свое

время были гипотетическими частицами, существование которых предполагалось на основании законов сохранения и тому подобных соображений, однако вскоре их удалось выделить из вещества и определить соответствующие им массы и электрические заряды.

Свободные кварки, казалось бы, очень легко обнаружить, так как им приписывают электрический заряд, равный либо $1/3$, либо $2/3$ «элементарного» заряда (заряда электрона или протона), а заряды всех известных до сих пор «элементов» — атомов, электронов, атомных ядер — равны либо нулю, либо целому кратному ($\pm 1, \pm 2, \dots$) заряду электрона e . Поэтому полный электрический заряд любого куска вещества, построенного из обычных «элементов», кратен величине e .

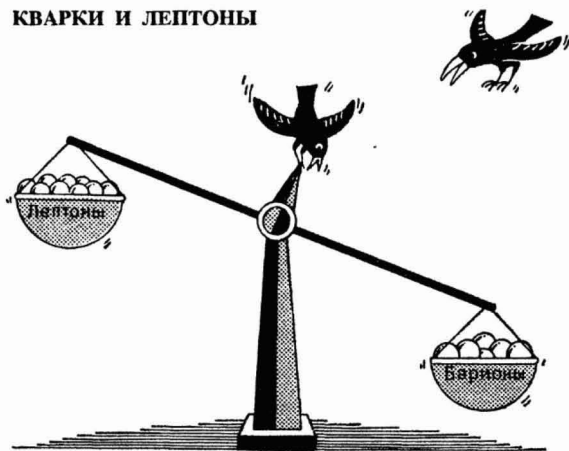
Здесь уместно напомнить еще один важнейший факт — закон сохранения электрического заряда. Превращаясь друг в друга в ходе ядерных реакций, частицы часто обмениваются зарядами, но полный электрический заряд вступающих в реакцию частиц совершенно не изменяется. Это типичный пример законов сохранения, о которых говорилось в предыдущей главе; если он верен, то существование элемента, несущего минимальный электрический заряд, не представляется невероятным. Выяснилось, что элементов мельчайшего электрического заряда довольно много. Это различающиеся массой и другими характеристиками электроны, протоны и все остальные частицы с зарядами $\pm e$.

В противоположность установившемуся ранее в теории элементарных частиц правилу предполагают, что кварки имеют необычные значения электрического заряда: $\pm e/3$ или $\pm 2e/3$. Иными словами, теперь истинным минимальным значением электрического заряда признают величину $e/3$. Так что же, частицы, имеющие, подобно электрону и протону, заряд $\pm e$, уже нельзя считать элементарными, а надо рассматривать их как состоящие из кварков?

На этот вопрос отвечают следующим образом. Протон — действительно составная частица, образованная из трех кварков; в основу теории кварков как раз и положена идея о составной природе протона. А электрон не состоит из кварков, он по-прежнему рассматривается как фундаментальная частица.

Барионы, лептоны, мезоны

Выше мы упомянули о кварках и лептонах и отметили, что электрон относят к лептонам. Название «лептон» означает «легкая частица» и производится от соответствующего грече-



Барions («тяжелые частицы») и лептоны («легкие частицы»).

ского слова. В семейство лептонов включают также нейтрино («нейтрончик» — ν), мюон (μ) и т. п.; но все они (кроме электрона) почти не проявляются в повседневной действительности. Электрические заряды лептонов равны $\pm e$ или 0.

Какие же «тяжелые» частицы противопоставляются легким лептонам? Они называются «барionsами» (от соответствующего греческого слова), и к ним причисляют, в частности, протоны. Вам, вероятно, известно, что масса протона (ядра атома водорода) превосходит массу электрона примерно в 1800 раз. Нейтрон (n) — тоже один из барionsов. Атомные ядра — это объединения, как правило, многих протонов (p) и нейтронов; ясно, что если к ним добавить электронные облака, то можно построить нейтральные атомы.

Так как протоны и нейтроны входят в состав атомных ядер, их называют еще нуклонами (от латинского *nucleus* — ядро); кроме нуклонов (N) к барionsам относят частицы лямбда (Λ), сигма (Σ) и ряд других тяжелых нестабильных частиц. Барionsы не элементарны: полагают, что каждый из них построен из тройки кварков.

Между барionsами и лептонами располагают семейство «мезонов». К нему относят, в частности, частицу, существование которой предсказал в свое время Юкава и которую сейчас называют пионом (π -мезон). Поскольку масса пиона примерно в 270 раз больше массы электрона и составляет около $\frac{1}{7}$ массы протона, в применении к этой частице название «мезон» (от греческого слова, означающего «промежуточный», «средний») оправдано. В действительности, однако, в классификации частиц по их массе нет особого

смысла. Массы многих мезонов по порядку величины такие же, как массы барионов; масса мюона из семейства лептонов близка к массе пиона, а масса недавно открытого тау-лептона (τ) даже больше массы протона.

Общее название барионов и мезонов — «адроны». Оно также произведено от соответствующего греческого слова и означает «сильные частицы»; такое название дано им потому, что эти частицы сильно взаимодействуют друг с другом. Силы, порождающие так называемое сильное взаимодействие, отличаются от электромагнитных и гравитационных; таковы, например, силы, скрепляющие атомные ядра, т. е. ядерные силы. Считают, что взаимодействие между нуклонами возникает в результате обмена мезонами, при котором один из нуклонов испускает, а другой — поглощает мезон. Акты испускания и поглощения повторяются часто, и ядерные силы больше электромагнитных.

Согласно гипотезе кварков, в отличие от барионов, составленных из троек кварков, мезоны образованы двойками кварков, точнее, парами из одного кварка и одного антикварка. Понятие «античастица» пока не объяснялось, но этот термин применим ко всем лептонам и кваркам: для каждой частицы существует своя античастица. Как ясно уже из названия, античастица несет электрический заряд, противоположный по знаку заряду соответствующей частицы; остальные квантовые числа (числа, которые, подобно обсуждаемой ниже «странности», определяют свойства частиц) у античастицы тоже, вообще говоря, имеют знак, обратный знаку квантовых чисел частицы, а масса античастицы равна массе частицы. Частица и античастица не являются совершенно разными частицами, они скорее подобны близнецам. В самом деле, хотя у электрона и его античастицы (позитрона) электрические заряды противоположны по знаку, а у протона и позитрона они одинаковы, позитрон все же гораздо родственнее электрону, чем протону.

Отсутствие позитронов и антипротонов в окружающем нас мире объясняется тем, что при их столкновении соответственно с электроном и протоном частица и античастица одновременно исчезают (происходит, как говорят, «аннигиляция пары»); высвобождаемая при аннигиляции энергия излучается, например, в виде фотонов. И наоборот, создать античастицу можно только в паре с ее частицей («рождение пары»). Поэтому при перечислении классов частиц часто не указывают отдельно частицы и античастицы; мы здесь тоже следуем такому обычаю, т. е., объединяя кварк и антикварк, говорим об этой паре просто как о кварке.

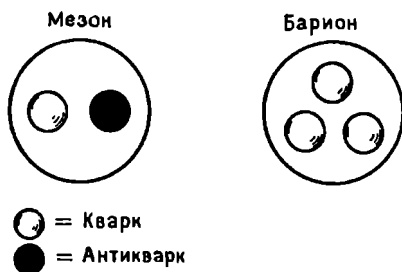


Рис. 2.1. Мезоны и барионы.

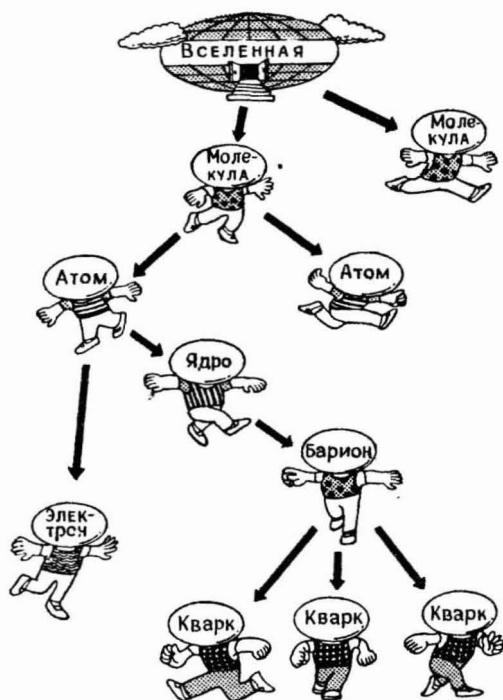
Но если мезоны строятся, как мы уже говорили, из пар кварков и антикварков, то почему же внутри мезонов эти пары не аннигилируют? Отчасти дело объясняется тем, что существует несколько видов кварков и, вообще говоря, невозможно построить мезоны из пар кварков и антикварков одного вида; к более глубокому обсуждению этого вопроса мы еще вернемся.

Подытожим сказанное. Адроны («сильные частицы») образуют семейство сильновзаимодействующих элементарных частиц и составлены из кварков. Входящие в число адронов барионы («тяжелые частицы») построены из троек кварков (соответственно антибарионы — из троек антикварков), а мезоны («промежуточные частицы») — из пар кварков (точнее, из одного кварка и одного антикварка). Другие комбинации кварков, как правило, не осуществляются, а сами кварки в свободном состоянии ненаблюдаемы.

Семейство лептонов («легких частиц») включает, в частности, такие сравнительно легкие частицы, как электрон и нейтрино. Лептоны не участвуют в сильном взаимодействии.

Окружающее нас вещество в конечном счете построено из кварков и лептонов по следующей схеме: из кварков образуются барионы, из барионов — атомные ядра, из ядер и электронов — атомы, из атомов — молекулы, а из молекул строятся, например, живые организмы и т. п.

Таким образом, имеется несколько уровней структурной организации вещества. Это означает, в частности, существование соответствующих масштабов расстояний и энергий. Шкала расстояний на первый взгляд ясна. Атомы имеют размер порядка 10^{-8} см и состоят из ядра размером около 10^{-13} см, окрестность которого затянута электронным облаком. Ядро в свою очередь состоит из протонов и нейтронов, а они «должны» быть образованы из кварков. Но при решении проблемы размера кварков возникают различные затруднения.



Уровни структурной организации вещества во Вселенной.

Что такое «размер» частицы?

Прежде всего можно говорить о протяженности частицы как квантовомеханической волны. По самой своей природе волна — протяженный объект, но она не имеет определенного размера: протяженность волны можно изменять, изменяя способ ее получения. В малую область пространства волну можно «втиснуть» только при условии, что длина волны невелика. Но поскольку по формуле де Бройля длина волны обратно пропорциональна импульсу, при уменьшении длины волны импульс частицы, а значит, и ее кинетическая энергия увеличиваются (одновременно увеличивается и неопределенность их значений — соотношение неопределенностей Гейзенберга). Следовательно, при изучении структуры вещества путем его облучения потоком частиц для увеличения точности анализа надо повышать энергию налетающих частиц, так как

в малых областях пространства могут быть локализованы только частицы высокой энергии.

К вопросу о «размере» частиц можно подойти так же, как к задаче о радиусе действия сил между ними (радиусе взаимодействия). О силах, убывающих обратно пропорционально квадрату расстояния, например о кулоновских (электромагнитных) и гравитационных, говорят, что радиус их действия бесконечно велик. Напротив, силы «типа Юкавы», например ядерные, имеют ограниченный радиус действия: на расстояниях, превышающих определенное значение, они экспоненциально уменьшаются. Поэтому можно сказать, что вне своего радиуса действия эти силы по существу равны нулю.

По порядку величины радиус действия ядерных сил равен 10^{-13} см. При сближении двух нуклонов на расстояние, меньшее радиуса действия сил, их движение хаотизируется за счет сильного взаимодействия; поэтому величина 10^{-13} см выступает фактически в роли размера нуклона. Вообще оказывается, что 10^{-13} см — порядок величины радиуса сильного взаимодействия для всех адронов. Следовательно, можно считать, что адроны любого типа имеют «размер» около 10^{-13} см.

Об информации, извлекаемой из экспериментов по рассеянию

Многие эксперименты по определению структуры элементарных частиц напоминают стрельбу в цель. Исследуемая частица служит «мишенью», а заготовленные в достаточном количестве другие частицы играют роль «снарядов», которые стреляют по мишени. Квантовую неопределенность траектории можно сделать сколь угодно малой, повышая энергию снаряда. Если силы взаимодействия между снарядом и мишенью короткодействующие, то считают, что «снаряд попал», когда он входит в область не равного нулю взаимодействия.

Типичные величины, измеряемые при подобных «стрельбах», — это сечение рассеяния (размер мишени) и распределение по углу рассеяния (вероятность отклонения в определенном направлении попавшего в цель снаряда). Для проведения такого опыта надо создать поток снарядов (пучок) определенной интенсивности, разместить под заданным углом к потоку измерительную аппаратуру и затем подсчитывать число влетающих в нее частиц. Изменяя указанный угол, регистрируют изменение числа частиц и таким путем находят их угловое распределение. Суммируя данные по всевозможным углам и

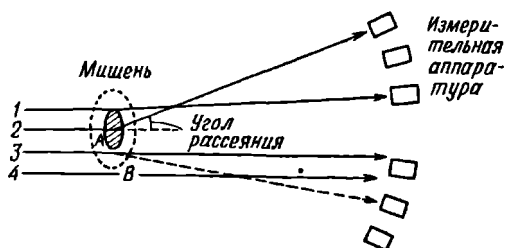


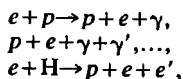
Рис. 2.2. Углом рассеяния называют угол, на который отклоняется от первоначального направления снаряд, попавший в цель. Если бы мишень имела размер B , больший A , то снаряд № 3, не попавший в мишень A , тоже рассеялся бы, например так, как указано пунктирной стрелкой. Следовательно, размер мишени (сечение) можно определить, подсчитывая долю рассеянных снарядов.

сравнивая их с интенсивностью потока налетающих частиц, определяют сечение рассеяния.

Может, разумеется, наблюдаться рассеяние электронов на протонах, но, поскольку оно вызывается дальнедействующими кулоновскими силами (кулоновское рассеяние), его угловое и энергетическое распределение отличается от соответствующих характеристик для сильно взаимодействующих частиц. При кулоновском рассеянии даже частицы, пролетающие далеко от рассеивающего центра, все же немного отклоняются от первоначального направления, давая большой вклад в рассеяние на малые углы. (Вероятность рассеяния на малый угол намного увеличивается, если заряд мишени распределяется по все большему объему. Именно из этого свойства кулоновского рассеяния исходил Резерфорд при формулировке своего вывода о наличии внутри атома маленького положительно заряженного ядра.)

В первом разделе мы отметили, что при столкновении двух частиц происходит не только простое рассеяние, но могут, вообще говоря, идти также разнообразные реакции. Даже при кулоновском рассеянии электронов на протонах часто излучаются электромагнитные волны (рождаются фотоны). Если же энергия налетающих электронов превосходит некоторое «пороговое» значение, то при бомбардировке ими атомов водорода последние иногда разваливаются на электроны и протоны.

Указанные реакции можно записать в виде формул



если обозначить через e —электрон, p —протон, γ —фотон (гамма-квант), H —атом водорода.

В отличие от «упругого рассеяния» о написанных только что реакциях говорят как о «неупругом рассеянии». Большая вероятность неупругого рассеяния и разнообразие его видов—одна из характерных особенностей реакций с участием адронов. Иными словами, столкновение адронов A и B сопровождается, вообще говоря, вылетом частиц A, B, C, D, E, F, \dots При этом оказывается, что, какие бы два адрона ни взять, радиус действия сил между ними будет одного и того же порядка величины, а типы реакций тоже будут очень похожи.

В этом смысле природа адронов одновременно и проста, и сложна. Большое разнообразие их видов наводит на мысль, что адроны не являются элементарными частицами, а представляют собой объекты с внутренней структурой, причем маловероятно, чтобы какие-то конкретные адроны оказались более фундаментальными, а остальные—построенными из них.

Поэтому для наведения порядка в адронных реакциях надо, как уже говорилось в первом разделе, обратиться к поиску законов сохранения. Если с их помощью удастся найти в адронных процессах какие-то закономерности, то для объяснения последних можно будет ввести подходящие гипотезы о фундаментальных частицах, из которых составлены адроны. Такой ход мысли напоминает историю возникновения атомной гипотезы, выдвинутой в свое время для объяснения закономерностей химических реакций.

Оказалось, что события в данном случае действительно разворачивались по описанной только что схеме. Новыми законами сохранения здесь явились обсуждаемые ниже законы «Накано—Нишиджимы—Гелл-Манна», а новыми частицами—введенные Гелл-Манном и Цвейгом кварки.



ПОИСК КВАРКОВ

О структуре протонов и нейтронов

Итак, кварки — это фундаментальные частицы, из которых построены адроны. Принадлежащие семейству адронов барионы образованы из троек кварков, а мезоны — из пар кварков и антикварков. Самая экстравагантная особенность предложенной независимо друг от друга Гелл-Манном и Цвейгом гипотезы кварков — дробность электрического заряда последних. Почему кваркам пришлось приписать дробный электрический заряд, постепенно разъяснится ниже, а пока мы познакомимся с конкретными кварками. Начнем с самых «банальных» из них — кварков типа *u* и типа *d*.

Символы *u* и *d* происходят от английских слов *up* (вверх) и *down* (вниз); соответствующие кварки входят в состав протонов и нейтронов. Поскольку атомные ядра построены из протонов и нейтронов, можно сказать, что кварки *u* и *d* — составные части всех химических элементов. Известно, что электрический заряд протона равен e , а нейтрона — нулю, как что если ядро состоит из Z протонов и N нейтронов, то его электрический заряд равен Ze ; нейтральный атом получается, когда указанное ядро удерживает в своей окрестности Z электронов. Число Z называют атомным номером, а сумму $A = Z + N$ — массовым числом атома. Например, для атома обычного водорода $Z=1$, $N=0$, $A=1$, для тяжелого водорода $Z=1$, $N=1$, $A=2$, для обычного гелия $Z=2$, $N=2$, $A=4$.

Для нахождения массы атомного ядра или атома по сумме масс составляющих их частиц из последней надо, вообще

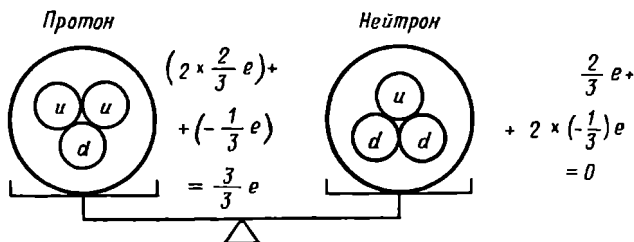


Рис. 3.1. Протон и нейтрон.

говоря, вычесть массу, соответствующую (по формуле Эйнштейна $E=mc^2$) энергии связи E , т. е. энергии, высвобождаемой при соединении в одно целое составляющих ядро или атом частиц. Но эта величина мала, массы протонов и нейтронов гораздо больше всех остальных слагаемых массы связанной системы, а разность масс протона и нейтрона почти равна нулю; поэтому массовое число $A = Z + N$ довольно точно совпадает с массой ядра или атома (напомним, что масса электрона составляет $\sim 1/1800$ массы протона). Число электронов Z определяет химические свойства атома, а число A — его массу. Атомы с одним и тем же Z , но разными A (разными N) называются изотопами. Изотопами являются, например, обычный и тяжелый водород.

Поскольку (если отвлечься от электрического заряда) свойства протонов и нейтронов отличаются не очень сильно, принимают, что различие между кварками u и d сводится в основном к различию величин их электрических зарядов.

Кваркам присваивают следующие значения атомного номера Z и массового числа A :

$$\begin{aligned} u: Z = \frac{2}{3}, A = \frac{1}{3}, \\ d: Z = -\frac{1}{3}, A = \frac{1}{3}. \end{aligned} \quad (1)$$

Пользуясь ими, кварковую структуру протона и нейтрона можно записать при помощи «химических» формул

$$\begin{aligned} p &= uud, \\ n &= udd. \end{aligned} \quad (2)$$

И обратно, из приведенных «химических» формул следуют значения (1) при дополнительном предположении, что массы кварков примерно одинаковы, а заряды их разных комбинаций отличаются на единицу.

Ответ на вопрос, почему барионы образованы из трех кварков, нам придется пока отложить. Но, учитывая, что

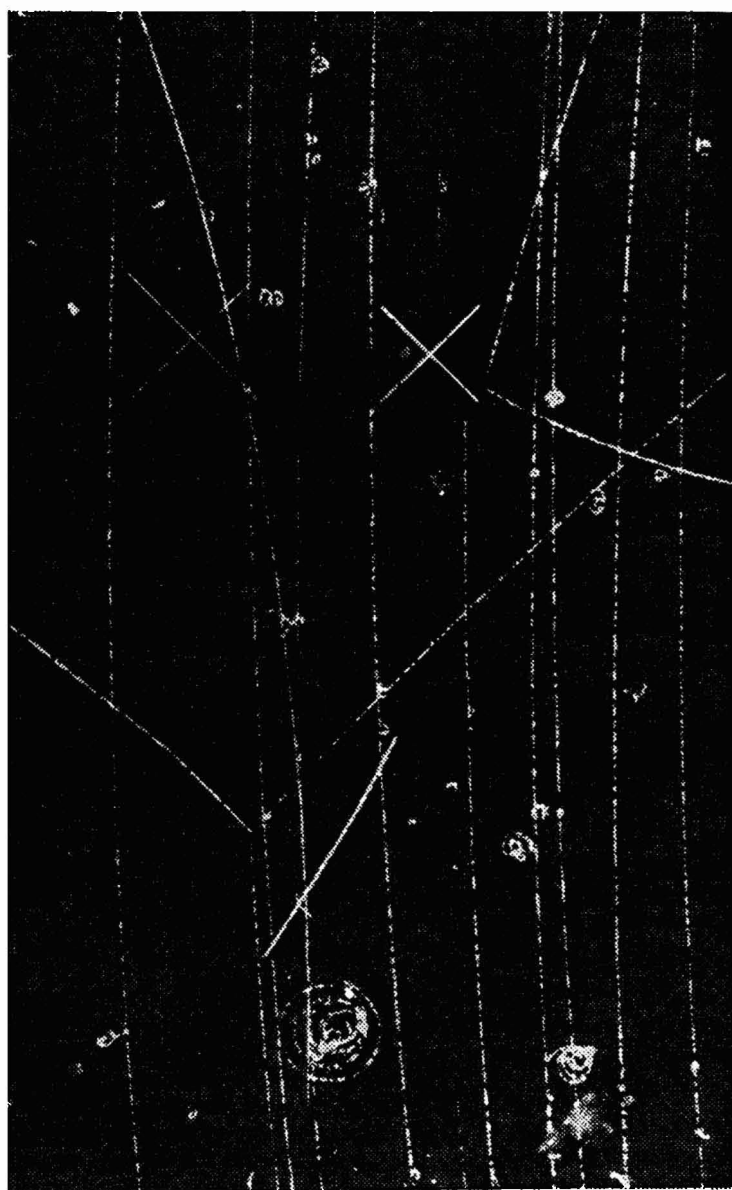
протоны и нейтроны получают при расщеплении атомного ядра, естественно задуматься, нет ли возможности расщепить на кварки сами протоны и нейтроны. И не должны ли регистрироваться частицы с электрическими зарядами $\frac{2}{3}$ и $-\frac{1}{3}$?

Поиск частиц с дробным электрическим зарядом

Электрический заряд релятивистской частицы определить сравнительно просто. Пролетая через камеру Вильсона или пузырьковую камеру, заряженная частица, образно говоря, «разбрызгивает» электроны с атомов среды (газа или жидкости соответственно), оставляя по пути ионы, которые становятся центрами конденсации для капелек тумана в газе или центрами роста пузырьков в жидкости; из капелек или пузырьков образуется след частицы (трек). Поскольку плотность («густота») следа прямо пропорциональна квадрату заряда частицы и в общем обратно пропорциональна квадрату ее скорости, следы всех околосветовых высокоэнергичных частиц с зарядами $\pm e$ имеют почти определенную примерно одинаковую плотность; следовательно, если бы обнаружили «тощие» следы меньшей плотности, их надо было приписать частицам, заряд которых меньше e .

Этим соображением пробовали руководствоваться при поиске кварков. Для этого ускоряли протоны в больших протонных ускорителях (протонных синхротронах) и пропускали протонные пучки через пузырьковые камеры, наполненные жидким водородом. Разнообразные частицы, рождаемые в протон-протонных столкновениях, оставляли свои следы в камере. В принципе необходимо было, анализируя фотографии следов, выявить необычные треки с аномально малой плотностью (густотой) следа (на самом деле, конечно, применялись более производительные методики). Однако найти частицы, оставляющие такие следы, до сих пор не удалось.

Более чувствителен метод с использованием масляных капель, примененный в свое время Милликоном для определения минимального электрического заряда e . Известно, что упавшие в жидкость маленькие капельки масла медленно опускаются с постоянной скоростью, поскольку увлекающая их вниз сила тяжести уравновешивается трением капелек о жидкость. Метод Милликена основан на том, что некоторые капли несут положительный или отрицательный электрический заряд, образующийся, когда электроны покидают каплю



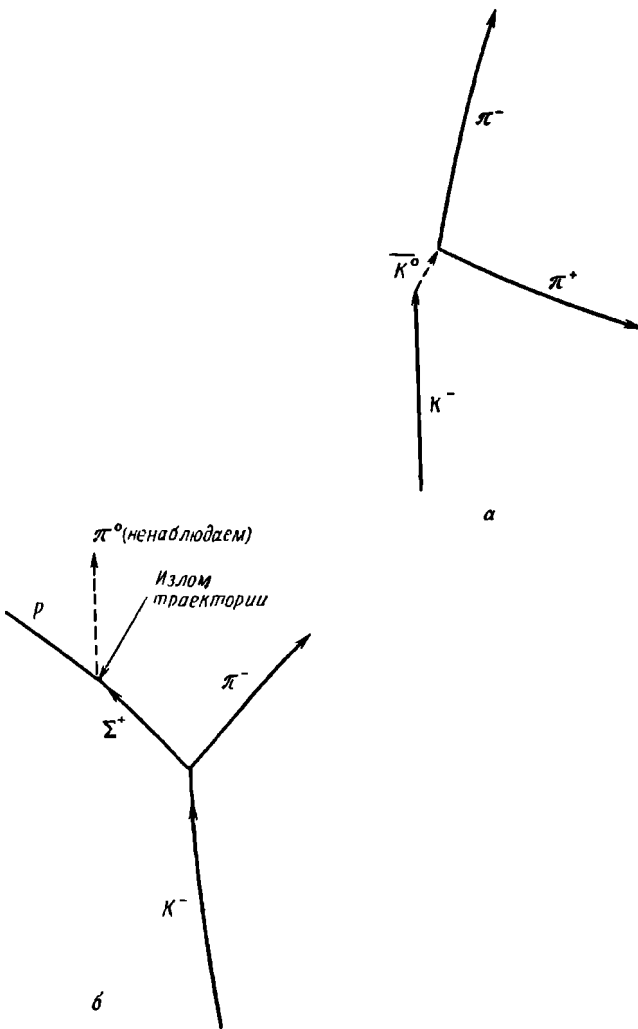


Рис. 3.2. Фотография следов заряженных частиц в пузырьковой камере, облучаемой пучком K^- -мезонов. На чертеже нарисованы присутствующие на фотографии треки, соответствующие двум конкретным процессам столкновения K^- -мезонов с наполняющими камеру протонами. (Снимок любезно предоставлен проф. Леви-Сетти.) *a*—рождение и распад K^0 : $K^- + p \rightarrow n + \bar{K}^0$; $\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$; *b*—рождение и распад Σ^+ : $K^- + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^-$; $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$.

32 ПОИСК КВАРКОВ

или, наоборот, захватываются каплей из жидкости. Движение таких капель должно измениться при помещении системы во внешнее электрическое поле. Изучение движения масляных капель позволило Милликену доказать, что заряд капель изменяется скачкообразно, и определить минимальную величину скачка заряда e .

На каких же характеристиках вещества отразится присутствие в нем свободного кварка? По гипотезе кварков число последних в составе любых атомных ядер кратно трем. Поэтому полный заряд системы, содержащей свободный кварк, не будет целым кратным e , даже если кварк присоединится к атомному ядру или электрону. Дело не изменится и при учете метастабильности кварка, если, конечно, не нарушается закон сохранения электрического заряда. Действительно, пусть кварк d тяжелее кварка u . Тогда может произойти распад, аналогичный бета-распаду нейтрона (n) на протон (p), электрон (e) и антинейтрино ($\bar{\nu}$):

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

$$d \rightarrow u + e + \bar{\nu};$$

обе формулы записаны так, чтобы удовлетворялся закон сохранения электрического заряда. Если еще более легких, чем u , кварков не существует, то частица u не может испытывать каких-либо дальнейших превращений. Иными словами, кварки, по крайней мере одного типа, абсолютно стабильны. Положение не меняется при учете антикварков, так как они, аннигилируя с кварками, будут давать мезоны (заряд которых целочислен); после максимально полной аннигиляции останутся только либо кварки, либо антикварки, и мы возвращаемся к исходному пункту рассуждения.

Итак, допустим, что в капле масла размером 1 мм содержится ровно один свободный u -кварк. Что наблюдал бы Милликен, если бы в его экспериментальной установке была такая капля? Заменяя один из электронов кварком, получим для полного заряда капли (в единицах e) ряд возможных значений $2/3, (2/3) \pm 1, (2/3) \pm 2, \dots$, явно отличающийся от обычного рассматриваемого ряда $0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Вспоминая, что атом имеет размер около 10^{-8} см, находим, что в капле размером 1 мм содержится примерно $10^7 \times 10^7 \times 10^7 = 10^{21}$ атомов. Поскольку на таких каплях Милликен смог измерить заряд одного электрона, то и примесь свободных кварков можно было бы зарегистрировать, даже если бы она составляла величину порядка 1 кварка на 10^{21} атомов.

Подобные опыты в стиле Милликена в течение нескольких

лет ставили группы Фербанка в Станфордском университете и Морпурго в университете Пизы. Каплями масла в наше время не пользуются. В опытах Фербанка изучалось движение маленьких шариков из редкоземельного элемента ниобия, которые переводились в сверхпроводящее состояние при низкой температуре. Поскольку сверхпроводник полностью выталкивает из себя магнитные силовые линии, он способен плавать в вакууме на границе области, занятой магнитным полем. Если плавающие таким образом шарики наэлектризуются, то они будут совершать колебания в переменном внешнем электрическом поле, что позволяет измерить величину находящегося на них заряда. В опытах пизанской группы шарики были не из сверхпроводника, а из обычного железа, что не меняет принципиальной стороны дела.

Каковы же результаты этих опытов? Думаю, кое-кто из читателей видел заметки в газетах и журналах, утверждающие, будто Фербанк «обнаружил» кварки. Он проводил измерения в течение ряда лет и несколько раз обрабатывал результаты; в печати сообщалось, что к настоящему времени зарегистрировано шесть случаев наличия дробного заряда $\pm \frac{1}{3}$. (Выше мы видели, что вследствие захвата шариками электронов невозможно отличить, находится ли на шарике кварк u с зарядом $\frac{2}{3}$ или кварк d с зарядом $-\frac{1}{3}$. Точно так же нельзя разграничить случаи присутствия антикварков \bar{u} (заряд $-\frac{2}{3}$) и \bar{d} (заряд $\frac{1}{3}$.)

Тем не менее еще не ясно, действительно ли эти результаты подтверждают существование кварков. Загадочнее всего наблюдаемые иногда скачкообразные изменения заряда шариков от 0 до $\pm \frac{1}{3}$. Чтобы истолковать такие скачки как захват кварка шариком или уход кварка с шарика в окружающее пространство, надо допустить, что в окрестности шарика кварки кишмя кишат подобно электронам; этому, однако, противоречат неопределенные результаты опытов Морпурго и др. Поэтому правильнее сказать, что существование свободных кварков пока еще не доказано.



ОБ УСКОРИТЕЛЯХ

Чем сильнее удар, тем мощнее звучание природы

Символ физики элементарных частиц — гигантские ускорители. Без них невозможны эксперименты с частицами, а без экспериментов немислимо развитие физики. Разумеется, высокие энергии нужны в физике частиц не всегда: она содержит также разделы, в которых изучают крайне тонкие эффекты, требующие высокой точности измерений. Но для поиска новых частиц и неизвестных ранее взаимодействий увеличивать энергию совершенно необходимо. Поскольку соотношение $E=mc^2$ налагает ограничение на массы частиц, могущих образоваться в процессах с данной энергией соударения, можно сказать, что надобность в ускорителях на некоторую энергию отпадает после того, как изучены реакции, возбуждаемые с помощью машин такого класса. Затем надо строить ускорители на еще большую энергию ...

Можно спросить: где гарантия, что повышение энергии ускорителей обязательно приведет к новым открытиям? Такой гарантии, конечно, нет, но, по крайней мере в прошлом, еще не бывало случая, чтобы постройка новых ускорителей не приводила к открытию новых частиц. Мы все время надеемся, что вот-вот достигнем рубежа, когда подтвердится вдохновляющая нас гипотеза о существовании небольшого числа фундаментальных элементов, из которых построено все вещество. Но природа каждый раз оказывается хитрее нас: она постоянно подбрасывает одну за другой все новые

частицы. Случается, конечно, что тот или иной проницательный ученый острым взглядом различает ключ к природным явлениям и предсказывает существование частиц с определенными свойствами. Хороший пример такого предвидения — мезоны Юкавы; из последних достижений можно указать на предсказание очарованных частиц (новой разновидности кварков), основанное на работах Глэшоу и др. Но не будет преувеличением сказать, что природа всегда оказывается богаче и сложнее наших гипотез о ней. Так было в случае Юкавы, который предположил существование мезонов всего одного типа, а выяснилось, что число типов мезонов огромно. Аналогично не оправдалось предположение, что с открытием очарованных частиц окончательно найдены все разновидности кварков — недавно обнаружен пятый кварк *b* («боттом-кварк», название произошло от английского слова *bottom* — дно)¹⁾.

Именно в этой нетривиальности взаимодействия природы с познающим человечеством кроется секрет неувядающей юности и свежести физики элементарных частиц, здесь источник нашего воодушевления. Оправдание огромных бюджетных ассигнований на постройку гигантских ускорителей — в приумножении ценностей общечеловеческой культуры. Если бы вдруг оказалось, что все фундаментальные частицы уже найдены и изучены, то физика высоких энергий, превратившаяся ныне в громадное международное предприятие, прекратила бы свое существование. Но можно ли сказать, что мы близки к исчерпанию предмета физики элементарных частиц? Предыдущий опыт подсказывает, что, скорее всего, мы пока не в состоянии быстро овладеть самыми сокровенными тайнами мироздания. Поэтому не остается ничего иного, как упорно и настойчиво продолжать исследования.

Принципы работы ускорителей

Основная идея опытов с элементарными частицами крайне проста: она сводится к тому, чтобы столкнуть частицы между собой и посмотреть, что получится. Чаще всего в результате столкновений образуется много разных частиц, в том числе нестабильных, не встречающихся в обычном веществе. Нестабильные частицы вскоре после своего рождения «распадаются» на другие частицы. К числу существенных экспериментальных данных относятся: схема распада, время, прошедшее

¹⁾ У большинства физиков не вызывает сомнения существование шестого, *t*-кварка (от англ. *top* — вершина). См. также стр. 128.—
Прим. ред.

от рождения частицы до ее распада, а также схема той реакции, в которой родилась нестабильная частица.

Простейший пример ускорителя — электронно-лучевая трубка бытового телевизора. Вам, конечно, известно, что это — та часть телевизора, в которой формируется телевизионное изображение. Из раскаленной нити катода, находящейся внутри трубки в высоком вакууме, вылетают электроны, которые затем ускоряются в определенном направлении, проходя большую разность потенциалов (около 15 000 В), и, ударяясь в люминофор, нанесенный изнутри на экран трубки, возбуждают атомы люминофора, вызывая процесс люминесценции. В результате испускаются фотоны (световые кванты).

В опытах с элементарными частицами ускоряют не только электроны. Существуют ускорители протонов (ядер атома водорода) и ядер других элементов; но в основном ускорители подразделяют на электронные и протонные. В примере с телевизором упомянута единица измерения электрического напряжения — вольт. Эту же единицу используют для указания энергии частиц в любых ускорителях; она удобна для сравнения разных ускорителей между собой.

Точнее говоря, энергию ускорителей выражают в электронвольтах (эВ). Например, циклотрон, на котором в свое время работал Ферми в Чикагском университете¹⁾, имел энергию 450 МэВ. Приставка М означает «мега», или «миллион» (10^6), а величина 450 МэВ — не что иное, как энергия, которую приобретают испускаемые катодом электроны, пройдя разность потенциалов $4,5 \cdot 10^8$ В. Эта энергия равна разности потенциалов V , умноженной на заряд e , т. е. eV . Протон и электрон имеют одинаковые по абсолютной величине, но противоположные по знаку электрические заряды. Поэтому если бы в примере с телевизором из электрода вылетали протоны, то на трубку надо было бы подать ускоряющее напряжение противоположной полярности.

Энергия, необходимая для удаления электронов с внешних оболочек атома (т. е. ионизации), по порядку величины составляет несколько электронвольт (говоря о «порядке величины», число указывают с точностью до множителя десять). Таков же порядок величины характерных энергий химических реакций. Не случайно стандартная ЭДС сухих батареек для микро-ЭВМ, транзисторных приемников и т. п. равна 1,5 В.

¹⁾ Автор книги проф. Ё. Намбу — декан физического факультета Чикагского университета США. — *Прим. перев.*

Энергии связи атомных ядер гораздо больше, по порядку величины они равны 10^6 эВ.

Именно такую кинетическую энергию надо сообщить протонам, чтобы при их соударениях с ядрами могли идти ядерные реакции. Но так как создать разность потенциалов 10^6 В технически сложно, ускоряемые частицы заставляют вращаться в магнитном поле, постепенно разгоняя их сравнительно небольшими импульсами напряжения, подаваемыми в определенные моменты времени с частотой вращения частицы. Это напоминает раскачивание качелей. Принцип постепенного ускорения в магнитном поле впервые использован в изобретенном Лоуренсом циклотроне. Если напряжение в импульсе составляет, например, 1000 В, то за тысячу оборотов частица пройдет разность потенциалов 10^6 В. Большинство экспериментов в физике высоких энергий по существу состоит в том, что пучок ускоренных указанным образом частиц выводят из магнитного поля и облучают им мишень, регистрируя частицы — продукты ядерных реакций.

При энергиях порядка 1 ГэВ ($=10^3$ МэВ, буква Г стоит здесь вместо приставки «гига», означающей миллиард, 10^9) циклотроны уступают место синхротронам. Принцип ускорения в синхротроне по существу тот же, но в отличие от циклотрона вакуумная камера синхротрона, в которой движутся ускоряемые частицы, имеет вид узкого тора, заключенного между полюсами магнитов. Хотя толщина тора всего несколько сантиметров, длина его окружности может составлять несколько сот метров. Например, протонный синхротрон на энергию 12 ГэВ Центра физики высоких энергий в Цукубе (Япония) имеет радиус около 17 м (длина окружности 108 м). Гораздо больше размеры синхротрона на энергию 400 ГэВ Национальной лаборатории ускорителей им. Ферми в окрестностях Чикаго (США). Радиус его кольца около 1 км, и все сооружение сверху напоминает кружево автомобильных дорог.

Размеры кольца ускорителя должны увеличиваться с ростом энергии ускоряемых частиц. Объясняется это прежде всего тем, что с ростом энергии частицы все труднее изменить направление ее движения, и радиус кривизны кольца будет увеличиваться из-за невозможности создать очень сильное магнитное поле. Еще одна причина увеличения радиуса кольца — потери энергии на излучение. При изменении направления своего движения заряженная частица излучает электромагнитные волны, и это приводит к уменьшению ее энергии. Ясно, что для эффективности ускорения прирост



Рис. 4.1. Национальная лаборатория ускорителей им. Ферми (FNAL) в окрестностях Чикаго (США) (схема).

энергии частицы за один оборот должен превышать сумму потерь энергии. Поскольку потери энергии прямо пропорциональны четвертой степени отношения полной энергии заряженной частицы к ее энергии покоя и обратно пропорциональны радиусу орбиты, указанный критерий эффективности налагает жесткие ограничения на возможность ускорения частиц с небольшой энергией покоя, подобных электрону.

Поэтому для получения высокоэнергичных электронов стали разрабатывать не кольцевые, а линейные ускорители, имеющие прямолинейную вакуумную камеру, в которую через определенные промежутки встроены пары ускоряющих электродов. Энергия частиц в таких машинах пропорциональна длине ускорителя. Широко известен линейный ускоритель SLAC (США) Станфордского университета, в трехкилометровой вакуумной трубке которого электроны разгоняются до энергии 25 ГэВ. Линейный ускоритель Центра физики высоких энергий в Цукубе (Япония) позволяет получить электроны с энергией 2,5 ГэВ, но эта машина предназначена не для создания электронного пучка, а для генерации с его помощью большого числа высокоэнергичных фотонов («фабрика фотонов»).

Итак, размеры ускорительных установок достигли нескольких километров, и для постройки как кольцевых, так и линейных машин уже стало не хватать территории и финансовых средств. Ферми как-то полушутя заметил, что к 1984 г.

(этот год вынесен в название фантастического романа Г. Орвелла) ускорители опояшут весь земной шар. Человечеству крупно повезло, что ни шуточный прогноз Ферми, ни мрачные пророчества Орвелла не стали реальностью.

Метод встречных пучков, использующий сокрушительную мощь лобового соударения

Для преодоления тупика, в который зашли традиционные методы ускорения, и существенного повышения энергии сталкивающихся частиц был предложен удачный обходной путь: разработан метод встречных пучков, реализующий, как ясно уже из его названия, возможность столкнуть между собой частицы, движущиеся в противоположных направлениях. В этом случае нет снаряда и мишени: обе частицы являются снарядами. Так работает, например, ускоритель PETRA в Гамбургском научно-исследовательском центре DESY (ФРГ). Принцип ускорения здесь тот же, что в синхротроне, но разгоняются два пучка — электронов и позитронов, — движущиеся навстречу друг другу. Удобно, что вследствие противоположности электрических зарядов электрона и позитрона эти частицы отклоняются магнитным полем в противоположные стороны. Если в каждом из пучков частицы имеют энергии по 15 ГэВ, то в момент их остановки при лобовом столкновении в энергию реакции может преобразоваться сумма энергий частиц 30 ГэВ.

Не надо думать, однако, что полученная при этом величина 30 ГэВ всего лишь вдвое превосходит энергию соответствующего ускорителя с неподвижной мишенью. Дело в том, что при неподвижной мишени в энергию реакции переходит не вся кинетическая энергия снаряда: часть последней расходуется на то, чтобы отбросить мишень (энергия отдачи). Когда мишень гораздо массивнее снаряда, энергия отдачи мала, но легко понять, что при обратном соотношении масс снаряда и мишени эффективность соударения сильно уменьшается. Потери энергии на отдачу увеличиваются по мере приближения скорости снаряда к скорости света из-за релятивистского возрастания массы. Эффективно используется не энергия снаряда E' в лабораторной системе отсчета, а его энергия W в системе покоя центра инерции снаряда и мишени. При неподвижной мишени $W \sim \sqrt{E'}$ (энергия W пропорциональна квадратному корню из E' , т. е., например, при увеличении энергии снаряда E' вчетверо энергия W возрастает всего

40 ОБ УСКОРИТЕЛЯХ

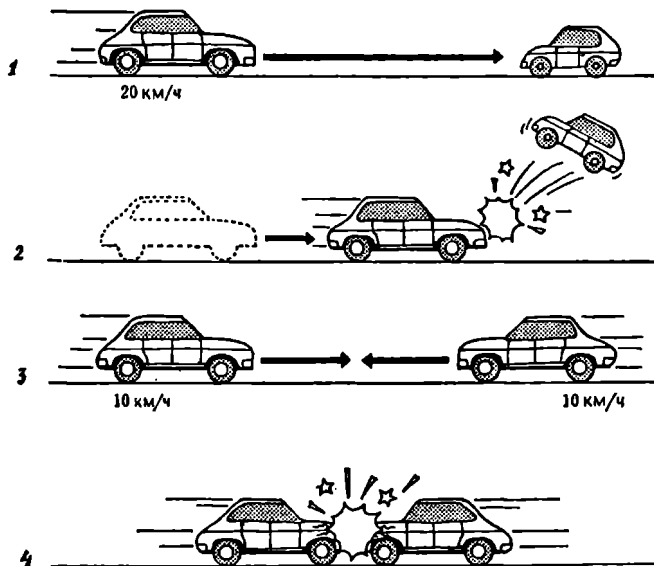


Иллюстрация к методу встречных пучков. При наезде большого автомобиля на стоящий маленький автомобиль (1) последний отскакивает с неожиданно слабыми повреждениями (2), а при лобовом столкновении (3) идущих с одинаковой скоростью навстречу друг другу автомобилей одинаковой массы повреждения велики (4).

вдвое). Если же сталкиваются частицы равной массы, движущиеся навстречу друг другу, то система покоя их центра инерции совпадает с лабораторной и $W=2E'$ (энергия W пропорциональна первой степени энергии снаряда E'). Когда протоны, разогнанные до энергии $E'=450$ ГэВ в ускорителе лаборатории им. Ферми, сталкиваются с неподвижной водородной мишенью, энергия W составляет 30 ГэВ, т. е. равна эффективной энергии ускорителя на встречных пучках PETRA, у которого энергия электронов в пучке $E'=15$ ГэВ.

Разумеется, эксперименты по столкновению протонов с протонами имеют совершенно другой смысл, чем опыты по столкновению электронов с электронами, прежде всего из-за различия адронных и лептонных взаимодействий; но надо подчеркнуть, что в случае электронов кроме метода встречных пучков не существует никакого другого способа достичь указанной энергии соударения. Ведь масса электрона составляет всего лишь около $\sim 1/2000$ массы протона, и при

использовании электронов в качестве неподвижной мишени энергия отдачи катастрофически увеличилась бы.

Слабое место метода встречных пучков — малая частота реакций. Эту особенность легко понять, сравнивая мысленно, например, стрельбу из пулемета по большой мишени и по летящим навстречу пулям. Для увеличения эффективности установок наряду с повышением интенсивности пучков стремятся путем сжатия пучка поднять плотность частиц в нем, т. е. работать с узкими пучками. Но поскольку многого таким способом не достигнешь, ускоренные частицы не пускают в дело сразу, а накапливают их в специальных тороидальных накопительных кольцах, где частицы вращаются в магнитном поле до тех пор, пока их не наберется достаточное количество.

Мы рассмотрели в общих чертах принципы работы современных ускорителей. Подведем итоги.

По принципу ускорения установки подразделяют на синхротроны и линейные ускорители, а по методике соударения — на машины с неподвижными мишенями и со встречными пучками. По виду ускоряемых частиц различают протонные и электронные ускорители с неподвижными мишенями. Ускорители на встречных пучках могут быть протон-протонными, протон-антипротонными, электрон-электронными, электрон-позитронными, а также протон-электронными и т. п., но на сегодняшний день реально работают только протон-протонный ускоритель ISR в ЦЕРНе¹⁾ (Женева, Швейцария) и уже упоминавшийся электрон-позитронный ускоритель PETRA (Гамбург, ФРГ). В ЦЕРНе завершается строительство большого протон-антипротонного ускорителя²⁾. В проект ускорителя TRISTAN (Центр физики высоких энергий, Цукуба, Япония) внесено изменение: он будет строиться как электрон-позитронный ускоритель.

Мы видим, что идет постоянное международное соревнование в постройке ускорителей на все более высокую энергию. Если не шутить, как Ферми, а говорить серьезно, то в течение полустолетия, прошедшего со времени изобретения

¹⁾ Европейская организация ядерных исследований. — *Прим. перев.*

²⁾ Синхротрон SPS в ЦЕРНе с 1981 г. работает в режиме встречных протон-антипротонных пучков с энергией 540 ГэВ.

В различных лабораториях мира планируется создание целого ряда ускорительных установок на встречных пучках, например электрон-позитронный ускоритель LEP с энергией 250 ГэВ в ЦЕРНе, ускорительно-накопительный комплекс (УНК) с энергией встречных протон-протонных и протон-антипротонных пучков 6000 ГэВ в Институте физики высоких энергий в Серпухове и т. п. — *Прим. ред.*

первого циклотрона Лоуренсом, энергии ускорителей увеличивались в десять раз каждые семь-восемь лет и сейчас достигли уровня 1 ТэВ (Т—сокращение от «тера», означает 10^{12}). Такое успешное развитие во многом обусловлено техническим прогрессом, так как разработка и внедрение новых методов ускорения удешевляет строительство ускорительных установок, делая его практически осуществимым. Не известно, однако, долго ли продержится эта благоприятная для ускорительной техники тенденция.



РОЖДЕНИЕ ТЕОРИИ ЮКАВЫ

От атома к атомному ядру

С созданием квантовой механики завершился длительный период закладки основ теории структуры атома и его свойств. Ранее, еще в 1911 г., Резерфорд выяснил, из каких объектов составлен атом: изучая рассеяние атомами альфа-частиц (ядер гелия), он пришел к выводу о наличии в центре атома тяжелого положительно заряженного ядра, окруженного облаком электронов. Но как движутся электроны, в частности почему они не теряют энергию на излучение электромагнитных волн? Решить эту задачу в рамках классической электродинамики было невозможно.

В 1912 г. Нильс Бор предложил квантовую модель атома, выдвинув смелую гипотезу о том, что электроны в атоме движутся только по «квантованным» орбитам, а свет излучается при перескоке электрона с орбиты на орбиту. Боровская модель объясняла основные закономерности атомных спектров, но еще не являлась окончательной теорией. Удовлетворительное объяснение стабильности атомов впервые было найдено только в квантовой механике, сформулированной в 1925 г. Гейзенбергом и Шредингером.

Электрон в квантовой механике имеет волновые свойства: атомы стабильны потому, что в окрестности ядра электронная волна является стоячей. Примером могут служить стоячие волны, возникающие на звучащей струне рояля или скрипки, когда на длине струны укладывается только определенное число собственных колебаний — основной тон или целое число обертонов (гармоник). Электронная волна в атоме

имеет аналогичную природу (собственные колебания электронов атома определяются волновым уравнением Шредингера).

Квантовая механика не просто решила задачу об атоме, она сильно изменила сам способ описания физических явлений. В новой механике классические ньютоновские законы движения уступили место квантовым законам, но главное различие этих двух механик — не в некоторой модификации формы уравнений, а в коренном изменении подхода к описанию природы. Теперь законами движения определялись уже не координаты и скорости частиц (как было в классической механике), а амплитуды распределения вероятности того, что данная частица имеет те или иные физические характеристики. Однако объяснение квантовой механики не является моей целью, и я ограничусь лишь этими вводными замечаниями. Речь о ней я завел здесь только затем, чтобы показать, как физики прошлого расширяли сферу ее применения.

Было понятно, как с помощью квантовой механики решать задачи атомной физики: для объяснения свойств атомов надо было применять квантовые законы к системе, состоящей из атомного ядра и электронов. Но что происходит внутри ядра, сначала не знали. Предполагали, что ядро, скорее всего, не является элементарной частицей, а содержит много протонов и нейтронов, но поскольку силы, связывающие ядерные частицы, должны были иметь совершенно новую, неэлектромагнитную природу, существовали сомнения в возможности описать их в рамках квантовой механики. Совершенно другим, чем в атомах, был также масштаб энергий. Электроны в атомах имеют кинетическую энергию порядка нескольких электронвольт, чему соответствует длина волны $\sim 10^{-8}$ см, совпадающая с размерами атома, а энергии и длины волн нуклонов в ядре по оценкам должны отличаться от значений этих величин для электронов примерно в миллион раз. Так как теории строения ядра предстояло объяснить все указанные особенности, до появления работы Юкавы широко бытовало мнение о чрезвычайной, почти непреодолимой сложности этой задачи.

В известном смысле так оно и есть. Ведь до сих пор не удалось вывести все конкретные особенности ядерных сил из одного фундаментального уравнения. Проблематичность такой возможности еще усилилась в связи с тем, что сами нуклоны сейчас уже не трактуют как элементарные частицы и ядро теперь надо рассматривать скорее как разновидность сложной макромолекулы, свойства которой требуется определить по уравнению Шредингера.

По моему личному мнению, главная заслуга Юкавы в том,

что он подошел к вопросу о ядерных силах как к общей задаче: можно ли, полностью доверяя уже существующей теоретической схеме, а именно квантовой механике и частной теории относительности, описать в ее рамках короткодействующие силы типа ядерных¹⁾? Оказалось, что можно, если допустить существование неизвестной ранее частицы. Но если это неизбежный логический вывод теории, то не следует бояться того, что соответствующие экспериментальные данные пока отсутствуют.

В случае Юкавы история распорядилась так, что его гипотеза нашла экспериментальное подтверждение. Сам Юкава следующим образом описывает свои переживания в тот период (цитируется по предисловию Юкавы к книге С. Такауты «Порядок и хаос. Теория Юкавы». — Косаку Сякан, 1974.):

«Осенью 1934 г., когда на основании своего исследования по теории ядерных сил я пришел к выводу о существовании мезона, мой дух переполняла чудесная уверенность в своей правоте. Сейчас уже стала общепринятой точка зрения Пуанкаре о том, что теория в физике построена на гипотезах. Я согласен с этим, но в то же время не считаю, что полностью потеряло смысл требование Декарта об аксиоматическом построении теории. Когда очень долго, как слегка ненормальный, концентрируешь все свои умственные силы на какой-либо проблеме, бывает, что та или иная мысль начинает представляться самоочевидной. Тогда в душе волной подымается поразительная самоуверенность и пробуждается жажда к дальнейшей работе. Такое состояние и означает, что появилась гипотеза, истинность или ложность которой надо объективно проверить путем сопоставления ее следствий с эмпирическими фактами. Но для автора его гипотеза, по крайней мере сначала, выглядит «безусловной истиной, исключающей все другие возможности». Человек, видящий в своей гипотезе одну только эту сторону, совершенно ничего не понимает в творчестве, в частности мало что может сказать о том, как делаются открытия в теоретической физике».

¹⁾ При построении своей теории ядерных сил Х. Юкава использовал идею И. Е. Тамма и Д. Д. Иваненко о том, что короткодействующие ядерные силы возникают в результате обмена частицами с ненулевой массой. Сама мысль о том, что силы, действующие между частицами, могут быть результатом обмена квантами поля, была высказана ранее П. А. М. Дираком, В. А. Фоком и Б. Подольским. — *Прим. ред.*

Мезонная теория Юкавы

Перейдем к рассмотрению мезонной теории Юкавы. При обдумывании проблемы ядерных сил на ум прежде всего приходят уже известные, хорошо понятые силы — электромагнитная и гравитационная. Выше отмечалось, что радиус их действия бесконечен, а соответствующие им потенциалы убывают обратно пропорционально расстоянию. С математической точки зрения статические электрическое и гравитационное поля являются решениями уравнения Лапласа. Но известно, что уравнение Лапласа применимо только в случае, когда источники поля покоятся; при движущихся источниках электромагнитное поле описывается уравнениями Максвелла, а гравитационное — уравнениями Эйнштейна. Обе эти системы уравнений имеют частные решения в виде волн, распространяющихся со скоростью света.

Во второй половине XIX в. Максвелл, обобщив законы электромагнетизма, найденные его предшественниками Фарадеем и др., и внося в них некоторые математические исправления, пришел к непротиворечивой системе уравнений, имеющей упомянутые волновые решения. Поскольку скорость распространения этих волн совпала со скоростью света, Максвелл заключил, что свет — разновидность электромагнитных волн. Вскоре этот вывод был подтвержден экспериментально.

Максвелловская теория электромагнетизма — первый пример так называемой теории поля. В наши дни любые силы описывают как полевые величины (поля сил, или силовые поля). Говоря немного упрощенно, полем определяется сила, действующая на пробное тело, помещенное в любую пространственно-временную точку (т. е. на пробное тело, находящееся в любой точке пространства в произвольный момент времени). Таким образом, силовое поле характеризует (в любой точке) свойства своеобразной «среды», получившей название «пространство-время».

Напротив, в ньютоновской теории тяготения сила притяжения двух материальных тел имеет вид «действия на расстоянии», т. е. считается, что тела влияют друг на друга непосредственно через разделяющее их пространство. Этот эффект, однако, допускает интерпретацию и на языке теории поля: можно рассмотреть поле силы тяжести, создаваемое первым телом в окружающем его пространстве, и принять, что на второе тело действует не само первое тело, а создаваемое им поле. В данном случае под полем надо понимать потенциал силы тяжести.

Последний пример показывает, что между полевым подходом и подходом, исходящим из действия на расстоянии, вообще говоря, нет непреодолимой пропасти, но формулировка максвелловской теории электромагнетизма и осознание того факта, что электромагнитные силы «распространяются» с ограниченной скоростью, послужили вескими доводами в пользу естественной идеи о силовом поле в среде. Более того, структура уравнений Максвелла содержала ключ к выяснению свойств этой среды: независимость скорости света от системы отсчета. В этом свойстве, поразительном самом по себе, лишь Эйнштейн смог разглядеть указание на то, что от выбора системы отсчета не должна зависеть скорость распространения не только электромагнитного поля, но и любого силового поля вообще. В основе созданной им «частной теории относительности» фактически лежит постулат о том, что поскольку форма уравнений Максвелла определяется свойствами пространства-времени, ими же должна определяться форма уравнений любых других силовых полей, если таковые существуют.

Эйнштейн определил релятивистское движение материальной точки как классического объекта, без учета квантовых (волновых) свойств частицы. Волновую функцию, описывающую квантовые свойства частицы, разумно интерпретировать как разновидность поля, в роли уравнения которого выступает уравнение Шредингера. Поскольку последнее является фундаментом нерелятивистской квантовой механики, соответствующей нерелятивистской ньютоновой механике материальной точки, оно не вписывается в рамки частной теории относительности.

Релятивистская квантовая механика

Какую же форму принимает релятивистская квантовая механика? Чем надо заменить уравнение Шредингера? Ответы на эти вопросы впервые даны Дираком, а уравнение, определяющее волновую функцию релятивистского электрона, получило название уравнения Дирака.

От уравнения Шредингера оно отличается рядом новых черт. Например, дираковский электрон имеет спин, т. е. свойство, которое можно интерпретировать либо как собственное вращение, либо как внутреннюю степень свободы, аналогичную поляризации света. По существу спин электрона означает его внутренний момент количества движения; величина электронного спина, измеряемая в единицах постоянной Планка \hbar , равна $1/2$, а проекция этого квантового вектора на

произвольную ось может принимать только два значения: $+1/2$ («вверх») и $-1/2$ («вниз»). Какое из двух возможных направлений считать направлением «вверх» — вопрос удобства; он решается аналогично тому, как в оптике решают вопрос о разложении поляризации света по двум взаимно перпендикулярным осям.

Спин электрона впервые введен в физику не Дираком: гипотеза о спине возникла немного ранее в связи с попытками объяснить некоторые особенности атомных спектров. Но то обстоятельство, что из уравнения Дирака автоматически, без каких-либо дополнительных предположений, следует наличие у электрона спина, явилось блестящим успехом релятивистской квантовой механики.

Еще один новый результат, с необходимостью вытекающий из уравнения Дирака, — существование «антиэлектрона», или, как его обычно называют, «позитрона». Точнее говоря, состояние, естественно описываемое дираковской волновой функцией, наряду с электроном включает позитрон, имеющий положительный электрический заряд. При столкновении электрона (e^- или e) с позитроном (e^+ или \bar{e}) кроме рассеяния этих частиц друг на друге может происходить их взаимная аннигиляция с испусканием нескольких фотонов (гамма-квантов, γ). Возможные результаты e^-e^+ -соударения записывают при помощи формул

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

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma' \text{ и т. п.}$$

ПОЛЬ ДИРАК родился в 1902 г. в Англии. Единственный из основателей квантовой механики, здравствующий и поныне. Гений, работы которого поражают математической глубиной и изяществом. Носящее его имя уравнение, описывающее квантовые и релятивистские свойства электрона, Дирак вывел, когда ему было 26 лет. Затруднение, состоящее в наличии у его уравнения решений с отрицательной энергией, Дирак преодолел, интерпретируя электрон с отрицательной энергией как позитрон с положительной энергией, т. е. сформулировав гипотезу о существовании так называемых античастиц. В 1933 г. удостоен Нобелевской премии. С тех пор внес большой вклад в развитие квантовой теории поля. В последнее время особую актуальность приобрела созданная им в 1931 г. теория изолированного магнитного полюса (монополя Дирака). Независимо от математиков разработал

математическую теорию спиноров для уравнения Дирака и математику нитевидных волокон для теории монополя. Кредо Дирака выражается следующей цитатой из его статьи о монополе: «Природа не может не воспользоваться красивой, математически элегантной возможностью». В настоящее время живет во Флориде (США). Временами выступает с научными лекциями. Лекции эти не рукописные, но в них нет ни одного лишнего слова, а манера изложения столь же красива и строга, как и в его научных статьях.

Разумеется, указанные процессы могут идти и в обратном направлении, т. е. при достаточной энергии соударения γ -квантов возможно образование электрон-позитронных пар. Существование позитронов экспериментально подтверждено американским физиком Андерсоном; его открытие в свое время послужило сильным аргументом в пользу уравнения Дирака. На первый взгляд не понятно, почему позитроны так редко встречаются в окружающей нас действительности. В ответ на этот вопрос обычно говорят, что позитроны аннигилируют при столкновении с электронами, но такое объяснение неудовлетворительно, так как тогда не ясно, почему после полной аннигиляции осталось так много электронов. Аналогично не понятно, чем объяснить существующее ныне соотношение между числами протонов и антипротонов. Анализ подобных вопросов уводит нас к проблеме образования Вселенной. Ею мы займемся ниже.

Обсудим релятивистскую квантовую механику в целом. Выше мы рассмотрели две характерные особенности уравнения Дирака — наличие у электрона спина и существование античастиц. Но уравнением Дирака не исчерпываются все релятивистски-инвариантные уравнения, к ним принадлежат еще, например, уравнения Максвелла. При переходе к квантовой механике классическое поле приобретает корпускулярные, а классическая частица (материальная точка) — полевые (волновые) свойства; корпускулярные и волновые свойства квантового объекта надо трактовать единым образом. В итоге возникает следующая ситуация.

Если для элементарной частицы (например, электрона или фотона) известны конкретные значения ее фундаментальных характеристик — массы, спина и электрического заряда, то движение частицы можно описать при помощи подходящего волнового уравнения. При этом оказывается, что каждой частице с необходимостью соответствует античастица, име-

ющая противоположный по знаку электрический заряд. В частности, частица может совпадать со своей античастицей; тогда ее электрический заряд, конечно, равен нулю. Примером такой нейтральной частицы является квант электромагнитного поля (фотон). Но было бы ошибкой думать, что способность заряженных частиц к излучению электромагнитных волн (испусканию фотонов) обусловлена отсутствием у фотона электрического заряда. Равенство нулю электрического заряда фотона означает лишь то, что свет как таковой не является своим собственным источником (свет не является источником света).

К числу самых фундаментальных характеристик элементарной частицы принадлежит масса покоя; если последняя равна нулю, то частица вынуждена постоянно двигаться со скоростью света. Типичный пример безмассовой частицы — фотон. Кроме него нулевой массой покоя должен обладать также квант гравитационного поля — пока еще не наблюдавшийся гравитон. До последнего времени считалось, что и среди частиц материи имеется одна с нулевой массой покоя, именно нейтрино, но сейчас в этом возникли сомнения (см. стр. 204).

Обратимся к спину. Выше указывалось, что в единицах \hbar спин электрона равен $1/2$, так что электрон может находиться в двух спиновых состояниях, с проекцией спина «вверх» ($+1/2$) и «вниз» ($-1/2$). Спин фотона равен единице. Мы уподобляли спин фотона его поляризации, но на самом деле в случае света понятия поляризации и спина просто тождественны друг другу. Однако, поскольку остановить свет невозможно, о его поляризации нельзя сказать, что она направлена «вверх» или «вниз». Надо рассматривать свет, поляризованный по кругу; тогда проекция момента количества движения фотона на направление его распространения будет равна ± 1 в зависимости от того, какова круговая поляризация — правая или левая. Эти два состояния поляризации фотона соответствуют двум спиновым состояниям электрона.

Числами $1/2$ и 1 не исчерпываются возможные значения спина элементарной частицы. В принципе могут существовать частицы со спинами 0, $1/2$, 1, $3/2$, ... Если спин массивной частицы равен j , то частица может пребывать в $2j+1$ спиновых состояниях, с проекциями спина на произвольно выбранную ось, равными $j, j-1, j-2, \dots, -j$. Например, частица ненулевой массы покоя со спином 1 может находиться в состояниях с проекциями спина 1, 0, -1. Если же, как в случае с фотоном, масса покоя частицы равна нулю, то

имеется всего два спиновых состояния, с проекциями спина на направление движения частицы, равными $\pm j$.

По установленному Паули соотношению между спином и статистикой частицы с целыми (0, 1, 2, ...) и полуцелыми ($1/2$, $3/2$, ...) значениями спина относят к двум совершенно различным разновидностям частиц. Если говорить упрощенно, то частицы с полуцелыми спинами (например, электрон) ведут себя как корпускулы также и в классическом пределе (при $\hbar \rightarrow 0$), т. е. входят в состав так называемого вещества.

Частицы же, проявляющие себя в классической механике как волны или силовые поля (например, электромагнитное поле), характеризуются целыми значениями спина (условия, при которых справедливо также и обратное утверждение, мы рассмотрим ниже).

Различают два типа статистики элементарных частиц — статистику Ферми, которой подчиняются частицы с полуцелыми спинами, и статистику Бозе, описывающую частицы с целыми спинами. Говоря упрощенно, в случае статистики Ферми две частицы не могут одновременно занимать одно и то же состояние, например, находиться в одном и том же месте пространства и иметь при этом одинаковые проекции спина на заданную ось. Это требование ферми-статистики согласуется с обычным представлением о веществе: ведь всегда подразумевается, что несколько одинаковых составных частей вещества невозможно «втиснуть» в одно и то же состояние.

Наоборот, в случае статистики Бозе число частиц, одновременно находящихся в одном и том же состоянии, ничем не ограничено. Такую особенность бозе-статистики можно интерпретировать как возможность получения волны сколь угодно большой амплитуды путем суперпозиции произвольного числа волн. Хотя энергия отдельного фотона и мала, но если их собирается достаточно много, то коллектив фотонов ведет себя как макроскопическое электромагнитное поле. Яркий пример поведения мы видим в лазерах, свойства излучения которых, как известно, объясняются тем, что лазерный луч содержит огромное число фотонов, находящихся в совершенно одинаковом состоянии.

Ферми-частицы, подчиняющиеся статистике Ферми, обычно называют фермионами, а бозе-частицы, следующие статистике Бозе, — бозонами. Ниже мы будем систематически пользоваться этими терминами. Фермионы названы так в честь Энрико Ферми (биографическую справку о нем см. на стр. 94), а бозоны — в честь индийского физика М. К. Бозе.

Кроме электронов и фотонов существуют еще принима-

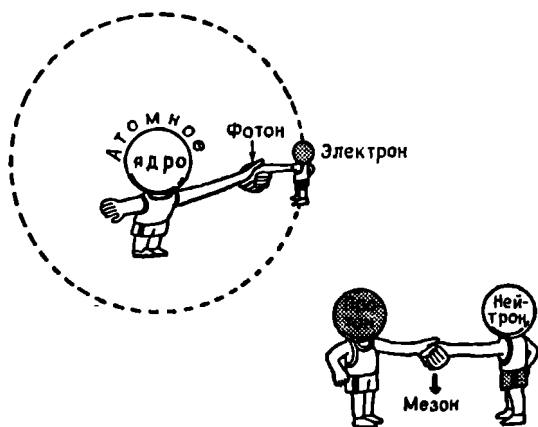
шиеся до сих пор за элементарные частицы нуклоны и построенные из нуклонов атомные ядра; к ним тоже применимы обсуждавшиеся выше общие принципы. Например, нуклоны, т. е. протоны и нейтроны, являются фермионами со спином $1/2$, которые совместно со своими античастицами (антинуклонами) описываются при помощи соответствующих уравнений Дирака, а образованный из протона и нейтрона дейтрон (ядро атома тяжелого водорода) надо трактовать как бозон со спином 1. Но этот бозон и в классическом пределе ведет себя как материальная частица, а не как силовое поле. Таким образом, вообще говоря, подразделение на бозоны и фермионы не совпадает с подразделением на классические частицы и классические поля. Причину такого несовпадения можно, конечно, видеть в том, что дейтрон является составной, а не элементарной частицей. Точно так же бозоном можно было бы считать состоящий из протона и электрона атом водорода.

Как зародилась идея о мезоне

Возникает вопрос: существуют ли другие, отличные от фотонов элементарные частицы, являющиеся бозонами? Если да, то они должны были бы проявляться как силовые поля¹⁾, например как поле ядерных сил. Согласно изложенной выше общей теории, подобный бозон мог бы обладать ненулевой массой. Если его спин равен нулю, т. е. если он описывается волновым уравнением Клейна—Гордона, то можно убедиться, что соответствующее силовое поле имеет короткий радиус действия, обратно пропорциональный массе бозона (равный его комптоновской длине волны).

Как раз примерно такими же свойствами обладают ядерные силы. Если так, то не существует ли в природе бозона, который являлся бы массивным квантом поля ядерных сил, описываемых уравнением Клейна—Гордона? Порядок величины радиуса действия последних известен: он совпадает с размерами ядра (10^{-13} см). Соответствующий расчет дает для массы кванта поля ядерных сил значение, примерно в 200 раз большее массы электрона (около $1/10$ массы нуклона). В этом по существу и состояла идея Юкавы. В его время такой бозон не был известен, но Юкава смело постулировал его существование и назвал свою гипотетическую частицу мезоном, так как для ее массы получилось значение, промежуточное между значениями масс электрона и протона.

¹⁾ См. примечания редактора на стр. 45 и 191.— *Прим. ред.*



Что связывает протон и нейтрон, электрические силы между которыми ничтожно слабы?

Теория Юкавы создана в 1934 г., т. е. примерно десять лет спустя после формулировки квантовой механики (1925 г.). За этот период пополнились знания об атомном ядре, было понято, что оно образовано из протонов и нейтронов, и доказано, кроме того, существование позитронов. Таким образом, момент для появления теории Юкавы был очень подходящим, но спрашивается, не было бы лучше, если бы Юкава выдвинул свою гипотезу еще раньше?

Поскольку идея Юкавы высказана после упомянутых открытий, может возникнуть мнение, что до такого «пустяка» был тогда в состоянии додуматься любой. В этой связи поучительно посмотреть, как рассуждали в то время другие физики, и попытаться воссоздать идейную атмосферу в физике в первой половине 1930-х годов.

ХИДЭКИ ЮКАВА (1907—1981) родился в Токио, вырос и учился в Киото (любопытно, что среди ученых, сведения о жизни и научной деятельности которых сообщаются в данной книге, очень велик процент родившихся либо в Токио, либо в Нью-Йорке). Отец — географ Т. Огава. Воспитываясь в семье потомственных ученых, Юкава с детских лет получил разно-стороннее образование, в частности глубокие знания по классической синологии. Годы его учебы в университете Киото по времени совпали с периодом закладки основ новой

квантовой механики Гейзенбергом, Шредингером и др. В Японии тогда учиться квантовой механике было не у кого, и Юкаве пришлось овладеть ею в основном самостоятельно. Проявив исключительную независимость и твердость духа, Юкава в 1934 г., в возрасте 27 лет, выдвинул свою мезонную теорию, в которой превзошел знаменитых европейских лидеров теоретической физики. В 1949 г. он первым среди японских ученых был удостоен Нобелевской премии. В последующие годы руководил группой, занимавшейся теорией элементарных частиц в университете Киото; подготовил многих физиков-теоретиков. После войны работал в основном над развитием теории нелокальных полей, цель которой — устранение недостатков традиционной квантовой теории поля. Предложенные им в этой области идеи и методы нашли широкое международное признание.

Эпоха 1930-х годов

Успешное описание строения атома, т. е. движения внутриатомных электронов, явилось крупным достижением квантовой механики, но было неизвестно, как далеко простирается область ее применимости. Перед физиками встала задача описать строение гораздо более мелкого, чем атом, объекта — атомного ядра. Представлялось очень вероятным, что оно образовано из нуклонов, но оставался совершенно неясным механизм связи нуклонов в ядре. И если для решения задачи об атоме пришлось создать новую механику — квантовую, то не потребуется ли придумать еще одну новую механику, специально приспособленную уже для решения задачи об атомном ядре?

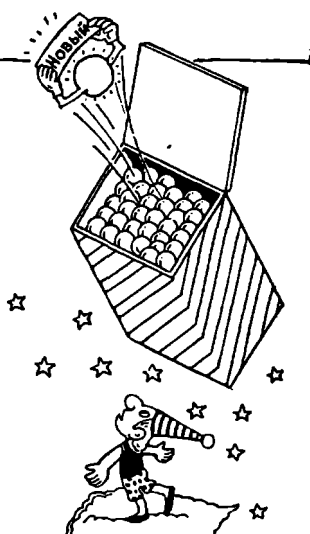
Релятивистская квантовая механика допускала существование большого числа разнообразных частиц, но пока еще была не вполне ясна интерпретация понятия античастицы. Хотя позитрон и обнаружили, оставались сомнения в существовании антинуклонов. Дело выглядело так, будто в окружающем нас мире есть всего три вида частиц-фермионов — протоны, нуклоны и электроны — и два вида полей — электромагнитное и гравитационное. Не окажется ли, что частицы с промежуточными массами (типа мезонов) найти не удастся? И до каких пределов можно доверять релятивистской квантовой механике?

Я думаю, сила Юкавы заключалась в том, что он не поддавался подобным сомнениям. Проще говоря, он был уверен

в истинности и универсальной применимости обеих созданных в XX веке и добившихся блестящих успехов поразительно красивых теоретических систем — теории относительности и квантовой теории — и не поколебался применить к атомному ядру следовавшие из них выводы. Был убежден в возможности описания всех физических явлений на основе квантовых и релятивистских законов. Конечно, какие-либо отдельные, пусть даже красивые и физически возможные законы не обязательно будут выполняться в природе. Но проверенные и эстетически безупречные системы законов безусловно должны иметь более широкие и глубокие применения, чем предполагалось вначале. Даже если на первый взгляд и покажется, что следствия из таких систем законов противоречат опыту, серьезное исследование неизбежно подтвердит их универсальную применимость.

Хорошую иллюстрацию этой мысли дает история вопроса о черных дырах, существование которых следует из эйнштейновской общей теории относительности. Проблема черных дыр не относится к теме моей книги, поэтому я не буду в нее особенно углубляться, замечу лишь, что всеобщие разговоры о чудовищном гравитационном поле, которое настолько сильно искривляет пространство-время, что оттуда не может выбраться свет, свидетельствуют о том, что в широкой публике проблема черных дыр вызывает еще большее любопытство, чем вопрос о кварках. Мода на эти разговоры так распространилась потому, что в последнее время благодаря прогрессу наблюдательной астрономии появились косвенные свидетельства в пользу существования черной дыры даже в центре нашей галактики. Однако идея, лежащая в основе представления о черной дыре, возникла почти сразу после создания в 1916 г. эйнштейновской теории гравитации (общей теории относительности), когда Шварцшильд решил уравнения Эйнштейна для сферически-симметричного гравитационного поля.

НОВЫЕ ЧАСТИЦЫ

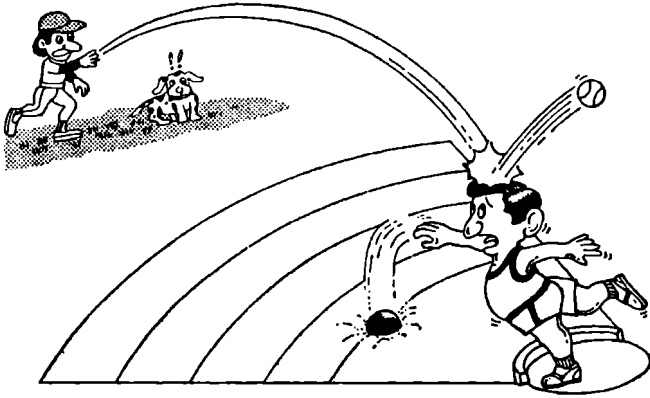


Потенциалы Кулона и Юкавы

Начатый в прошлой главе разговор о теории Юкавы еще не закончен. Была пояснена только основная идея этой теории, состоящая в том, что описание ядерных сил на основе релятивистской квантовой механики неизбежно приводит к постулату о существовании бозона, названного Юкавой мезоном. Но, зная только это, будет, по-видимому, трудно понять содержание теории Юкавы. Кроме того, надо разъяснить ряд оставленных пока без ответа вопросов, например, почему мезоны Юкавы не удастся наблюдать в обычных опытах.

Действие силового поля на частицу на языке квантовой теории обычно интерпретируют как испускание и поглощение квантов этого поля. Например, считают, что электромагнитное (кулоновское) взаимодействие двух электронов возникает вследствие обмена фотонами. Электроны, так сказать, «играют в мяч», причем в роли мяча выступает фотон. Отсутствие у фотона массы покоя (его движение со скоростью света) проявляется в «дальнодействии» кулоновских сил, т. е. в том, что кулоновский потенциал убывает с расстоянием как $1/R$.

Если же в нашей «игре в мяч» частицы «перекидываются тяжелым мячом», т. е. обмениваются бозоном с ненулевой массой покоя, то действие силового поля не простирается далеко. Потенциал в этом случае зависит от расстояния по «закону Юкавы» [$\sim \exp(-\mu R)/R$], т. е. убывает при увеличении расстояния по экспоненциальному закону. Здесь μ — величина, пропорциональная массе частицы ($1/\mu$ — так



Тяжелый мяч далеко не бросишь.

называемая комptonовская длина волны). Таким образом, в случае массивного бозона радиус действия сил по порядку величины совпадает с комptonовской длиной волны кванта силового поля. К сожалению, без использования дифференциальных уравнений невозможно показать, как возникает формула для потенциала Юкавы. Но на качественном уровне факт короткодействия ядерных сил легко объяснить при помощи соотношения неопределенностей Гейзенберга.

Заметим, что рассматриваемый бозон (которым обмениваются взаимодействующие частицы) не является «настоящей» (реальной) частицей, так как в начальном состоянии нет энергии, необходимой для его действительного рождения (для этого нужна энергия порядка энергии покоя массивного бозона). Такие бозоны называют «виртуальными», подразумевая под этим, что они существуют только в течение короткого интервала времени «переброски мяча» и, так сказать, не успев родиться, тут же уничтожаются. Поскольку по соотношению неопределенностей Гейзенберга неопределенность энергии ΔE обратно пропорциональна неопределенности времени ΔT ,

$$\Delta E \cdot \Delta T \geq \hbar \quad (\hbar \text{ — постоянная Планка}), \quad (1)$$

при очень малом сроке существования ΔT неопределенность энергии ΔE может оказаться достаточной для рождения виртуальной частицы. Но, родившись, она за время ΔT продвинется самое большее на расстояние $\Delta T \cdot c$ (c — скорость света). Полагая, что ΔE равно энергии покоя mc^2 , для

радиуса действия сил находим значение $\hbar/mc = 1/\mu$, совпадающее с комптоновской длиной волны.

Таким образом, мы объяснили, почему силы Юкавы имеют конечный радиус действия, и оценили порядок его величины. Ответ на вопрос о знаке сил Юкавы — являются они силами притяжения или силами отталкивания — зависит от знака «заряда» источника поля. Под «зарядом» в данном случае надо понимать характеризующую источник константу, играющую в случае поля Юкавы роль, аналогичную роли электрического заряда в теории электромагнитного поля (как известно, в последней кулоновский потенциал пропорционален электрическому заряду). В общем случае такую величину называют постоянной связи (константой связи); ее величиной определяется интенсивность силового поля. Ядерные силы гораздо больше электромагнитных потому, что в первом случае константа связи гораздо больше, чем во втором. Константа связи электромагнитного поля равна электрическому заряду e ; в безразмерной записи эта величина приобретает вид знаменитой постоянной тонкой структуры $e^2/\hbar c = 1/137$. Относительная слабость электромагнитного взаимодействия объясняется тем, что число $1/137$ мало по сравнению с единицей.

Так как ядерные силы больше электромагнитных, константы связи мезонов должны быть больше величины $e^2/\hbar c$; как правило, постоянные связи мезонных полей имеют порядок от 0,1 до 1. Но на знак ядерных сил кроме константы связи решающее влияние оказывает еще величина спина мезонов. Например, если бы происходил обмен мезонами со спином, равным единице (таким же, как у фотонов), то две частицы, имеющие одинаковые константы связи (одинаковые «заряды»), отталкивались бы, а при обмене мезонами со спином, равным нулю, те же частицы притягиваются (ввиду сложности объяснения этого феномена мы ограничимся здесь только упоминанием о нем).

Сначала Юкава предположил, что мезоны имеют спин 0 и электрические заряды ± 1 . Естественно, что при перебрасывании «заряженного мяча» взаимодействующие частицы обмениваются электрическим зарядом. Это значит, что, например, протон, испустивший в сторону нейтрона мезон с электрическим зарядом $+1$, сам превращается в нейтрон, а поглотивший указанный мезон нейтрон становится протоном. Иными словами, если такие процессы разрешены, то делается невозможной идентификация протона и нейтрона, которые теперь выступают просто в роли различных зарядовых состояний нуклона. Кроме того, понятно, что протон с протоном или

нейтрон с нейтроном не могут перебрасываться только одним «заряженным мячом».

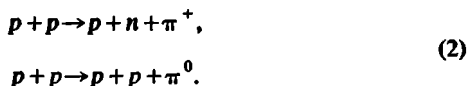
Разумеется, невозможность идентификации протона и нейтрона имеет важное значение. Впервые идею о их неразличимости выдвинул Гейзенберг. В гл. 3 мы уже отмечали, что если отвлечься от электрического заряда, то протон и нейтрон очень похожи друг на друга; поэтому при решении задачи о ядерных силах естественно сначала пренебречь тонкими различиями нуклонов и рассматривать протон и нейтрон как две частицы с одинаковой массой. Но тогда надо ввести квантовое число, позволяющее их пометить. По аналогии с квантовым вектором спина, имеющим всего две проекции — «вверх» и «вниз», Гейзенберг ввел так называемый изоспин. По определению нуклон находится в состоянии протона, когда проекция изоспина направлена «вверх», и в состоянии нейтрона, когда она направлена «вниз». (Слово «изоспин» означает «однотипный»; оно получено объединением слов «изотоп» и «спин».) Известно, что ядра изотопов имеют одинаковые атомные номера Z и различные массовые числа (см. стр. 28). Поэтому, к сожалению, определение изоспина по смыслу противоположно определению изотопа. По величине изоспина нуклона равен $\frac{1}{2}$, а его проекции на направление z принимают значения $\pm \frac{1}{2}$. Символически это записывают при помощи формул $I = \frac{1}{2}$, $I_z = \pm \frac{1}{2}$.

В настоящее время стало ясно, что при помощи мезонов одного вида полностью объяснить ядерные силы невозможно. Для их действительного описания надо учитывать процессы обмена мезонами многих типов, имеющими разные массы, спины и электрические заряды. Тем не менее полагают, что основную роль в создании ядерных сил играют самые легкие мезоны, которым соответствуют силовые поля с наибольшими радиусами действия, т. е. так называемые пионы или пи-мезоны (π). Их открыли раньше других мезонов, и это открытие было квалифицировано как общее подтверждение теории Юкавы.

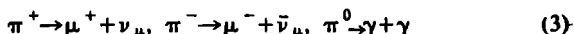
Пионы

Масса пионов примерно в 270 раз больше массы электрона. Они имеют спин нуль, но в отличие от первоначального предположения Юкавы четность пионов отрицательна. Четностью называют свойство, связанное с пространственной инверсией: четность частицы положительна, если соответствующее поле не изменяет знака при зеркальном отражении или, что то же, при замене правой системы координат на левую; в противном случае четность отрицательна.

Существуют пионы трех видов, с электрическими зарядами ± 1 и 0. Поэтому взаимодействие нуклонов может происходить как с перезарядкой, так и без нее. В итоге оказывается, что сила взаимодействия между нуклонами не зависит от направления изоспина, т. е. симметрична относительно замены протона на нейтрон и обратно. Такое же замечание относится к пионам (π^0 , π^+ , π^-), находящимся в трех зарядовых состояниях; полагают, что изоспин пиона $I=1$ ($I_z=1, 0, -1$). Пионы как реальные частицы могут рождаться в нуклон-нуклонных столкновениях при условии, что энергия сталкивающихся частиц достаточно велика. Например, возможны процессы:

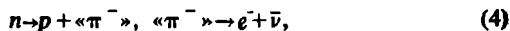


Энергия покоя пиона равна 140 МэВ. С учетом отдачи нуклона для рождения реального пиона необходим ускоритель на энергию 280 МэВ. Оказалось, что свободные пионы не стабильны: частицы π^\pm распадаются на мюоны (μ) и мю-нейтрино (ν_μ), а частица π^0 — на два фотона (γ):

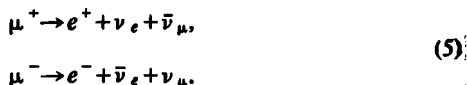


(символ $\bar{\nu}$ означает античастицу для ν , т. е. антинейтрино). Время жизни заряженных пионов составляет 10^{-8} с, а нейтрального — 10^{-16} с. Отсутствие пионов в обычном веществе объясняется их нестабильностью.

Для объяснения бета-распада нейтрона Юкава предположил, что мезон распадается на электрон и нейтрино. Точнее говоря, он рассматривал процессы



где $\langle \pi \rangle$ — гипотетический пион Юкавы, появляющийся на промежуточном этапе бета-распада. В действительности, однако, пион сначала распадается на мюон (μ) и мю-нейтрино (ν_μ) по схеме (3), а затем наступает вторая стадия процесса — бета-распад мюона:



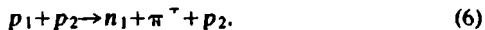
Здесь ν_μ и ν_e — нейтрино двух разных сортов: частица ν_μ всегда сопровождает мюон (μ), а частица ν_e сопровождает электрон (e).

Мюон был открыт в 1936 г., вскоре после появления

теории Юкавы. Его обнаружила в космических лучах группа Андерсона (того самого, который открыл позитрон). Эту частицу сразу попытались интерпретировать как мезон Юкавы, т. е. как пион. Такое стремление вполне объяснимо. Во-первых, близки их массы: масса мюона составляет около $\frac{3}{4}$ массы пиона. Во-вторых, мезон Юкавы призван объяснить ядерные силы, а какова возможная роль еще одного мезона, было не ясно. Казалось, что он совершенно не нужен.

Регистрируемые в космических лучах мюоны являются вторичными частицами: первичные космические лучи, состоящие в основном из протонов, при столкновениях с ядрами атомов воздуха рождают в верхних слоях атмосферы поток пи-мезонов, вскоре распадающихся с испусканием мюонов, которые и достигают земной поверхности. Мюоны не успевают распасться, во-первых, из-за того, что их время жизни примерно в 100 раз больше времени жизни пи-мезонов (в системе отсчета, связанной с Землей, это время жизни еще больше увеличивается за счет релятивистского эффекта замедления скорости хода часов), а во-вторых, потому, что мюоны, будучи, как и электроны, лептонами, не участвуют в сильном взаимодействии с веществом воздуха.

Но если не знать о существовании описанного двуступенчатого процесса, то при интерпретации наблюдаемых явлений неизбежно приходишь к противоречию. В самом деле, для того чтобы в разреженных верхних слоях атмосферы космические протоны могли продуцировать достаточное количество пионов, необходимо сильное взаимодействие, при котором типичная реакция с образованием пи-мезона имеет вид



Написанная формула означает, что первичный космический протон p_1 , сталкиваясь с протоном p_2 , входящим в состав ядра атома воздуха, превращается в нейтрон n_1 с испусканием π^+ -мезона.

Но тогда с той же вероятностью должен идти обратный процесс, при котором π^+ -мезон поглощается, сталкиваясь в ядре атома воздуха с нейтроном ($\pi^+ + n \rightarrow p$); в итоге он никак не может благополучно достичь земной поверхности.

От гипотезы о двух мезонах к открытию мюона

Эта неувязка несколько лет смущала физиков. Правильное решение вопроса впервые было указано Танигавой и Сакатой. В основном верное описание фактов давала, в частности,

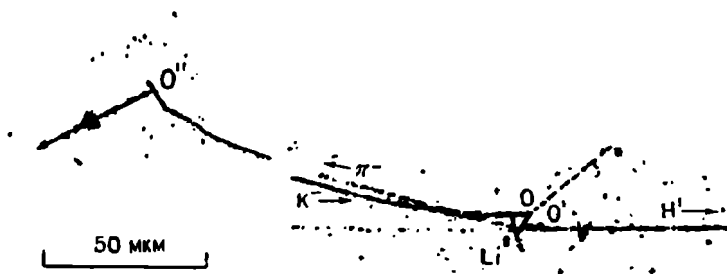
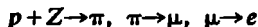


Рис. 6.1. Треки частиц в фотоэмульсии. (Фото проф. Леви-Сетти из журнала «Нуово чименто».)

гипотеза о двух мезонах, предложенная Сакатой и Иноуэ. Но в условиях второй мировой войны эта гипотеза не привлекла к себе должного внимания. Действительное открытие пионов произошло уже после окончания войны, в 1947 г. Их обнаружила группа английских физиков под руководством Пауэлла, которая достигла успеха при помощи высокочувствительных фотопластинок, помещаемых в поток космических лучей. После проявления фотоэмульсию исследовали под микроскопом и нашли в ней следы первичных космических протонов. Точнее говоря, была ясно различима последовательность процессов



(Z означает здесь атомное ядро). К счастью исследователей, оказалось, что образовавшийся при столкновении сравнительно низкоэнергичный пион вылетел в направлении, параллельном слою эмульсии. Растратив свою энергию, пион остановился и превратился в мюон, который в свою очередь аналогичным образом распался на электрон и два нейтрино (последние, конечно, не оставили следов в эмульсии).

Толщина следа зависит от интенсивности процесса ионизации частицей атомов среды и в общем случае уменьшается при возрастании скорости частицы, приближаясь к минимальному значению, когда скорость частицы стремится к скорости света. Истинная природа мезонов Юкавы была выяснена, таким образом, благодаря прогрессу технологии, позволившему регистрировать предельно тонкие следы релятивистских частиц.

Открытие пиона и мюона имело исключительное, принципиальное значение для окончательного закрепления наметившегося еще ранее кардинального изменения наших первоначальных представлений об элементарных частицах. Раньше

полагали, что элементарные частицы, как правило, должны представлять собой стабильные составные части окружающего нас обычного вещества (казалось противояственным, что в роли фундаментальных частиц могут выступать какие-то эфемерные, нестабильные образования). Вообще-то и раньше были известны исключения. Например, нейтрон, стабильный внутри атомного ядра, в свободном состоянии путем бета-распада превращается в протон. Хотя испускаемое распадающимся нейтроном нейтрино в те времена еще сохраняло статус гипотетической частицы, его, во всяком случае, не считали составной частью вещества. В этом смысле можно сказать, что наличие бета-радиоактивности, впервые обнаруженной у радия, уже тогда указывало на существование скрытых, еще не понятых нами принципов организации материи.

Но после открытия пиона и мюона исключения превратились в правило. Обе вновь открытые частицы оказались нестабильными и не входили в состав обычного вещества. Мюон ведет себя как тяжелый электрон, это один из членов современного семейства лептонов; до сих пор не ясно, для чего он существует. Таинственность мюона усиливалась еще тем, что до самого последнего времени из частиц семейства лептонов были известны только электрон, мюон и соответствующие им два вида нейтрино (электронное нейтрино и мю-нейтрино).

Напротив, открытие пиона снимало налет таинственности с ядерных сил, или так называемого сильного взаимодействия: существование пионов указывало на возможность понять это взаимодействие в рамках релятивистской квантовой механики. Но являются ли пионы единственными носителями ядерных сил? Если исходить из «естественной» точки зрения, что природа должна быть устроена по возможности просто, то, конечно же, пионы надо было рассматривать как единственные частицы такого рода. Поэтому многие теоретики потратили тогда огромные усилия на попытки описать детали строения ядерных сил на основе пионной гипотезы.

В действительности, однако, не только никак не удавалось удовлетворительно объяснить ядерные силы, но и сами пионы оказались не более чем «первыми ласточками» большого и все разрастающегося семейства мезонов: новые, странные и непонятные мезоны и барионы начали открывать один за другим. В этих обстоятельствах стало ясно, что давно известные нам атомные ядра — всего лишь разновидность адронов, случайно оказавшихся стабильными.

Драматический выход на сцену V -частиц

Вскоре после открытия пионов в космических лучах обнаружили так называемые V -частицы. Их увидели не в фотопластинках, а в обычной камере Вильсона; своим названием V -частицы обязаны форме трека, напоминающего изогнутый гвоздь. Аналогично выглядит трек пиона, превращающегося в мюон, но V -частицы имели большие, чем пионы, массы, а кроме того, по-видимому, их было несколько типов.

Наблюдались случаи превращения заряженных V^\pm -частиц в другие заряженные и нейтральные частицы, случаи превращения нейтральных V^0 -частиц в пары заряженных частиц (треки при этом имели вид перевернутых букв V), случаи превращения одной V^\pm -частицы в тройку заряженных частиц и т. п.; вторичными частицами, в которые превращались V -частицы, могли быть пионы, мюоны, протоны и т. д. Бросалось также в глаза, что часто на фотоснимках регистрировалось сразу по две V -частицы. Как надо было интерпретировать эту массу событий?

Разумеется, физики постоянно занимаются разгадкой подобных головоломок. Но поскольку я сам в то время много думал на эту тему вместе со своими коллегами по Осакскому университету, мне хочется поделиться здесь своими воспоминаниями. Доля процессов с участием V -частиц в общем балансе реакций, вызываемых космическими лучами, крайне мала. Поэтому вероятностью одновременного рождения пары V -частиц можно было бы полностью пренебречь, если бы рождение каждой из них происходило независимо от рождения другой. Следовательно, большая частота появления пар V -частиц скорее всего объясняется тем, что они рождаются парами в одном и том же процессе, и надо искать причину совместного рождения. Если бы такой причины не существовало, то в силу приведенных соображений с подавляющей вероятностью должны были бы рождаться одиночные V -частицы. Итак, в чем же причина совместного рождения V -частиц?

При обдумывании этого вопроса, естественно, возникает мысль о законах сохранения. Еще в гл. 1 мы видели, какую пользу они могут принести при интерпретации результатов опыта. Надо попытаться ввести подходящую величину, сохранением которой эти результаты объяснялись бы. Например, совместное рождение электрона (e^-) и позитрона (e^+) возможно, а совместное рождение двух электронов e^- и e^- или двух позитронов e^+ и e^+ запрещено законом сохранения электрического заряда. Не существует ли в случае V -частиц

какой-либо новой сохраняющейся величины (квантового числа)?

Это новое квантовое число Гелл-Манн назвал «странностью», и поскольку такое название пришло, начиная с этого места мы будем им пользоваться. Смысл названия в том, что частицы очень уж необычны.

Поскольку при столкновении космического протона с веществом полная странность системы равна нулю, в результате столкновения должны образоваться две V -частицы, имеющие соответственно положительную и отрицательную странности. Экспериментальные данные показывают, что две компоненты пары не обязательно принадлежат одному виду V -частиц. Учитывая, что некоторые из них могут превращаться обратно в протоны, естественно допустить среди V -частиц существование фермионов, более тяжелых, чем протон, и мезонов, которые легче протона. На эксперименте изредка наблюдаются случаи отсутствия парного рождения V -частиц. Такие исключения можно объяснить тем, что одна из V -частиц ускользнула из камеры Вильсона, не успев прореагировать с веществом, или была не замечена по какой-либо другой причине. Подобные недосмотры в порядке вещей, поэтому о редких отклонениях от закона парного рождения можно не беспокоиться.

Какова дальнейшая судьба однажды рожденной V -частицы? Если бы квантовое число «странность» сохранялось точно, то оно не могло бы измениться при ее дальнейших превращениях, в частности V -частица не могла бы поглощаться обычным веществом, так как по определению странность частиц последнего равна нулю. Но экспериментально наблюдаются случаи превращения V^0 -частицы в пару $\pi \pm$ -мезонов. Как и обычное вещество, пионы имеют странность, равную нулю. Для объяснения возникающего противоречия можно, конечно, предположить, что совместно с пионами при V^0 -распаде рождаются какие-то другие нейтральные частицы, ускользающие от наблюдения, но детальное измерение энергетических и угловых распределений продуктов реакции показало, что кроме двух пионов никаких других частиц в данном случае не образуется.

Попытка справиться с затруднениями

Итак, мы опять зашли в тупик. Как из него выбраться? Один из возможных путей выхода — допустить, что специально введенный нами закон сохранения может нарушаться, т. е. что он не является абсолютно строгим, а имеет исключения.





Рис. 6.2. Пример V -частицы. Распад K^- (тау-частицы): $\tau^- \rightarrow 3\pi$. (Фотография предост. проф. Леви-Сегги.)

Конечно, это путь оппортунистов, и даже раздавались голоса, что не к лицу так поступать физикам, которые должны ценить строгость своих теорий. Но если говорить не о законах сохранения, а о правилах отбора, то примеров нарушения последних сколько угодно. Правда, странность введена нами как величина, аналогичная электрическому заряду, и как-то неприятно допускать возможность нарушения закона ее сохранения. Однако исследователь перестанет быть самим собой, если не испробует всех возможностей. Мы скоро убедимся, что гипотеза о нарушении закона сохранения странности очень полезна.

Прежде всего в рамках такой гипотезы распад V -частиц «почти» запрещен, откуда следует, что они должны иметь сравнительно большое время жизни. «Сравнительно большое» означает здесь, что время жизни велико по сравнению со сроком существования виртуальной частицы, определяемым из соотношения неопределенностей. Подставляя в формулу $\Delta E \cdot \Delta T \geq \hbar$ в качестве ΔE энергию покоя V -частицы или кинетическую энергию вторичных частиц — продуктов ее распада (последнюю величину обозначают символом Q), для ΔT

находим значение порядка 10^{-23} с; даже при движении со скоростью света за это время можно пройти расстояние не больше 10^{-13} см, совпадающее по порядку величины с размером атомного ядра. Вычисленный по соотношению неопределенностей интервал времени играет роль естественного временного масштаба для случаев неабсолютного запрета; частицы с временем жизни порядка 10^{-23} с фактически надо рассматривать как «виртуальные»: по существу они не отличаются от «мячей», «переброской» которых объясняется природа ядерных сил.

Время жизни реальных V -частиц несравнимо больше указанного только что временного масштаба. Рождаясь в стенках камеры Вильсона, они распадаются только после того, как пройдут расстояние в несколько сантиметров, откуда следует, что их время жизни самое малое 10^{-10} с; эта величина меньше времен жизни пиона (10^{-8} с) и мюона (10^{-6} с), но по порядку величины она скорее близка к ним, чем к сроку существования виртуальной частицы.

Здесь уместно вспомнить, что распады пиона и мюона естественно рассматривать как разновидности бета-распада. В частности, распад мюона очень похож на бета-распад нейтрона: предложенная для описания последней теория бета-распада Ферми практически без изменений обобщается на случай мюона и позволяет вычислить его время жизни в точном соответствии с экспериментальным значением (большое различие времен жизни нейтрона (10 мин) и мюона (10^{-6} с) объясняется различием величин Q , а константы связи бета-распада нейтрона и мюона хорошо согласуются друг с другом). Не следует ли отсюда, что и распад V -частиц надо трактовать как разновидность бета-распада? Может быть, меньшее значение времен жизни V -частиц объясняется тем, что величина Q для них еще больше, чем для мюона и пиона?

Соответствующий анализ показал, что эти странные явления, напоминающие бета-распад, очень разнообразны. Их объединяет крайне медленное течение процесса, т. е. небольшая величина константы связи. Кроме того, все они, так сказать, обладают несговорчивым характером, т. е. без должной почтительности относятся к разным законам сохранения, постоянно нарушая их.

Подытожим еще раз то, чему мы научились у природы.

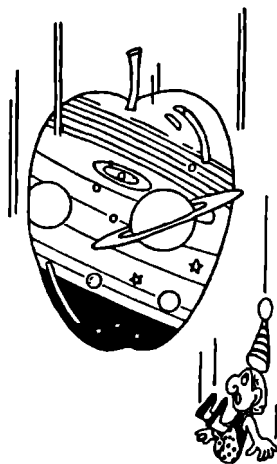
1. Элементарные частицы не обязательно являются составными частями обычного вещества; их разновидности гораздо больше.
2. Различаются два вида взаимодействия — электро-

магнитное и сильное (ядерные силы), и существуют кванты передающих их полей.

3. Одни частицы участвуют в сильном взаимодействии, а другие не участвуют в нем. На современном языке это адроны и лептоны.
4. Существует третий вид взаимодействия—так называемое слабое взаимодействие, являющееся, в частности, причиной бета-распада. Многие адроны и лептоны нестабильны относительно слабого взаимодействия.
5. Слабое взаимодействие может нарушать законы сохранения, установленные для других видов сил.

Последняя особенность слабого взаимодействия проявилась, в частности, в упомянутом выше нарушении закона сохранения странности. По мере увеличения наших знаний мы все более убеждались в «коварстве» слабого взаимодействия. В списке его «преступлений» против законов сохранения особую известность получила история с нарушением закона сохранения четности. О несохранении четности, а также о нарушении закона сохранения странности мы подробнее поговорим в следующей главе.

СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ



Правило Накано — Нишиджимы — Гелл-Манна

После обнаружения пионов, мюонов и V -частиц, в 1950-х гг. одну за другой стали открывать все новые частицы и общее число их стало быстро увеличиваться. Правда, за исключением мюона, все остальные вновь открываемые частицы оказывались адронами. Такая тенденция сохраняется до сих пор: единственный вновь открытый лептон (τ) обнаружен совсем недавно, всего несколько лет назад. Исключительная многочисленность семейства адронов — несомненно, благоприятное для исследователей обстоятельство. Оно позволяет систематически изучать свойства адронов и, располагая их в том или ином порядке, попытаться обнаружить регулярную повторяемость свойств. Так бывало не раз в истории физики. Например, при изучении структуры атомов именно обилие спектроскопических данных позволило установить простые закономерности, попытки понять которые и привели в конце концов к созданию квантовой механики. Если обратиться к более раннему периоду, то только потому, что планет было несколько, Коперник смог построить свою модель Солнечной системы, а наличие многочисленных наблюдательных данных Тихо Браге помогло Кеплеру сформулировать его знаменитые законы, которые затем Ньютон естественно включил в созданную им механику. Тому же учат нас история открытия Менделеевым его периодического закона и история создания оболочечной модели ядра Майером, Иенсенем и Джусом.

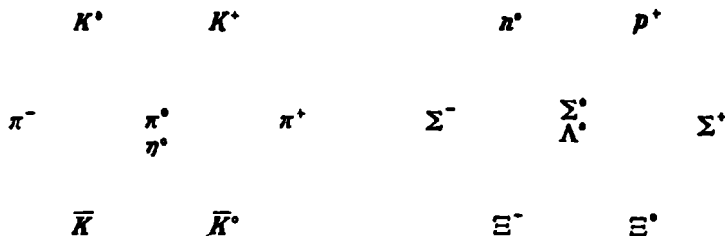


Рис. 7.1. Семейство мезонов.

Рис. 7.2. Семейство барионов.

Для классификации адронов решающее значение имело правило (формула) Накано — Нишиджимы — Гелл-Манна (ННГ). Именно для естественного объяснения этого правила и была предложена в свое время гипотеза о фундаментальных частицах — кварках. Но изложим сначала фактическую сторону дела.

V-частицы, пионы, нуклоны и некоторые другие члены семейства адронов являются «стабильными», т. е. не распадаются, если пренебречь слабым и электромагнитным взаимодействием (примеров электромагнитных распадов не так уж много — это распады π^0 -мезона, Σ^0 -частицы и т. п.). Поэтому их время жизни сравнительно велико, и часто в камере Вильсона или в слое фотоэмульсии удается обнаружить и изучить место, в котором произошел распад. Все остальные адроны (их большинство) «нестабильны», т. е. распадаются уже за счет сильного взаимодействия, превращаясь сразу после своего рождения в некоторое число «стабильных» адронов. Таким образом, большинство адронов можно также рассматривать как очень короткоживущие возбужденные состояния. «Стабильные» адроны обычно подразделяют на мезоны и барионы; члены этих групп частиц приведены на рис. 7.1—7.3.

На этих рисунках частицы уже упорядочены по правилу ННГ. Прежде всего бросается в глаза, что мезоны, барионы и антибарионы образуют группы по восемь частиц. Это обстоятельство Гелл-Манн отметил, воспользовавшись заимствованным из буддизма выражением «восьмеричный путь»¹. По оси абсцисс отложена величина I_z — проекция изоспина на направление z , а по оси ординат — квантовое число «странность» или так называемый гиперзаряд Y (для мезонов $Y=S$,

¹ «Восьмеричный путь, ведущий к освобождению от страдания» (так называемая «четвертая благородная истина») — один из ключевых моментов учения Будды. — *Прим. ред.*

72 СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

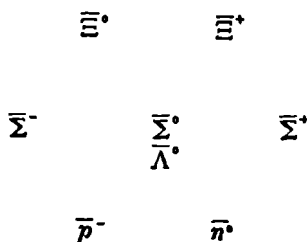


Рис. 7.3. Семейство антибарионов.

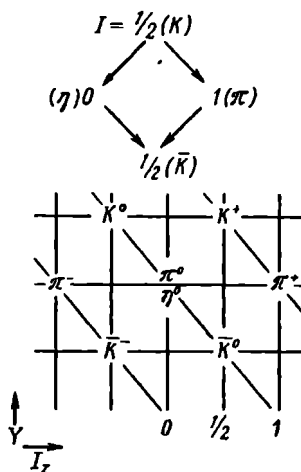


Рис. 7.4.

а в случае барионов и антибарионов соответственно $Y = S \pm 1$). Верхний правый индекс при символах частиц имеет смысл знака электрического заряда; видно, что электрический заряд возрастает по диагонали вправо вверх.

На горизонтальных линиях расположены частицы, имеющие одно и то же значение изоспина I . На примерах нуклонов и пионов мы видели уже, что у частиц с данным значением изоспина массы и константы взаимодействия различаются не очень сильно. Если еще немного снизить требования к точности совпадения масс и констант взаимодействий, то можно будет сказать, что в не слишком плохом приближении массы и параметры сильного взаимодействия совпадают у всех членов данной восьмерки. Массы, во всяком случае, равны по порядку величины, а различие взаимодействий тоже не слишком значительно. Большие различия остаются только в значениях проекций изоспина и значениях квантового числа странности.

Подобный не слишком детальный, обобщенный взгляд на вещи очень важен в физике и естествен с человеческой точки зрения. При таком подходе можно заметить скрытые частностями общие закономерности, позволяющие заложить фундамент будущей точной теории. О каких же общих правилах может идти речь в данном случае?

При взгляде на рис. 7.1 и 7.2 бросается в глаза, что между значениями изоспина I и гиперзаряда Y (или странности)

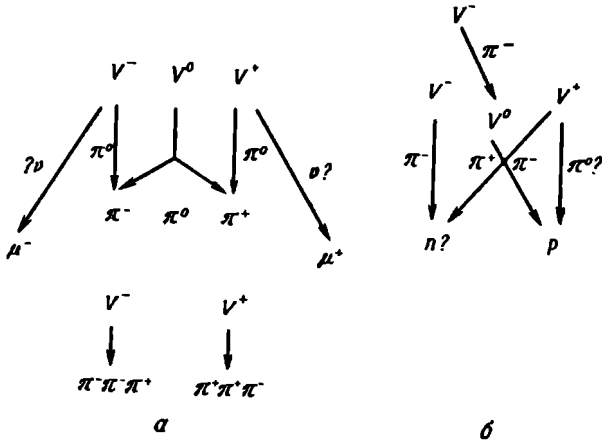


Рис. 7.5. а — V-частицы, интерпретируемые как мезоны; б — V-частицы, интерпретируемые как барионы.

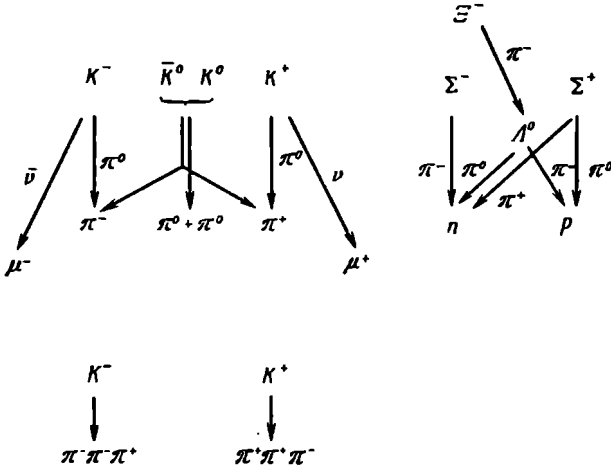


Рис. 7.6.

имеется некоторая связь. Рассмотрим, например, рисунок, относящийся к мезонам. У K-мезонов (каонов) $I = 1/2$, $Y = 1$, для пионов $I = 1$, $Y = 0$, а в случае η^0 -частицы $I = 0$, $Y = 0$. Иными словами, при изменении гиперзаряда Y на единицу изоспин I скачком меняется на $\pm 1/2$. Графически это показано на рис. 7.4.

Выше уже отмечалось, что электрический заряд систематически изменяется в направлении вправо-вверх. Поэтому величину электрического заряда Q можно выразить через проекцию I_z изоспина I и гиперзаряд Y простой формулой

$$Q = I_z + Y/2.$$

Это и есть формула (правило) Накано — Нишиджимы — Гелл-Манна.

Когда рисунок уже готов, додуматься до такой формулы не составляет труда, но настоящая работа физика в том и состоит, чтобы дать правильную картину в условиях, когда еще не известно даже, какие именно частицы существуют; только ради подобной работы и стоит жить. До появления формулы ННГ известные экспериментальные факты изображали диаграммами, подобными показанной на рис. 7.5.

Стрелками на диаграмме 7.5 показаны процессы распада; рядом изображены частицы, испускаемые одновременно. Поскольку массы V -частиц приблизительно известны, расположение последних на диаграмме 7.5 определяется значениями их масс. Можно ли, исходя из рис. 7.5, додуматься до расположения, показанного на рис. 7.1 и 7.2? И каково соответствие между V -частицами и членами изображенных на рис. 7.1, 7.2 октетов? Читатель, подумайте! (Ответ показан на рис. 7.6.)

КАДЗУХИКО НИШИДЖИМА родился в 1926 г. Входил в состав группы, занимавшейся теорией новых элементарных частиц, которая была организована Томонагой в Токио в последний период войны. Когда Нишиджима приступил к работе на вновь созданном физико-техническом отделении Осацкого университета, как раз начали постепенно накапливаться экспериментальные данные о странных частицах. Совместно со своим коллегой по Осацкому университету Накано он предлагает правило Накано — Нишиджимы. В США к тому же результату одновременно и независимо пришел Гелл-Манн. Затем Нишиджима работает несколько лет в ФРГ и США. В настоящее время — профессор Токийского университета. Нишиджима является также автором гипотезы о двух нейтрино (ν_e и ν_μ)¹ и различных теорем в

¹ Предположение, что нейтрино, рождающееся в паре с мюоном, отлично от нейтрино, рождающегося в паре с электроном, высказано в 1957 г. М. А. Марковым, Ю. Швингером и К. Нишиджимой. — *Прим. ред.*

квантовой теории поля. Известен и как автор монографий по теории элементарных частиц и теории поля, написанных на английском языке.

Сущность идеи трех авторов

Формулу, открытую в 1953 г. независимо друг от друга Гелл-Манном и Накано с Нишиджимой, нельзя вывести только путем созерцания картинок, подобных показанной на рис. 7.5. Для ее вывода прежде всего необходимо ввести рассмотренную в предыдущей главе гипотезу о новом квантовом числе (гиперзаряде), закон сохранения которого регулирует процессы рождения V -частиц и может нарушаться в процессах их распада. Но одной этой гипотезы недостаточно. Решающее значение имеет еще упомянутая в предыдущем разделе связь между гиперзарядом (странностью) и изоспином, заключающаяся в том, что при изменении гиперзаряда Y на единицу величина изоспина I меняется на $\pm 1/2$. Если допустить существование такой связи, то легко видеть, что при распаде странных частиц (т. е. частиц с ненулевым значением квантового числа «странность») на обычные частицы с испусканием пионов не сохраняется не только гиперзаряд, но и изоспин. В самом деле, изоспин пионов равен единице, а полный изоспин системы в ходе реакции может измениться только на полуцелое число; следовательно, изменение полного изоспина не может равняться нулю.

Конечно, можно было бы сказать, что нет необходимости нарушать сразу два закона сохранения. Но дело в том, что у обычных (не странных) частиц наблюдается определенная корреляция между значениями спина и изоспина: спин и изоспин одновременно либо полуцелые, либо целые (например, у нуклонов как спин, так и изоспин равны $1/2$, у пионов спин равен нулю, а изоспин — единице). В то же время даже беглого взгляда на известные тогда V -частицы было достаточно, чтобы убедиться в отсутствии у них подобной корреляции. Но вдруг в действительности такая корреляция есть, а не видно ее по случайным причинам? Может быть, надо потребовать, чтобы у странных частиц так же, как у обычных, была корреляция между значениями спина и изоспина? Для обеспечения этой корреляции список V -частиц надо было дополнить, вводя соответствующим образом новые, еще не известные частицы.

Примерно таковы были соображения, которыми руководствовались авторы формулы ННГ; их формула могла быть

верна лишь при условии существования некоторых пока не известных частиц с заранее заданными свойствами. Вскоре предсказанные частицы были обнаружены экспериментально, и гипотеза ННГ превратилась в теорию, которую физики стали развивать дальше. Таким образом, рассмотренный этап классификации частиц завершился благополучно.

В чем должен был состоять следующий шаг? Формула ННГ устанавливала связь между гиперзарядом и изоспином, но не объясняла, почему частицы группируются в октеты. Обсуждение этой проблемы мы отложим до следующей главы, а здесь заметим, что экспериментальное подтверждение теории ННГ указывало не только на то, что надо было просто признать существование октетов (восьмерок частиц, см. рис. 7.1—7.3). Ведь теория ННГ исходила из допущения о сохранении изоспина и гиперзаряда при сильном взаимодействии. Поскольку последнее в основном контролирует механизм рождения V -частиц, а все остальные взаимодействия проявляются лишь при их распадах, указанные законы сохранения надо проверять на процессах рождения. О сохранении гиперзаряда уже говорилось выше, при интерпретации парного рождения странных частиц; теперь надо рассмотреть сохранение изоспина.

Сильное взаимодействие и сохранение изоспина

В качестве примера рассмотрим пион-протонные реакции, т. е. процессы столкновения пучков π^{\pm} -мезонов с протонными мишенями. Поскольку формулой ННГ (см. стр. 74) устанавливается связь между изоспином, с одной стороны, и электрическим зарядом и странностью — с другой, можно было подумать, что из сохранения двух последних величин автоматически следует сохранение первой, но в действительности сохранение изоспина — более сильное требование: оно подразумевает, что вероятность реакции (сечение процесса) не зависит от направления вектора изоспина (его проекций).

Например, изоспин нуклона равен $1/2$, а его проекции, соответствующие протону и нейтрону, равны $1/2$ и $-1/2$; изоспин пиона равен 1, его проекции, отвечающие частицам π^+ , π^0 , π^- , суть 1, 0, -1 . Поэтому различным комбинациям при рассеянии пионов на нуклонах отвечают проекции суммарного изоспина I_z , равные $3/2$, $1/2$, $-1/2$, $-3/2$, а именно:

$$I_z = 3/2 \quad \pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p, \quad (a)$$

$$I_z = 1/2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \pi^+ + n \rightarrow \pi^+ + n, \\ \rightarrow \pi^0 + p, \end{array} \right. \quad (b)$$

$$(c)$$

$$I_2 = -1/2 \left\{ \begin{array}{l} \pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n, \\ , \\ \rightarrow \pi^- + p, \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (d) \\ (e) \end{array}$$

$$I_2 = -3/2 \quad \pi^- + n \rightarrow \pi^- + n. \quad (f)$$

Если отделить три верхние реакции от трех нижних горизонтальной чертой и произвести относительно нее отражение, то такая операция как раз приведет к изменению направления изоспина на обратное. Из закона сохранения изоспина тогда следует, что сечения реакций, которые при указанном отражении ставятся в соответствие друг другу, должны быть одинаковы.

В действительности сечения реакций подчиняются кроме указанного еще некоторым другим, более строгим ограничениям. Поскольку без использования математики объяснить этот материал довольно трудно, я не стану вдаваться в детали, а укажу только, что изоспин надо рассматривать как квантовый вектор. Из квантовой теории следует, что при сложении векторов с длинами $I=1/2$ (нуклоны) и $I=1$ (пионы) могут получиться векторы с длинами $I=1 \pm 1/2$, т. е. с длинами $I=3/2$ и $I=1/2$. Соответственно сечение реакции должно зависеть от двух должным образом скомбинированных членов, отвечающих $I=3/2$ и $I=1/2$. Но могут найтись значения энергии столкновения, при которых основной вклад в сечение реакции вносит член, отвечающий одному (из двух возможных) значению I . Такое случается, если существует резонансное состояние с данным I . Физически подобный резонанс аналогичен резонансу в струнных музыкальных инструментах, когда при некоторой частоте (в нашем случае — энергии) две сталкивающиеся частицы настолько «сходятся характерами», что никак не могут разойтись, образуя метастабильное состояние; сечение процесса тогда сильно возрастает.

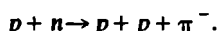
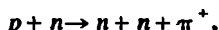
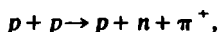
В случае πN -рассеяния (рассеяния пионов на нуклонах) наблюдается резонанс при $I=3/2$. В точке резонанса сечения указанных выше шести реакций выражаются через члены, отвечающие $I=3/2$, и можно точно определить отношения сечений. Вычисление дает

$$a : b : c : d : e : f = 9 : 1 : 2 : 2 : 1 : 9.$$

Этот резонанс получил название 3-3-резонанса (3-3 означает, что речь идет о состоянии с изоспином $3/2$ и спином $3/2$). Исторически 3-3-резонанс πN -рассеяния оказался первым резонансным состоянием, открытым в адронных реакциях.

3-3-резонанс в πN -рассеянии

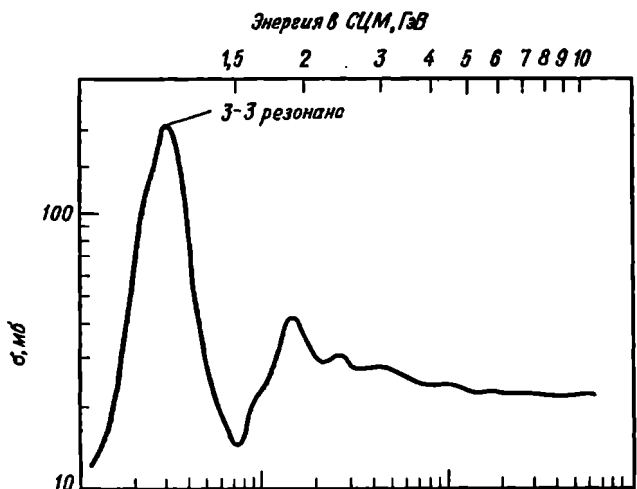
В начале 1950-х гг. в Чикагском университете был запущен новый синхротрон. Автором проекта был Ферми, энергия синхротрона достигала 450 МэВ, а цель его постройки состояла не только в исследовании pp -рассеяния, но и в рождении пионов, а также изучении свойств последних. Протонным пучком бомбардировали соответствующим образом подобранные мишени; при столкновениях налетающих протонов с протонами (p) или нейтронами (n) атомов мишени рождались пионы:



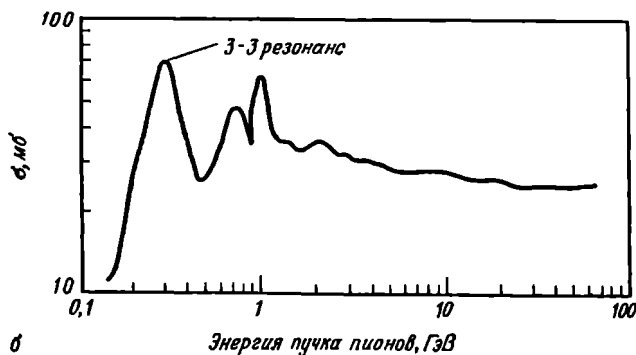
Энергии рожденных таким образом пионов распределялись в интервале от нуля до значений, превышающих 200 МэВ, но сепарация в магнитном поле позволяла выделить монохроматические (с определенным значением энергии частиц) вторичные пучки пионов. До своего распада на мюоны пи-мезоны успевали пролететь расстояние в несколько метров. Цель группы Ферми состояла в том, чтобы, бомбардируя мишени вторичными пучками пи-мезонов, поставить опыты по πN -рассеянию.

Результаты опытов оказались неожиданными: сечение рассеяния постепенно возрастало по мере увеличения энергии пучка пионов. Работавший вместе с Ферми молодой теоретик Бракнер высказал предположение, что дело здесь в существовании пион-нуклонного резонансного состояния. Ту же идею независимо от Бракнера выдвинули Фудзимото и Миядзава.

Резонансное состояние можно трактовать также как частицу с чрезвычайно коротким временем жизни. Так же, как и обычные частицы, резонансы характеризуют определенными значениями квантовых чисел (спином, изоспином, странностью). В отличие от стабильной частицы, имеющей определенную энергию покоя (массу), резонансу свойственно распределение энергий, характеризуемое конечной шириной. Причина уширения резонансного состояния кроется в соотношении неопределенностей энергии и времени: чем короче время жизни, тем больше ширина резонанса. Строго говоря, не было бы ошибкой называть резонансами все нестабильные частицы, включая нейтроны и пионы, но дело в том, что времена жизни обсуждаемых здесь резонансных состояний несравненно короче времен жизни обычных нестабильных частиц: резонансы распадаются, не успевая пройти за время



а



б

Рис. 7.7. Резонансное рассеяние пионов на нуклонах (πN -рассеяние): а—полное сечение процесса $\pi^+ p$; б—полное сечение процесса $\pi^- p$. $1 \text{ мб} = 10^{-27} \text{ см}^2$.

своего мимолетного существования даже расстояние порядка размеров атомного ядра. Поэтому ширины резонансных состояний могут достигать нескольких десятков мегаэлектрон-вольт; ширина резонанса не обязательно должна быть гораздо меньше его массы.

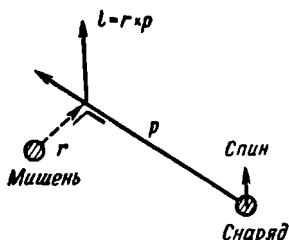


Рис. 7.8. Орбитальный момент количества движения $l = r \times p$, где p —импульс частицы. Изображен случай, когда проекция спина на направление l равна $+1/2$.

Возрастание сечения πN -рассеяния при увеличении энергии, наблюдавшееся в опытах Ферми, означало, что энергии соударения частиц в этих опытах достигли области существования резонанса. Резонансный характер рассеяния проявляется в том, что в этой области процесс идет через образование в промежуточном состоянии возбужденного нуклона N^* :



Типичное поведение сечения при резонансном рассеянии показано на рис. 7.7. Энергию, при которой сечение достигает максимума, называют центром резонанса или его массой (выраженной в энергетических единицах), а ширину пика— шириной резонанса (при уменьшении ширины возрастает значение сечения в максимуме и резонанс становится более выраженным). Не будет ошибкой считать, что мы встречаемся с резонансом всякий раз, когда сечение имеет острый максимум.

Для точной характеристики резонанса очень важно определить соответствующий ему набор квантовых чисел. Проще всего это сделать, сравнивая отношения сечений в разных каналах реакции, например при помощи формул, приведенных на стр. 77. В экспериментах группы Ферми эти отношения оказались равными $a : b : c = 9 : 1 : 2$. Тем самым существование резонанса с изоспином $3/2$ было подтверждено экспериментально.

Поясним теперь, как определяют спин резонанса. По своей природе спин—это момент количества движения. Поэтому спин состояния N^* является векторной суммой орбитального момента количества движения пиона, определяемого по траектории последнего, и собственных спиновых моментов пиона и нуклона (спин пиона равен нулю, спин нуклона— $1/2$). Если прицельный параметр прямолинейной траектории налетающего на нуклон пиона, движущегося с импульсом p , равен r , то орбитальный момент количества движения пиона $l = r \times p$ и направлен перпендикулярно плоскости орбиты пиона, вдоль

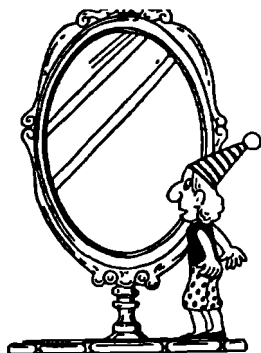
оси z (см. рис. 7.8). В квантовой теории величина l квантуется, она равна целому числу постоянных Планка \hbar . В зависимости от того, направлен ли спин нуклона по оси z («вверх») или против оси z («вниз»), полный момент количества движения j будет равен $(l + 1/2)\hbar$ или $(l - 1/2)\hbar$. Например, значение $j = 3/2$ может достигаться либо при $l = 1$ (спин нуклона «вверх»), либо при $l = 2$ (спин нуклона «вниз»).

Взаимодействие частиц, вообще говоря, зависит от момента количества движения j . Поэтому могут найтись такие специальные значения j и конкретные значения энергии, при которых частицы сильно притягиваются друг к другу. Тогда возможен резонанс. На классическом языке явление резонанса можно пояснить следующим образом: в состоянии N^* ($j = 3/2$), когда $l = 1$ и спин нуклона направлен вверх, пион сильно притягивается к нуклону, совершает вокруг последнего несколько оборотов, затем срывается с вращательной орбиты и улетает дальше. Чем больше оборотов совершает пион, тем больше «время жизни» состояния, а значит, тем уже резонанс.

Как удостовериться, что спин j состояния N^* действительно равен $3/2$? Есть два способа убедиться в этом. Первый состоит в изучении угловых распределений продуктов реакции. При разных j угловые распределения выглядят по-разному. Грубо говоря, чем больше j , тем сложнее колеблется угловое распределение при изменении угла рассеяния. При втором способе надо изучать сечение рассеяния: оно пропорционально квадрату дебройлевской длины волны налетающей частицы и первой степени j .

Исследования показали, что число резонансов в адронных реакциях исключительно велико. Вслед за состоянием N^* были открыты многие другие подобные состояния. Повидимому, практически число резонансов не ограничено. Это легко понять, если учесть, что на самом деле адроны — сложные частицы. Поэтому естественно, что в зависимости от того, каким образом возбуждено их внутреннее состояние, будут получаться различные резонансы. Аналогичное поведение атомов и атомных ядер при их возбуждении хорошо известно; в этом отношении адроны не представляют собой чего-то принципиально нового.

СИММЕТРИЯ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ



О понятии симметрии

Выше мы познакомились с различными квантовыми числами и увидели, как с их помощью формулируются правила отбора для процессов с участием элементарных частиц. Законы сохранения важны не только из-за их практической значимости; особую ценность они имеют потому, что выражают общие принципы, регулирующие ход природных процессов. Среди законов сохранения встречаются абсолютно точные, такие, как законы сохранения энергии и электрического заряда, и приближенные, например законы сохранения странности и изоспина; первые, в частности, можно трактовать как «конституцию» (основной закон) Вселенной.

Все, вероятно, слышали утверждение о невозможности построить вечный двигатель. Желание иметь вечный двигатель, черпающий энергию из ничего, наряду со стремлением к полетам в небо принадлежало к самым сокровенным мечтам человечества; но физики категорически отвергли первую из этих возможностей. Почему же они с такой убежденностью почитают законы сохранения как нечто священное? Цель данной главы — объяснить, в чем здесь дело.

Коротко говоря, суть в том, что законы сохранения тесно связаны с симметрией окружающего нас мира. Существует даже специальная математическая теорема, доказанная немецким математиком Эмми Нетер, утверждающая, что каждому виду симметрии природы соответствует свой закон сохранения. Поскольку изложение в данной книге ведется без привлечения математики, мы поясним теорему Нетер на чисто

интуитивном уровне. Начнем с сохранения импульса и энергии.

Эти законы сохранения связаны с однородностью пространства и времени. Однородность свойств означает, что свойства в какой-либо одной точке совпадают со свойствами в любой другой точке. В частности, законы, управляющие ходом природных процессов в некоторой пространственной точке в определенный момент времени, не изменяются при переходе к другой точке и другому моменту времени. В применении к волновым процессам однородность пространства и времени означает существование заполняющих все пространство и определенных в произвольный момент времени волн, характеризующихся постоянной длиной волны и постоянной частотой. Поскольку в квантовой теории по соотношению Эйнштейна — де Бройля длина волны сопоставляется импульсу, а частота — энергии частицы, читатель, возможно, получил смутное представление о наличии связи между однородностью пространства-времени и законами сохранения импульса и энергии.

Аналогично закон сохранения момента количества движения связан с изотропией пространства, под которой понимают независимость свойств последнего от направления помещенного в произвольную точку вектора. Поскольку однородность и изотропия времени и пространства считаются фундаментальными свойствами их симметрии, неудивительно, что выводимые из этих свойств законы сохранения имеют в глазах физиков очень высокий статус и рассматриваются как абсолютно точные.

Вдумчивый читатель, вероятно, уже понял, что идея о наличии у природного объекта симметрии равносильна утверждению о существовании ряда точек зрения на этот объект, при переходе между которыми не изменяются описывающие объект законы природы. При таком подходе идею симметрии легко связать с приближенными законами сохранения, например законом сохранения изоспина. В самом деле, поскольку протон и нейтрон, а также π^+ , π^0 , π^- -мезоны имеют соответственно почти одинаковые свойства, изменения, происходящие при взаимной перестановке частиц внутри этих двух групп, не бросаются в глаза; следовательно, изоспин почти сохраняется.

Какой же симметрией объясняется безусловное сохранение электрического заряда? Краткий ответ состоит в том, что электрический заряд в некотором смысле аналогичен моменту количества движения. Правда, в случае электрического заряда речь идет не о вращениях в реальном координатном

пространстве, а о преобразовании фазы квантовомеханической волновой функции в абстрактном пространстве. То обстоятельство, что электрический заряд квантуется, т. е. принимает только целые значения $0, \pm 1, \pm 2, \dots$, аналогично квантованию момента количества движения. Интерпретация понятия об электрическом заряде при помощи подобных геометрических идей лежит в основе теории калибровочных полей, которой мы займемся ниже.

А сейчас возвратимся к вопросу о симметрии пространства-времени. Множество преобразований, относительно которых оно симметрично, не исчерпывается рассмотренными выше преобразованиями сдвига и поворота осей координат; сюда относится также инверсия (отражение) системы координатных осей. От непрерывных преобразований сдвига и поворота инверсия отличается тем, что это — дискретное преобразование, производимое сразу, в один прием, так что ее повторное применение возвращает систему в исходное состояние.

Пространственную инверсию называют также зеркальным отражением, имея в виду, что речь идет о преобразовании, соответствующем рассмотрению предметов в зеркало, когда левое и правое или верх и низ меняются местами. Поскольку человеческая фигура имеет лево-правую симметрию, люди, глядя в зеркало, не замечают особых отклонений и узнают себя; однако правша видит в зеркале левшу и наоборот. Превратить правшу в левшу невозможно никакими перемещениями и поворотами. Поэтому мир по ту сторону зеркала отличается от мира по эту его сторону.

Поясним различие между дискретным и непрерывным преобразованием на следующем житейском примере. Допустим, у вас есть два цветных слайда с фотографией вашего приятеля г-на X. Один фотоснимок сделан на токийском вокзале Яэсугути, а другой — в Осака, в районе Умэда. При разглядывании проекций слайдов на экране у вас не возникает сомнения, что на обоих снимках запечатлен один и тот же г-н X. Таким образом, г-н X не изменился оттого, что он переместился в пространстве примерно на 500 км. Но что произойдет, если при проецировании на экран слайд нечаянно повернули не той стороной? Если вам известно, что у г-на X справа на щеке есть родинка, то вы сразу заметите ошибку. Г-на X с родинкой на левой щеке не существует в природе.

Напротив, естественно было бы думать, что фундаментальные единицы строения вещества (элементарные частицы) не должны иметь «формы», т. е. для них не должно быть различия между правым и левым. Иными словами, мир по ту

сторону зеркала должен быть в принципе столь же реален, как мир по эту его сторону, и управляться он должен теми же законами. В примере с нашим g -ном X последнее утверждение означает, что если у X есть родинка справа, то не должно быть запрета на существование отраженного в зеркале g -на X , имеющего родинку слева.

Закон сохранения, обусловленный симметрией относительно пространственной инверсии, называют законом сохранения четности. Впервые речь о таком законе сохранения зашла в квантовой механике, потому что в ней появилась возможность различать четность состояния по характеру расположения горбов и впадин волновой функции. Если в окрестности некоторой точки число горбов и впадин волновой функции четное (четный орбитальный момент количества движения l), то при инверсии горбы переходят в впадины, а впадины — во впадины, а при нечетном числе горбов и впадин (нечетное l) горбы при отражении переходят во впадины и наоборот. Говорят, что в первом случае четность положительна, а во втором — отрицательна. Сохранение четности в некотором процессе означает, что четность начального состояния совпадает с четностью конечного.

Известно, что момент количества движения подразделяют на орбитальный и собственный (спиновый). Аналогично различают орбитальную и собственную (внутреннюю) четность. Поскольку в отличие от обычных квантовых чисел четность принимает всего два значения — плюс и минус, четность сложной системы определяют не через сумму четностей составных частей, а через их произведение. Например, внутренняя четность пиона отрицательна, а четность системы двух пионов будет положительна, если орбитальный момент их относительного движения равен нулю.

ЯНГ (ЯНГ ЧЖЭНЬНИН) и ЛИ (ЛИ ЦЗУНДАО). Янг Чжэньнин родился в 1922 г. в китайской провинции Аньхуй. После войны поступил в Чикагский университет, где в то время еще активно работали Энрико Ферми и Эдвард Теллер; формально Янг стал учеником последнего. Совместно с Ферми предложил составную модель элементарной частицы (модель Ферми — Янга); стал известен также как автор статьи о модели Изинга в теории ферромагнетизма. По окончании университета был принят в Принстонский институт перспективных исследований, где пользовался покровительством Оппенгеймера (директора института). В 1954 г. совместно с Миллсом опубликовал теорию Янга — Миллса, послужившую основой

для теории неабелевых калибровочных полей, глубокий физический смысл которой был признан учеными лишь спустя десять с лишним лет. В 1956 г. разобрался в «проблеме тау-тэта» ($\tau-\theta$, см. стр. 87) и совместно с Ли опубликовал общую теорию несохранения четности. Спустя несколько месяцев были поставлены известные опыты мадам Ву и Ледермана, в которых теория Янга и Ли нашла блестящее подтверждение. В следующем году оба получили Нобелевскую премию. Ясно доказанное Янгом и Ли положение о том, что природа не стремится к полной симметрии, повергло в свое время физиков в состояние шока. В настоящее время Янг — профессор Нью-Йоркского университета.

Ли Цзундао родился в 1926 г. в Шанхае. Будучи несколько младше Янга по курсу, так же, как и он, Ли из Чикагского университета перешел в Принстон. В Чикагском университете его руководителем был известный астрофизик профессор Чандрасекар. «Чандра» еженедельно специально приезжал из расположенной в штате Висконсин обсерватории в Чикаго, чтобы читать лекции Ли и Янгу. Впоследствии Чандрасекар писал в своих воспоминаниях: «Все мои «первоклашки» стали нобелевскими лауреатами». Так же, как и Янг, Ли внес значительный вклад в статистическую механику и теорию поля. В настоящее время — профессор Колумбийского университета (США).

Несохранение четности

Сохранение четности (равноправие левого и правого) считалось естественным следствием одного из свойств симметрии пространства-времени, поэтому неудивительно то состояние замешательства, в которое пришли физики после внезапного опровержения в 1956 г. этого укоренившегося предрассудка. Сомнения в правильности закона сохранения четности впервые возникли при изучении распадов каонов. Как видно из рис. 7.1, каоны — странные частицы. В семействе каонов частицы K^+ , K^0 имеют странность $+1$, а их античастицы \bar{K}^- , \bar{K}^0 характеризуются странностью -1 ; изоспин каонов равен $1/2$. Существует несколько разных способов (каналов) распада каонов за счет слабого взаимодействия. Например, имеются определенные вероятности для каждого из следующих трех каналов распада частицы K^+ :

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \quad (\theta^+, \text{ тэта}),$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \quad (\tau^+, \text{ тау}),$$

$$K^+ \rightarrow \bar{\mu}^+ + \nu_\mu \quad (K_{\mu 2}).$$

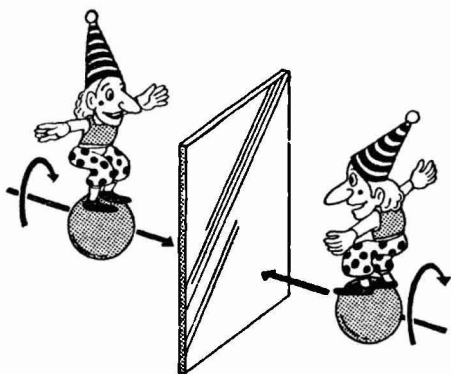
В начальный период, когда каоны еще не были как следует идентифицированы и наблюдались как V -частицы, было не ясно, что выписанные выше три реакции являются просто разными каналами распада одной и той же частицы; названия в то время давались феноменологически, по типу продуктов реакции (ср. рис. 7.5 на стр. 73). Чтобы доказать, что во всех трех случаях мы имеем дело с распадом одной и той же частицы, надо было не только установить равенство масс распадающихся частиц, но и убедиться, что у них одинаковы все остальные квантовые числа (спин, четность и т. п.).

Равенство масс тау- и тэта-частиц (τ и θ) уже было установлено. Спины их тоже оказались одинаковыми (равными нулю), но четности различались: тау-частица имела отрицательную, а тэта-частица — положительную четность (при подсчете четностей исходили из того, что внутренняя четность пионов отрицательна).

Но действительно ли τ и θ являются разными частицами, у которых случайно совпали массы и спины, а различаются только четности? Этот вопрос, названный «проблемой $\tau-\theta$ », не давал покоя теоретикам. Вскоре, однако, он был блестяще решен молодыми сотрудниками Принстонского института высших исследований Янгом и Ли. Они заметили, что во всех случаях слабого взаимодействия, включая бета-распад, справедливость закона сохранения четности на самом деле никогда не доказывалась. Поэтому тэта- и тау-частицы надо рассматривать как одну и ту же частицу, которая в силу несохранения четности может распадаться как на два, так и на три пиона.

Для проверки гипотезы Янга и Ли в Колумбийском университете были сразу же поставлены опыты. Группа Ледермана (который в настоящее время является директором Национальной лаборатории ускорителей им. Энрико Ферми) изучила процесс распада пиона на мюон с последующим распадом мюона на электрон с испусканием нейтрино ($\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ распады), а группа мадам Ву — бета-распад радиоактивного изотопа кобальта; в обоих случаях было подтверждено, что четность не сохраняется.

В этих опытах обнаружили неожиданные свойства спина нейтрино: оказалось, что бета-распадное нейтрино ν , испускаемое вместе с электроном e , находится только в левовинтовом, а антинейтрино $\bar{\nu}$, испускаемое вместе с протоном, — только в правовинтовом состоянии. Под левовинтовым (левым) и правовинтовым (правым) состояниями здесь понимаются состояния, аналогичные состоянию круговой поляризации



При отражении в зеркале левый винт переходит в правый и наоборот.

света: проекция спина нейтрино направлена вдоль направления его распространения и равна $(-1/2)$ для левого и $(+1/2)$ для правого состояния.

На основании вышеизложенного должно быть понятно, что при зеркальном отражении левая поляризация нейтрино переходит в правую. Таким образом, природа не стремится поддерживать неизменной четность. Разумеется, спин нейтрино непосредственно ненаблюдаем, но вследствие его поляризации теряет симметрию распределение бета-распадных электронов по направлениям их вылета. В опыте Ледермана создаваемые в синхротроне π^- -мезоны превращались в мюоны μ^- и антинейтрино $\bar{\nu}$; мюоны в свою очередь распадались с испусканием электронов, причем число электронов, вылетающих в направлении импульса мюона, было больше числа электронов, вылетающих в противоположном направлении.

Нарушение CP -инвариантности

Мы видели, что в случае нейтрино право-левая симметрия отсутствует; но нельзя ли восстановить симметрию, если кое-чем поступиться? Основания для такой надежды есть: поскольку нейтрино ν имеет левую поляризацию, а антинейтрино $\bar{\nu}$ — правую, при зеркальном отражении в комбинации с заменой частицы на античастицу положение восстанавливается. Замена частиц античастицами имеет смысл, только если ее проделать сразу для всех видов частиц; но тогда заряженные частицы, например электроны и протоны, изменят знак

своего электрического заряда. Поэтому замену частиц на античастицы называют также зарядовым сопряжением. О рассмотренной выше комбинированной инверсии, при которой последовательно выполняются пространственное отражение и зарядовое сопряжение, говорят как о CP -преобразовании (по первым буквам слов *charge*—заряд и *parity*—четность).

В течение нескольких лет после открытия несохранения четности широко распространилась точка зрения, что все взаимодействия, за исключением слабого, инвариантны относительно каждого из преобразований C и P , а слабое взаимодействие инвариантно относительно комбинированного преобразования CP ¹⁾. Казалось, что ничего другого и быть не может: ведь на электромагнитном уровне замена всех частиц античастицами вообще не ощутима, так как знаки электрических зарядов относительно по своей природе, а в случае слабого взаимодействия зеркально отраженное правое антинейтрино $\bar{\nu}$ переходит в левое нейтрино ν , благодаря чему при комбинированной инверсии CP мир нейтрино переходит сам в себя. В рассмотренном выше примере с K^{\pm} -каонами частица K^+ ведет себя так же, как зеркально отраженная частица K^- .

Но в 1964 г. физики вновь испытали потрясение: был обнаружен эффект нарушения инверсии CP -симметрии. Несохращение комбинированной четности открыли сотрудники Принстонского университета (США) Фитч и Кронин. Явление это вновь связано с распадом каонов, но сам эффект еще более тонкий, чем рассмотренное выше несохранение четности; поэтому его трудно объяснить (авторы открытия Фитч и Кронин удостоены Нобелевской премии).

Для проверки нарушения CP -инвариантности существует очень удобный и чувствительный тест—распад нейтральных каонов, т. е. частиц K^0 и \bar{K}^0 . Они являются античастицами друг для друга и, подобно K^{\pm} -мезонам, при наблюдении, как V -частицы, распадаются либо на два (π^+ , π^- или π^0 , π^0), либо на три ($\pi^+\pi^+\pi^0$ или $\pi^0\pi^0\pi^0$) пиона. Все указанные конечные состояния симметричны относительно зарядового сопряжения (зарядовая четность $C = +1$), но пространственная четность двух пионов положительна, а трех пионов отрицательна. Если в процессе распада комбинированная инверсия CP сохраняется, то в канале распада на два пиона комбинированная четность CP положительна, а в канале распада на три пиона отрицательна; следовательно, при условии

¹⁾ Гипотеза об инвариантности слабого взаимодействия относительно CP -преобразования и тесно связанная с ней так называемая теория двухкомпонентного нейтрино сформулирована в 1957 г. независимо Л. Д. Ландау, А. Саламом, Ли и Янгом.— *Прим. ред.*

CP -инвариантности эти два канала не могут соответствовать распаду одной и той же частицы.

Ту частицу, у которой $CP=+1$, назвали K_1 , а ту, у которой $CP=-1$ — K_2 ; состояния K_1 и K_2 являются смесями состояний K^0 , \bar{K}^0 :

$$\begin{aligned} K_1 &= K^0 - \bar{K}^0 & (C=-1, P=-1, CP=+1), \\ K_2 &= K^0 + \bar{K}^0 & (C=+1, P=-1, CP=-1). \end{aligned}$$

И обратно, волновые функции частиц K^0 , \bar{K}^0 являются соответствующими линейными комбинациями волновых функций частиц K_1 , K_2 .

Соотношение между представлениями K_1 , K_2 и K^0 , \bar{K}^0 совершенно аналогично рассматриваемому в оптике соотношению между различными представлениями поляризованного света: линейно-поляризованный луч можно представить как сумму лучей с правой и левой круговой поляризацией, и наоборот, свет, поляризованный по кругу, разлагается на линейно-поляризованные составляющие; заранее нельзя сказать, какое из двух представлений — линейно-поляризованное, или поляризованное по кругу — более фундаментально. Положение определяется при учете взаимодействия света со средой: встречаются как среды, пропускающие линейно-поляризованный свет, так и среды, пропускающие свет, поляризованный по кругу. Поэтому в зависимости от рассматриваемой среды удобно использовать то или иное представление поляризованного света.

Аналогичным образом надо рассуждать и в случае каонов. При описании их рождения в процессах с сильным взаимодействием удобно пользоваться классификацией по странности, т. е. считать, что рождаются частицы K^0 или \bar{K}^0 , а при описании распадов нейтральных каонов за счет слабого взаимодействия (слабых распадов) целесообразно ввести классификацию по CP -четности, т. е. произвести разложение на составляющие K_1 и K_2 . Поскольку по отношению к слабым распадам K_1 и K_2 ведут себя как разные частицы, у них должны быть разные времена жизни. И действительно, оказалось, что время жизни K_1 составляет примерно одну сотую времени жизни K_2 . Первоначальный пучок, состоящий из частиц K^0 (или \bar{K}^0), представляет собой смесь K_1 и K_2 , но компонента K_1 быстро распадается, и на расстоянии нескольких метров от места своего образования пучок каонов состоит уже только из частиц K_2 .

Фитч и Кронин обнаружили, что и в этом остаточном пучке частиц K_2 могут идти распады на два пиона. Таким

образом, K_2 -мезоны распадаются как на два, так и на три пиона, откуда следует, что CP -четность не сохраняется

Инвариантны ли законы природы по отношению к операции обращения времени?

Многие, вероятно, слышали, что в связи с разговорами о CP -инвариантности обычно упоминают так называемую CPT -теорему. Здесь T означает обращение времени, т. е. операцию, соответствующую прокручиванию кинофильма в обратном направлении. Давно известно, что основные законы физики инвариантны относительно обращения времени. Тем не менее в реальном мире время явно имеет определенное направление: тепло всегда передается от горячего тела к холодному, а люди постепенно старятся. Причина такого несоответствия более века занимает умы физиков, и спорам на эту тему не видно конца.

Но здесь обсуждается несколько иной вопрос: действительно ли инвариантны относительно обращения времени (T) сами законы физики? CPT -теорема утверждает, что в общем случае законы природы должны быть инвариантны относительно комбинации трех последовательно выполненных преобразований C , P и T . Если нарушена инвариантность относительно комбинации CP , то это нарушение должно компенсироваться соответствующим нарушением инвариантности относительно операции T .

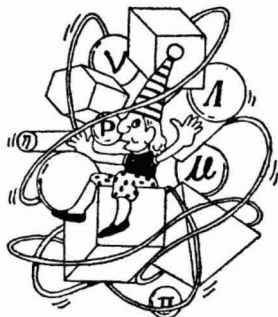
Итак, в конечном счете мир, строго говоря, не симметричен относительно преобразований C , P и T . Но поскольку нарушение симметрии проявляется лишь в слабых взаимодействиях, оно практически не оказывает влияния на обычные явления. Вселенная оказалась, так сказать, с небольшим брачком, но эта недоделка так искусно упрятана, что не бросается в глаза.

Подчеркнем еще раз со всей определенностью, что несимметрия окружающего нас мира не имеет никакого отношения к обсуждаемой здесь несимметричности законов природы. Мы видим, что большинство людей вокруг нас — правши. Входящие в состав генов молекулы ДНК построены по типу правой спирали. Все тела Солнечной системы состоят из нуклонов и электронов, в ней не встречается образований из антинуклонов и позитронов. Но в принципе могла бы существовать солнечная система, получаемая из нашей применением операций P и C . (Кстати, недавно сообщалось о синтезе левой спирали ДНК). Такая «солнечная система наоборот», будучи однажды созданной, вела бы себя подобно нашей и

было бы нелегко найти между ними различия. Конечно, в зарядово-сопряженной, зеркально отраженной солнечной системе было бы больше левшей, восток и запад на Земле поменялись бы местами, солнце восходило бы на востоке («на самом деле» на западе!) и т. п., но, спрашивается, могли ли бы все это заметить тамошние жители?

Даже если бы законы природы были зеркально-симметричны, практическое построение вселенной надо было бы начинать с некоторого состояния, обычно называемого начальным условием. Выбор начального условия произволен: он определяется законом случая. Построенная из бесчисленного множества элементарных частиц вселенная — очень сложное образование; если в начальный момент в ней случайно все молекулы некоторого сорта оказались левыми, то последующие химические реакции не смогут изменить этого факта и в созданной при этих условиях вселенной левые молекулы будут существовать всегда. Таким образом, наблюдаемая асимметрия мира может быть просто следствием начального условия.

Слепая подражательность свойственна не только людям, о ней можно говорить также и в применении к физическим явлениям. Примеры обусловленного ею естественного (или спонтанного) нарушения симметрии мы рассмотрим в гл. 19.



СОСТАВНЫЕ МОДЕЛИ АДРОНОВ

Аргументы в пользу существования фундаментальных частиц

Своей формулой Накано, Нишиджима и Гелл-Манн показали, что адронные реакции подчиняются строгим закономерностям, понять которые можно, допустив у адронов наличие квантовых чисел изоспина и странности. Другое свойство адронов — существование у них многочисленных резонансов (возбужденных состояний) — специфично для составных систем, подобных атомам и атомным ядрам. Сопоставив эти два факта, естественно прийти к мысли, что адроны построены из каких-то более фундаментальных частиц, являющихся носителями указанных квантовых чисел.

Хотя история науки и показывает, что физики то и дело вводят неизвестные ранее частицы, не надо думать, что дело это простое и что новых частиц можно ввести сколько угодно. В период, когда не вызывало никаких возражений представление о том, что атомные ядра построены из протонов и нейтронов, а ядерные силы передаются пионами, для выдвижения гипотезы, разрушающей это сложившееся представление, требовалось незаурядное мужество. Во всяком случае, если нет абсолютной необходимости, то исследователи обычно всячески избегают вводить новые предположения. Такой консерватизм оправдан в случае естественных наук, в которых по традиции высоко ценится строгость доказательств.

Но естественным наукам не свойственно и одностороннее, поверхностное описание явлений. В частности, в японской

физике сильна традиция конструктивного подхода к теории, восходящая к известной работе Юкавы. Сотрудники Юкавы Саката, Такэгани и др. сознательно подчеркивали преимущества конструктивной точки зрения, рассматривая ее как важный методологический принцип. Позиция Сакаты и его единомышленников оказала большое влияние на их учеников и последователей, добившихся на конструктивном пути больших успехов. У нас еще будут случаи поговорить об этом, а здесь мы начнем с рассмотрения предложенной Сакатой модели (так называемой «модели Сакаты»).

ЭНРИКО ФЕРМИ (1901—1954) универсальный ученый, внесший эпохальный вклад как в теоретическую, так и в экспериментальную физику. Родился в Риме, учился в Пизе, в 26 лет — профессор Римского университета. В 1938 г. удостоен Нобелевской премии за экспериментальные исследования с медленными нейтронами; к этому времени был уже широко известен также и как первоклассный теоретик — автор статистики частиц с полуцелым спином (статистика Ферми — Дирака, 1926 г.), теории бета-распада (1934 г.) и т. п. Вскоре после того, как Ферми, спасаясь от преследований итальянских фашистов, эмигрировал в США, где занял должность профессора Колумбийского университета, поступило сообщение из Германии об успешном расщеплении атомного ядра; Ферми сразу же поставил проверочные эксперименты. С этого момента начались исследования по овладению атомной энергией. 2 декабря 1942 г., когда построенный под руководством Ферми ядерный реактор Чикагского университета достиг критической мощности, была доказана возможность практического осуществления самоподдерживающейся цепной реакции деления ядер. После войны Ферми возвратился к занятиям чистой физикой. По его проекту в Чикагском университете был построен синхротрон, на котором начались экспериментальные исследования пионов; но, к сожалению, вскоре Ферми безвременно скончался от рака в возрасте 53 лет.

Ферми был прирожденным лидером. Возникшие под его влиянием традиции сильны в Чикагском университете и сейчас; по университету бродят легенды о Ферми. Широко известны изумительная ясность читанных им в аудиториях лекций и трудность принимаемых Ферми экзаменов на докторскую степень. Описывая свое впечатление от научных лекций Ферми в письме к другу, я сравнивал искусство Ферми-лектора с игрой первоклассного актера театра «Кабуки».

Составная модель Ферми — Янга

Вскоре после открытия пионов Ферми и Янг выдвинули интересную теорию. В то время Янг еще учился в Чикагском университете, а присуждение ему вместе с Ли Нобелевской премии за открытие несохранения четности было еще делом будущего. Ферми и Янг заметили, что квантовые числа пионов можно очень хорошо описать, если принять, что последние составлены из нуклонов и антинуклонов. Действительно, «химические» формулы

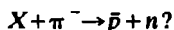
$$\pi^+ = p\bar{n}, \quad \pi^- = n\bar{p}, \quad \pi^0 = (p\bar{p} - n\bar{n}),$$

в которых p , n , \bar{p} , \bar{n} — протон, нейтрон, антипротон и антинейтрон соответственно, правильно описывают не только электрический заряд, но и изоспин пионов. Причина этого в том, что p , n , \bar{p} и \bar{n} имеют компоненты I_z , равные $1/2$, $-1/2$, $-1/2$ и $1/2$, а у π^+ , π^- , π^0 $I_z = 1, -1, 0$. В формуле для π^0 здесь использована такая же суперпозиция волновых функций, как выше в формулах для K_1 , K_2 (см. стр. 90). Выбором знака минус гарантируется, что π^+ , π^0 и π^- ведут себя как проекции вектора изоспина $I=1$; мы не будем вдаваться в математическое обоснование этого факта.

Итак, с изоспином пионов все в порядке, а как обстоит дело с их спином? Известно, что спин пионов равен нулю, а их внутренняя четность отрицательна. Учитывая, что спин нуклонов равен $1/2$, можно показать, что сумма двух противоположно направленных спинов как раз равна нулю (строгое доказательство мы опускаем ввиду его громоздкости). Четность пионов тоже получается правильной: поскольку внутренняя четности частицы и античастицы противоположны, их произведение равно -1 .

О смысле понятий «элементарный» и «составной» применительно к миру элементарных частиц

Верно ли, что пионы составлены из нуклонов и антинуклонов? В случае атомов и атомных ядер основным аргументом в пользу их составной природы является возможность разбить эти системы на составные части. Можно ли то же сделать с пионами, иными словами, можно ли, подавая на пион внешнюю энергию X , произвести реакцию вида



Поскольку из пионов невозможно приготовить мишени, подобные мишеням из атомов и атомных ядер, непосредственно

	p	n	\bar{p}	\bar{n}	π^+ $p\bar{n}$	π^- $n\bar{p}$	π^0 $p\bar{p}-n\bar{n}$
I_z	$1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$1/2$	1	-1	0
Спин	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	0	0	0
Четность	+	+	-	-	-	-	-

Рис. 9.1. Объяснение квантовых чисел пионов в модели Ферми — Янга, рассматривающей пи-мезоны как частицы, составленные из нуклонов и антинуклонов.

осуществить указанную реакцию было бы очень трудно, но можно рассмотреть обратный процесс, при котором энергия X испускается в виде различных частиц (γ , π^0 и т. п.). Такие реакции действительно идут и ничем не выделяются среди множества других реакций подобного вида. Существование этих процессов, однако, не может служить аргументом в пользу составной природы пионов, так как иначе пришлось бы принять, например, что фотоны составлены из электронов и позитронов, поскольку при столкновении фотонов возможно образование электрон-позитронных пар. Таким образом, совершенно не ясно, как надо определять понятия «элементарный» и «составной» в мире свободно превращающихся друг в друга «элементарных» частиц. В системах, подобных атому водорода, энергия связи мала по сравнению с энергиями покоя составляющих систему частиц (протона и электрона), благодаря чему при связывании последних в единую систему их массы изменяются мало. Напротив, в случае пионов энергии связи составляющих пион нуклона и антинуклона должны быть сопоставимы с их энергиями покоя. При рассмотрении пиона в микроскоп внутри него вряд ли удалось бы разглядеть что-либо, напоминающее свободный нуклон.

Вообще говоря, разделение частиц на элементарные и составные — вопрос удобства. Однако ясно, что для экономии мышления было бы очень полезно найти такое по возможности ограниченное множество фундаментальных частиц, из характеристик которых можно было бы вывести разнообразные свойства всех других частиц, наблюдаемых на опыте. Такой подход согласуется с самой заветной целью теории элементарных частиц, состоящей в том, чтобы выводить сложное из простого. В этом смысле я хотел бы предупре-

дить читателя, что при рассмотрении реальных проблем различие между элементарными и составными частицами сглаживается и становится не таким четким, как различие черного и белого.

Насколько серьезно относились Ферми и Янг к своей составной модели пионов, сказать трудно. Поскольку в то время Ферми не очень доверял квантовой теории поля, основанной, в частности, на теории Юкавы, можно даже предположить, что он выдвинул составную модель пиона из чувства противоречия. Недоверие Ферми объяснялось несовершенством квантовой теории поля, которая, как известно, за исключением нескольких простых случаев, давала для физических величин бессмысленные выражения. Как раз в период формулировки модели Ферми и Янга некоторые трудности квантовой теории поля, в частности затруднение, связанное с бесконечностью собственной энергии частиц, были в определенном смысле преодолены в работах Томонаги, Швингера, Фейнмана и др., но оставалось неясным, насколько безупречно найденное ими решение.

Необходимо четко различать две стороны проблемы — математическую подготовку к описанию элементарных частиц и поиск ответа на вопрос, какие элементарные частицы реально существуют. Несвершенство математической теории не должно давать повода к нерешительности или колебаниям в исследовании реально существующих элементарных частиц. Следующий шаг в усовершенствовании теории Ферми и Янга сделал Саката, предложивший аналогичную схему классификации странных частиц.

СЭЙТИ САКАТА (1911—1970) Родился в Токио. Учился в университете в Киото у Юкавы. Совместно с Такэцани и Кобаяси занимался разработкой ранней мезонной теории. Некоторое время работал в группе Нишины и Томонаги в Токийском физико-химическом институте, затем перешел в университет Нагои, где вскоре занял самостоятельное положение. В 1942 г. (совместно с Танигавой) предложил теорию двух мезонов, в 1956 г. — так называемую модель Сакаты. Искусно применяя материалистическую диалектику, Саката пропагандировал свои взгляды в лекциях и монографиях; он оказал большое влияние на молодое поколение японских исследователей. В частности, утверждение Сакаты о неограниченности числа уровней организации элементарных частиц способствовало снятию у научной молодежи психологическо-

го барьера, препятствовавшего смелому введению в теорию новых частиц. Неудивительно, что в такой атмосфере были выдвинуты замечательные пророческие идеи, воплотившиеся в четырехкварковой модели Маки и шестикварковой модели Маскавы (см. стр. 180). Не будет преувеличением сказать, что в настоящее время теория элементарных частиц в значительной мере развивается по пути, предсказанному Сакатой.

Модель Сакаты

В теории, именуемой моделью Сакаты, к протону (p) и нейтрону (n)—фундаментальным частицам модели Ферми—Янга—добавляется лямбда-частица (Λ); таким образом, фундаментальными частицами модели Сакаты являются три бариона: p , n , Λ . Остальные адроны (как мезоны, так и барионы) строятся в модели Сакаты из указанных трех фундаментальных барионов. Формулы для мезонов

$$\begin{aligned}\pi^+ &= p\bar{n}, & \pi^- &= n\bar{p} \quad (\text{Ферми—Янг}), \\ K^+ &= p\bar{\Lambda}, & K^0 &= n\bar{\Lambda}, \\ K^- &= \Lambda\bar{p}, & \bar{K}^0 &= \Lambda\bar{n}\end{aligned}$$

являются обобщением формул модели Ферми—Янга. С барионами дело сложнее. Поскольку они подчиняются статистике Ферми и имеют полуцелый спин, их можно строить только из нечетного числа фундаментальных частиц p , n , Λ (трех, пяти, семи и т. д.). Например, поскольку сигма-частицу (Σ) можно рассматривать как комбинацию Λ и π , а кси-частицу (Ξ)—как комбинацию Λ и K , для них надо писать формулы вида

$$\begin{aligned}\Sigma^+ &= \Lambda\pi^+ = \Lambda p\bar{n}, \\ \Xi^0 &= \Lambda\bar{K}^0 = \Lambda\Lambda\bar{n}.\end{aligned}$$

Большое достоинство модели Сакаты в том, что с ее помощью удастся удовлетворительно объяснить, почему имеет место правило ННГ. С этой целью прежде всего заметим, что, поскольку протон p и нейтрон n характеризуются нулевой странностью и отличными от нуля проекциями изоспина $\pm 1/2$, а лямбда-частица Λ —нулевым изоспином и не равной нулю странностью, квантовые числа изоспина и странности можно рассматривать просто как индексы этих фундаментальных частиц. Известно, что (приближенное) сохранение изоспина объясняется сходством протона и нейтрона. Естественно обобщить эту идею, постулировав близость

свойств трех фундаментальных частиц — p , n , Λ , и вывести из такой симметрии соответствующие законы сохранения.

Указанное обобщение реализовано в работах Икэды, Огавы, Онуки (ИОО) и Ямагути. Говоря математическим языком, они рассмотрели симметрию троек состояний, так называемую SU_3 -симметрию. Сокращение SU производится от первых букв английского термина *special unitary group* — специальная унитарная группа; группа SU_3 образована преобразованиями, переводящими друг в друга тройки состояний. Аналогично преобразования, переводящие друг в друга пары состояний (например, p и n), образуют группу SU_2 ; SU_2 -симметрия — не что иное, как симметрия в пространстве изоспина (которой соответствует изотопическая, или зарядовая, инвариантность).

Чтобы различить два разных состояния, нужны два разных индекса, или квантовых числа, в качестве которых обычно используют значения $\pm 1/2$ («вверх» или «вниз») проекции изоспина I_z . Чтобы не спутать с первыми двумя состояниями отличающееся от них третье, требуется еще одно, новое квантовое число; его роль исполняет странность S . Поскольку у протона и нейтрона $I_z = \pm 1/2$, $S=0$, а у лямбда-частицы $I_z=0$, $S=-1$, спецификация значений I_z и S равносильна указанию, какое состояние (из трех) имеется в виду (рис. 9.2).

Теперь ясно, что в общем случае n состояний можно классифицировать при помощи $(n-1)$ -го квантового числа.

Заметим, что в выборе квантовых чисел имеется значительный произвол. Например, если в случае (p, n, Λ) физические свойства трех состояний действительно одинаковы, то ничто не мешает характеризовать, скажем, нейтрон и лямбда-частицу значениями I_z , а протон — значениями S и строить классификацию на основе нейтрона и лямбда-частицы. И все же, несмотря на это, способ приписывания квантовых чисел в формуле ННГ не был просто данью традиции, так как в реальной тройке состояний (протон, нейтрон, лямбда-частица) протон и нейтрон выделяются близостью сходства своих свойств.

В предыдущей главе указывалось, что изотопическая (SU_2) симметрия приводит, кроме сохранения I_z , к ряду соотношений между сечениями различных реакций. То же относится к SU_3 -симметрии. Иными словами, если отвлечься от разницы между протоном, нейтроном и лямбда-частицей, то можно вывести приближенные соотношения между сечениями процессов, в которых участвуют различные комбинации

	p	n	Λ	\bar{p}	\bar{n}	$\bar{\Lambda}$
I_z	$1/2$	$-1/2$	0	$-1/2$	$1/2$	0
S	0	0	-1	0	0	1

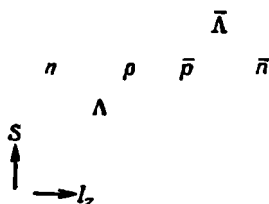


Рис. 9.2. Значения квантовых чисел I_z и S для трех фундаментальных частиц.

фундаментальных частиц p , n , Λ . Такие соотношения — одно из важных следствий SU_3 -симметричной теории ИОО.

Кроме того, теория SU_3 -симметрии позволяет в общем случае установить, какие мультиплеты можно построить из различных комбинаций трех фундаментальных частиц (и их античастиц). Например, ясно, что, комбинируя частицы (p , n , Λ) по две, удастся построить всего $3 \times 3 = 9$ составных состояний (pp , pn , np , ...), которые при учете симметрии относительно перестановок пар частиц разбиваются на два мультиплета: симметричный, содержащий шесть состояний, и антисимметричный (три состояния, рис. 9.3).

Из частиц и античастиц тоже можно построить девять парных составных состояний, но в данном случае теория симметрии показывает, что эти девять состояний разбиваются на октет (восемь состояний) и синглет (одно состояние, рис. 9.4). Если символами 3 и $\bar{3}$ обозначить соответственно тройки p , n , Λ и \bar{p} , \bar{n} , $\bar{\Lambda}$, то результат расчета, основанного на теории групп, можно выразить формулами

$$3 \times 3 = 6 + \bar{3},$$

$$3 \times \bar{3} = 8 + 1;$$

здесь символ $\bar{3}$ в правой части означает, что соответствующие состояния имеют квантовые числа античастиц \bar{p} , \bar{n} , $\bar{\Lambda}$.

Плодотворность предложенной Икэдой, Огавой и Онуки теории SU_3 -симметрии особенно ясно видна на примере семейства мезонов. Принимая, что последние принадлежат

$$pp \quad p\bar{p}+p\bar{r} \quad r\bar{r}$$

$$p\Lambda+\Lambda p \quad r\Lambda+\Lambda r$$

$$\Lambda\Lambda$$

$$a$$

$$p\bar{p}-p\bar{r}$$

$$p\Lambda-\Lambda p$$

$$r\Lambda-\Lambda r$$

$$b$$

$$\text{Октет}$$

$$p\bar{\Lambda}$$

$$r\bar{\Lambda}$$

$$p\bar{r}$$

$$p\bar{p}-p\bar{n}$$

$$p\bar{n}$$

$$p\bar{p}+p\bar{n}-2\Lambda\bar{\Lambda}$$

$$\Lambda\bar{p}$$

$$\Lambda\bar{n}$$

$$\text{Синглет}$$

$$p\bar{p}+p\bar{n}+\Lambda\bar{\Lambda}$$

Рис. 9.3. Составные состояния, получаемые при разложении прямого произведения $3 \times \bar{3}$: *a*—симметричные комбинации (6); *b*—антисимметричные комбинации ($\bar{3}$).

Рис. 9.4. Составные состояния, получаемые при разложении прямого произведения $3 \times \bar{3}$.

множеству состояний $3 \times \bar{3}$, без труда убеждаемся в совпадении октета, показанного на рис. 9.4, с октетом мезонов (π , K , η), изображенным выше на рис. 7.1 (стр. 71). Синглет рисунка 9.4 разумнее всего сопоставить с мезоном η' , масса которого значительно больше масс частиц октета; такое сопоставление согласуется с духом классификации, описанной в предыдущем абзаце. Удастся также качественно описать и соотношение масс внутри октета мезонов: масса каона $K^+ = p\bar{\Lambda}$ больше массы пиона $\pi^+ = p\bar{n}$ потому, что лямбда-частица Λ тяжелее нейтрона n .

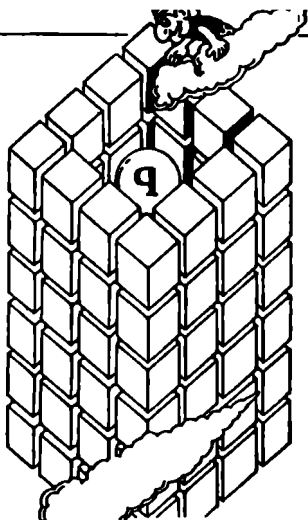
Но к барионам модель Сакаты совершенно неприменима. Мы уже видели, что барионы так же, как и мезоны, образуют октет (см. рис. 7.2). В модели Сакаты три частицы из этого октета (p , n , Λ) выделяются в качестве фундаментальных. Такое выделение противостоит естественности, так как остальные пять частиц (Σ , Ξ) по своим свойствам не очень сильно отличаются от выделенных трех; кроме того, в теории SU_3 -симметрии не содержится пятичленного мультиплета.

Для спасения модели Сакаты пытались привлечь возбужденные состояния (резонансы), имеющие такие же квантовые числа изоспина и странности, как протон, нейтрон и лямбда-

частица; указанные резонансы объединяли в октет с сигма- и кси-частицами Σ , Ξ .

Но подобные попытки успеха не имели, и в конце концов модель Сакаты была заменена предложенной Гелл-Манном и Цвейгом моделью кварков, о которой уже говорилось выше, во второй и третьей главах. В следующей главе мы несколько подробнее остановимся на том, насколько успешно модель кварков объясняет свойства адронов.

МОДЕЛЬ КВАРКОВ



Отличия от модели Сакаги

От модели Сакаги модель кварков отличается главным образом тем, что фундаментальные частицы в ней не выбираются среди уже известных, а относятся к новому, более глубокому уровню организации материи. Иными словами, в модели кварков все адроны считаются составными частицами и в этом смысле равноправны друг другу. Тем самым автоматически снимается основное затруднение модели Сакаги, заключавшееся в том, что протон, нейтрон и Λ -частица занимали в ней среди барионов выделенное положение.

Но свойства самих кварков не очень сильно отличаются от свойств фундаментальных частиц модели Сакаги, рассматриваемых как носители изоспина и странности, разумеется, за исключением одного сенсационного пункта — дробности значений электрического заряда, приписываемого кваркам.

О кварках мы уже говорили во второй и третьей главах, а здесь приведем дополнительные пояснения. Модель кварков предложена в 1964 г. независимо друг от друга Гелл-Манном и Цвейгом. Гелл-Манн назвал тройку новых фундаментальных частиц кварками (от англ. *quark*), а Цвейг — «эйсами» (от англ. *ace* — «карточный туз» или просто «туз»).

МЮРРЕЙ ГЕЛЛ-МАНН родился в 1929 г. в Нью-Йорке (США). Степень доктора наук получил в Массачусетском

технологическом институте. Не будет преувеличением сказать, что Гелл-Манн — один из главных лидеров послевоенного развития теории элементарных частиц. Научную карьеру начал с должности преподавателя в Чикагском университете, а уже через несколько лет был приглашен на должность профессора в Калифорнийский технологический институт, где в то время работал Фейнман. Итогом этого периода была формула Накано — Нишиджимы — Гелл-Манна (1953 г.). Среди огромного числа первоклассных научных работ Гелл-Манна можно выделить как особые достижения: ренормгрупповое уравнение Гелл-Манна — Лоу, теорию $V-A$ взаимодействия Фейнмана и Гелл-Манна, теорию восьмеричного пути, предложенную одновременно и независимо Гелл-Манном и Нееманом, гипотезу кварков (одновременно и независимо с Цвейгом), алгебру токов и многое другое. В частности, важность идеи о ренормализационной группе для теории калибровочных полей и статистической физики была осознана теоретиками только спустя примерно двадцать лет после выхода в свет работы Гелл-Манна и Лоу. В 1969 г. Гелл-Манну присуждена Нобелевская премия. Гелл-Манн — автор таких новых физических терминов, как «странность», «кварки», «цвет».

Что касается названия «кварк», то Гелл-Манн предупредил в своей статье, что это — непонятное восклицание героя одного из романов Дж. Джойса, Финнегана Вейка. Предложение использовать выкрик Финнегана в качестве названия новых фундаментальных частиц кажется остроумным, и не нужно доискиваться, какой смысл вкладывал в это слово герой новеллы. Название «кварк» привилось, по-видимому, потому, что оно звучит таинственно, а также вследствие научного авторитета самого Гелл-Манна.

Три кварка, введенные Гелл-Манном и Цвейгом, в настоящее время обозначают символами u , d , s , которые соответствуют символам p (протон), n (нейтрон), Λ (лямбда-частица) модели Сакаты:

$$(u, d, s) \rightarrow (p, n, \Lambda).$$

Электрический заряд $2/3, -1/3, -1/3 \leftrightarrow 1, 0, 0$.

Символы u , d произведены от английских слов *up*, *down*, означающих, что проекция изоспина направлена «вверх» или «вниз», а символ s — первая буква английского слова *strangeness* (странность). Электрические заряды кварков получаются из электрических зарядов фундаментальных частиц модели

	<i>p</i>	<i>n</i>	Λ	<i>u</i>	<i>d</i>	<i>s</i>
I_2	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0
Странность	0	0	-1	0	0	-1
Заряд	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
Спин	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

Рис. 10.1. Сравнение фундаментальных частиц модели Сакаты и кварков.

Сакаты сдвигом на $\frac{1}{3}$, благодаря которому сумма электрических зарядов кварков оказывается равной нулю; но относительные заряды кварков таковы же, как относительные заряды в модели Сакаты. Можно даже сказать, что модель кварков следует из модели Сакаты, если к ней предъявить два последних требования.

В модели Сакаты мезоны интерпретировались как пары частица — античастица. Так же они интерпретируются в модели кварков: достаточно заменить символы *p*, *n*, Λ на *u*, *d*, *s*. В самом деле, заряды кварков сдвинуты на $\frac{1}{3}$, а заряды антикварков — на $(-\frac{1}{3})$ (рис. 10.1); поэтому суммарный заряд мезона остается таким же, как в модели Сакаты.

Если для простоты обозначить символами *q*, \bar{q} кварк и антикварк и ввести вместо *u*, *d*, *s* символы q_1 , q_2 , q_3 , то для мезонов *M* можно написать следующую «химическую» формулу:

$$M = q_i \bar{q}_j$$

Конкретные варианты этой формулы для отдельных мезонов выводятся сравнением рисунков 7.1 и 9.4. Как мы уже видели в предыдущем разделе, полное число комбинаций $3 \times 3 = 9$ разбивается на октет и синглет.

Барионы в модели кварков

Посмотрим теперь, как модель кварков описывает барионы. Отличие от модели Сакаты очевидно. Уже после появления теории ИОО Гелл-Манн и Неэман независимо друг от друга показали, что формула ННГ следует не только из модели Сакаты, но и из более общего требования: достаточ-

но, чтобы теория была SU_3 -симметричной. При соблюдении этого требования все известные в то время мезоны и барионы распределяются по октетам группы SU_3 . Гелл-Манн дал своему варианту теории название «восьмеричный путь». Окте́ты — не единственные мультиплеты SU_3 -теории. Самыми фундаментальными в ней являются триплеты, из которых строятся все остальные мультиплеты группы SU_3 . Эти триплеты и сопоставляются кваркам.

Чтобы понять, как возникает барионный октет, рассмотрим еще раз аргументацию, изложенную в предыдущих разделах. Выше, на стр. 100, мы видели, что $3 \times 3 = 9$ состояний, образованных парами кварков, разбиваются на секстет (шесть состояний) и триплет (три состояния) так, что состояния, входящие в триплет, антисимметричны относительно перестановок образующих их кварков и имеют такие же квантовые числа (I_z , электрический заряд Q и т. п.), как антикварки $\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3$; следовательно, в рамках SU_3 -теории состояния рассматриваемого триплета просто тождественны антикваркам \bar{q} . Вспомним теперь, что при комбинации q и \bar{q} возникает мезонный октет; значит, октет образуется также и при комбинации q и (qq) , так как среди состояний (qq) содержится \bar{q} . Этот последний октет и сопоставляют барионам:

$$B = q_i(q_j q_k) = q_i q_j q_k.$$

Подробнее способ построения барионного октета пояснен на рис. 10.2. Конечно, полное число комбинаций из трех кварков по три равно $3 \times 3 \times 3 = 27$ и кроме октетных образуются также и другие состояния, в частности декуплет (десять состояний), показанный на рис. 10.3.

Существование указанного декуплета, заполняемого резонансными барионными состояниями, явилось решающим аргументом в пользу SU_3 -теории. В верхней строке диаграммы рис. 10.3 представлены дельта-частицы Δ — барионы спина $3/2$, у которых $S=0$, $I=3/2$. Это знакомые нам 3-3-резонансы пион-нуклонного рассеяния (см. гл. 7). Следующие две строки диаграммы заполняются уже открытыми к моменту формулировки теории восьмеричного пути частицами с $S=-1$, $I=1$ и $S=-2$, $I=1/2$, а единственное место в нижней строке оставалось вакантным: соответствующую частицу с $S=-3$, $I=0$ никто еще не наблюдал. Сравнение масс известных частиц показало, что при движении вдоль диаграммы рис. 10.3 сверху вниз массы возрастают: при переходе от строки к строке они увеличиваются примерно эквидистантно на 140—150 МэВ. Если допустить, что это правило эквидистантного возраста-

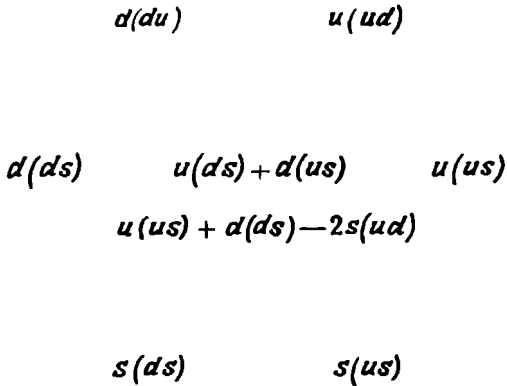


Рис. 10.2. Построение барионного октета:

$$\begin{aligned}
 n^0 &= d(du), \quad P^+ = u(ud), \\
 \Sigma^- &= d(ds), \quad \Sigma^0 = u(ds) + d(us), \\
 \Sigma^+ &= u(us), \quad \Lambda^0 = u(us) + d(ds) - 2s(ud), \\
 \Xi^- &= s(ds), \quad \Xi^0 = s(us).
 \end{aligned}$$

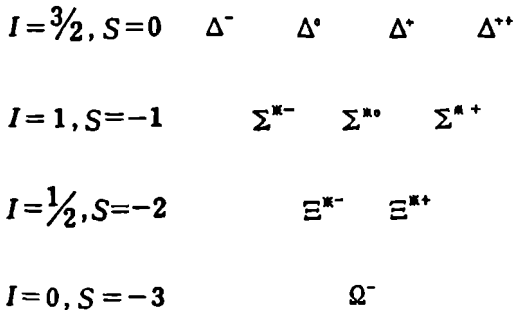


Рис. 10.3. Барионный декуплет.

ния массы остается верным также и при переходе от третьей сверху строки к самой нижней, то можно вычислить массу неизвестной частицы. Предсказанное таким образом значение массы оказалось равным приблизительно 1680 МэВ.

Обнаружение Ω^- -частицы, имевшей заранее предсказанные свойства

В 1963 г. сотрудники Брукхэйвенской лаборатории (США) зарегистрировали в пузырьковой камере рождение и распад неизвестной ранее омега-минус-частицы Ω^- , имевшей все требуемые теорией свойства.

Масса Ω^- -частицы совпала с предсказанным значением. Делать далеко идущие выводы, исходя только из одного совпадения, конечно, очень рискованно, и исследователи, вообще говоря, не должны так поступать. Но в данном конкретном случае доказательство существования Ω^- -частицы — не единственный способ проверить соответствие SU_3 -теории и экспериментальных данных. В принципе для такой проверки можно воспользоваться любым из 27 состояний, которые могут образоваться при взаимодействии октетных барионов с октетными мезонами. В частности, исходя из 3-3-резонанса πN -рассеяния, тоже можно построить состояние с $S = -3$, но оно будет иметь $I = 1$, т. е. будет триплетом, а не синглетом. В SU_3 -теории имеются разнообразные возможности и, как всегда, при решении вопроса о том, какие из них реализуются в действительности, решающее слово остается за экспериментом.

Дадим краткую сводку основных результатов SU_3 -теории.

1. Адроны в общем случае группируются в мультиплеты — синглеты, октеты, декуплеты и т. д. Частицы, принадлежащие одному мультиpletу, имеют одинаковый спин, сравнительно близкие значения масс и характеризуются определенной связью между изоспином и странностью, удовлетворяющей правилу ННГ.

2. Поскольку массы частиц внутри мультиплетов различаются, SU_3 -симметрия не является совершенно точной, но оказывается, что ее нарушение подчиняется некоторой приближенной закономерности, выражаемой при помощи так называемой массовой формулы Гелл-Манна — Окубо. Частный случай этой массовой формулы — упоминавшаяся выше эквидистантность масс частиц внутри барионного декуплета. В общем случае формула Гелл-Манна — Окубо показывает, как масса частиц внутри мультиплета зависит от значений изоспина и странности.

3. Теория позволяет также вывести конкретные приближенные соотношения между магнитными моментами частиц, принадлежащих данному мультиpletу, и между сечениями реакций с участием этих частиц.

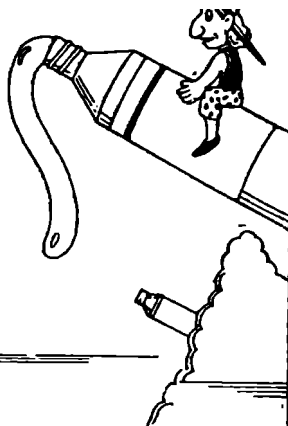
В период, когда искали Ω^- -частицу с целью подтверждения SU_3 -теории, речь шла о проверке первоначальной, еще не развитой модели кварков. Но уже в этой ранней модели принималось, что, хотя все барионы и построены из троек кварков, существование, скажем, 27-плета невозможно (он разбивается на синглет, октеты и декуплет по правилу $3 \times 3 \times 3 = 1 + 8 + 8 + 10$). Таким образом, при формулировке модели кварков в чисто математическую теорию представлений группы SU_3 вводились ограничения, облегчающие истолкование наблюдаемых на опыте явлений.

То же относится и к массовой формуле Гелл-Манна — Окубо. Разумно принять, что разности масс адронов объясняются неравенством масс кварков. Обычно считают, что s -кварк тяжелее u - и d -кварков; поэтому относительное утяжеление странных частиц прямо пропорционально числу содержащихся в них s -кварков. Если, кроме того, допустить, что d -кварк немного массивнее u -кварка, то можно объяснить, почему нейтрон тяжелее протона.

Несколько расширяя поле зрения, попробуем сравнить между собой мезоны и барионы. Первые имеют структуру $q\bar{q}$, а вторые — qqq ; поэтому барионы должны быть массивнее мезонов. В общем, это так, но отношение масс мезонов к массам барионов не равно $2/3$. Очень велик разброс масс π -, K - и η -частиц внутри мезонного октета: разности масс примерно равны средней массе мезона. Иными словами, приближенность модели кварков сразу обнаруживается, как только мы переходим к ее количественному анализу.

В начальный период разработки модели кварков было совершенно не ясно, насколько серьезно нужно воспринимать эти объекты. Даже сами авторы модели иногда высказывались в том смысле, что кварки, возможно, не более чем удобные символы для выражения соотношений между квантовыми числами частиц. Конечно, если бы удалось обнаружить свободные кварки, подобные сомнения сразу отпали бы, но их не нашли до сих пор, и, значит, сомнения остаются. Однако, поскольку стиль научного мышления, опирающийся на интерпретацию кварков как обычных частиц, постоянно приводил ко все новым и новым успехам, в настоящее время почти не осталось людей, которые относились бы к кваркам как к не имеющим реального значения математическим символам.

Модель кварков непрерывно развивалась и эволюционировала. В следующих главах мы шаг за шагом рассмотрим этот процесс.



ЭВОЛЮЦИЯ МОДЕЛИ КВАРКОВ

Модели систем, построенных из кварков

Первоначально кварки были введены для объяснения SU_3 -симметрии адронов, и ясно, что эти гипотетические частицы не могли сразу получить статус «настоящих». Созревание гипотезы и развитие ее в непротиворечивую теорию требует определенного времени. Достаточно напомнить, какой долгий срок прошел, прежде чем атомная гипотеза переросла в современное общепризнанное учение об атомах. Даже сейчас у некоторой части физиков остаются сомнения в реальности кварков. Основная причина для таких сомнений в том, что «кварки до сих пор никто не видел». Чтобы перевести их в разряд столь же «наблюдаемых» частиц, как, например, лептоны, требуются, в частности, разнообразные теоретические проверки, в результате которых все детальнее познаются свойства изучаемых объектов или, иначе говоря, уточняются сделанные ранее предположения.

Три кварка введены Гелл-Манном и Цвейгом как носители трех квантовых чисел, в пространстве которых действует группа SU_3 ; кроме того, Гелл-Манн и Цвейг предположили, что кварки являются фермионами (ферми-частицами, см. стр. 51) со спином $1/2$, похожими в этом отношении на лептоны. Поскольку адроны строятся из кварков, ясно, что в зависимости от выбора комбинации последних будут получаться состояния, различающиеся не только значениями изоспина и странности, но и значениями спина. Разумно предположить, что таким образом можно описать также и возбужденные резонансные состояния адронов. Высказыва-

лась надежда, что изучение этих состояний позволит выявить природу взаимодействия кварков, подобно тому как изучение данных атомной и ядерной спектроскопии позволяет извлекать сведения о характере взаимодействия частиц, из которых построены атомы и ядра.

Попытаемся по аналогии с теорией атомов и атомных ядер построить модели систем, образованных из кварков. Поскольку массы кварков, входящих в состав адронов, примерно одинаковы, адроны разумнее сравнивать не с атомами, а с атомными ядрами. Мезоны $q\bar{q}$ надо сопоставить с дейтоном (ядром атома тяжелого водорода) pn (протон—нейтрон), а барионы qqq —с тритоном pnn или ядром гелия-3 (He^3) ppn . Дейтон и тритон—изотопы обычного водорода (p), а гелий-3—изотоп обычного гелия-4 ($ppnn$). Заменяя p и n на кварки u и d , получим, что при переходе от теории атомного ядра к модели кварков тритон переходит в нейтрон, а гелий-3—в протон:

$$\begin{aligned} t &= pnn, & He^3 &= ppn, \\ n &= udd, & p &= uud. \end{aligned}$$

Первоначальная гипотеза, позволившая в общих чертах понять структуру атомного ядра, сводилась к тому, что сила притяжения между нуклонами имеет короткий радиус действия, а энергия связи нуклонов в ядре мала по сравнению с энергиями покоя частиц (составляет несколько процентов от энергии покоя), в частности, мала кинетическая энергия нуклонов; кроме того, для простоты игнорировалась разница между протоном и нейтроном и предполагалось, что сила притяжения нуклонов не зависит от ориентации их спинов. Такая приближенная картина взаимодействия правильно объяснила общий характер энергетических спектров атомных ядер, а для истолкования конкретных особенностей спектров пришлось учитывать различие протона и нейтрона, зависимость энергии взаимодействия от ориентации спинов и т. п.

Естественно попытаться использовать такой же подход в модели кварков, что и сделали Гюрсей и Радзикатти и независимо от них Сакита; соответствующая схема известна под названием SU_6 -теории. Ревнителю принципов теоретической физики схема SU_6 должна показаться недопустимым суррогатом, и требовалось немалое мужество, чтобы смело высказать положенные в ее основу предположения.

Дело в том, что если бы адрон представлял собой слабосвязанную систему, то входящие в его состав кварки были бы легче самого адрона и при расщеплении последнего

без труда высвобождались бы в свободное состояние. В частности, был бы возможен развал пиона с вылетом кварка и антикварка, каждый из которых легче пиона, а ведь пион — самая легкая из сильновзаимодействующих частиц. Если же в основу рассуждений положить факт отсутствия свободных кварков в природе, то при построении модели надо принять, что кварки гораздо тяжелее адрона, а большие энергии покоя кварков компенсируются примерно равной им по величине энергией связи кварков в адроне. Связанные в адрон кварки можно уподобить камням на дне глубокого колодца, которые никак не удастся оттуда выкинуть. Но столь глубокие и узкие потенциальные ямы невозможно описать на языке релятивистской теории ядерных сил, подобной теории Юкавы.

Аналогия с атомным ядром

Отмеченную в предыдущем абзаце неувязку оставим пока в стороне как еще не решенную проблему и попытаемся сначала провести до конца аналогию между системой кварков и атомным ядром. Начнем с мезонов. Если сила притяжения кварка и антикварка не зависит от спина, то энергия системы определяется состоянием их относительного движения. Обычно считается, что энергия минимальна в состоянии с орбитальным моментом количества движения $l=0$ и возрастает при переходе к $l=1, 2, 3, \dots$. При $l=0$ полный спин системы будет равен нулю или единице в зависимости от того, антипараллельны или параллельны друг другу равные $1/2$ спины составляющих систему частиц. Поскольку четность системы кварк и антикварк отрицательна, получаются состояния 0^- и 1^- (объяснение этих результатов дано выше, при изложении теории Ферми — Янга, см. стр. 95). Когда кварк и антикварк выбираются из трех возможных кварков, теория SU_3 -симметрии показывает, что множество состояний $q_i \bar{q}_j$ разбивается на октет и синглет. Таким образом, с состояниями 0^- все в порядке. Состояния 1^- сопоставляются так называемым векторным мезонам, обозначаемым символами ω , ρ , K^* , ϕ и т. п. Это возбужденные резонансные состояния, по энергии расположенные выше состояний 0^- ; известно, что они обычно распадаются на два мезона 0^- .

В случае барионов тоже разумно принять, что в состоянии с наименьшей энергией орбитальный момент количества движения трех кварков равен нулю. Полный спин системы трех кварков может принимать значения $1/2$ и $3/2$. Состояния со спином $1/2$ образуют барионный октет, а со спином $3/2$ —

барионный декуплет. Но почему должна быть корреляция между спином и трансформационными свойствами состояний в теории SU_3 ?

При ответе на последний вопрос обнаруживается мощь принципов квантовой статистики, согласно которой (см. стр. 51) частицы со спином $1/2$ должны быть фермионами, подчиняющимися статистике Ферми. Это значит, что полная волновая функция системы трех кварков должна быть антисимметричной относительно перестановок любой пары частиц. При перестановке частиц переставляются не только их спиновые переменные, но и переменные (u , d , s), маркирующие состояние в теории SU_3 ; поэтому-то и возникает указанная корреляция.

Описанная программа реализована в предложенной Гюрсе-ем, Радзикатти и Сакитой SU_6 -теории. Такое название она получила потому, что при учете направлений спина приходится работать с кварками не трех, а шести видов.

Теория SU_6 в состоянии объяснить, почему спин октетных барионов равен $1/2$, а декуплетных $3/2$, но достигается это ценой одного очень странного допущения. Получается, что, хотя мы и исходим из посылки о принадлежности кварков к статистике Ферми, в действительности дело выглядит так, будто они подчиняются статистике Бозе. Этот парадокс удобнее всего объяснить на примере частицы Ω^- (см. стр. 108). Поскольку ее спин равен $3/2$, а странность -3 , она находится в состоянии, при котором спины всех трех s -кварков параллельны. Но такое состояние симметрично относительно перестановки любой пары частиц, в противоречии с требованием статистики Ферми. Однако если забыть об этом противоречии и принять статистику Бозе, то для всех характеристик не только Ω^- -частицы, но и других барионов (например, для их магнитных моментов) при помощи теории SU_6 можно получить значения, согласующиеся с экспериментальными данными.

При поверхностной оценке SU_6 -теория выглядит успешной, но с принципиальной точки зрения в ней, конечно, есть много темных мест. Взять хотя бы одно из ее достижений — уже упоминавшееся успешное вычисление магнитных моментов. В теории принимается, что масса кварка равна $1/3$ массы нуклона, а магнитные моменты кварков складываются. Это значит, что при расщеплении атомного ядра на нуклоны последние должны просто разваливаться на составляющие их кварки. Но таких кварков не существует. Кварки, ведущие себя как бозоны (частицы, подчиняющиеся статистике Бозе, см. стр. 51), слабо связанные с тем не менее неразъедини-

мые? Не слишком ли бледна слабая тень реальности, отбрасываемая этими загадочными объектами? Ясно, что надо было как-то согласовать между собой указанные взаимоисключающие свойства.

Оставим пока в стороне вопрос об энергии связи и обсудим трудность, связанную со статистикой. Одна из первых попыток ее преодоления принадлежит Гринбергу, который предложил считать, что кварки подчиняются не обычной статистике Ферми, допускающей в одном состоянии не более одной частицы, а так называемой пара-ферми-статистике третьего порядка, при которой число частиц в одном состоянии может равняться трем. Такого рода статистика была известна теоретически, но ранее не находила практического применения.

Но введение пара-ферми-статистики напоминало тавтологию: оно ничего не объясняло. Ощущалась необходимость в другом, независимом способе проверки статистических свойств кварков. К счастью, такой способ был найден: для проверки статистики кварков занялись исследованием процессов рождения пар $q\bar{q}$, например процессов рождения мезонов при e^+e^- -столкновениях. Оказалось, что в данном случае требование пара-ферми-статистики равносильно допущению об утроении числа обычных фермионов; как тот, так и другой подход приводит к увеличению вероятности процесса (его сечения) в три раза по сравнению с обычной оценкой.

Классификация кварков по цвету и аромату

Если это так, то не лучше ли оставить кварки фермионами, но принять, что число их видов втрое больше? Утроение числа кварков означает, что вводятся три разновидности каждого из «старых» кварков u , d , s ; вновь вводимые кварки имеют общие квантовые числа изоспина и странности, маркирующие состояния в теории SU_3 . При этом число SU_3 -триплетов увеличивается в три раза:

$$\begin{array}{ccc} u_1 & u_2 & u_3, \\ d_1 & d_2 & d_3, \\ s_1 & s_2 & s_3. \end{array}$$

Предложение увеличить втрое число кварков выдвинуто одновременно и независимо несколькими авторами: Кара и

Намбу, Миямото, Тавхелидзе¹⁾. Видно, что для полной классификации кварков теперь требуются две координаты: по оси абсцисс и по оси ординат. Вдоль оси ординат изменяются квантовые числа старой SU_3 -теории, а вдоль оси абсцисс — квантовые числа новых состояний, которые тоже обладают SU_3 -симметрией. Новые квантовые числа получили название «цвет», а для старых принят термин «аромат». Для конкретизации цвета пользуются словами «красный», «зеленый», «синий» или «красный», «желтый», «синий», а для аромата используют старые обозначения u , d , s ; выше упоминалось (и в дальнейшем будет идти речь) о том, что в настоящее время число ароматов увеличилось и рассматривают ароматы c , b ²⁾.

Модели с девятью кварками

Обсудим, теперь уже на новом уровне, проблему структуры адронов. Какие адроны можно построить из девяти кварков? Поскольку число кварков увеличилось, на первый взгляд должно возрасти также число мезонов и барионов. Но для их описания нам было достаточно трех видов кварков. Не возникает ли здесь новой трудности? И удастся ли удовлетворить требованиям статистики Ферми для барионов?

Коротко говоря, ответ на эти вопросы состоит в том, что обычные адроны надо считать «бесцветными», или «белыми». «Белизна» адронов означает, что при их построении кварки трех основных цветов смешиваются в одинаковой пропорции, т. е. рассматриваются как эквивалентные друг другу. Для построения барионов берут по одному кварку красного (R , от англ. *red*), зеленого (G , от англ. *green*) и синего (B , от англ. *blue*) цвета и образуют их должную суперпозицию, т. е. производят соответствующее усреднение по состояниям q_R , q_G , q_B . В случае мезонов в комбинациях q и \bar{q} берут кварки одного и того же цвета, а затем усредняют по состояниям $q_R\bar{q}_R, \dots$

Гипотеза о «бесцветности» адронов позволяет избежать трудностей со статистикой, но выглядит как искусственный прием. Надо указать причину, по которой запрещены произ-

¹⁾ Автор называет не всех советских авторов этой гипотезы. Идея о том, что каждый из кварков u , d , s ... представлен тремя разновидностями, различающимися особым квантовым числом, которое позднее получило название «цвет», выдвинута в совместной работе Н. Н. Боголюбова, Б. В. Струминского, А. Н. Тавхелидзе.— *Прим. ред.*

²⁾ А также t (см. гл. 12 и примечание редактора на стр. 35.— *Прим. ред.*

<i>Аромат</i>				
<i>Вверх</i>	u_1	u_2	u_3	
<i>Вниз</i>	d_1	d_2	d_3	
<i>Стран- ность</i>	s_1	s_2	s_3	
<i>Очарова- ние</i>	c_1	c_2	c_3	
<i>Красота</i>	b_1	b_2	b_3	
	<i>Крас- ный</i>	<i>Синий</i>	<i>Зеле- ный</i>	<i>Цвет</i>

Рис. 11. 1. Классификация кварков по степеням свободы цвета и аромата.

вольные комбинации цветных кварков. Если такой причины не отыщется, то число адронов в модели с цветными кварками неизбежно должно возрасти.

Если подобная причина есть, то естественно думать, что она имеет динамическую природу: цветные состояния могут существовать, но отвечающие им частицы гораздо тяжелее бесцветных и не наблюдаются в современных экспериментах. Понять эту идею помогает аналогия с атомами. Белые адроны аналогичны неионизованным, нейтральным атомам, в которых полностью скомпенсированы положительные и отрицательные электрические заряды, а цветные состояния адронов подобны заряженным ионам. Ясно, что ионы имеют большую энергию и стремятся возвратиться в состояние нейтрального атома. Такая тенденция объясняется тем, что между электрическими зарядами действует сила кулоновского притяжения.

Можно ли применить эту аналогию к цветовым состояниям? Иначе говоря, нельзя ли построить теорию, в которой существовала бы сила, пропорциональная цвету кварков и равная нулю в состоянии белого цвета? К счастью, оказалось, что теория, идеально приспособленная для описания указанной ситуации, уже создана: это — упоминавшаяся выше теория Янга — Миллса. О Янге мы говорили в связи с несохранением четности; он разработал свою теорию совместно с Миллсом в 1954 г. В настоящее время она известна под названием теории неабелевых калибровочных полей (неабелевых полей); подробнее мы ее обсудим ниже.

Существуют ли цветные адроны?

Естественно, что проведением аналогии между нейтральными атомами и белыми адронами проблема полностью не решается. Подобно ионизации атомов, должна быть возможна «ионизация» белых адронов с превращением их в цветные. Правда, всегда можно предположить, что нужная для такой «ионизации» энергия очень велика.

Но как оценить порядок величины этой энергии? Иными словами, каков порядок величины массы частиц, находящихся в цветном состоянии? Поскольку внутри таких частиц должны содержаться «лишние» кварки, ясно, что наш вопрос имеет прямое отношение к уже обсуждавшейся проблеме высвобождения кварков.

Поэтому активизировались попытки подтвердить или опровергнуть существование цветных адронов и трехцветных кварков. Если адроны в принципе можно «ионизовать», то такая реакция должна начинаться после того, как энергия адрон-адронных или адрон-лептонных столкновений превзойдет некоторое «пороговое» значение. При этом должно резко увеличиваться сечение процесса и возможно наблюдение новых резонансных состояний. Таким образом, надо ожидать, что при энергиях, намного превышающих сечения наблюдаемых адронных реакций, сечения всех процессов сильно возрастут.

Поскольку сами кварки тоже являются цветными частицами, необходимо обратить внимание на один важный класс цветных состояний. Кварки характеризуются цветом и ароматом, причем разным ароматам u , d , s соответствуют разные электрические заряды. Следовательно, среди цветных состояний можно различать состояния с дробным электрическим зарядом, как у кварков, и состояния, пропорция смешивания цветов в которых хотя и отличается от пропорции, характерной для мезонов и барионов, но такова, что электрический заряд цветного состояния остается целым. Первые из указанных цветных состояний можно отличить, непосредственно измеряя электрический заряд частицы, например исследуя толщину треков в пузырьковой камере (выше, в разделе о поиске кварков, указывалось, что толщина трека пропорциональна квадрату величины электрического заряда ультрарелятивистской частицы).

Если же электрический заряд целочисленный, то электромагнитные свойства цветных и белых частиц одинаковы и различить их таким простым способом невозможно.

Может ли электрический заряд кварков принимать целочисленные значения?

Не объясняются ли неудачи попыток обнаружения свободных кварков тем, что их электрический заряд в действительности является целочисленным? Такая возможность естественно возникает после введения цветовых степеней свободы кварков. В самом деле, не обязательно считать, что электрический заряд связан только с ароматом, его можно приписывать также и цветовым степеням свободы. Если отдельные кварки имеют целочисленные значения электрического заряда, а электрический заряд состояния по трем цветовым степеням свободы, принимает дробные значения, то в белых адронах такие кварки будут вести себя точно так же, как бесцветные кварки Гелл-Манна и Цвейга, имеющие дробный электрический заряд.

Возможность приписывания кваркам целочисленных значений электрического заряда изучена в работе Кара и Намбу. Рассмотрим модель Кара—Намбу подробнее.

Кварки в модели Кара—Намбу напоминают обычные барионы; в этом смысле она близка к старой модели Сакаты. Но в отличие от модели Сакаты, здесь принимается, что кварки гораздо тяжелее обычных барионов и представляют собой нестабильные частицы, распадающиеся на мезоны и барионы. Правда, справедливости ради надо отметить, что в настоящее время нет никаких свидетельств в пользу существования подобных частиц, независимо от того, приписываются ли им дробные или целочисленные заряды, считают ли их стабильными или нестабильными.

Тем не менее способ взаимного сопоставления и проверки различных гипотез о распределении электрического заряда кварков существует. Для этого надо воспользоваться процессом рождения адронов при столкновении встречных электрон-позитронных пучков. При таком столкновении электрон-позитронные пары через посредство промежуточных фотонов γ превращаются в пары кварков и антикварков q, \bar{q} , которые благодаря сильному взаимодействию объединяются в адроны и излучаются в виде нескольких наблюдаемых частиц:

$$e^+ + e^- \rightarrow \langle \gamma \rangle \rightarrow \langle q + \bar{q} \rangle \rightarrow \text{адроны}$$

(в кавычки взяты виртуальные промежуточные частицы). Поскольку при высоких энергиях вероятность (сечение) рождения определенной пары кварков пропорциональна квадрату их электрического заряда, полное сечение процесса, безотносительно к виду испускаемых адронов, должно быть пропор-

Аромат Цвет	<i>u</i>	<i>d</i>	<i>s</i>
Красный	1	0	0
Зеленый	1	0	0
Синий	0	-1	-1
Среднее значение	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$

Рис. 11.2. Электрические заряды кварков в модели Кара—Намбу.

ционально сумме квадратов электрических зарядов всевозможных кварков. Например, в случае модели Гелл-Манна—Цвейга с тремя кварками *u*, *d*, *s*, указанная сумма квадратов равна

$$R = \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{2}{3}.$$

Если же кварки имеют три цвета, то суммировать нужно по девяти видам кварков, и тогда получится $R=2$. Напротив, в модели Кара—Намбу $R=4$ (в этом можно убедиться при помощи таблицы, показанной на рис. 11.2). Правда, значение $R=4$ получается у Кара—Намбу при суммировании по всем возможным адронам, включая небелые, а если ограничиться только белыми адронами, то и у Кара—Намбу тоже получится $R=2$.

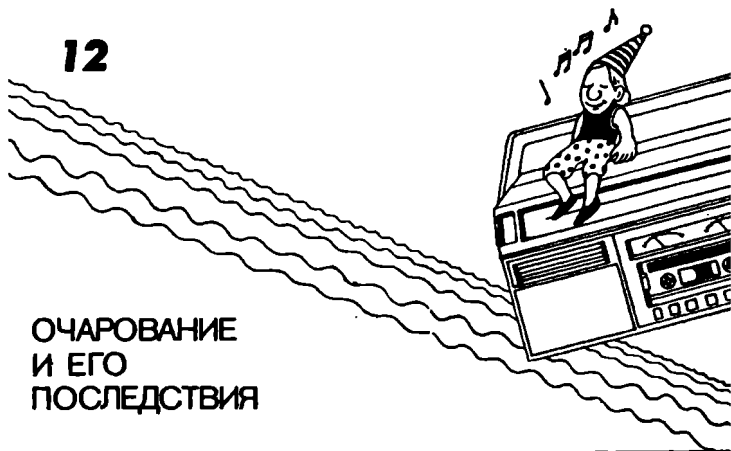
В экспериментах 1960-х гг., проводившихся при энергиях 2—3 ГэВ, для величины R нашли значение около $R=2$, а не $\frac{2}{3}$ или 4; эти данные свидетельствовали в пользу модели цветных кварков с дробными зарядами. Но как поведет себя величина R при увеличении энергии соударения?

Среди задач, ради решения которых строился Станфордский электрон-позитронный ускоритель на 8 ГэВ (SPEAR, США), была, в частности, задача измерения величины R . Сделать это сравнительно просто: надо регистрировать любые адроны независимо от их вида и свойств; поэтому такие измерения были проведены сразу же после пуска ускорителя. Они дали странный результат: при энергии выше 4 ГэВ величина R увеличилась до значения $R \sim 4$. Это означало, что

модель Гелл-Манна—Цвейга с трехцветными кварками надо отвергнуть. Точно так же отвергался и результат $R=2$, получаемый в модели Кара—Намбу при суммировании по белым адронам; но поскольку в последней модели при суммировании по всем адронам, включая цветные, $R=4$, можно было думать, что при энергиях выше 4 ГэВ начинают рождаться цветные адроны.

Сюрприз J/ψ

Чтобы разобраться в полученных результатах, сотрудники Станфордского ускорителя повторили свой опыт, выполнив более точные измерения. В итоге в 1974 г. был получен совершенно неожиданный результат—открыта новая частица J/ψ . Установление ее истинной природы потребовало значительного времени. В конце концов оказалось, что это не цветной, а белый адрон, построенный из неизвестных ранее кварков—носителей нового аромата (квантового числа «очарование»). О частице J/ψ и открытом вслед за ней новом семействе частиц мы подробнее поговорим в следующей главе.



ОЧАРОВАНИЕ И ЕГО ПОСЛЕДСТВИЯ

Предъявлением частицы J/ψ природа демонстрирует свою сложность

При помощи кварковой модели, введенной с целью классификации и упорядочения в адронные семейства частиц, открытых одна за другой в 1950—1960-х гг., удалось построить все адроны из кварков u , d , s , и был период, когда казалось, что все вещество Вселенной состоит из комбинаций трех кварков и четырех лептонов (электрона e , электронного нейтрино ν_e , мюона μ и мюонного нейтрино ν_μ). В тот период можно было сказать, что хотя по сравнению с началом XX века, когда были известны только электрон и протон, физика элементарных частиц несколько усложнилась, но по существу она уже достигла предела своего развития. Оставалось уточнить только свойства силового поля, передающего слабые взаимодействия, и поля, действующего на цвета кварков.

Исследования этих так называемых калибровочных силовых полей действительно с большой силой развернулись в 1970-х гг., но тогда же стали поступать экспериментальные свидетельства, что число разновидностей кварков и лептонов больше, чем думали ранее. Первое из таких свидетельств — обнаружение частицы J/ψ , о которой мы упомянули в конце предыдущей главы.

Частицу J/ψ открыли независимо друг от друга и практически одновременно группа Тинга из Массачусетского технологического института (США) и группа Рихтера (линейный ускоритель SLAC Станфордского университета, США). За

свое открытие они были удостоены в 1976 г. Нобелевской премии. Символ J введен группой Тинга, а ψ — группой Рихтера¹⁾. Обе группы пользовались совершенно разными экспериментальными методами, но, несомненно, обнаружили одну и ту же частицу.

Группа Тинга работала на ускорителе AGS (30 ГэВ) Брукхейвенской национальной лаборатории (США). Она изучала распад на электрон-позитронные пары (e^- , e^+) нейтральных адронов, рождаемых при взаимодействии протонного пучка ускорителя с гелиевой мишенью (при столкновениях протонов с протонами). Целью опытов Тинга был поиск новых векторных мезонов.

Векторными называют мезоны спина единица; по модели кварков спины q и \bar{q} в таком мезоне параллельны. В частности, мезоны вида $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$, имеющие нулевой электрический заряд и нулевую странность, похожи на суперпозиции $e\bar{e}$ (электрон — позитрон) и $\mu\bar{\mu}$ (мюон — антимюон); поэтому помимо превращений в прочие адроны возможны распады таких мезонов на лептон-антилептонные пары

$$q + \bar{q} \rightarrow \langle \gamma \rangle \rightarrow e + \bar{e}, \mu + \bar{\mu}.$$

Считалось, что известные к тому времени векторные мезоны ρ^0 , ω^0 , ϕ^0 (см. стр. 112) построены из кварков и антикварков по указанной выше схеме.

САМЮЭЛ ТИНГ и **БАРТОН РИХТЕР** — американские физики-экспериментаторы. В 1976 г. удостоены Нобелевской премии за одновременное и независимое открытие новой частицы J/ψ .

В настоящее время Тинг — профессор Массачусетского технологического института; опыты, приведшие к открытию частицы J , поставлены им в Брукхейвенской национальной лаборатории. Впоследствии принимал участие в опытах на ускорителе ДЭЗИ (ФРГ) и в ЦЕРНе (Швейцария). Тинг по происхождению китаец, и символ J открытой им частицы напоминает китайский иероглиф, с которого начинается его фамилия.

Рихтер — один из руководителей и душа SLAC (Станфордского центра линейных ускорителей). Он, в частности, был

¹⁾ По-видимому, двойное название частицы J/ψ сохранилось не только как дань уважения к ее открывателям, но и из-за игры слов: *Gipsy* (джипси) по-английски — цыганка, цыган. — *Прим. ред.*

инициатором проектирования и разработки системы со встречными электрон-позитронными пучками. Вслед за открытием ψ -частицы группой Рихтера обнаружены одна за другой ψ' , χ , D и другие частицы, содержащие очарованные кварки; сотрудник того же Центра Перл нашел новый лептон—тау-частицу (τ). В течение этих нескольких лет SLAC лидировал в деле открытия новых частиц.

Но не существует ли других, более тяжелых векторных мезонов? Разумеется, мезоны не обязаны быть векторными (иметь спин единица), но, как видно из приведенной схемы реакции, возможность распада на лептон-антилептонные пары через однотипные промежуточные состояния, содержащие векторные фотоны (« γ »), уникальна именно для векторных мезонов, искать которые надо было, таким образом, на пути исследования высокоэнергичных электрон-позитронных пар. На этой задаче и сосредоточил свое внимание Тинг. Подготовка опыта заняла у него несколько лет ввиду крупномасштабности экспериментальной установки.

При столкновении налетающих протонов с протонами (или нейтронами) мишени

$$p + p(n) \rightarrow \bar{\nu}^0 + x + y + \dots$$

рождались векторные мезоны $\bar{\nu}^0$, которые тут же распадались на e^+ и e^- . Измеряя энергии и другие характеристики электрона и позитрона, можно было рассчитать массу породившей их частицы.

Конечно, при отсутствии резонанса пары кварков и антикварков могут превращаться также в мюон-антимюонные пары, энергии которых в опыте не фиксировались, но при наличии резонанса должен был наблюдаться острый максимум.

Гарантия существования искомого векторного мезона, разумеется, не было. Могло быть и так: новый векторный мезон существует, но вероятность его образования настолько мала, что соответствующие события оказываются погребенными под уровнем фона и зарегистрировать максимум очень трудно. Таким образом, в опыте Тинга присутствовал элемент риска.

Опыты Рихтера были не менее уникальны. В них изучались процессы, обратные тем, формула которых приведена на стр. 121, а именно регистрировались адроны, рождаемые при столкновениях позитронов (e^+) с электронами (e). Лептоны не

участвуют в сильном взаимодействии, поэтому при указанных столкновениях адроны могли рождаться только за счет их электромагнитного взаимодействия с электронами. Такие процессы — идеальное средство для изучения электромагнитных взаимодействий, и надо отдать должное Рихтеру за ту настойчивость, с которой он добивался строительства установки SPEAR со встречными электрон-позитронными пучками. Даже если бы обнаруженного Рихтером резонанса и не существовало, его опыты дали бы ценнейшую информацию о числе кварков (об этом говорилось в конце предыдущей главы). Кроме того, подобно фотонам и векторным мезонам, в электрон-позитронные процессы должна вносить вклад не являющаяся адроном специальная векторная частица Z^0 — переносчик слабого взаимодействия в теории Вайнберга — Салама, о которой речь пойдет ниже. Именно этими соображениями объясняется то, что во всем мире одна за другой проектируются и строятся все более мощные установки со встречными электрон-позитронными пучками.

Истинная природа частицы J/ψ .

Вернемся к частице J/ψ . Сообщения о ее открытии проникли в газеты и вызвали сенсацию не только среди ученых, но и у широкой публики. Всеобщее возбуждение объяснялось не просто тем, что открыт еще один мезон, а главным образом способом его обнаружения. Особенно поражали воображение данные, поступившие из Станфорда (SLAC).

При постановке опыта со встречными пучками пучки электронов и позитронов сначала вращаются в тороидальных камерах в противоположных направлениях, а затем пересекаются в некоторой точке. Точка пересечения окружена измерительной аппаратурой, регистрирующей треки всех вылетающих из области соударения частиц, по которым определяются свойства частиц и их энергии. Читатель, взгляните на рис. 12.1. Вы видите, что сначала сечение мало и практически не меняется, так что регистрируемые события напоминают чуть накрапывающий осенний дождик. И вдруг, при достижении энергии 3,1 ГэВ, кривая резко взмывает вверх: в узком энергетическом интервале шириной несколько мегаэлектронвольт (МэВ) сечение процесса возрастает в сто раз. На ум приходит сравнение из области радио: вращая ручку настройки, вы вначале ловите лишь слабый шум и треск. И вдруг при незначительном повороте ручки попадаете на мощную радио-

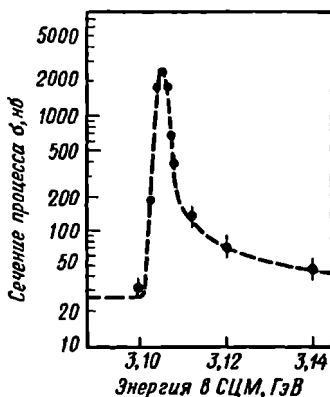


Рис. 12.1. Экспериментальная кривая из статьи, сообщавшей об открытии J/ψ -частицы. (1 нб = 10^{-35} см².)

станцию, от сигнала которой начинает содрогаться и чуть не ломается громкоговоритель вашего приемника.

Главные характеристики резонанса — высота пика и его ширина. Резонанс тем более явно выражен, чем выше и уже пик; в обратном случае, когда пик низкий и пологий, затруднительно даже сказать, существует ли резонанс вообще. При наличии резонанса площадь пика в основном определяется характером реакции и ее энергией, поэтому высота и ширина резонанса обратно пропорциональны друг другу: чем уже резонанс, тем он выше.

Известным мезонам, таким, как ρ^0 , ω^0 , ϕ^0 , соответствуют довольно высокие пики, но их ширина обычно бывает порядка 100 МэВ. Именно поэтому так поразил воображение ученых узкий, как игла, резонанс J/ψ ; чувствовалось, что это не просто еще один мезон.

По соотношению неопределенностей ширина резонанса в общем обратно пропорциональна времени его жизни: чем уже резонанс, тем больше время жизни и тем он стабильнее. Что же представляет собой J/ψ -частица, которая настолько стабильнее остальных векторных мезонов?

Выяснение истинной природы J/ψ -частицы продолжалось около двух лет; при этом потребовались как новые экспериментальные данные, так и разнообразные теоретические соображения. Среди новых экспериментальных данных прежде всего надо упомянуть обнаруженный примерно неделю спустя после открытия J/ψ -частицы узкий резонанс ψ' , расположенный при чуть более высокой энергии. При дальнейшем повышении энергии в окрестности 4 ГэВ найдено несколько более широких резонансов, похожих на обычные мезоны.

Кроме резонансов следует отметить еще общий рост полного сечения всех процессов вида $e^+ + e^- \rightarrow$ адроны (увеличение величины R), о котором говорилось выше, на стр. 119. (Экспериментальные данные представлены на рис. 12.2. см. стр. 128.)

Вскоре после перечисленных резонансов, по своим квантовым числам (спин, четность и т. п.) напоминавших фотоны, была открыта новая группа мезонов, получивших название χ -частицы. Они рождаются в процессе испускания фотонов ψ' -частицами:

$$\psi' \rightarrow \chi + \gamma;$$

масса χ заключена между массами ψ и ψ' . Совсем недавно обнаруженная η_c -частица имеет массу, чуть меньшую массы ψ , а своей спин-четностью (0^-) напоминает π^0 и η^0 ; тем не менее η_c -частица рождается из ψ' в процессе взаимодействия последней с фотонами γ .

Если спектр масс упомянутых выше частиц изобразить графически, то он расположится в области энергий 3—4 ГэВ, а по форме будет напоминать картину спектральных линий атома, например атома водорода. По современному представлению этот спектр масс сопоставляется спектру энергетических уровней системы $c - \bar{c}$, где c — четвертый кварк (c — от англ. *charm* — «очарование»), а \bar{c} — соответствующий антикварк. По аналогии с хорошо известным позитронием (системой, в которой электрон и позитрон связаны наподобие атома водорода), систему $c - \bar{c}$ называют чармонием. Частицы связываются в чармоний не за счет электромагнитных кулоновских сил, а под действием сил новой природы, введенных в связи с представлением о цвете кварков.

Четвертый кварк c , введение которого придало модели кварков завершенный вид

Данных о частицах ψ и χ было недостаточно для того, чтобы сделать определенный вывод в пользу изложенной выше интерпретации, основанной на существовании кварка c , но гипотеза об очарованном кварке окончательно утвердилась после открытия в 1976 г. мезонов D и F . Их массы оказались примерно вдвое меньше масс частиц семейства ψ , поэтому вновь открытые мезоны можно было интерпретировать как системы, составленные из кварка c и старых кварков u , d , s :

$$\begin{aligned} D^+ &= c\bar{d}, & D^0 &= c\bar{u}, \\ \bar{D}^0 &= u\bar{c}, & \bar{D}^- &= d\bar{c}, \\ F^+ &= c\bar{s}, & \bar{F}^- &= s\bar{c}. \end{aligned}$$

Из приведенных формул ясно, что кварку s надо приписать электрический заряд $^{2}/_{3}$, равный заряду u -кварка. Частицы D и F имеют такую же спин-четность 0^- , как η - s -частица, пионы, каоны, эта-мезон η и т. п. Кроме того, уже были известны несколько более тяжелые, чем D и F , векторные мезоны D^* и F^* , обладающие такой же спин-четностью 1^- , как векторные мезоны ρ , ω , ϕ , K^* и ψ -частицы.

D -мезоны очень похожи на каоны: они получают из каонов, если входящий в состав последних s -кварк заменить c -кварком. Входящий в состав каонов s -кварк является носителем странности. В том же смысле принимают, что содержащийся в D -мезонах c -кварк является носителем нового квантового числа — «очарования». Таким образом, F -мезоны характеризуются отличными от нуля значениями как странности, так и очарования.

Понятия странности и очарования полезны тем, что соответствующие квантовые числа почти сохраняются: они неизменны, если отвлечься от слабого взаимодействия. Поэтому D - и F -мезоны сравнительно стабильны, они распадаются лишь вследствие процессов превращения c в s -кварк:

$$c \rightarrow s + v + \bar{e}, \quad s + u + \bar{d},$$

Для оценки массы c -кварка можно воспользоваться описанным выше¹⁾ правилом сложения масс кварков, составляющих адрон. Поскольку

$$D \approx 1,8 \text{ ГэВ}, \quad u, d \approx 0,3 \text{ ГэВ},$$

имеем

$$c \approx 1,8 - 0,3 = 1,5 \text{ ГэВ},$$

откуда для массы ψ -частицы получается значение

$$\psi = c\bar{c} \approx 3 \text{ ГэВ},$$

хорошо согласующееся с величиной, измеренной на опыте.

Итак, гипотеза об очарованном кварке (c) позволяет по крайней мере качественно объяснить наблюдаемые явления; поэтому ее введение представляется разумным. В этой связи любопытно то, что идея о существовании четвертого кварка зародилась намного раньше открытия очарованных частиц ψ : она потребовалась для наведения порядка в теории слабых взаимодействий. Детали мы обсудим в следующих главах, а здесь ограничимся изложением сути дела. Формулы «обычно-

¹⁾ При изложении SU_6 -теории.— *Прим. перев.*

го» бета-распада

$$u \rightarrow d + \nu_e + e,$$

$$\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_e + e$$

допускают перестановку пары кварков (u , d) с парами лептонов (μ , ν_μ), (e , ν_e). Поэтому число разновидностей лептонов и ароматов кварков может быть только четным, а новые частицы могут появляться лишь парами. Поскольку в свое время s -кварк появился в единственном числе, требовалось допустить существование его «напарника» — еще одного кварка c . Таким образом, в дополнение к паре кварков (u , d) должна была возникнуть еще одна пара (c , s) с электрическими зарядами ($2/3$, $-1/3$).

Смелая гипотеза, довольно убедительная в силу своей простоты. Но на практике было много неясного, например, перестановка s - и u -кварков сильно изменяла схемы распада V -частиц. Поэтому ввиду сложности и запутанности процессов слабого взаимодействия V -частиц теория должна была пройти долгий путь, прежде чем смогла вполне разобраться в вопросе и признать правильность гипотезы о кварк-лептонной симметрии. От ее формулировки до экспериментального открытия c -кварка прошло около десяти лет.

Природа вновь пережитрила физиков

Поскольку после открытия очарованных частиц модель кварков приобрела теоретическую завершенность, могло показаться, что проблема строения вещества в принципе уже решена. Если бы это было верно, то число разновидностей фундаментальных частиц исчерпывалось бы четырьмя видами лептонов (ν_e , e), (ν_μ , μ) и двенадцатью ($12=4$ аромата $\times 3$ цвета) видами кварков (u_i , d_i), (c_i , s_i) (индекс i принимает три значения: «красный», «зеленый», «синий»).

Но природа вновь обманула наши ожидания: оказалось, что существуют новые виды частиц.

Началось с того, что группа Перла в Станфорде (SLAC) открыла новый, так называемый τ -лептон. Перл с сотрудниками изучали процессы электрон-позитронных столкновений на той же, что и Рихтер, установке SPEAR; среди продуктов реакции они обнаружили похожую на мюон частицу с большей, чем у мюона, массой, равной 1,8 ГэВ. Схемы ее распада хорошо соответствовали схеме распада мюона:

$$\tau \rightarrow \begin{cases} \tau + \mu + \nu_\mu, \\ \nu_\tau + e + \nu_e. \end{cases}$$

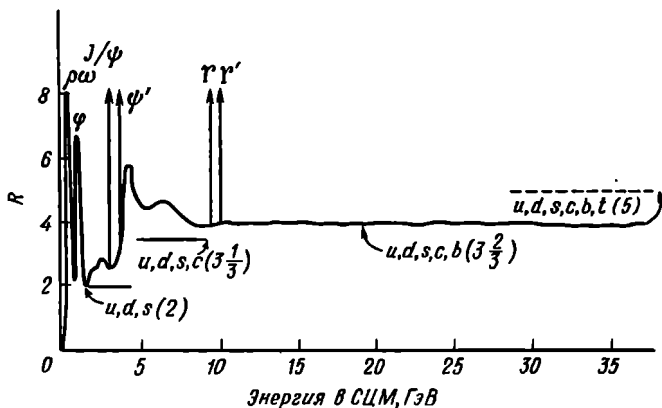


Рис. 12.2. Энергетическая зависимость величины R . Видны острые резонансы вблизи значений 3 и 9 ГэВ, соответствующие частицам ψ и Υ . В скобках после символов кварков указаны соответствующие теоретические значения R . Пунктиром отмечено гипотетическое значение $R=5$ для модели шести кварков.

Свойства нового вида нейтрино ν_τ , в деталях еще не изучены, но в существовании пары (ν_τ , τ) нет сомнений.

Увеличение числа лептонов до шести означало, что кварки должны иметь шесть ароматов. Подтверждением такой гипотезы, по-видимому, явилось открытие группой Ледермана в 1977 г. нового, более тяжелого, чем J/ψ , мезона, получившего название ипсилон-частицы (Υ). Так же, как в опыте Тинга, Ледерман изучал протон-протонные столкновения; в качестве источника протонов использовался протонный ускоритель на 400 ГэВ Национального центра ускорителей им. Ферми (FERMILAB, США). Затем в Гамбурге (ФРГ) и Корнеллском университете (США) при изучении электрон-позитронных столкновений было подтверждено существование Υ -частицы и обнаружены ее возбужденные состояния Υ' , Υ'' и т. д.

Поскольку частицы семейства Υ имеют массы около 10 ГэВ, масса входящих в их состав кварков должна быть порядка 5 ГэВ. По аналогии с уже известными парами кварков разумно предположить, что в состав Υ -частиц входит кварк b из новой пары (t , b); b -кварк должен иметь электрический заряд ($-1/3$) и быть легче кварка t . Символы t , b обычно связывают с английскими словами *top* (вершина) и *bottom* (дно), но возможна и более изящная расшифровка: *truth* (истина) и *beauty* (красота).

Кварк t пока еще не обнаружен. Исходя из того что масса

ϕ^0 -мезона (структура $s\bar{s}$) равна 1 ГэВ, J/ψ -частицы ($c\bar{c}$) — 3 ГэВ, ипсилон-частицы ($b\bar{b}$) — 9 ГэВ, некоторые предсказывали, что масса частицы со структурой $t\bar{t}$ будет равна 27 ГэВ. На новом электрон-позитронном ускорителе PETRA, построенном в Гамбургском центре ядерных исследований DESY (ФРГ), был обследован энергетический интервал до энергий более 30 ГэВ, однако ничего похожего на ожидаемый резонанс обнаружено не было, к великому огорчению немецких ученых, мечтавших обогнать своих американских коллег.

В предыдущей главе указывалось, что полное сечение превращений электрон-позитронных пар в адроны является чутким барометром для числа ароматов кварков. Напомним, что при заданной энергии полное сечение указанных процессов пропорционально сумме квадратов электрических зарядов кварков, которые могут рождаться при этой энергии; соответствующую сумму квадратов обозначают символом R (см. стр. 119). Вычисляя значения R при энергии, меньшей 3 ГэВ (возможны только кварки u, d, s), в интервале от 3 ГэВ до 9 ГэВ (кварки u, d, s, c) и выше 9 ГэВ (u, d, s, c, b), найдем

$$\left\{ \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 \right\} \times 3 = 2,$$

$$\left\{ \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 \right\} \times 3 = 3\frac{1}{3},$$

$$\left\{ \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 \right\} \times 3 = 3\frac{2}{3}.$$

Соответствующая экспериментальная кривая представлена на рис. 12.2. Видно, что всюду, за исключением области от 3 до 9 ГэВ, где имеются резкие резонансы семейств ψ и Y , вычисленные выше теоретические значения в общем неплохо согласуются с экспериментальными.

Лептоны шести видов и кварки по крайней мере пяти ароматов

Подытожим, что мы узнали в данной главе. Со времени 1960-х гг., когда была предложена модель кварков, число разновидностей лептонов и кварков все время увеличивалось, и в настоящее время известны лептоны шести видов и кварки пяти ароматов. Но нет убедительных теоретических предсказаний того, сколько же всего должно быть фундаментальных частиц и как распределены их массы. Поэтому можно сказать, что сейчас виден лишь один путь решения этих вопросов: строить новые ускорители и искать новые частицы.

И все же было бы абсолютно неверно утверждать, что теория здесь совершенно бессильна. Существование очарованного кварка было предсказано задолго до экспериментального

обнаружения J/ψ -частицы. Цветовые степени свободы кварков введены из теоретических соображений, да и о самом существовании кварков вряд ли можно было бы догадаться, не будь теории. Таким образом, постройку физиками все более мощных ускорителей нельзя считать просто данью безответственному, праздному любопытству типа «а вдруг что-нибудь удастся открыть?»

Параллельно с открытием новых частиц с 1960-х гг. до нашего времени происходило бурное развитие теории, были выдвинуты многие важнейшие идеи, правильность которых подтверждена экспериментально. Хотя возможность единого описания разных элементарных частиц и силовых полей еще не доказана полностью, но уже можно утверждать, что это не пустая мечта. Из такого рода теорий следует, что пока еще обнаружены не все частицы и поля.



КВАРКИ НА СТРУНАХ

Об одном парадоксе

Вернемся немного назад. Мы видели, что модель кварков не только хорошо объяснила SU_3 -симметрию адронов, но и добилась известного успеха в классификации их спиновых состояний при помощи SU_6 -теории, согласно которой адроны ведут себя так, как будто бы кварки в них слабо связаны. С другой стороны, известно, что выбить кварки из адронов никак не удастся. Получается, что мы явно встречаемся здесь с каким-то парадоксом.

Адроны имеют многие важные свойства, о которых в данной книге еще не упоминалось; разумеется, модель кварков должна объяснить также и их. Но с этой целью в модель неизбежно придется ввести какие-то новые элементы, или постулаты. В данной главе мы ознакомимся с указанными эмпирическими фактами и их теоретическим объяснением.

При адрон-адронных столкновениях кроме упругого рассеяния возможно также рождение сразу нескольких адронов в одном акте соударения. При увеличении энергии сечение таких процессов обнаруживает резкие колебания, указывающие на существование резонансов, или возбужденных состояний. Изучение энергетических распределений продуктов множественного рождения показывает, что среди них встречаются сильно возбужденные адроны, распадающиеся сразу на несколько адронов.

Возникают два вопроса. Во-первых, сколько может быть возбужденных состояний? Иными словами, должны ли при постепенном увеличении энергии без конца появляться все

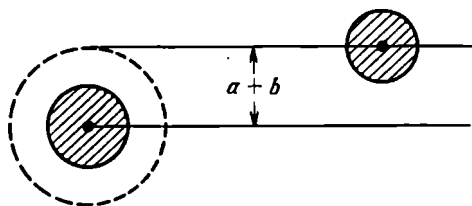


Рис. 13.1. Столкновение шаров с радиусами a и b .

новые и новые резонансы? Во-вторых, как изменяется сечение процесса при увеличении энергии? И каковы число рождающихся частиц и их энергетические распределения?

Попробуем сначала понять характер ответа на эти вопросы, рассматривая графики экспериментальных зависимостей. Например, на рис. 7.7 (стр. 79) показана энергетическая зависимость полного сечения π^+ р-рассеяния

$$\pi^+ + p \rightarrow x$$

(под x здесь понимаются все возможные процессы). Из графиков рис. 7.7 ясно, что

- 1) хотя сечение и имеет несколько резонансных пиков, в области высоких энергий резонансы постепенно исчезают;
- 2) сечение имеет общую тенденцию к уменьшению с ростом энергии и в области высоких энергий приближается к определенному предельному значению.

Прокомментируем сначала второе наблюдение. Стремление сечения к постоянному предельному значению разумно интерпретировать как свидетельство конечности размера адрона. В самом деле, два шара с радиусами a и b столкнутся лишь в том случае, если расстояние между их центрами не превысит сумму радиусов $a + b$ (см. рис. 13.1); отсюда для сечения σ получается оценка

$$\sigma = \pi(a + b)^2.$$

В силу волновой природы элементарных частиц сечение для них будет несколько больше, но ясно, что в пределе высоких энергий (малых длин волн) в общем справедлива приведенная классическая оценка. Следовательно, исходя из экспериментального значения σ , можно оценить радиус адронов, который оказывается порядка 1 Ф (10^{-13} см); впрочем, читателю все это, видимо, и так известно.

Однако из того обстоятельства, что при высоких энергиях кривая σ становится все более плавной, не обязательно следует вывод об отсутствии в этой энергетической области резонансов. В самом деле, при высоких энергиях идет

огромное число различных реакций, и даже если в одной из них (в состоянии с определенным моментом количества движения) и существует резонанс, соответствующее сечение будет составлять лишь часть полного, и может оказаться, что эту часть не удастся различить на общем фоне; кроме того, возможно наложение нескольких широких резонансов, которые, усредняясь, дадут плавную кривую.

Подчиняются ли резонансы каким-либо закономерностям? Прежде всего нас интересуют такие характеристики резонансов, как масса (энергия) и спин. Спин, т. е. момент количества движения, определяется по характеру угловой зависимости рассеяния. Выше уже отмечалось, что, чем больше момент количества движения, тем более часты колебания в угловой зависимости сечения рассеяния.

Кривую зависимости спина от квадрата массы (энергии покоя) называют траекторией Редже. Термин этот применяется в теории, основы которой заложил итальянский физик Редже. Если построить траекторию Редже для случая $\pi^+ p$ -рассеяния (при значении изоспина, равно $3/2$), то получится замечательная прямая линия, показанная на рис. 13.2. При значении спина $j=3/2$ расположен уже известный нам 3-3-резонанс; при переходе к каждой следующей точке на кривой значение спина увеличивается на два: $j=7/2, 11/2, \dots$

В общем аналогичные результаты получаются и для других реакций, например $\pi^- + p$, $K^- + p$ и т. п. Все это — траектории Редже для барионных резонансных состояний, различающихся значениями внутренних квантовых чисел (странности, изоспина и т. д.). Для построения траекторий, отвечающих мезонным резонансным (возбужденным) состояниям, надо воспользоваться данными о процессах рассеяния типа $\pi + \pi$, но ввиду нестабильности пионов такие реакции практически не изучались. Если же построить траектории Редже, пользуясь данными о рождении и распаде состояний со спинами 0, 1, ... (например, в процессах $p + p \rightarrow p + \dots$ ($p \rightarrow \pi + \pi$)), то тоже получатся прямые линии.

Оказывается, что все траектории Редже, будучи прямолинейными, кроме того, еще и параллельны друг другу. Иными словами, наклон (отношение приращения спина к приращению квадрата массы) всех траекторий одинаков, различаются только отрезки, отсекаемые на оси ординат, — они зависят от внутренних квантовых чисел семейства частиц, попадающих на данную траекторию. Такая удивительная универсальность траекторий Редже, несомненно, должна иметь глубокую причину. Если прямые линии продолжаютя неограниченно, то должно существовать бесконечно много резонансных

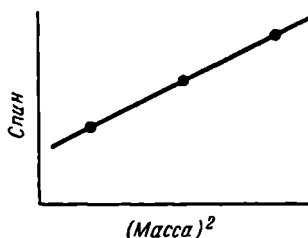


Рис. 13.2. Траектория Редже.

состояний с неограниченно большими значениями спина и энергии.

С точки зрения модели кварков существование неограниченного числа резонансов при высоких энергиях может иметь только один смысл: кварки не являются свободными. Но хотелось бы составить более конкретное представление о механизме их удержания в адронах.

Струнная модель адронов

Перейдем к теоретическому обоснованию свойств траекторий Редже. Не останавливаясь на описании действительного развития теории, сразу изложим результаты. В струнной модели адронов предполагается, что входящие в состав последних кварки связаны друг с другом струнами, по своим характеристикам напоминающими резиновые ленты. Расположение струн в мезонах и барионах показано на рис. 13.3; на

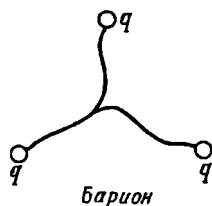


Рис. 13.3. Струнная модель.

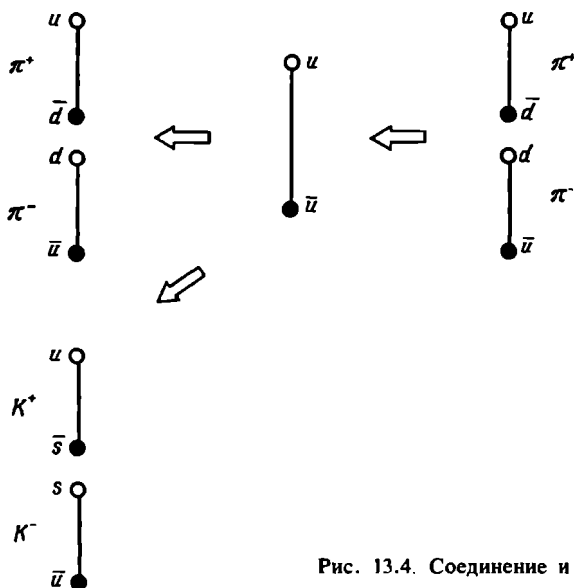


Рис. 13.4. Соединение и разрыв струн.

каждом конце струны обязательно закреплен кварк. От реальной резиновой ленты рассматриваемая здесь струна отличается тем, что по предположению при неограниченном растяжении струны ее натяжение остается постоянным. В этом смысле струна скорее напоминает паутинку с паучком на конце. Струну можно разорвать; в точке разрыва образуется пара—кварк и антикварк, которые занимают два вновь возникших конца струны.

Рассмотрим внутреннее движение в мезоне. Возможно, конечно, и очень медленное движение с постепенными растяжениями и сжатиями струны, но мы обсудим случай, когда струна вращается подобно жесткому стержню так, что сила натяжения уравновешена центробежной силой. При записи условия равновесия мы, пользуясь формулой $E=mc^2$, интерпретируем потенциальную энергию натяжения струны, запасенную в каждой ее точке, как плотность распределения массы и учтем ограничение на длину струны, вытекающее из условия, что ее концы движутся не быстрее скорости света. Тогда получится, что, чем медленнее вращается струна, тем она длиннее, а полная энергия струны E связана с моментом

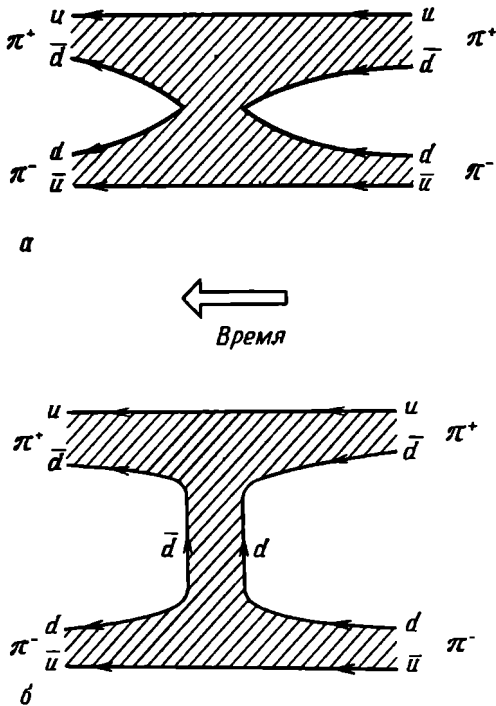


Рис. 13.5 Обмен мезоном $d\bar{d}$ между пионами π^+ и π^- .

количества движения l правильным соотношением

$$l \sim E^2,$$

которое одновременно объясняет универсальность траекторий Редже, так как коэффициент пропорциональности в написанной формуле определяется натяжением струны, одинаковым для всех частей.

Случай барионов не столь прост, как случай мезонов. Сразу возникает вопрос, почему струны надо связывать между собой именно так, как показано на рис. 13.3. В действительности этот способ связи вытекает из теории цветowych калибровочных полей, на чем мы здесь не останавливаемся.

Рассмотрим теперь процессы разрыва и соединения струн, играющие важную роль при интерпретации адронных процессов. Например, при столкновении $\pi^+ = u\bar{d}$ с $\pi^- = d\bar{u}$ происхо-

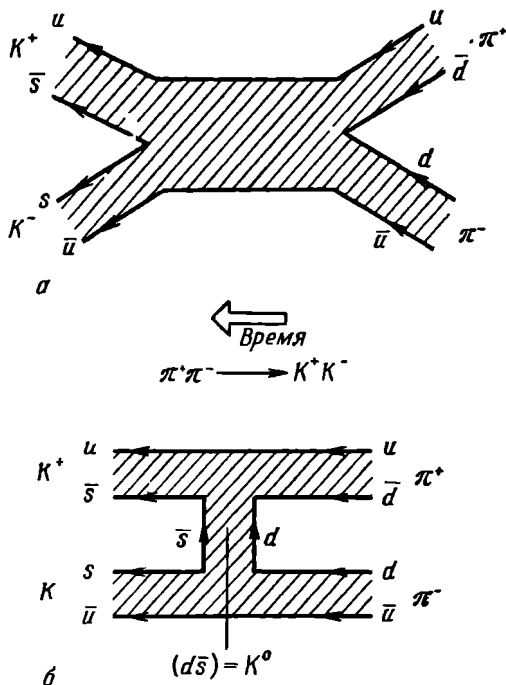


Рис. 13.6. Процесс обмена одним каоном между двумя мезонами.

дит аннигиляция либо пары $u\bar{u}$, либо пары $d\bar{d}$ и временно образуется единая струна, различными способами разрыва которой объясняются различные результаты пион-пионного рассеяния. В результате $\pi^+\pi^-$ -соударения кроме π^+ , π^- могут образоваться также $K^+ = u\bar{s}$ и $K^- = s\bar{u}$ или $K^0 = d\bar{s}$ и $\bar{K}^0 = s\bar{d}$.

На рис. 13.5, а показана временная развертка движения двух струн. Каждая из них «заметает» в направлении течения времени полосу, края которой показывают движение кварков. В середине диаграммы полосы временно срастаются, образуя, подобно сямским близнецам, единое целое.

Постепенно деформируя рисунок, придем к диаграмме, показанной на рис. 13.6, б. Последнюю можно интерпретировать как диаграмму процесса, в котором два пиона обмениваются одним каоном (описание в духе теории Юкавы). Произ-

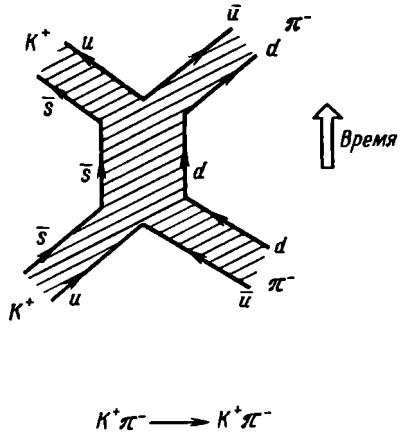
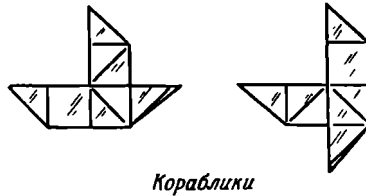


Рис. 13.7. Иллюстрация понятия о дуальности процессов рассеяния адронов при помощи бумажных корабликов.



водя дальнейшую деформацию и поворот на 90° , приходим к диаграмме $K^+ \pi^-$ -рассеяния (см. рис. 13.7, на котором повернута стрелка времени и расположенные по диагонали частицы заменены античастицами).

В детстве я очень любил играть в бумажные кораблики, которые строятся перегибанием и складыванием листа бумаги; думаю, не один я увлекался этим. Все, наверное, знают, что при игре иногда кораблик, идущий под полными парусами, вдруг неожиданно становится на нос. Так называемые взаимно дуальные диаграммы процессов рассеяния похожи на такие кораблики.

Попробуемся интерпретировать в терминах струнной модели адронов результат электрон-позитронного столкновения.

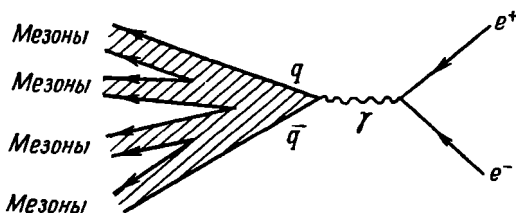


Рис. 13.8. Диаграмма для процесса столкновения электрона с позитроном.

Рождаемые в процессе $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q\bar{q}$ пары кварк—антикварк при высокой энергии разлетаются в противоположные стороны. Между q и \bar{q} натянута струна, которая некоторое время остается целой, а затем, по-видимому, разрывается сразу на несколько кусков, которые на опыте регистрируются как мезоны. Попробуйте вытянуть узкую длинную полоску из жевательной резинки, а потом резко и сильно дерните ее. Получить сразу три обрывка довольно трудно, но в случае адронов число обрывков, т. е. показатель множественности генерации частиц, неуклонно возрастает с увеличением энергии.

О природе струны

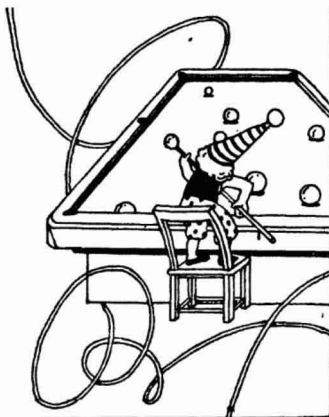
Что такое струна? Ниже мы увидим, что, по современным представлениям, струна есть нечто, напоминающее изолированную силовую линию электрического поля, но для объяснения удобнее воспользоваться магнитными силовыми линиями. Струна подобна постоянному магниту, а кварки—его полюсам. Известно, что при разламывании магнитного стержня получаются два магнита, каждый из которых вновь имеет пару полюсов; отломить один полюс—северный или южный—совершенно невозможно. Поэтому-то и не существует в природе изолированных кварков.

Для придания смысла высказанной аналогии надо считать, что струна не является математической линией, а имеет некоторую толщину. При этом естественно думать, что у коротких струн, т. е. в состояниях с низкой энергией, длина и толщина примерно одинаковы, и нет нужды разделять эти понятия. Соответствующую модель, предложенную Джонсоном и др., называют «моделью мешка». По этой модели адрон



Кварки в мешке.

подобен резиновому воздушному шару, в котором заперты кварки. Если такой шар привести в быстрое вращение, то под действием центробежной силы он вытянется и станет похож на дирижабль. Читатель, конечно, догадался, что дирижабль этот и есть струна.



О ПАРТОНАХ

Рыхлые адроны

Природа адронов сложна. Некоторые их свойства невозможно объяснить в рамках модели струны, они находятся с ней в вопиющем противоречии. Одно из таких свойств, свидетельствующее, так сказать, о «ненормальности характера» адронов, мы обсудим в этой главе.

В предыдущей главе отмечалось, что в области высоких энергий сечение адрон-адронного рассеяния не обнаруживает резонансов и плавно приближается к постоянному предельному значению. Это довольно скучная область, в которой не происходит никаких изменений, и чем больше накапливается экспериментальных данных, тем яснее становится, что адроны при высоких энергиях представляют неинтересный объект.

Основной процесс при высоких энергиях — множественная генерация адронов. Например, в ускорителях ЦЕРНа (Швейцария) и Национального центра им. Ферми (США) при каждом протон-протонном столкновении рождается около десятка адронов, в основном — пионов. Статистическая обработка результатов множественной генерации позволяет сравнительно легко определить по экспериментальным данным энергетические распределения вторичных частиц.

Процесс множественной генерации происходит следующим образом. При столкновении летящих навстречу друг другу протонов возникает много осколков (адронов), которые, почти не разлетаясь в стороны, образуют узкие струи, направленные вперед и назад вдоль линии относительного

движения сталкивающихся частиц; угловые размеры струй обратно пропорциональны энергии соударения. Такой характер рассеяния свидетельствует о необычайной рыхлости адронов.

В самом деле, вспомним, как рассуждал Резерфорд, когда предлагал свою модель структуры атома. Он убедился, что при бомбардировке атома альфа-частицами велика вероятность рассеяния последних на большие углы, и сделал отсюда вывод о наличии в центре атома маленького массивного ядра. В нашем случае ситуация обратная: отсутствие рассеяния на большие углы говорит о том, что внутри адронов нет твердой сердцевины: сталкивающиеся частицы как бы проскакивают друг сквозь друга по инерции, почти не изменяя состояние своего движения.

Что же происходит с кварками внутри адронов? Действительно ли отсутствует резерфордовское рассеяние кварков друг на друге? Понятно, что результат рассеяния в струнной модели может сильно отличаться от рассчитанного Резерфордом, но, во всяком случае, ясно, что возникновение струй можно объяснить, только допустив разрыв струн на множество кусков.

Данные, позволившие разобраться в проблеме, были получены в 1967—1968 гг. в Станфорде (SLAC, США). В этих опытах изучали не адрон-адронное рассеяние, а процесс столкновения с протонами электронов, разогнанных в линейном ускорителе до энергии 20 ГэВ. Такой процесс более, чем протон-протонное рассеяние, соответствует резерфордовской постановке опыта: Резерфорд бомбардировал точечными альфа-частицами протяженные атомы, а здесь точечными электронами бомбардируются протяженные протоны (конечно, масштабы «протяженностей» у Резерфорда и в опытах станфордской группы совершенно разные, но дела это не меняет). Использование электронов удобно еще тем, что они не участвуют в сильном взаимодействии. Тем самым ввиду хорошей изученности электромагнитных свойств частиц сильно облегчается теоретический анализ результатов опыта.

Ранее в Станфордском университете аналогичные опыты ставил Хофштадтер, который за изучение распределения электрического заряда внутри ядер получил в свое время Нобелевскую премию. Но в опытах Хофштадтера исследовалось упругое рассеяние (при котором не затрагивается внутренняя структура сталкивающихся частиц, а изменяется только направление их движения), а теперь речь идет о неупругих процессах, при которых протон испускает много адронов. Измерялись угловые и энергетические распределе-

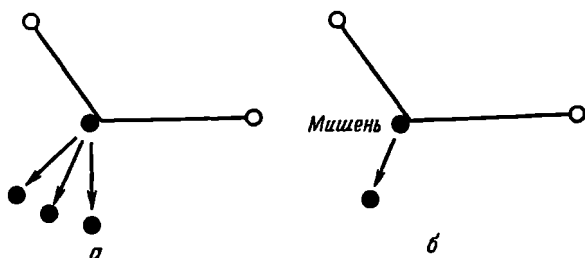


Рис. 14.1. Неупругое (а) и упругое (б) рассеяние.

ния рассеянных электронов, а судьба протонов не регистрировалась. Дело в том, что в упругом случае энергия рассеянного электрона однозначно связана с углом рассеяния, а поскольку на превращение протона в адроны надо затратить энергию, неупруго рассеянные на данный угол электроны будут иметь энергию, меньшую энергии упруго рассеянных электронов. Следовательно, угловые и энергетические распределения рассеянных электронов содержат информацию о распределении затрат энергии на превращение протонов в адроны.

О не имеющих размера точечных частицах

Результаты опытов станфордской группы выразились в виде простого правила масштабной инвариантности (скейлинг). Коротко говоря, оно заключается в том, что если измерить энергетические и угловые распределения рассеянных электронов при некоторой энергии соударения, то результат соответствующих измерений при другой энергии можно рассчитать, пользуясь экспериментальными данными, полученными при первом значении энергии соударения. Иными словами, изменяя соответствующим образом масштаб на шкале энергий, можно уложить на одну кривую все экспериментальные данные. Кривая эта показана на рис. 14.2. Отложенная там по оси абсцисс степень неупругости x равна единице при упругом рассеянии и нулю в случае полностью неупругого рассеяния (когда электрон поглощается протоном).

Указанное правило называют правилом масштабной инвариантности Бьёркена по имени ученого, предсказавшего его теоретически еще до постановки станфордских опытов. Смысл этого правила по существу состоит в том, что внутри адронов нет никакого масштаба расстояний. Поясним сказан-



Рис. 14.2. Правило масштабной инвариантности Бьёркена (скейлинг).

ное на примере атома. Известно, что в атоме помимо его собственного общего размера есть еще второй масштаб расстояний — размер атомного ядра. Поскольку в квантовой механике масштабы на шкале расстояний обратно пропорциональны масштабам на шкале энергий, существование в атоме двух масштабов означает, что происходящие с ним процессы кардинальным образом различаются при низких и высоких энергиях. Напротив, в случае, когда имеется всего один масштаб, при увеличении энергии не может произойти качественного изменения характера процессов. Иначе говоря, второй масштаб энергии в данном случае равен бесконечности. Это значит, что если внутри адрона и есть составляющие его частицы, то их размер бесконечно мал, т. е. они являются точечными¹.

Фейнмановская модель партонов

Конкретную модель внутреннего строения адронов предложил Фейнман — широко известный автор так называемых «фейнмановских диаграмм». По гипотезе Фейнмана, адроны состоят из большого числа частиц, названных им партонами (от англ. *part* — «корпускулы-части»).

Процесс столкновения электрона с протоном описывается в партонной модели следующим образом. Принимается, что протон — газообразное тело, состоящее из партонного газа, а налетающий на протон электрон рассеивается на отдельных частичках этого газа — партонах. Конкретные партоны не имеют определенной массы: считается, что во всех адронах, от самых тяжелых до самых легких, всевозможные виды партонов смешаны в одной и той же пропорции. Не определено также и число партонов — принимается только, что их суммарная энергия равна полной энергии протона. При

¹ «Точечноподобное» поведение протона предсказывалось М. А. Марковым в 1964 г. — *Прим. ред.*

столкновении электрона с протоном, т. е. в действительности при столкновении электрона с каким-то конкретным партоном, последний отскакивает, так что связь между углом рассеяния электрона и его энергией зависит от массы отскочившего партона (процесс рассеяния напоминает игру в бильярд с большим количеством шаров самой разнообразной массы). Поэтому показанная на рис. 14.2 кривая имеет смысл распределения энергий (масс) партонов. Поскольку большие x соответствуют столкновениям с тяжелыми, а малые x — с легкими партонами, из вида кривой ясно, что в составе протона легких партонов больше, чем тяжелых.

РИЧАРД ФЕЙНМАН родился в 1918 г. в Нью-Йорке. В 1942 г. получил ученую степень в Принстонском университете. Участник Манхаттенского проекта (разработки атомной бомбы). В физике проявил исключительную независимость, развивал новые, экстравагантные подходы, например, известно его обоснование квантовой механики при помощи интегралов по траекториям (функциональных интегралов), теперь, впрочем, считающееся ортодоксальным. Естественное следствие такого подхода — фейнмановская интерпретация античастиц как частиц, движущихся в обратном по времени направлении (из будущего в прошлое). Автор диаграммной техники (диаграммы Фейнмана), ставшей теперь стандартным методом вычислений в теоретической физике. В 1965 г. вместе с Томонагой и Швингером удостоен Нобелевской премии. Среди других его достижений упомянем здесь разработанную совместно с Гелл-Манном $V-A$ -теорию (1957 г.) и партонную модель (1969 г.).

Фейнман — единственный в своем роде «свободный художник» теоретической физики, олицетворение живости и остроумия. Его публичные выступления — всегда события, он — «звезда», сразу покоряющая и научную, и любую другую аудиторию. Известны и чрезвычайно популярны написанные им учебники по разным разделам физики для студентов университетов.

Сила этой совершенно необычной партонной модели заключается не только в том, что с ее помощью удается объяснить правило масштабной инвариантности, она полезна еще тем, что позволяет свести все многообразие экспериментальных данных к распределению вероятности партонов.

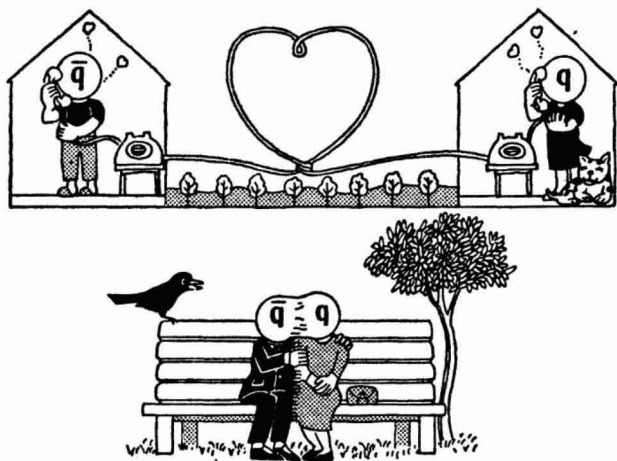
Определив последнее однажды, его можно применять не только при изучении рассеяния электронов на протонах, но и, например, для обработки данных протон-протонного рассеяния. В случае рассеяния протонов на протонах речь идет, конечно, о партон-партонном рассеянии, и здесь тоже имеет место свое правило масштабной инвариантности. Но в данном случае кроме электромагнитного надо учитывать также и сильное взаимодействие; кроме того, измеряется энергетическое распределение не партонов, а вылетевших адронов. Также же, как и при рассеянии электронов на протонах, при протон-протонном рассеянии велик выход низкоэнергичных рассеянных частиц (в данном случае — адронов), образующихся за счет столкновений с легкими партонами.

Сравнение с моделью кварков

Между партонной моделью и обсуждавшимися выше моделями адронов есть некоторое сходство, но с первого взгляда ясно также, что по отдельным пунктам они несовместимы друг с другом. Казалось бы, естественно сопоставить партоны с кварками, но ведь число партонов не определено. Нельзя сказать, что протон — система трех партонов: в его состав входят также маленькие легкие партоны. Кроме того, по предположению, партоны не взаимодействуют друг с другом, а кварки должны быть связаны между собой при помощи струн.

С моделью кварков не согласуется также вытекающий из данных по рассеянию электронов на протонах вывод о том, что среди партонов встречаются нейтральные частицы, не имеющие электрического заряда. Нейтральные партоны не взаимодействуют с электронами, но в них заключена часть полной энергии протона; поэтому при учете только рассеянных электронов не удастся подвести баланс энергии. Непротиворечивое истолкование экспериментальных данных возможно лишь при допущении, что в нейтральных партонах заключено в среднем около половины полной энергии протона.

Отмеченные противоречия двух моделей отражают сложность природы адрона; по-видимому, разумно считать, что каждая из моделей верно схватывает только некоторые ее черты. В этой связи актуально звучит замечание Сакаги, который постоянно подчеркивал, что модель — это еще не окончательная теория. Со временем модели должны уступить место более фундаментальному теоретическому рассмотрению.



На большом расстоянии—струна, на малом—глюоны.

К счастью, уже сейчас такая более фундаментальная теория создана в форме квантовой теории цветowych калибровочных полей—квантовой хромодинамики (КХД). Ее мы рассмотрим в следующих главах, а здесь я хочу в нескольких словах пояснить, как в КХД разрешается противоречие между партонной моделью и моделью кварков.

Нейтральные партоны—это кванты цветового калибровочного поля (глюоны). Сила взаимодействия между кварками, обусловленная этим полем, в отличие от силы электромагнитного происхождения велика на больших и мала на малых расстояниях. Струнной моделью описывается взаимодействие удаленных друг от друга кварков, а партонной—поведение близких кварков. Неопределенность числа партонов объясняется тем, что глюоны непрерывно рожают пары кварков и антикварков, а те, аннигилируя, рожают глюоны, и т. д.



ТЕОРИЯ ПЕРЕНОРМИРОВОК

Физика элементарных частиц целиком поглощена погоней за новыми эффектами

Боюсь, что у читателя, осилившего мою книгу до этого места, сложилось впечатление, будто физика элементарных частиц — не более чем коллекция моделей, хотя и могущих качественно объяснить самые разношерстные данные, но непригодных для точного количественного описания явлений, и будто бы в этой науке отсутствует фундаментальная теория, способная систематически вывести наблюдаемые факты из немногих принципов.

Трудно возражать против такой критики. Действительно, по сравнению, например, с ньютоновой механикой, точно предсказывающей момент и место наступления солнечных затмений, или по сравнению с общей теорией относительности, дающей, например, значение смещения перигелия Меркурия ($40''$ за 100 лет)¹⁾, которое подтверждается самыми тщательными измерениями, физика элементарных частиц часто очень приблизительно описывает реальность и даже, может быть, пока не заслуживает названия точной науки. Однако такое положение, скорее всего, отражает существо дела, поскольку ясно, что первоочередная задача изучения

¹⁾ Данная величина [ее более точное значение $43''$ (угловых секунды) за столетие] является поправкой, которую дает общая теория относительности к значению смещения перигелия Меркурия за счет возмущений со стороны других планет ($5600''$ за столетие), вытекающей из ньютоновой теории тяготения. — *Прим. ред.*

мира элементарных частиц — по возможности более полный охват новых эффектов и хотя бы качественное понимание их природы.

СИНЬИТИРО ТОМОНАГА (1906—1979) родился в Токио в семье философа С. Томонаги. Вырос и учился в Киото. Почти ровесник Юкавы, воспитывавшийся в том же окружении, Томонага, как и Юкава, занялся разработкой теории элементарных частиц; всю жизнь они были соперниками на этом поприще. В отличие от Юкавы Томонага продолжил образование за границей (учился в Германии у Гейзенберга). Вернувшись в Японию, работал в лаборатории Нишины, входившей в состав Токийского физико-химического института.

Начиная с 1943 г. занимался развитием сверхмноговременного формализма; эта работа в 1947 г. увенчалась созданием теории перенормировок, нашедшей практическое применение при вычислении, например, величины лэмбовского сдвига и т. п. В 1965 г. совместно с Швингером и Фейнманом удостоен Нобелевской премии. В сотрудничестве с Нишиной занимался физикой космических лучей. Во время войны участвовал в исследовательских программах по разработке теории магнетронов и волноводов. Был хорошим руководителем для студентов; вырастил много способных учеников-физиков.

Квантовая электродинамика

Тем не менее и в физике элементарных частиц есть раздел, в котором мы достигли исключительно высокого уровня точности наших знаний. Это квантовая электродинамика (КЭД) — наука об электромагнитных свойствах элементарных частиц. В частности, с очень большой точностью изучены, как теоретически, так и экспериментально, электромагнитные свойства лептонов — электронов и мюонов, и нельзя пожаловаться на недостаточно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных значений.

Типичный пример таких результатов — данные о магнитном моменте электрона. Из уравнения Дирака следует, что магнитный момент электрона равен магнетону Бора, а в

квантовой электродинамике этот простой результат немного исправляется¹⁾

экспериментальное значение 1,001159652200,

теоретическое значение 1,001159652415.

Чтобы достичь такой высокой точности, требуются, с одной стороны, высокое экспериментальное искусство, а с другой — очень сложные и трудоемкие расчеты при помощи КЭД. В частности, известный авторитет в этой области Т. Киношита (Корнеллский университет, США) говорил, что для повышения точности расчетов ему приходилось заставлять работать большую ЭВМ в течение сотен часов.

Такие огромные усилия людям не жаль прилагать потому, что КЭД — очень надежная, всесторонне проверенная теория. Можно сказать и наоборот: если бы в ней удалось обнаружить какие-либо существенные дефекты, то это само по себе явилось бы выдающимся открытием (небольшое расхождение приведенных выше численных значений не рассматривается как существенный недостаток теории). КЭД²⁾ разработана еще в 1940-х гг. Томонагой, Швингером, Фейнманом, Дайсоном и др., но и в настоящее время считается образцом для теоретиков, занимающихся физикой элементарных частиц.

Бесконечность собственной энергии

Сущность КЭД — идея перенормировки. Перенормировку можно сравнить с увеличением банковского вклада за счет начисления процентов.

Разумеется, взаимодействие между электронами и электромагнитным полем рассматривается в КЭД квантовомеханически, исходя из уравнения Дирака для электронов и уравне-

¹⁾ Указанные ниже величины являются отношениями значений магнитного момента электрона, измеренного экспериментально и вычисленного теоретически, к магнетону Бора $e\hbar/2mc$, где e — заряд электрона, m — масса электрона, \hbar — постоянная Планка, c — скорость света. — *Прим. ред.*

²⁾ КЭД и разработанная в ее рамках теория перенормировок являются версией более общей концепции — квантовой теории поля (КТП), которая представляет собой основу описания взаимодействий элементарных частиц. Ее можно рассматривать как синтез квантовой механики и теории относительности. Описанные в последующих главах теории также разработаны на основе общих принципов КТП. Наряду с физиками, имена которых Ё. Намбу называет в настоящей главе, крупный вклад в развитие КТП и, в частности, теории перенормировок внесли ученые из разных стран, в том числе Г. Бете, П. А. М. Дирак, В. Паули, Н. Н. Боголюбов, В. Гейзенберг, Е. Вигнер. — *Прим. ред.*

ний Максвелла для электромагнитного поля. Одно из проявлений квантовомеханического характера взаимодействия — постоянное испускание и поглощение электронами виртуальных фотонов и временное превращение фотонов в виртуальные электрон-позитронные пары, которые, аннигилируя, вновь рождают фотоны. В результате обмена фотонами между двумя разными электронами возникает сила взаимодействия электромагнитного происхождения, но возможно также испускание и обратное поглощение виртуального фотона одним и тем же электроном. Последний процесс описывает действие электрического заряда электрона самого на себя, в результате чего у электрона появляется разновидность потенциальной энергии, называемая «собственной энергией»; она дает вклад в энергию покоя электрона. В итоге полная масса электрона должна вычисляться как сумма его первоначальной механической массы и «собственной» электромагнитной массы.

Соответствующая проблема появляется уже в классической электродинамике; ее подробно рассмотрел Лоренц в своей электронной теории. Представим себе, что металлический шарик радиусом r несет заряд e ; ясно, что в результате кулоновского взаимодействия элементов шарика друг с другом у шарика появится собственная энергия порядка e^2/r , неограниченно возрастающая при уменьшении r . Когда r достигает значения $r_0 \approx 1\Phi$ (10^{-15} м), собственная энергия электрона сравнивается с его энергией покоя. Поэтому Лоренц предположил, что электрон имеет размер r_0 и что вся его масса — электромагнитного происхождения.

В таком случае, однако, электрон, не будучи точечной частицей, имеет внутреннюю структуру. Если же электрон — настоящая элементарная частица, то он должен быть точечным, но тогда невозможно избежать появления бесконечной собственной энергии.

В 1930-х гг. Вайскопф обнаружил, что в квантовой теории поля положение с расходимостью собственной энергии электрона несколько иное, чем в классической электродинамике. Поскольку электромагнитное поле вокруг точечного электрона рождает виртуальные электрон-позитронные пары, эффективно оказывается, что заряд электрона как бы размазывается по области конечных размеров (рис. 15.1). Характер этого размазывания таков, что собственная энергия электрона хотя и не делается конечной, но уменьшается: она обращается в бесконечность по логарифмическому закону, т. е. очень медленно.

При логарифмическом законе расходимости оценка в духе

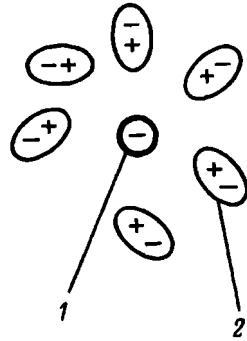


Рис. 15.1. Виртуальные электрон-позитронные пары в окрестности точечного электрона: 1—голый электрон; 2—электрон-позитронная пара.

Лоренца дает для размера электрона величину не 10^{-13} , а 10^{-30} см. Поскольку такие малые области пространства для современной физики элементарных частиц недостижимы, в свое время распространилось мнение, что о проблеме можно забыть. Но ее нельзя было сбрасывать со счета как принципиальный вопрос теории. Кроме того, в формулах для сечений различных процессов рассеяния электронов оставались расходящиеся члены. Таким образом, квантовая электродинамика давала для физических величин бессмысленные выражения.

Теория перенормировок как воплощение идеи примирения с действительностью

Преодоление указанной трудности и спасение КЭД— заслуга теории, созданной Томонагой, Швингером, Фейнманом и Дайсоном. Ее дух Томонага как-то кратко выразил словами: «Принцип недеяния». Суть его слов в том, что надо признать совершенство теории, отказаться от притязаний на вычисление любого из содержащихся в ней выражений и отделить осуществимое от неосуществимого. В определенном смысле такая позиция напоминает восточную философию примирения с действительностью.

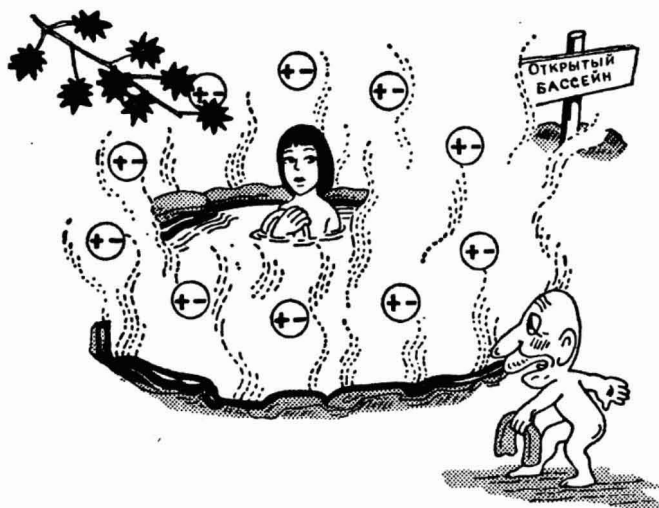
ЮЛИАН ШВИНГЕР родился в 1918 г. в Нью-Йорке. В детстве считался вундеркиндом; его «открыл» профессор Колумбийского университета Раби. В 17 лет написал первую научную статью, в 21 год получил степень доктора. К 1947 г. независимо развил квантовую электродинамику, успешно объяснил

величины лэмбовского сдвига и аномального магнитного момента электрона и т. п. Благодаря этим работам в 29 лет стал профессором Гарвардского университета, а впоследствии совместно с Томонагой и Фейнманом был удостоен Нобелевской премии. Во время войны, как и Томонага, занимался теорией волноводов. За многие годы работы подготовил большое число учеников и сотрудников. В молодые годы Швингер работал столь интенсивно, что ему даже некогда было проверять результаты своих работ; в его творчестве сильна тенденция к математической физике. В настоящее время — профессор Калифорнийского университета.

Успех подобного направления мысли в применении к физике объясняется тем, что Томонага и др. сумели строго математически отделить друг от друга входящие в теорию вычислимые и невычислимые величины. Невычислимых величин в данном случае оказалось две: масса электрона (включающая собственную энергию) и его электрический заряд. О массе мы уже говорили, сейчас рассмотрим заряд. Как показано на рис. 15.1, электрон-позитронные пары, индуцированные вокруг точечного электрона, поляризуются электрическим полем последнего, благодаря чему электроны пар отходят от рассматриваемого голого электрона, а позитроны приближаются к нему. В итоге точечный электрон скрывается в окружающем его облаке и его эффективный заряд уменьшается. Расчет величины уменьшения заряда приводит к не имеющему смысла бесконечно большому выражению.

Томонага и др. постулировали, что на опыте наблюдается полная масса и полный электрический заряд электрона, которые невозможно разделить на часть, соответствующую голому электрону, и часть, связанную с окружающим его облаком. Решение проблемы бесконечностей сводится к утверждению, что относящиеся к облаку бесконечные величины компенсируются соответствующими величинами, характеризующими ненаблюдаемую голую частицу, в результате чего остаются наблюдаемые значения массы и электрического заряда. Указанную компенсацию можно сравнить с банковской операцией, при которой на вложенный в банк бесконечно большой активный капитал начисляются бесконечно большие отрицательные проценты (дефицит, или долговые обязательства); в итоге остающаяся в банке сумма оказывается конечной.

По-видимому, нельзя полностью отвергнуть раздающиеся иногда упреки в том, что Томонага и др. применили «аллопа-



Голый заряд ненаблюдаем.

тический ¹⁾ метод лечения» КЭД. Но этот метод позволяет рассчитать любой электромагнитный процесс, причем в случае необходимости точность расчета может быть сколь угодно сильно повышена. Именно на этом пути удалось найти количественное объяснение величины магнитного момента электрона (см. стр. 150), лэмбовского сдвига уровней и др. эффектов.

Успеху рассматриваемого метода способствовало одно случайное обстоятельство — сравнительная малость величины электрического заряда e . Интенсивность электромагнитного взаимодействия определяется введенной Зоммерфельдом так называемой постоянной тонкой структуры $e^2/\hbar c = (1/137)$. Поскольку этой постоянной пропорциональна, например, амплитуда вероятности каждого акта испускания и обратного поглощения фотона, вероятность процесса с участием многих фотонов будет сильно уменьшена. Именно поэтому оказывается эффективной теория возмущений, использующая разложение в ряд по величине $1/137$ (в упомянутом выше расчете аномального магнитного момента электрона, выполненном

¹⁾ Аллопатия (от греч. *állos* — другой и *páthos* — страдание) — устаревшее направление в медицине, основанное на применении лекарств, вызывающих симптомы, противоположные симптомам данной болезни. — *Прим. ред.*

Киношитой, учтены члены, пропорциональные четвертой степени величины $1/137$).

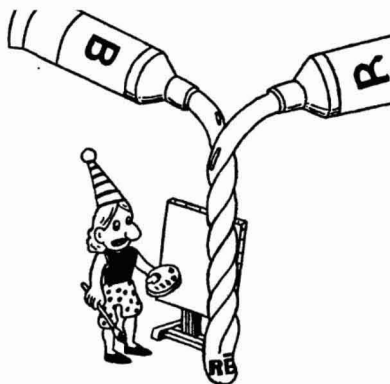
Мы уже знаем, что в природе кроме электромагнитного существуют также и другие типы взаимодействий. Поэтому естественно желание распространить и на них методы расчета, с помощью которых удалось добиться успеха в КЭД. Но такое легко сказать и очень трудно сделать.

Причина этого прежде всего в том, что природа как сильного, так и слабого взаимодействия до сих пор известна недостаточно. Оба этих взаимодействия в отличие от электромагнитного являются короткодействующими, и к ним, вообще говоря, неприменима процедура перенормировки. Кроме того, в отличие от КЭД в теории сильных взаимодействий вследствие большой величины константы связи неприменимы приближенные выражения теории возмущений.

Поэтому около двадцати лет теоретики вынуждены были искать истину ощупью, блуждая в темноте. И лишь в самое последнее время, присоединив к теории перенормировок некоторые новые элементы, они нашли, наконец, путь к решению.

В следующих главах мы рассмотрим сначала современное состояние теории сильных, а затем и слабых взаимодействий.

КХД — КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА



От мезонной теории к хромодинамике

Мезонная теория Юкавы была создана для объяснения ядерных сил. Ее основная идея — что ядерные силы возникают в результате обмена мезонами — признается и сейчас, но число мезонов очень увеличилось и совершенно исчезли надежды на количественное объяснение ядерных сил путем вывода их из одного фундаментального уравнения. Появление модели кварков позволило изменить точку зрения на проблему: теперь естественно рассматривать ядерные силы подобно силам химической природы, действующим между сложными молекулами. Известно, что хотя атомы и скрепляются кулоновским взаимодействием электронов и ядер, но между нейтральными атомами кулоновские силы не действуют: взаимодействие атомов и молекул объясняется поляризационными, обменными и т. п. силами сложной природы.

В гл. 2 уже говорилось, что адрон можно рассматривать как составленный из кварков нейтральный по отношению к цвету атом. В этой аналогии электрический заряд сопоставляется цвету, а кулоновское взаимодействие зарядов — взаимодействию между цветами кварков. Силы взаимодействия кварков фундаментальнее ядерных сил Юкавы, поэтому можно думать, что их механика проще. Но поскольку электрический заряд один, а цветов — три, для конкретного проведения рассматриваемой аналогии нужно обобщить понятие электрического заряда.

Обобщение максвелловской теории электромагнитного поля в настоящее время называют теорией «калибровочных

полей». Иногда говорят также о «полях Янга—Миллса» в честь авторов, впервые осуществивших указанное обобщение. Возможно еще большее расширение смысла понятия «калибровочное поле», когда в число таких полей включается эйнштейновское гравитационное поле и т. п. В чем же заключается своеобразие этого нового класса полей?

О калибровочных полях

Во-первых, калибровочные поля—дальнодействующие: соответствующая сила, подобно кулоновской или гравитационной, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Во-вторых, сила пропорциональна квантовому числу источника поля, и для этого квантового числа имеет место закон сохранения. В случае электромагнитного поля в роли такого квантового числа выступает электрический заряд.

В теории калибровочных полей указанные два свойства взаимосвязаны. Важно подчеркнуть также, что этих двух требований достаточно для вывода основных уравнений теории. В частности, сказанное означает, что из закона сохранения электрического заряда можно вывести только теорию Максвелла и никакую другую. Различают абелевы (подобные электромагнитному) и неабелевы калибровочные поля. Неабелевыми являются поля Янга—Миллса, но мы для простоты сначала остановимся на гравитационном поле. Абелево силовое поле как таковое не несет в себе заряда того источника, которым оно порождено (например, электромагнитное поле не имеет электрического заряда). А в эйнштейновской теории гравитации, основанной на требовании эквивалентности энергии и массы, энергия любого вида является источником гравитационного поля.

Гравитационное поле, создаваемое некоторым телом в его окрестности, пропорционально массе тела. Но поскольку гравитационное поле само по себе создает в каждой точке потенциальную энергию, каждую точку окружающего тело пространства можно считать источником гравитационного поля. Для самосогласованности такое рассуждение надо повторить неограниченное число раз; в результате получим уравнения теории гравитации Эйнштейна, которые, в противоположность линейным максвелловым уравнениям, нелинейны. Последнее означает, в частности, что гравитационное поле, создаваемое в некоторой точке двумя телами, не равно сумме гравитационных полей отдельных тел. В обычных задачах небесной механики указанная нелинейность не играет роли

из-за того, что потенциальная энергия гравитационного поля очень мала по сравнению с энергиями покоя небесных тел.

Хромодинамика

Перейдем к полям Янга—Миллса. Теорию полей Янга—Миллса, роль квантовых чисел в которой отводится цвету, называют хромодинамикой. По предположению существуют цвета трех видов—красный, зеленый, синий. Между окрашенными (цветными) кварками действуют значительные силы, а в состоянии, когда все три цвета насыщены, возникает окрашенная в белый цвет система—адрон, в которой указанные силы уравниваются. Таков замысел теории цветных кварков. Как провести его в жизнь?

Ничего не получится, если в качестве трех цветов выбрать просто три разных «электрических заряда» — a , b , c . Требованию «белый цвет равносильен электронейтральности»:

$$a + b + c = 0$$

удовлетворить, конечно, можно, но такой способ введения цвета плох тем, что все три величины a , b , c эквивалентны друг другу. Чтобы избежать отмеченной эквивалентности, можно попробовать прием, используемый в обычной теории цвета: рассмотреть плоскость, каждая точка которой сопоставляется некоторой смеси трех основных цветов, и в этой плоскости построить равносторонний треугольник, поместив в его вершины основные цвета. Такой прием, однако, неудовлетворителен с квантовомеханической точки зрения, ибо не обеспечивает симметрии, возникающей при смешивании трех цветных кварков, рассматриваемых как квантовые волны (цветовой SU_3 -симметрии). Последнее требование будет выполнено, если допустить возможность превращения, например, красного кварка в синий и т. п.

В итоге оказывается, что надо ввести калибровочные поля восьми видов. Каждое из них имеет составной цвет, а число восемь возникло по той же причине, по которой появился «восьмеричный путь» в SU_3 -теории аромата (кварков u , d , s). Мы обсудим этот вопрос еще раз.

Глюоны—клей, скрепляющий кварки

Поскольку цветное калибровочное поле обеспечивает неразъединимость кварков, его кванты были названы «глюонами» (от англ. *glue*—клей).

Рассмотрим испускание глюонов кварками. Пусть, напри-

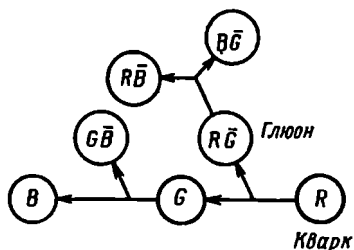


Рис. 16.1. Цвета кварков и глюоны.

мер, в результате одного из таких процессов красный кварк (R) превратился в синий (B). Поскольку при этом глюон отнимает у кварка красный цвет и сообщает ему синий, можно считать, что глюон уносит от кварка суперпозицию красного (R) и антисинего (\bar{B}) цветов, т. е. что этот глюон имеет составной цвет $R\bar{B}$. В общем случае глюон G_{ij} , испускаемый при переходе кварка q_i в кварк q_j , ведет себя как частица, имеющая составной цвет, образуемый суперпозицией цветов q_i и \bar{q}_j : $G_{ij} \sim q_i \bar{q}_j$

(рис. 16.1). Всего возможно $3 \times 3 = 9$ комбинаций цветов, но среди них есть одна, отвечающая состоянию с белым цветом:

$$G_W \sim q_R \bar{q}_R + q_G \bar{q}_G + q_B \bar{q}_B.$$

Если с самого начала предположить, что в состоянии с белым цветом «клей» не действует, то надо принять условие $G_W = 0$. Тогда останется восемь независимых видов глюонов.

Поскольку глюоны сами являются носителями цвета, то, как читатель, видимо, уже понял, глюоны могут испускать глюоны. Некоторые из таких процессов изображены на рис. 16.1. В этом отношении глюонное поле напоминает гравитационное и, значит, должно быть неабелевым. Неабелевость означает непрерывность, некоммутативность. Например, в результате испускания глюонов $G_{R\bar{B}}$, $G_{B\bar{R}}$ кварк q_R может, проходя через промежуточное состояние q_G , превратиться в q_B , но этот процесс невозможен, если те же глюоны испускаются в обратном порядке.

Элементарному электрическому заряду e (единичному источнику электромагнитного поля) в хромодинамике соответствует элементарная (единичная) интенсивность цвета кварков g , по предположению не зависящая от разновидности цвета. Подобно тому как при обмене фотоном между двумя электронами возникает напряженность электромагнитного поля, пропорциональная e^2 , напряженность глюонного поля, возникающего при обмене между двумя кварками одним

глюоном, пропорциональна g^2 . Надо иметь в виду, однако, что в зависимости от цвета глюонов у кварков есть разнообразные возможности для обмена. Если, кроме того, учесть, что глюоны могут испускать другие глюоны, то окажется, что между кварками возможен обмен двумя и более глюонами, а в напряженности глюонного поля появятся слагаемые, пропорциональные g^4 , g^6 ,

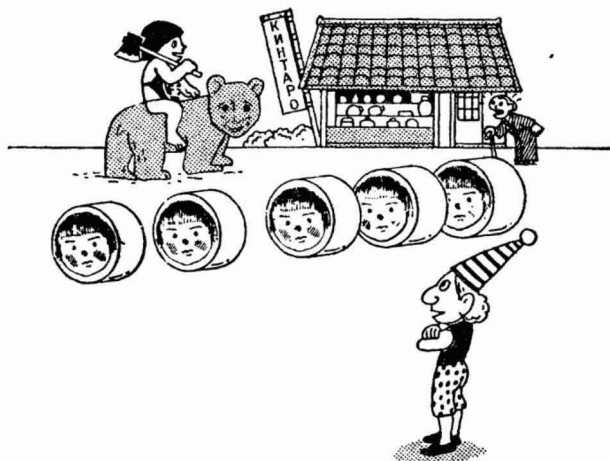
Поскольку в электромагнитном случае величина $e^2/\hbar c$ мала, в напряженности поля обычно ограничиваются учетом кулоновской силы, пропорциональной e^2 ; в хромодинамике ситуация не столь проста, так как в ней надо потребовать, чтобы константа связи глюонного поля g была очень велика. В общем, однако, оказывается, что состояние белого цвета устойчиво благодаря тому, что между кварками и антикварками, составляющими белую «молекулу», действуют силы притяжения.

Асимптотическая свобода

Квантовой хромодинамикой (КХД) называют квантовую теорию цветовых калибровочных полей. При ее формальном сопоставлении с квантовой электродинамикой (КЭД) электронам надо поставить в соответствие кварки, а фотонам— глюоны. Спрашивается, способна ли КХД удовлетворительно объяснить особенности сильных взаимодействий? Не получится ли, что, подобно излучению фотонов, адроны в КХД могут испускать наружу глюоны? Казалось бы, последний процесс должен отсутствовать по крайней мере в стабильных белых состояниях.

В 1973 г. в развитии теории произошло важное событие: обнаружено удивительное свойство КХД—так называемая асимптотическая свобода. Этот результат независимо друг от друга получили т'Хоофт (Нидерланды), Гросс и Вильчек (США), Политцер (США); в то время все эти энергичные молодые люди были либо студентами, либо начинающими научными сотрудниками.

Наличие асимптотической свободы—важная отличительная особенность квантовой теории неабелевых калибровочных полей (полей Янга—Миллса). Выше, в гл. 15, мы видели, что в квантовой электродинамике вокруг голого заряда образуется экранирующее его облако электрон-позитронных пар, в результате чего оказывается, что голый заряд больше наблюдаемого. Для неабелевых полей соотношение между голым и наблюдаемым зарядом обратное. Из-за того что (глюонное) поле вновь рождает поле, вокруг голого «цветового заряда»



Так что же: кварки подобны плененному Кинтаро (герой японских народных сказок)?

скапливаются «заряды» того же вида; в результате получается, что видимый издали (наблюдаемый) цветовой заряд больше голого. Можно сказать и наоборот: если попытаться приблизиться к голому цветовому заряду, проникнув сквозь окружающее его облако, то по мере приближения к цели ее образ будет становиться все бледнее и бледнее, исчезая на глазах подобно призраку. Ту же мысль можно выразить, перейдя к энергетическому представлению: чем выше энергия (меньше расстояние), тем слабее по сравнению с кулоновским случаем сила взаимодействия.

Это удивительное свойство КХД — математически строгое следствие теории перенормировок, но его трудно понять интуитивно. Неожиданный для всех результат, полученный упомянутыми выше молодыми людьми путем смело проведенного расчета, с математической точки зрения не вызывает сомнений (отметим в скобках, что применение теории перенормировок к полям Янга — Миллса само по себе представляет трудную математическую задачу, решение которой потребовало нескольких лет упорных усилий).

Возвращаясь к КХД, обсудим значимость асимптотической свободы для теории сильных взаимодействий. Мы начали с предположения, что силовое поле, создаваемое цветовым зарядом кварков, имеет кулоновскую природу, но оказалось, что величина цветового заряда (интенсивность

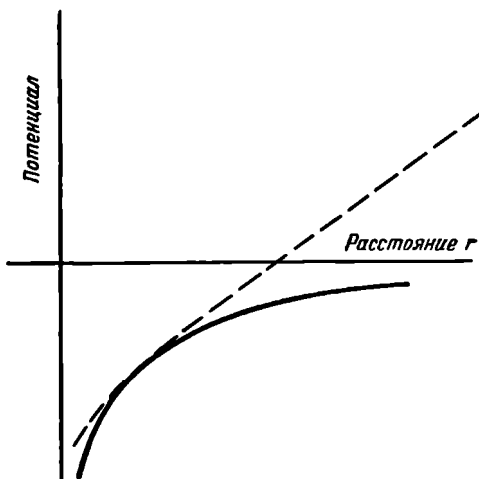


Рис. 16.2. Потенциал взаимодействия кварков: сплошная кривая — закон Кулона ($\sim 1/r$); штриховая — КХД.

цвета) зависит от расстояния: на малых расстояниях (высокие энергии) она уменьшается, а на больших расстояниях (низкие энергии) увеличивается. Очевидно, такое свойство глюонного поля чрезвычайно полезно для объяснения свойств кварков: получается, что в области высоких энергий кварки ведут себя как свободные партоны, а при низких энергиях интенсивность взаимодействия кварков сильно возрастает.

Если потенциал взаимодействия кварков ведет себя так, как показано на рис. 16.2, то в КХД, так же, как и в модели струны, удастся объяснить неразъединимость кварков в адронах. При попытке разъединения кварков на начальной стадии сопротивление невелико, но затем начинает действовать «клей», из которого образуется никогда нерывающаяся струна. Аналогично можно объяснить невылет свободных глюонов: изолированные глюоны не существуют потому, что они сами являются носителями цвета, а группа из нескольких глюонов, по-видимому, образует белый «клеевой сгусток». Ввиду целочисленности его спина клеевой сгусток подобен мезону, но из-за отсутствия аромата такой «квизимезон» крайне трудно уловить. Возможно, этим объясняется то, что подобные частицы до сих пор не обнаружены.

В силу сказанного в настоящее время КХД рассматривают как наиболее перспективный вариант теоретических основ динамики кварков; однако не надо думать, что все проблемы

уже решены. Строгие предсказания теории (асимптотическая свобода) относятся только к области предельно высоких энергий. Поскольку в реальных опытах энергии не бесконечно велики, кварки в них не ведут себя как абсолютно свободные частицы; однако оказывается, что связанные с этим отклонения от правила масштабной инвариантности могут быть теоретически рассчитаны. Результаты таких расчетов в общем подтверждают наблюдениями.

Остановимся на еще одном интересном обстоятельстве. Выше уже указывалось, что причина асимптотической свободы — антиэкранирующее действие глюонов. Но вокруг голого источника кроме глюонного облака создается также облако из пар кварков и антикварков, которое, подобно облаку электрон-позитронных пар в КЭД, производит обычное экранирующее действие; оказывается, что при числе ароматов кварков, большем шестнадцати, экранирующее действие превосходит антиэкранирующее и асимптотическая свобода исчезает. В настоящее время известно пять-шесть ароматов и угрозы для асимптотической свободы пока нет. В этой связи возникает вопрос: не является ли требование асимптотической свободы причиной ограниченности числа ароматов кварков в природе?

Решеточная теория Вильсона

Перейдем к случаю низких энергий. Основной вопрос здесь: обеспечивает ли КХД неразъединимость кварков (удержание кварков в адронах) и если да, то каков механизм этого эффекта? Из-за большой величины константы связи прямое математическое исследование этой проблемы затруднено, и пока не найдено удовлетворительного метода ее решения. Но ввиду успешности струнной модели и модели мешка предпринимались усилия по их интерпретации в рамках КХД. Ознакомимся кратко с одной из самых перспективных попыток в этом направлении — так называемой решеточной теорией Вильсона.

В решеточных теориях приближенно принимается, что пространство и время не образуют континуума, а представляют собой дискретное множество точек, напоминающее кристаллическую решетку. Вильсон, кроме того, предполагает, что кварки размещаются в узлах решетки, а силовые линии калибровочного поля соединяют произвольный узел решетки только с его ближайшими соседями. Предполагается далее, что энергия взаимодействия кварка q и антикварка \bar{q} пропорциональна длине соединяющей их струны (рис. 16.3). Между

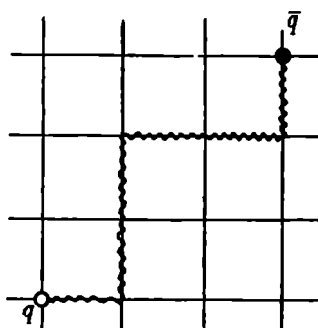


Рис. 16.3. Решеточная теория Вильсона.

двумя точками можно провести бесчисленное множество струн; в теории Вильсона по всем этим струнам производится квантовомеханическое усреднение. В итоге получается, что при увеличении расстояния между q и \bar{q} их энергия взаимодействия становится пропорциональной расстоянию между ними, как и требуется в модели струны.



СПОНТАННОЕ НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ

Немного о симметрии

Хорошо известно (и не раз подчеркивалось в этой книге), что в физике большую роль играет симметрия. Каждому виду симметрии (инвариантности) соответствует закон сохранения. Например, из инвариантности пространства-времени относительно операции сдвига следуют законы сохранения импульса и энергии, а из инвариантности относительно поворотов — закон сохранения момента количества движения. Из инвариантности относительно пространственной инверсии и операции замены частиц на античастицы следуют соответственно законы сохранения P - и C -четностей. Приближенная симметрия относительно перестановки u - и d -кварков приводит к приближенному закону сохранения изоспина и т. д., и т. п.

Более внимательное рассмотрение перечисленных примеров симметрии показывает, что в каждом случае существует несколько формально различных состояний, неразличимых по существу, т. е. эквивалентных с точки зрения физических законов. Иными словами, физические законы инвариантны относительно замены произвольного состояния на любое эквивалентное ему состояние.

При этом, разумеется, необходимо как-то различать эквивалентные состояния, скажем, A и A' , и определить операции перевода A в A' , которым и будут соответствовать сохраняющиеся величины, или квантовые числа.

Если физический закон обладает каким-либо свойством симметрии, то должны существовать все состояния, получаемые применением к произвольному состоянию всех возмож-

ных операций симметрии. Если, например, на поверхность стола в его центре положено яблоко хвостиком вверх, то в принципе должны существовать состояния, в котором яблоко поставлено хвостиком вниз, и состояния с яблоком, сдвинутым в любую другую точку стола (изменениями свойств яблока можно не интересоваться).

О состоянии, инвариантном относительно всех преобразований симметрии, говорят, что оно синглетно. Например, поскольку математическая сфера инвариантна относительно поворотов вокруг ее центра, бессмысленно говорить о сферах, повернутых друг относительно друга (сфера одна, синглетна), но можно различать сферы, находящиеся в разных местах. Идеальный вакуум, т. е. пространство-время, совершенно лишено каких бы то ни было материальных тел, полностью однороден и изотропен (см. стр. 83), и в этом смысле он единствен (синглетен); но если в него поместить материальные тела, то появится разнообразие и вместе с тем повысится энергия системы.

Изложенными соображениями руководствуются в квантовой теории поля при определении состояния Вселенной как целого. В частности, принимают, что состояние вакуума имеет наименьшую энергию и инвариантно относительно всевозможных преобразований симметрии (синглетно). Аналогичным образом можно определить вакуумное состояние части Вселенной, разумеется, при условии, что взаимодействие выделенной части с ее окружением пренебрежимо мало.

Спонтанное нарушение симметрии

Легко видеть, однако, что постулированные выше свойства состояний с наименьшей энергией не всегда имеют место. Покажем это на примере ферромагнитной среды. К ферромагнетикам относят вещества типа железа или никеля, из которых делают постоянные магниты. В ферромагнетиках существует корреляция между электронными спинами соседних атомов, благодаря которой энергия системы меньше в состоянии с параллельными спинами. Поэтому в состоянии с минимальной энергией спины всех атомов выстраиваются параллельно друг другу и вещество приобретает макроскопический магнитный момент (напомним, что каждый спин является маленьким постоянным магнитиком). Состояние это устойчиво. Но, по крайней мере в идеальном случае, вещество «не знает», в каком направлении надо ему ориентировать вектор полного магнитного момента, иными словами, энергия системы инвариантна относительно одновременного поворота

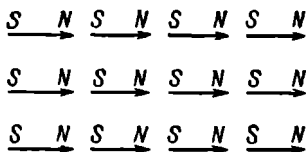


Рис. 17.1. Ферромагнетизм. Направления всех атомных магнитов одинаковы.

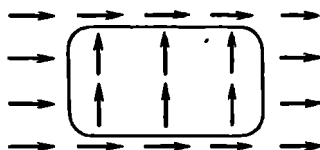


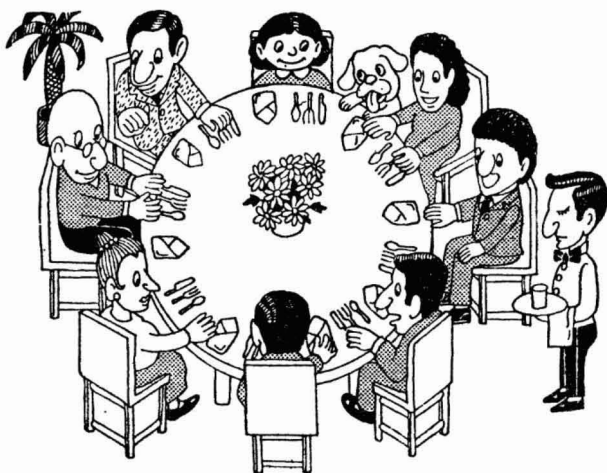
Рис. 17.2. Спонтанное нарушение симметрии: локальное разупорядочение.

спинов всех атомов на один и тот же угол. Поэтому число состояний с одной и той же минимальной энергией бесконечно велико.

В случае ферромагнетика конечных размеров проблемы в известном смысле не возникает, поскольку куски вещества с разной ориентацией магнитного момента могут сосуществовать. По-другому ставится вопрос при переходе к бесконечно большому ферромагнетiku. Тогда окажется, что мы живем внутри одного из таких постоянных магнитов и нам надо будет как-то выбрать направление его магнитного момента в состоянии с наименьшей энергией.

Оказывается, однако, что, хотя для изменения ориентации состояния с минимальной энергией и не требуется затраты энергии, у нас нет средств осуществить такой поворот. Причина этого просто в том, что никакая конечная установка не в состоянии одновременно повернуть спины сразу всех атомов бесконечно протяженной среды. Самое большее, что мы можем сделать,— это повернуть спины всех атомов в какой-то ограниченной области. Но тогда в среде возникнут деформации и ее энергия уже не будет минимальной. Таким образом, даже если мы и живем в мире с некоторой конкретной ориентацией, все равно мы в состоянии наблюдать как физические эффекты только локальные нарушения порядка. Для таких наблюдателей симметрия мира в целом далеко не самоочевидна.

Рассмотренный эффект получил название спонтанного нарушения симметрии. Из сказанного понятно, что он возможен только в системах, число степеней свободы у которых, по крайней мере с практической точки зрения, бесконечно велико; в физике имеется много примеров такого рода. Но как общий принцип, применимый также и в теории элементарных частиц, эффект спонтанного нарушения симметрии впервые был осознан в работе Намбу — Иона — Ласиннио (модель со сверхпроводимостью).



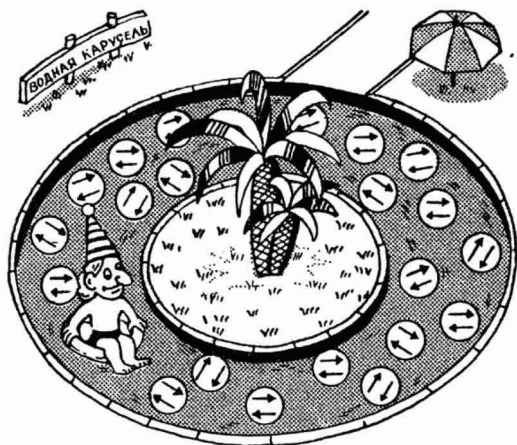
Спонтанное нарушение симметрии: пример Салама.

Любопытный пример спонтанного нарушения симметрии, взятый из обыденной жизни, предложил Салам. Представим себе званый обед, большой круглый стол, вокруг которого плотно уселись многочисленные гости. Перед каждым местом поставлена тарелка и в порядке разложены ножи, вилки, салфетки и т. п. Поскольку промежутки между местами малы, салфетки положены так, что не ясно, к какому месту они относятся: налицо явная право-левая симметрия. В действительности, конечно, безразлично, какую салфетку взять. И вот какой-то гость первым выбирает случайно правую салфетку. В тот же миг имевшаяся ранее симметрия спонтанно исчезает, так как все остальные гости теперь уже вынуждены взять свои правые салфетки.

Память о спонтанном нарушении симметрии — НГ-волны

Два состояния — состояние со спонтанно нарушенной симметрией и состояние, в котором симметрии вообще не было, — не обязательно эквивалентны. В примере с ферромагнетиком имелась в виду симметрия относительно бесконечно-непрерывного множества направлений магнитного момента, а в примере с банкетом речь шла об инвариантности относительно дискретного, более того, конечного набора возможностей — о право-левой симметрии. Оказывается, что в случаях,

170 СПОНТАННОЕ НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ



Жидкость куперовских пар течет без сопротивления.

подобных первому из рассмотренных нами примеров, т. е. при симметрии относительно непрерывных преобразований, в системе остаются неявные следы нарушения симметрии.

Выше уже указывалось, что произвести одновременный поворот спинов всех атомов в бесконечно протяженном ферромагнетике практически невозможно. Если же повернуть спины в некоторой ограниченной области, то по системе побежит возмущение с характерной длиной волны порядка размеров этой области (так называемая волна поворота спинов, или спиновая волна). Поскольку при неограниченном увеличении размера области мы возвращаемся в пределе к симметричной ситуации, ясно, что энергия спиновой волны стремится к нулю при стремлении длины волны к бесконечности. Так же ведет себя при увеличении длины волны энергия световых и звуковых возмущений. Следовательно, масса покоя кванта спиновых волн равна нулю. Иными словами, должны существовать кванты спиновых волн, имеющие сколь угодно малую энергию; пока такие кванты не исчезли, система «помнит» о нарушении симметрии.

В применении к теории элементарных частиц эти волны получили название волн Намбу—Голдстоуна (НГ-волны), хотя в других областях физики они, разумеется, были известны давно. Наиболее тривиальный пример—упругие волны в твердом теле, которые можно трактовать как память

о нарушении трансляционной инвариантности последнего. В принципе, конечно, все равно, в какое место пространства поместить один атом. Но если речь идет о кристалле, то, коль скоро его первый атом занял какое-то место, остальные атомы должны располагаться эквидистантно в узлах кристаллической решетки. Если внешняя по отношению к кристаллу сила нарушает установившийся порядок, по кристаллу начинают распространяться упругие волны.

Сверхпроводимость — тоже нарушение симметрии

Наблюдаемое у многих веществ при низких температурах явление сверхпроводимости заключается в том, что сопротивление вещества строго обращается в нуль и магнитное поле из него выталкивается. Удовлетворительное теоретическое объяснение механизма сверхпроводимости впервые дано Бардином, Купером и Шриффером (Иллинойский университет, США); предложенная ими схема в настоящее время широко известна под названием теории БКШ¹⁾.

Наступление сверхпроводимости означает нарушение некоторой абстрактной, так называемой калибровочной инвариантности (калибровочной симметрии), которой соответствует закон сохранения электрического заряда. В последнее время это явление приобрело важное значение для ряда моделей теории элементарных частиц.

В задачу данной книги не входит изложение основ теории БКШ; мы кратко поясним только некоторые существенные для нас моменты. Вообще наличие электропроводности означает, что некоторые электроны в веществе могут двигаться свободно. При наступлении сверхпроводимости электроны собираются в пары частиц с противоположно ориентированными спинами (так называемые куперовские пары), и эти пары конденсируются в веществе. Число пар не определено, а поскольку состояние конденсата не нарушается при его смещении из одного места в другое, говорят о наступлении сверхпроводимости.

Иначе говоря, для разрыва куперовской пары необходима энергия, превосходящая некоторое минимальное значение E_0 ; образуемые при разрыве пары неспаренные электроны ведут

¹⁾ Теория сверхпроводимости была независимо разработана Н. Н. Боголюбовым. При этом в рамках созданного им метода Н. Н. Боголюбов развил общий подход к анализу систем со спонтанно нарушенной симметрией.— *Прим. ред.*

172 СПОНТАННОЕ НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ

себя как частицы с энергией покоя $E_0/2$. Соответствующая последней масса отличается от массы «нормального» (не находящегося внутри сверхпроводника) электрона; это дополнительный параметр, характеризующий поведение электрона внутри вещества.

Изложенные факты наводят на размышления. Нельзя ли предположить, что своего рода сверхпроводник заполняет всю Вселенную, так что мы живем внутри этого сверхпроводящего вещества? В таком случае мы не в состоянии наблюдать истинного вакуума; реальным вакуумом для нас является наинизшее по энергии состояние окружающей нас сверхпроводящей среды. Частицы, имеющие в состоянии истинного вакуума массу покоя нуль (подобные нейтрино), в нашем реальном мире могли бы проявлять себя как частицы с ненулевой массой покоя. Не такова ли причина появления масс у электронов и кварков?

Высказанная аналогия составляет содержание так называемой модели со сверхпроводимостью Намбу—Ионы—Ласинио (модель НИЛ). Прежде чем переходить к ее подробному изложению, поясним ее связь с нарушением симметрии.

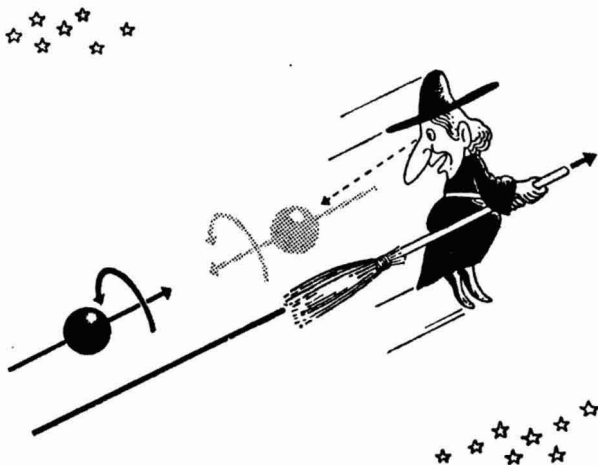
Симметрия, нарушаемая в теории БКШ, имеет отношение к закону сохранения электрического заряда. Связано это с тем, что число куперовских пар (число упорядоченных электронов в состоянии конденсата) не является заданной величиной. Для характеристики упорядочения вводят специальный параметр, по смыслу аналогичный направлению спина в ферромагнетике. В определении этого параметра содержится некоторый произвол.

К вопросу о происхождении массы у кварков (модель НИЛ)

Вернемся к проблемам теории элементарных частиц.

Модель НИЛ была предложена на ранней стадии развития теории кварков и претендовала на динамическое объяснение происхождения массы у барионов, которые уподоблялись электронам в сверхпроводнике, но ее можно применить и к фундаментальным частицам современной теории, объясняя той же причиной происхождение массы у лептонов и кварков. В последнем случае, однако, надо говорить не о симметрии, связанной с электрическим зарядом, а о так называемой киральной симметрии.

Слово «киральный» с английского можно перевести как «относящийся к руке»; оно означает подразделение на лиц, преимущественно владеющих правой рукой («правша») или



Левоспиральный спин при обгоне выглядит как правоспиральный. левой рукой («левша»). Выше, на стр. 87, мы говорили о левых (левовинтовых) и правых (правовинтовых) нейтрино; теперь можно сказать, что киральность этих частиц равна соответственно ± 1 .

Несохранение четности обычно объясняют тем, что в реальном мире существуют только левые нейтрино и правые антинейтрино. Но такое ограничение возможно лишь для нейтрино, лишенных массы. Если масса этой частицы не равна нулю, то должны существовать как левые, так и правые нейтрино. В самом деле, скорость массивной частицы всегда меньше скорости света. Поэтому левая частица (проекция спина которой на направление движения отрицательна) при наблюдении из системы отсчета, движущейся в том же, что и частица, направлении, но с большей скоростью, будет выглядеть как правая, потому что в этой новой системе отсчета направление движения частицы изменится на обратное.

Основные особенности слабых взаимодействий учтены в так называемой $V-A$ -теории, согласно которой оператор слабого взаимодействия выражается лишь через левые компоненты частиц и правые компоненты античастиц. Поскольку частица не может превратиться в античастицу, при слабом взаимодействии остается неизменной полная киральность, определяемая как разность между числами левых и правых частиц. Но так как все частицы, за исключением нейтрино, имеют ненулевую массу, при их движении перепутываются

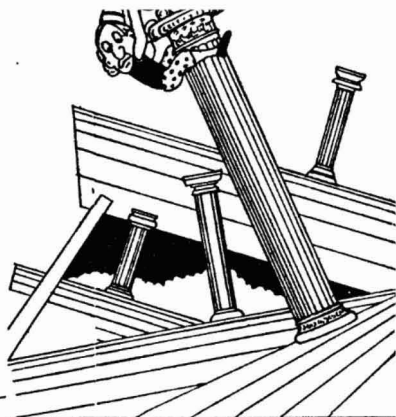
левые и правые компоненты; в итоге нарушается сохранение киральности.

Читатель уже, видимо, понял, как надо провести в данном случае аналогию со сверхпроводимостью: «истинные» лептоны и кварки не имеют массы, они приобретают ее в результате спонтанного нарушения киральной симметрии. Но в таком виде наша аналогия выражает всего лишь одну из возможностей. Хотелось бы иметь более серьезное теоретическое обоснование высказанной точки зрения. К счастью, в качестве дополнительного аргумента можно воспользоваться существованием НГ-волн.

Следуя теории БКШ, примем, что в наблюдаемом нами реальном мире частицы и античастицы (например, q и \bar{q}) образуют конденсат из пар куперовского типа (с равной нулю киральностью). При разрыве каждой куперовской пары возникают имеющие ненулевую массу кварк и антикварк. Нарушение порядка в конденсате сопровождается появлением НГ-волн, характеризующихся нулевым спином и отрицательной четностью, такими же, как у пионов. Так, может быть, чрезвычайная малость масс пионов по сравнению с массами остальных адронов объясняется тем, что пионы — кванты НГ-волн?

Мы знаем, что пионы бывают трех видов и что кроме них нулевым спином и отрицательной четностью обладают также относительно более тяжелые каоны и эта-мезон. Для единообразного описания всех этих частиц надо учесть изменение ароматов кварков, принять, что масса мезонов не полностью равна нулю и т. п., т. е. допустить, что кроме спонтанного нарушения симметрии теория содержит еще и другие важные элементы. Внести эти исправления непросто, и соответствующая работа пока еще не завершена. В заключение данной главы отметим, что помимо успешных применений в физике адронов идея о спонтанном нарушении симметрии положена также в основу рассматриваемой ниже единой теории калибровочных полей.

«ПОКОСИВШИЙСЯ
ХРАМ»
СЛАБЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ



Неделка творца?

При размышлении о слабом взаимодействии преследует впечатление, что «здесь что-то не то», хотя и не удастся понять, что «должно быть на самом деле». Впечатление это объясняется не только необычностью сочетания слабости константы связи и малости радиуса действия сил. В отличие от взаимодействий других видов — гравитационного, электромагнитного, сильного, которые все укладываются в рамки теории калибровочных полей и выводятся из красивых принципов симметрии, слабое взаимодействие выглядит исключительно асимметричным, не имеющим регулярности. В главах 6—8 мы уже касались вопросов несохранения четности (P), комбинированной четности (CP), странности. В настоящее время есть основания ожидать, что кроме перечисленных возможны и другие нарушения симметрии. И вот, начав писать эту главу, я вдруг захотел немного пооткровенничать и рассказать о том ощущении, которое не покидает меня при обдумывании проблем слабого взаимодействия.

Так и кажется, что при разработке проекта нашей Вселенной господь бог, славно потрудившись над чертежами конструкций гравитационного, электромагнитного и сильного взаимодействий, изготовил их согласно формулам и по всем правилам чертежного искусства. А когда дело дошло до слабого взаимодействия, то он то ли ошибся в расчетах, то ли неверно прочел масштабы, но, как бы то ни было, в чертежи кое-где вкрались неточности: прямые не пересекались с перпендикулярами, четырехугольники оказались незамкнуты-



Слабое взаимодействие — недоделка божества?

ми и т. п. В итоге каркас слабого взаимодействия немного перекопился. Но издали дефекты не бросались в глаза, и создатель, махнув рукой на недоделки, вдвинул блок слабых взаимодействий в конструкцию Вселенной в том виде, в каком он у него получился.

Однако естествоиспытатели твердо убеждены, что всемогущий не мог допустить подобной халатности, и ищут для наблюдаемых эффектов свои объяснения. «Не потому перекопился каркас,— горячатся они,— что всевышний схалтурил! Всему должны быть причины!»

Упорные попытки разобраться «в замыслах всевышнего» продолжались почти двадцать последних лет; в итоге наше понимание слабых взаимодействий поднялось на новую, более высокую ступень. Теория Вайнберга—Салама вскрыла их глубокую внутреннюю структуру и сделала возможным единое описание. В конце концов слабые взаимодействия, так же как и все остальные виды сил, удалось интерпретировать на основе принципов теории калибровочных полей. Но, прежде чем говорить об этих теоретических достижениях, надо объяснить, в чем же заключается «перекошенность каркаса» слабых взаимодействий.

О слабых взаимодействиях

Вначале к слабым взаимодействиям относили бета-распады атомных ядер, а затем, как мы уже знаем, к ним причислили распады новых частиц; в результате число и разнообразие слабых процессов сильно увеличилось. Различа-

ют процессы с участием только адронов, только лептонов и комбинированные процессы с участием как адронов, так и лептонов, например

$$n \rightarrow p + \bar{\nu}_e + e, \quad (\text{а})$$

$$\Lambda \rightarrow N + \pi \quad (N = p, n), \quad (\text{б})$$

$$\Lambda \rightarrow p + \bar{\nu}_e + e, \quad (\text{в})$$

$$K \rightarrow \pi + \pi, \quad (\text{г})$$

$$K \rightarrow \pi + \pi + \pi, \quad (\text{д})$$

$$K^- \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu, \quad (\text{е})$$

$$\pi^- \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu, \quad (\text{ж})$$

$$\mu \rightarrow \nu_\mu + e + \bar{\nu}_e, \quad (\text{з})$$

$$\mu + n \rightarrow p + \nu_\mu. \quad (\text{и})$$

На первый взгляд, их единое описание представляется невозможным. Но при более глубоком подходе, когда фундаментальными частицами считают кварки и лептоны, положение намного упрощается. На этом уровне интерпретации распад пиона (ж) надо записывать в форме

$$\pi^- = (d\bar{u}), \quad d + \bar{u} \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu.$$

В такой же форме можно записать распады нейтрона и мюона (а, з, и):

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

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

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

Поскольку n и p имеют составную структуру udd и uud , приходим к следующим схемам распада составляющих адроны кварков:

$$d + \bar{u} \rightarrow e + \bar{\nu}_e, \quad \mu + \bar{\nu}_\mu.$$

Мы получили, таким образом, что слабые взаимодействия представляют собой процессы превращения друг в друга пар лептонов и кварков. (Процессы вида $K \rightarrow 3\pi$ несколько сложнее, но надо иметь в виду, что в них вносят вклад также и сильные взаимодействия.) Естественно предположить, что подобные превращения в каком-то смысле являются универсальными, но так ли это?

Поиски порядка в слабых взаимодействиях

Исторически первой теорией слабых взаимодействий была созданная в 1933 г. теория бета-распада Ферми, согласно которой превращение нейтрона в протон сопровождалось образованием пары электрон и антинейтрино [процесс (а) на стр. 176]. Ферми предположил, что взаимодействие является контактным, т. е. происходит в одной пространственно-временной точке.

Форма взаимодействия конкретизировалась указанием его интенсивности (константы связи) и типа (векторный, скалярный и т. п.). Интенсивностью определялась скорость процесса (или время жизни), а от типа зависели такие детали процесса, как энергетическое распределение электронов, наличие или отсутствие переворота спина нейтрона при его распаде и т. п. В первом варианте теории Ферми принял векторный тип взаимодействия. Поскольку при этом, в противоречии с экспериментальными данными, не происходило переворота спина, впоследствии Гамов и Теллер добавили во взаимодействие члены других типов. Еще позже обнаружилось несохранение четности, и в 1957 г. была предложена теория так называемого « V минус A типа», в которой в почти одинаковой пропорции смешивались члены векторного (V) и аксиально-векторного (A) типов. Константу связи $V-A$ взаимодействия стали называть постоянной Ферми.

$V-A$ -теорию легко обобщить на случай кварков и лептонов. Как только что указывалось, из фундаментальных частиц нужно построить пары (e, ν_e) , (μ, ν_μ) , (u, d) ; процессы слабого взаимодействия получаются комбинированием этих пар. Например, распад мюона (μ) отвечает комбинации $(\mu, \nu_\mu) \times (e, \nu_e)$, распад нейтрона (n) — комбинации $(u, d) \times (e, \nu_e)$, а распад пиона (π) и захват мюона (μ) — комбинации $(u, d) \times (\mu, \nu_\mu)$. Если принять, что всем комбинациям соответствует одна и та же константа связи (постоянная Ферми), то для времен жизни частиц получаются определенные соотношения (универсальность). Рассчитать время жизни пиона трудно, а для остальных трех частиц гипотеза универсальности точно подтвердилась.

Таким образом, вроде бы выяснилось, что в слабых взаимодействиях обнаруживается какой-то порядок, но пока еще оставалось одно неприятное обстоятельство, связанное с интерпретацией слабых распадов странных частиц. Например, распад лямбда-частицы (Λ) похож на процесс (а); следовательно, для его интерпретации надо образовать пару кварков (u, s). Но с кварком u у нас уже спарен кварк d : (u, d); к тому

же константа связи для пары (u, s) получается равной всего $1/4$ от постоянной Ферми. То же относится к распадам сигма- и кси-частиц Σ, Ξ .

Должен существовать очарованный кварк!

Для объяснения указанных отклонений от гипотезы универсальности Кабиббо (Римский университет, Италия) выдвинул замечательную идею: он предложил вместо двух разных комбинаций (u, d) , (u, s) рассматривать одну комбинацию (u, d') , в которой d' представляет собой смесь состояний d и s (эту смесь теперь называют смесью Кабиббо; речь идет о состоянии, получаемом путем суперпозиции двух волн, отвечающих кваркам с одинаковыми зарядами, но разными ароматами). Пропорция смешивания подбирается так, чтобы содержание d' в основном содержало компоненту d ; тогда для вероятности процессов с участием кварков (u, d) получается практически прежнее значение, согласующееся с условием универсальности, а заметно уменьшена лишь вероятность процессов с участием кварков (u, s) .

Определив пропорцию смешивания один раз, можно попробовать применить идею о неизменной смеси кварков к вычислению вероятностей слабых распадов всех остальных странных частиц. Такая попытка привела к успеху; тем самым идея Кабиббо получила подтверждение. Но почему в теории слабых взаимодействий должно возникать такое странное смешанное состояние d' ? Поскольку теория SU_3 -симметрии строится при помощи трех исходных, не смешанных ароматов (u, d, s) , не является ли выдвигаемое в теории слабых взаимодействий требование об образовании дублетов кварков неуместным?

Эти сомнения были сняты в теории, предложенной Маки, Хара и др., которые заметили, что с точки зрения слабых взаимодействий пару (u, d') разумно дополнить парой (c, s') , построенной так, чтобы состояние s' было ортогонально («перпендикулярно») состоянию d' , определенному как смесь кварков d и s ; такое состояние s' в основном содержит компоненту s . Символом c обозначен новый, четвертый кварк, имеющий такой же, как кварк u , электрический заряд $2/3$ и большую, чем у u , массу, благодаря чему тогда его еще нельзя было наблюдать. Ясно, что гипотетический кварк Маки, Хара и др.— не что иное, как известный в настоящее время очарованный кварк. Соотношение между кварками d, s и кварками d', s' проще всего понять, воспользовавшись аналогией с поляризацией света.

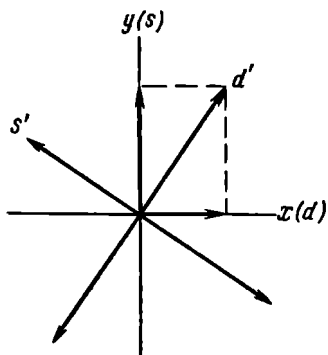


Рис. 18.1. Поляризация и кварки d , s , d' , s' .

Произвольный вектор линейной поляризации можно разложить на составляющие, направленные вдоль двух взаимно перпендикулярных осей x и y (рис. 18.1). Уподобляя эти составляющие кваркам d и s , видим, что кварк d' аналогичен некоторому вектору линейной поляризации, а кварк s' — другому, перпендикулярному d' вектору. И, наоборот, кварки d и s можно разложить на составляющие, направленные вдоль d' и s' . Переход от одного представления к другому означает просто разный выбор координатных осей.

«Перекося каркаса» слабых взаимодействий, о котором говорилось в начале данной главы, как раз и означает указанный поворот координатных осей: в случае сильных взаимодействий ароматы кварков «направлены» вдоль осей d и s , а в случае слабых — вдоль «наклоненных» осей d' и s' .

Подчеркнем, что заслугу предсказания очарованного кварка нельзя приписать только Маки и др. Эту честь они должны разделить с д-ром Сакатой, из ясных указаний которого на возможность существования новых фундаментальных частиц исходили молодые японские ученые. Впоследствии Глэшоу, Илиопулос и Майяни (сокращенно ГИМ) отметили необходимость четвертого кварка для решения проблемы нейтральных токов; неизбежность введения такого кварка ощущалась все более явственно.

Вопрос о нейтральных токах мы более подробно обсудим ниже, а здесь заметим, что необходимость их существования следует из калибровочной теории слабых взаимодействий. В отличие от обычного бета-распада типа $u \leftrightarrow d'$, $e \leftrightarrow \nu$, при котором обязательно происходит обмен электрическим зарядом, в случае нейтральных токов идут процессы вида

$$d + e \rightarrow d + e,$$

не сопровождаемые перезарядкой. Последнюю реакцию наблюдать трудно из-за того, что в ней не происходит распада d -кварка. Однако в рамках теории Кабиббо возможны легко наблюдаемые нейтральные переходы типа $s \leftrightarrow d$, например процесс

$$\Lambda \rightarrow n + e + \bar{e},$$

который должен идти примерно с той же вероятностью, что и обычно наблюдаемый процесс $\Lambda \rightarrow p + e + \bar{\nu}$, поскольку оба они содержатся в токе $d' \leftrightarrow d'$; тем не менее распад лямбда-частицы через нейтральный ток не наблюдается экспериментально. Для объяснения этого противоречия в теории ГИМ вводится четвертый кварк и доказывается, что члены нейтрального тока $d' \leftrightarrow d'$, ответственные за переход $s \leftrightarrow d$, взаимно уничтожаются с соответствующими членами тока $s' \leftrightarrow s'$.

Кобаяси и Маскава обобщили теорию Кабиббо. Прежде всего они заметили, что при наличии двух кварковых дублетов (u, d) и (c, s) безразлично, какие пары кварков смешивать — d и s , или u и c ; это вопрос удобства. Иначе обстоит дело при переходе к трем дублетам кварков.

Если ввести третий дублет (t, b) , то при смешивании состояний надо образовывать суперпозиции d'', s', b' трех кварков d, s, b ; число степеней свободы при этом заметно больше, чем в случае двух дублетов. Отсюда, согласно Кобаяси и Маскаве, следует, что в случае трех дублетов возможно нарушение CP -инвариантности. Таким образом, если на эксперименте обнаружится слабое несохранение CP -четности, его можно будет рассматривать как указание на существование третьего дублета кварков.

Самое поразительное, что все эти соображения были высказаны до обнаружения очарованного кварка. Недавнее открытие ипсилон-частицы Υ можно рассматривать как подтверждение теории Кобаяси — Маскавы.

Вопрос: почему «рама» слабых взаимодействий перекосилась? — до сих пор остается без ответа. Интересно было бы, однако, представить себе, как выглядел бы этот мир, если бы указанный перекокс отсутствовал, т. е. если бы, образно говоря, «божественный замысел воплотился без искажения». Тогда, как и в нашем мире, внутри дублетов (e, ν_e) , (u, d) , (μ, ν_μ) , (c, s) были бы возможны переходы, но разные дублеты не смешивались бы между собой.

Следовательно, их можно было бы рассматривать как разные «поколения», например, дублеты (e, ν_e) , (u, d) можно

было бы отнести к первому, а (μ, ν_μ) , (c, s) —ко второму поколению. Несмешиваемость поколений проявлялась бы в наличии сохраняющихся величин. Например, даже если бы во втором поколении и было возможно превращение $c \rightarrow s$, s -кварк никогда не мог бы превратиться в u -кварк первого поколения. Поэтому лямбда-частица и каоны оказались бы стабильными и, вообще говоря, наряду с протонами и нейтронами входили бы в состав атомных ядер. Таким образом, этот мир сильно отличался бы от ныне существующего.

ЕДИНАЯ
ТЕОРИЯ
ВАЙНБЕРГА-
САЛАМА



Юкава ожидал от своего мезона слишком много

Мы уже видели, что как электромагнитное, так и сильное взаимодействия описываются калибровочными теориями: электромагнитное — квантовой электродинамикой (КЭД), исходящей из калибровочно-инвариантных уравнений Максвелла, а сильное — квантовой хромодинамикой (КХД), основанной на теории цветовых калибровочных полей. Возникает вопрос: применима ли теория калибровочных полей к описанию слабого взаимодействия? Ответ на него дала теория Вайнберга — Салама (ВС).

В предыдущей главе мы ознакомились с тем, каким образом можно вполне корректно распространить теорию Ферми на всевозможные фундаментальные частицы. Но взаимодействие Ферми является контактным (см. стр. 177), что неестественно с точки зрения теории Юкавы, согласно которой взаимодействия между частицами должны передаваться при помощи каких-то полей. В действительности Юкава, формулируя свою мезонную гипотезу, имел в виду объяснить при ее помощи также и бета-распад. С этой целью он предположил, что бета-распад происходит в две стадии:

$$I. \quad n \rightarrow p + Y^-,$$

$$II. \quad Y^- \rightarrow e + \bar{\nu},$$

ШЕЛДОН ЛИ ГЛЭШОУ, СТИВЕН ВАЙНБЕРГ, АБДУС САЛАМ за разработку единой теории электромагнитного и слабого взаимодействий совместно удостоены Нобелевской премии в 1979 г. В настоящее время Глэшоу и Вайнберг — профессора Гарвардского университета (США).

Глэшоу широко известен как один из авторов теории ГИМ (Глэшоу, Илиопулос, Майани), в которой были выдвинуты убедительные аргументы в пользу существования очарованного кварка, SU_5 -теории Джорджи — Глэшоу — одной из первых работ в направлении «великого объединения» электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий и др.

Интересы Вайнберга простираются от теории элементарных частиц до космогонии; он внес большой вклад в успешное объединение этих двух крайних разделов современной физики. Хорошо известен и как автор популярных книг, например книги «Первые три минуты»¹.

Салам — пакистанец по национальности. Долгое время был профессором Лондонского имперского колледжа. Один из организаторов и директор Международного центра теоретической физики в Триесте (Италия); в этом качестве оказывает большую помощь молодым исследователям из развивающихся стран. Активно работает в теоретической физике, главным образом в самых современных разделах теории поля. Известен, в частности, статьями о суперсимметрии.

т. е. возникает в результате обмена мезоном Y между нуклоном и лептоном, подобно тому как ядерное взаимодействие возникает вследствие обмена мезоном Y между двумя нуклонами. Но такая идея сразу же встречается с затруднением: она противоречит универсальности слабых взаимодействий, т. е. тому хорошо установленному факту, что константы связи слабых распадов нейтрона n и мюона μ одинаковы (см. стр. 177).

В самом деле, в рассматриваемом здесь двухступенчатом процессе Юкавы константа связи на начальной стадии (ступень I) должна совпадать с константой связи сильного взаимодействия; поэтому слабым надо признать только процесс на заключительной стадии (ступень II). Однако при

¹ Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. — М.: Энергия, 1981. — Прим. ред.

распаде мюона, который является лептоном, стадия с сильным взаимодействием отсутствует. Следовательно, с точки зрения Юкавы константы связи слабых распадов нейтрона и мюона не могут равняться друг другу в противоречии с требованием универсальности. Вывод, который надо сделать из полученного противоречия, ясен: если поле, передающее слабое взаимодействие, существует, то оно не может иметь мезонной природы. Это должно быть новое, ранее неизвестное поле, константа слабой связи которого как с лептонами, так и с адронами (или кварками) одинакова.

W-БОЗОНЫ

Квант нового гипотетического поля получил название *W*-бозон (*W*—первая буква английского слова *weak*—слабый). Слабое взаимодействие с участием *W*-бозонов естественно рассмотреть по аналогии с теорией ядерных сил Юкавы.

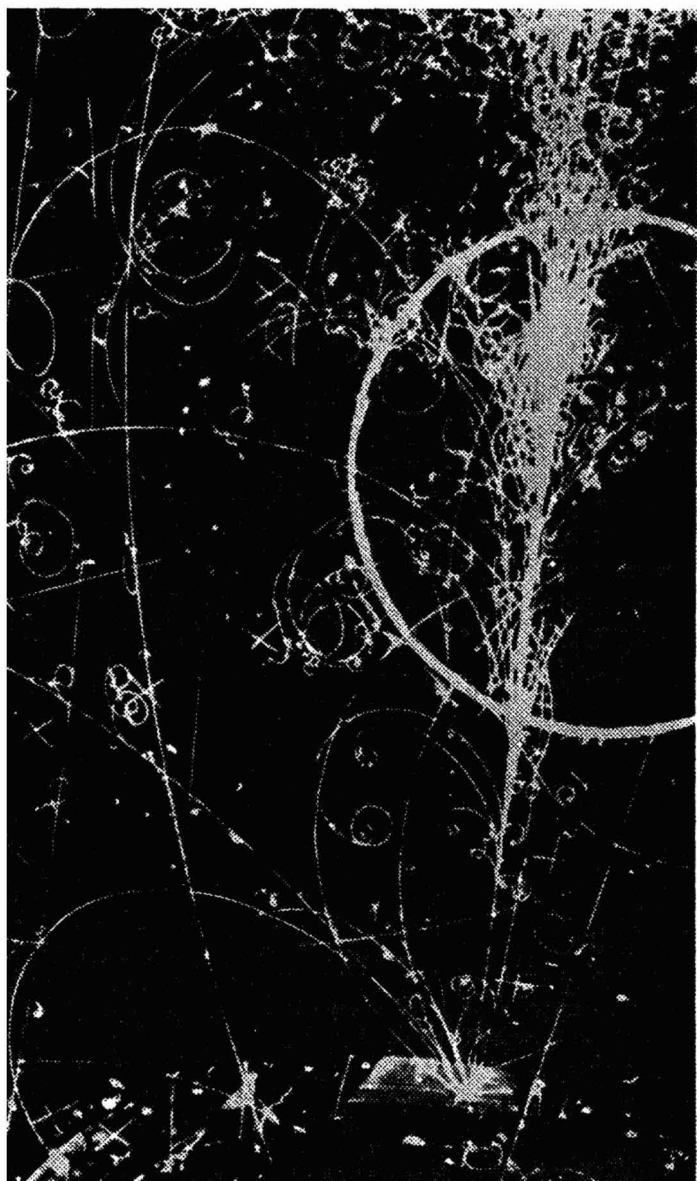
Запишем еще раз, теперь уже в новых обозначениях, схемы бета-распада нейтрона и мюона.

$$\begin{aligned} n &\rightarrow p + W^- && \text{(или } d \rightarrow u + W^-), \\ \mu &\rightarrow \nu_\mu + W^-, \\ W^- &\rightarrow e + \bar{\nu}_e \end{aligned}$$

Учитывая аналогичные схемы распада с участием античастиц, приходим к выводу, что должны существовать *W*-бозоны с электрическими зарядами ± 1 .

Каковы спин и масса *W*-бозонов? Вопрос о спине решается просто. Поскольку бета-распадное взаимодействие имеет форму *V*—*A*, спин *W*-бозонов должен равняться единице и эти частицы надо связывать с левыми лептонами и кварками (античастицы — с правыми).

Можно сказать и наоборот: слабые взаимодействия универсальны и имеют форму *V*—*A* именно потому, что они передаются через *W*-бозоны, спин которых равен единице, а константа слабой связи со всеми частицами одинакова. При такой интерпретации слабые взаимодействия уподобляются электромагнитным, которые, как известно, передаются фотонами — частицами со спином единица, имеющими универсальную константу связи (элементарный электрический заряд *e*). Аналогия с электромагнитным случаем наводит на мысль, что



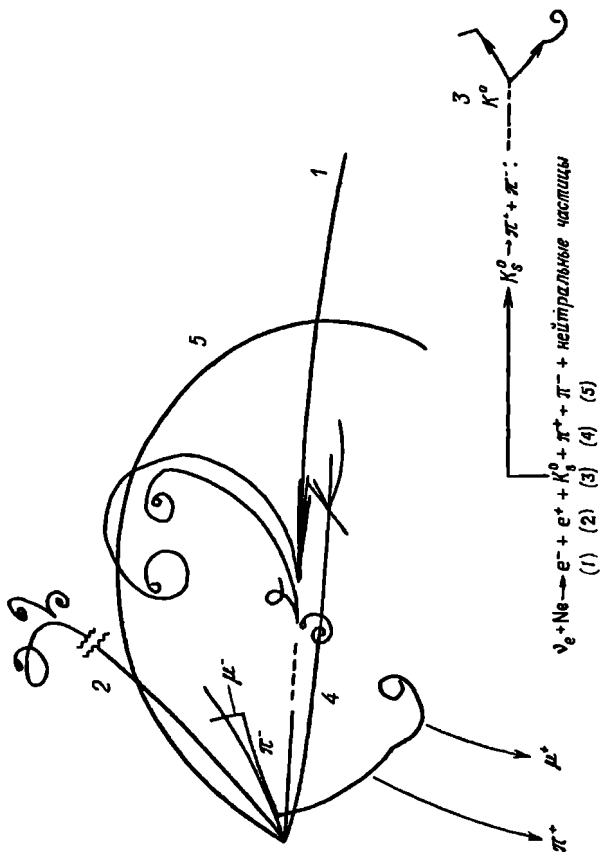


Рис. 19.1. Частицы, наблюдаемые при столкновении нейтрино с веществом. Изображенное на рисунке событие интерпретируют как рождение (при столкновении ν_e с атомом Ne) очарованной частицы, сразу же распадающейся с испусканием K^0 -мезона. Пунктиром показана частица, не оставившая следа на фотоэмульсии. (Фото предоставлено Лабораторией им. Ферми.)

слабые силы тоже могли бы иметь калибровочную природу, но остальные характеристики W -бозонов не согласуются со свойствами калибровочных полей.

Прежде всего в отличие от дальнедействующих электромагнитных сил, носитель которых (фотон) имеет нулевую массу покоя, слабые силы являются настолько короткодействующими, что в теории Ферми радиус их действия принят просто равным нулю. Такое предположение означает, что масса W -бозонов бесконечно велика. Если же допустить, что радиус действия слабых сил хотя и мал, но отличен от нуля, то постоянная Ферми будет выражаться через квадрат произведения константы связи W -бозонов g и их массы M (обратно пропорциональна этому квадрату). Поэтому, пользуясь только значением постоянной Ферми, невозможно определить величины g и M в отдельности.

Указанное соотношение справедливо в области низких энергий, когда дебройлевские длины волн участвующих во взаимодействии частиц намного превосходят радиус действия слабых сил; именно в этой энергетической области разыгрываются явления обычного бета-распада. Однако слабые процессы могут идти и при высоких энергиях.

Например, возможны процессы вида $\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu + p + \dots$; для их изучения регистрируют мюоны, выбиваемые из подводящей мишени пучком высокоэнергичных нейтрино. Такие процессы напоминают рассеяние электронов на протонах: в роли фотона в данном случае выступают W -бозоны, которыми обмениваются слабо взаимодействующие частицы.

По теории Ферми, сечение нейтринных процессов должно линейно расти с энергией. Если же масса W -бозонов не бесконечно велика (радиус действия слабых сил не равен нулю), то при каких-то значениях энергии должно начаться резкое увеличение сечения. До сих пор такой тенденции не обнаружено; это значит, что масса W -бозонов гораздо больше той предельной величины, которую еще можно было бы измерить в современных опытах.

Заметим кстати, что постановка нейтринных экспериментов — дело не простое. Соответствующие опыты в мощных ускорителях, конечно, облегчаются тем, что сечение увеличивается с ростом энергии, но надо иметь в виду, что в абсолютном выражении оно остается гораздо меньше сечения сильных взаимодействий.

Для создания пучка нейтрино сначала образуют пучок пионов, возникающий при бомбардировке мишени протонами. Вылетающие вперед пионы или каоны при своем распаде дают нейтрино, которые направляются в пузырьковую каме-

ру. Мало того, что пучок пионов надо очистить от разных паразитных частиц: дело еще осложняется тем, что время жизни пионов растет пропорционально их энергии; поэтому до своего распада на нейтрино пионы должны пролететь большое расстояние. Например, в установке FERMILAB (США) длина скрытого под земляной дамбой туннеля, в котором формируется пучок нейтрино, прежде чем он попадет в измерительную камеру, достигает нескольких сотен метров.

Путь к объединению электромагнитного и слабого взаимодействий

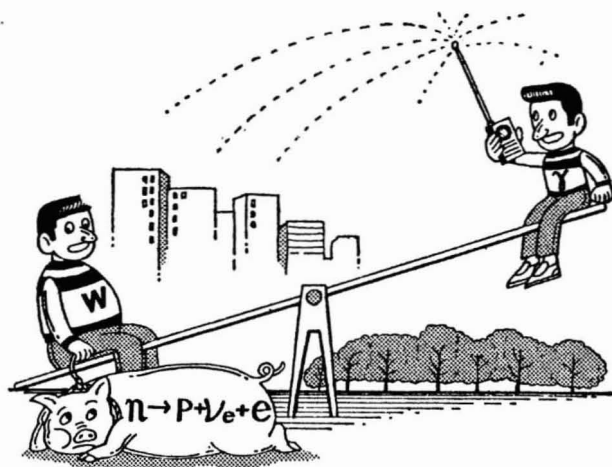
Итак, экспериментальные доказательства существования W -бозона пока отсутствуют¹⁾. Но нельзя ли оценить его массу из теоретических соображений? Немного выше мы видели, что это можно сделать при условии, что известна константа связи слабого взаимодействия. Так, может быть, эта нужная нам константа просто равна хорошо всем знакомой константе связи электромагнитного взаимодействия, т. е. элементарному электрическому заряду e ?

Не правда ли, естественная мысль? Можно сказать, что именно это простое соображение послужило исходным толчком, побудившим теоретиков заняться объединением электромагнитных и слабых взаимодействий, хотя, конечно, существовали и другие аргументы в пользу такого объединения. Например, в его пользу говорила универсальность как электромагнитного, так и слабого взаимодействий по отношению к кваркам и лептонам, иными словами, то, что в отличие от сильного взаимодействия, происходящего только между цветами кварков, как слабые, так и электромагнитные силы действуют лишь на ароматы кварков и лептонов. Не объясняются ли крайняя малость слабых сил по сравнению с электромагнитными, а также и все остальные видимые различия их свойств только тем, что массы фотона и W -бозонов не одинаковы?

Из допущения, что константа связи слабых сил равна электрическому заряду e , для массы W -бозонов получается оценка 40 ГэВ. Таким образом, эти частицы гораздо тяжелее адронов, порядок массы которых 1 ГэВ, и неудивительно, что пока их не удалось обнаружить экспериментально. Но поскольку слабые взаимодействия в отличие от электромагнитных нарушают четность, маловероятно, чтобы их единое описание свелось просто к отождествлению констант связи.

Попытки создания единой теории электромагнитных и

¹⁾ См. примечание на стр. 191.— *Прим. ред.*



Сводится ли все различие между фотоном и W -бозоном к разнице масс?

слабых взаимодействий сравнительно давно предпринимались Глэшоу, Саламом и другими авторами, но выдвигаемые ими модели сначала не имели формы построенной по всем правилам теории калибровочных полей. Окончательный вариант теории был предложен в 1967 г. независимо друг от друга Вайнбергом и Саламом; поэтому теперь единую теорию электрослабых взаимодействий называют теорией Вайнберга — Салама.

Аналогия с явлением сверхпроводимости

Выше мы указывали на явление сверхпроводимости как на один из примеров нарушения симметрии. Похожее нарушение симметрии моделируется в теории ВС. Поэтому мы попробуем изложить ее, опираясь на аналогию со спонтанным нарушением симметрии при возникновении сверхпроводимости.

Диэлектрик «прозрачен» как для электрического, так и для магнитного поля в том смысле, что оба этих поля проникают внутрь вещества. Обычные проводники прозрачны для магнитного поля, но экранируют электрическое. И наконец, сверхпроводники экранируют как электрическое, так и магнитное поле (эффект Мейснера). При этом экранировку не надо понимать так, будто поле сразу обращается в нуль при переходе через поверхность вещества: существует тонкий приповерхностный слой, в котором поле отлично от нуля.

Различие между прозрачностью среды и ее экранирующим действием аналогично различию между силами типа Кулона и типа Юкавы. Оно означает, что глубина проникновения поля в соответствующие среды либо бесконечно велика, либо ограничена. Толщину слоя вещества, в который проникает поле, естественно сопоставить с радиусом действия сил в теории элементарных частиц. Применяя сюда идею Юкавы, приходим к необходимости существования «частиц» с массой, обратно пропорциональной радиусу действия сил в данной среде.

В прозрачной среде фотоны являются безмассовыми частицами, а внутри сверхпроводника они должны вести себя как частицы с неравной нулю массой (энергией покоя). Подобные частицы называют плазмонами. Если бы мы жили внутри сверхпроводящей среды, то силы, возникающие при обмене плазмонами, мы воспринимали бы как силы типа Юкавы.

Поскольку в теории ВС единым образом рассматриваются как электромагнитные, так и слабые силы, реальная «сервировка стола» более сложна. Кроме W^\pm -бозонов и фотонов вводят еще нейтральный бозон Z^0 , ответственный за нейтральные слабые процессы типа $\nu \rightarrow \nu$, $e \rightarrow e$, при которых не изменяется, электрический заряд, т. е. процессы вида $\nu + p \rightarrow \nu + \bar{p}$, $\bar{\nu} + p \rightarrow \bar{\nu} + p$. Существование таких нейтральных процессов в природе — вопрос сложный и интересный сам по себе. Здесь мы ограничимся замечанием, что в экспериментах с нейтринными пучками, упорно проводившихся в Западной Европе и США, этот вопрос решен положительно.

Вернемся к теории ВС. Часто ее называют также калибровочной $SU_2 \times U_1$ -теорией, имея в виду, что при ее построении используется комбинация неабелева калибровочного поля с симметрией SU_2 и абелева калибровочного поля с симметрией U_1 . Чтобы понять смысл сказанного, рассмотрим действие этих полей на лептоны и кварки.

Дублеты (u, d) , (ν, e) и т. п. можно рассматривать как «частицы» со «слабым» изоспином $1/2$; симметрия теории относительно перестановок компонент внутри дублетов характеризуется «слабой» группой SU_2 . Симметрии U_1 отвечает сохраняющееся квантовое число, при помощи которого отличаются кварки от лептонов. Калибровочное SU_2 -поле является трехкомпонентным, т. е. имеет «слабый» изоспин, равный единице. «Слабый» изоспин калибровочного U_1 -поля равен нулю. Сказанное можно пояснить при помощи аналогии со случаем «сильного» изоспина. Введенные здесь калибровочные поля аналогичны пионам (π^\pm, π^0) и η -мезону. π^\pm -мезоны

соответствуют W^\pm -бозонам, а соответствующая смесь π^0 - и η^0 -мезонов — нейтральному бозону Z^0 и фотону, γ (смесь состояний понимается в том же смысле, в каком выше (гл. 18, стр. 178) понималась смесь кварков s и d в теории Кабиббо).

Компоненты четырех калибровочных полей подразделяются на электромагнитное поле γ и слабые поля W^\pm , Z^0 ; последние приобретают массу потому, что мир, в котором мы живем, представляет собой довольно сложно устроенный «сверхпроводник». Подробности математической «кухни» мы здесь опускаем, заметим только, что «сверхпроводимость» появляется в теории ВС благодаря использованию так называемого поля Хиггса (аналогичный метод рассмотрения реальных сверхпроводников разработан известным советским физиком Ландау¹⁾. Хиггсово поле и слабые поля не смешиваются друг с другом — подобно маслу и воде. Из-за этого в теории и возникает эффект Мейснера.

Теория ВС была сформулирована в 1967 г. Тот факт, что она не сразу получила признание, отчасти объясняется отсутствием в то время экспериментальных доказательств существования нейтральных слабых процессов. Другая причина скепсиса — сомнения в перенормируемости теории. Если бы теория ВС оказалась перенормируемой, ее, конечно, нельзя было бы воспринимать всерьез. Но в 1973 г. голландец т'Хоофт доказал, что теория ВС перенормируема: с этого момента она сразу приобрела высокий статус наравне с квантовой электродинамикой. Теория ВС согласуется со всеми известными в настоящее время экспериментальными данными. Но окончательно ее правильность можно будет признать лишь после экспериментального обнаружения квантов калибровочных полей W^\pm , Z^0 , кванта хиггсова поля H и т. п.

Массы частиц W^\pm , Z^0 не одинаковы, но обе должны быть больше 70 ГэВ. Отличие этой цифры от приведенной на стр. 188 простой оценки объясняется наличием в теории ВС двух констант связи, которые не совсем просто связаны с электрическим зарядом e . Но как бы то ни было, обнаружение этих частиц на эксперименте, по-видимому, дело недалекого будущего²⁾.

¹⁾ Совместно с В. Л. Гинзбургом (теория Гинзбурга — Ландау). — *Прим. перев.*

²⁾ В 1983 г. было объявлено об экспериментальном обнаружении на установке SPS в ЦЕРНе следов распада тяжелых W^\pm и Z^0 бозонов (по оценке масса W равна приблизительно 80 ГэВ, а Z — 90 ГэВ). — *Прим. ред.*

ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ



Задача объединения трех взаимодействий

Работа Вайнберга — Салама, в которой была предложена перенормируемая калибровочная теория того же ранга, что и квантовая электродинамика, позволившая навести порядок в слабых взаимодействиях, означала замечательный успех теоретической физики. Важно подчеркнуть, что успех этот был достигнут ценой отказа от независимого описания слабых и электромагнитных взаимодействий, признания того факта, что с самого начала эти взаимодействия тесно переплетены друг с другом в одних и тех же рамках.

Оказалось, что константы связи электромагнитного поля (электрический заряд e) и слабого поля W хотя и не равны друг другу, но имеют одинаковый порядок величины.

Сильные взаимодействия, как мы уже знаем, тоже описываются калибровочной теорией — квантовой хромодинамикой (КХД). Но константа связи цветового (глюонного) поля довольно велика по сравнению с электромагнитной константой связи. Более того, на стр. 161—162 мы видели, что константа связи глюонов не является постоянной величиной: она зависит от масштаба длин или, что то же, от энергии, при которой производится наблюдение.

Зависимость константы связи от используемого при наблюдении масштаба не является специфической особенностью КХД, это — общее свойство перенормируемых теорий. При этом оказывается, что поведение констант связи абелевых полей, например полей квантовой электродинамики (КЭД), противоположно поведению констант связи полей

неабелевых, а именно: в абелевом случае константа связи увеличивается с ростом энергии. Выше, при изложении КЭД, уже объяснялось, что вблизи электрический заряд кажется очень большим, а при удалении от него видимая величина электрического заряда уменьшается за счет эффекта экранирования. Поскольку экранировка не полная, с бесконечного расстояния мы видим ограниченную, не равную нулю величину, которую обычно и называют электрическим зарядом частицы.

Поэтому попытаемся рассмотреть сильное, электромагнитное и слабое взаимодействия совместно и обсудим вопрос, возможно ли их единое описание в рамках одной теории.

Изложенные выше соображения как будто бы говорят в пользу такой возможности. В самом деле, хотя электромагнитная константа связи и невелика, но она увеличивается с ростом энергии, а константа связи сильного взаимодействия, начиная с довольно большого значения, уменьшается. Поскольку слабое взаимодействие описывается неабелевыми полями, его константа связи тоже, по-видимому, уменьшается с ростом энергии.

Следовательно, может оказаться, что при некоторой энергии (или масштабе длины) все три константы связи совпадут друг с другом. Если это верно, то можно принять, что в действительности константы связи одинаковы, а три вида калибровочных полей являются просто разными компонентами единого калибровочного поля. В результате нарушения симметрии указанные компоненты вышли на разные пути эволюции и при низких энергиях стали выглядеть как совершенно различные сущности.

**Такие колоссальные энергии... Нет!
Это нелепо!**

Если бы все было действительно так, то, несомненно, это была бы прекрасная идея. Но каков порядок величины энергии, при которой возможно объединение? Для ответа на такой вопрос надо ознакомиться с одной особенностью теории перенормировок.

Константу связи g некоторого калибровочного поля обычно записывают в безразмерном виде $g^2/\hbar c$. Например, в случае электромагнитного поля это — известная постоянная тонкой структуры $e^2/\hbar c = 1/137$. Константа связи глюонного поля в КХД $g^2/\hbar c$ при энергии около 1 ГэВ равна примерно 0,3. Полагают, что она уменьшается обратно пропорционально логарифму энергии E .

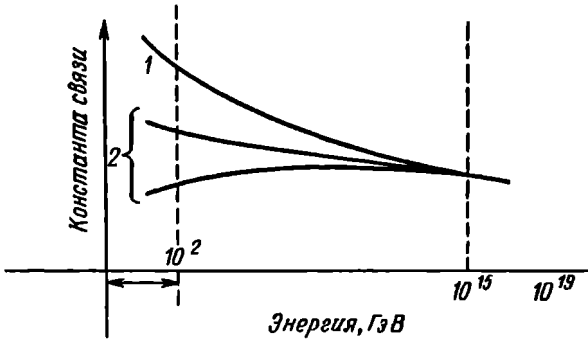


Рис. 20.1. Энергия, при которой происходит объединение электромагнитного и глюонного взаимодействий: 1 — сильное взаимодействие; 2 — электрослабое взаимодействие; 10^2 ГэВ — порядок энергии современных ускорителей; 10^{15} ГэВ — энергия объединения взаимодействий; 10^{19} ГэВ — планковская энергия.

Коэффициент пропорциональности зависит от деталей теории. В случае неабелевых полей он положителен, а для абелевых — отрицателен. В любом случае, однако, логарифмический закон означает крайне медленное изменение. Если воспользоваться логарифмической формулой, то для энергии, при которой совпадут константы связи электромагнитного и глюонного полей, получается громадное значение порядка 10^{15} ГэВ. Для сравнения заметим, что современные ускорители достигли энергии около 10^2 ГэВ, т. е. величины, меньшей в 10^{13} раз. Имеет ли смысл найденное нами значение?

Вообще-то нет оснований для безоговорочного утверждения о бессмысленности нашего результата. Например, уравнения Максвелла правильно описывают электромагнитные волны при изменении длины волны от сотен километров до 10^{-13} см. Ньютонова механика не приводит к ошибке при расчете движения как песчинки, так и небесного тела. И не уверены ли мы, что эйнштейновская теория гравитации применима ко всей Вселенной, т. е., в пересчете на длину, до расстояний порядка 10^{27} см?

Конечно, совершенно не встречаются элементарные частицы, энергия которых была бы равна «энергии объединения» 10^{15} ГэВ, но при сравнении с нашими повседневными масштабами последнее значение не так уж и велико: в массовом эквиваленте оно составляет всего 10^{-9} г. В этой связи уместно напомнить, что в теоретической физике давно известна еще бóльшая единица массы — так называемая план-

ковская масса, указывающая нижнюю границу области энергий, в которой гравитацию надо рассматривать квантовомеханически, так как она становится столь же важной, как и остальные виды сил. Количественно планковская масса равна 10^{19} ГэВ или 10^{-5} г, что в 10^4 раз больше «энергии объединения» сильного, электромагнитного и слабого взаимодействий.

Кстати, когда только появилась теория перенормировок, Ландау обратил внимание на ее связь с теорией гравитации и указал, что если число элементарных частиц (электронов, мюонов и т. п.) достигнет дюжины, то при энергиях порядка планковской должно произойти объединение электромагнитного и гравитационного взаимодействий (скорость изменения константы связи зависит от числа частиц, поэтому вычисляемая теперь энергия объединения отличается от планковской. Впрочем, ясно, что пока рано говорить о ее точном численном значении).

Неосуществленная мечта Эйнштейна

Единая теория поля имеет долгую историю, начало которой восходит к периоду, когда Эйнштейн сформулировал свою теорию гравитации. По мысли Эйнштейна, гравитация отражает геометрические свойства пространства. Например, отклонение тела, пролетающего вблизи небесного светила, от прямолинейного пути объясняется тем, что пространство вблизи светила искривлено. Эту мысль можно пояснить, сравнивая сферу и плоскость. Если двигаться по сфере все время вперед, то через один оборот вернуться в исходную точку, на плоскости же такой возврат невозможен даже по прошествии бесконечного времени. Но было бы неестественно утверждать, что указанное различие сферы и плоскости объясняется тем, что при движении по сфере на тело действует специальная сила. Согласно Эйнштейну, гравитация есть аналогичный геометрический эффект.

Кроме гравитационного существует лишь одно поле, имеющее такой же большой радиус действия,— электромагнитное; со времен Эйнштейна положение в этом отношении не изменилось. Если гравитация сводится к геометрии, то нельзя ли подобным образом рассмотреть также и электромагнетизм? Эта мысль вполне естественна, и известный математик Герман Вейль попытался создать единую теорию гравитационного и электромагнитного полей, обобщив по сравнению с Эйнштейном геометрию пространства-времени.

Впоследствии и сам Эйнштейн на склоне лет много сил отдал усовершенствованию единой теории поля, но ему так и

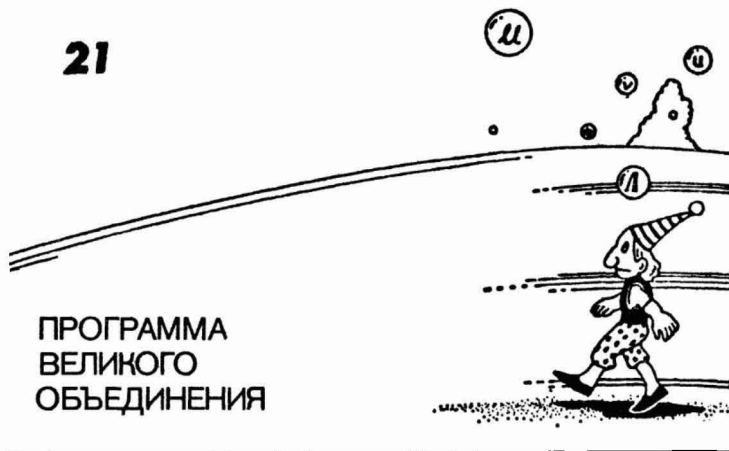
не удалось получить удовлетворительного результата. Однако идея о едином поле не умерла, посеянные Вейлем семена дали всходы в самое последнее время. Правда, содержание идеи сейчас несколько изменилось, но все равно речь идет о калибровочных полях, а ведь сам термин «калибровочное поле» предложен Вейлем.

Задача объединения трех взаимодействий и материальных частиц

В теории Вайнберга—Салама объединены не гравитационное и электромагнитное, а электромагнитное и слабое взаимодействия. Следующая ступень—включить в единую теорию также и сильное взаимодействие; именно в этом состоит суть обсуждавшейся в начале данной главы идеи. Различные варианты единой теории трех взаимодействий—слабого, электромагнитного и сильного—в настоящее время называют теориями «Великого объединения».

К сожалению, в теорию великого объединения пока невозможно включить пользующуюся большим уважением у физиков эйнштейновскую теорию гравитации. Надо думать, что в будущем когда-нибудь появится теория «Сверхвеликого объединения», включающая также и гравитационное взаимодействие. И сейчас предпринимаются многочисленные попытки в этом направлении, но гравитационное поле в математическом отношении отличается от обычных калибровочных полей. В частности, при квантовомеханическом рассмотрении его не удастся перенормировать. Поэтому по отношению к теории гравитации мы сейчас находимся примерно в таком же положении, в каком находились по отношению к квантовой электродинамике до создания теории перенормировок.

Поскольку квантовые гравитационные эффекты могут проявиться в физике элементарных частиц лишь при энергиях порядка планковской, в настоящее время невозможно также и их экспериментальное изучение. Более актуальна наряду с задачей объединения трех взаимодействий (слабого, электромагнитного, сильного) задача единого рассмотрения частиц материи—кварков и лептонов. Этот вопрос мы еще раз обсудим в следующей главе.



ПРОГРАММА ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

Последний вопрос

Уравнение эйнштейновской теории гравитации, показывающее, каким образом гравитационное поле определяется распределением вещества, имеет вид

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu}^{\nu}$$

Тот, кто не знаком с математическим смыслом входящих в эту формулу выражений, не в состоянии полностью оценить ее красоту; говоря приблизительно, левая часть уравнения описывает искривление пространства-времени, т. е. гравитационное поле, а в правой части стоит энергия вещества, т. е. частиц, электромагнитного поля и всех остальных заполняющих пространство-время объектов. G —ньютоновская постоянная тяготения.

Сам Эйнштейн испытывал чувство неудовлетворенности своим уравнением, которому, по его мнению, не хватало гармонии частей. Если провести сравнение со зданием, то левая часть уравнения напоминала прекрасный мраморный дворец, а правая—жалкий деревянный сарайчик, сколоченный из необработанных досок. Такое различие объясняется тем, что выражение для гравитационного поля в левой части основано на красивых и простых геометрических принципах, а правая часть имела очень сложную неуниверсальную структуру

Правда, среди членов правой части исключение составляло электромагнитное поле, которому, поскольку оно является калибровочным, можно, как мы уже знаем, придать геометри-

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu}$$



Эйнштейн недоволен.

ческий смысл. Согласно теории ВС и КХД, поле слабых сил и глюонное — тоже калибровочные. Остаются материальные частицы, т. е. лептоны и кварки. Естественно, что в теории великого объединения материальные частицы тоже нужно трактовать единым образом, наравне с полями. Но существуют ли геометрические принципы, применимые также и к частицам материи?

Определенного ответа на этот последний вопрос пока не дано. Предложена, правда, так называемая теория суперсимметрии, согласно которой фермионы (т. е. частицы материи) и бозоны (силовые поля) можно трактовать единым образом, но главный вопрос заключается в том, почему частицы материи имеют свойственное им распределение масс. В распределении масс всевозможных лептонов и кварков не удается усмотреть никакой регулярности. В этом главный источник сложности правой части уравнения Эйнштейна. Применимость геометрических принципов и принципов суперсимметрии к безмассовым частицам — факт сравнительно простой и не очень глубокий.

Теории Великого объединения не дают удовлетворительного ответа на поставленный выше коренной вопрос, но в качестве первого шага на пути к его решению они предлагают рассматривать кварки и лептоны единым образом.

Ниже мы ознакомимся с типичным вариантом теории Великого объединения — SU_5 -теорией Джорджи — Глэшоу.

Теория Великого объединения Джорджи — — Глэшоу

Выше несколько раз повторялось, что различие между кварками и лептонами сводится к вопросу, участвует ли соответствующая частица в сильном взаимодействии или нет. Естественно, что при объединении сильного взаимодействия со слабым и электромагнитным лептоны и кварки надо рассматривать единообразно. Для этого связь между кварками и лептонами можно уподобить связи между заряженными и нейтральными частицами.

Мы знаем, что кварки и лептоны имеют ароматы и по отношению к слабому взаимодействию разбиваются на дублеты вида (u, d) , (ν, e) . Если отвлечься от смешивания Кабиббо (стр. 178) и т. п., то между разными дублетами отсутствуют переходы.

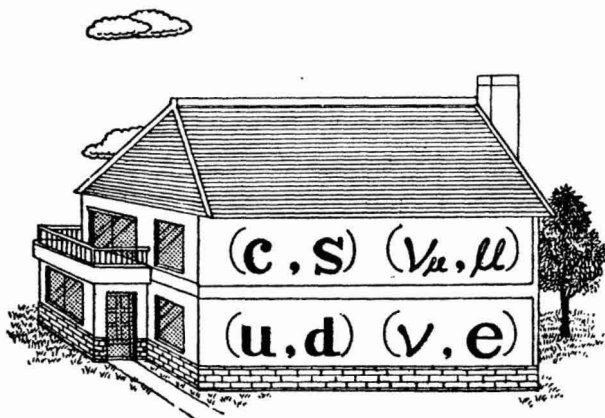
Поэтому попробуем сначала связать два самых легких дублета (u, d) , (ν, e) . Их можно считать частицами первого поколения (определение поколений см. на стр. 180); следующее за ними второе поколение состоит из дублетов (c, s) , (ν_μ, μ) . Поскольку разные поколения отличаются только массами, связь внутри первого поколения не изменится при включении в рассмотрение следующих поколений.

При учете цветов кварков число кварков первого поколения будет равно шести, а число лептонов — двум. Если, кроме того, учесть классификацию на левые и правые частицы, то будет, например, только одно левое нейтрино ν_L (и правое антинейтрино $\bar{\nu}_R$). Даже если бы правое нейтрино и существовало, оно не участвовало бы в известном в настоящее время слабом взаимодействии. Принимая во внимание все эти обстоятельства, Джорджи и Глэшоу предложили следующую SU_5 -теорию.

Подобно тому как в основу SU_3 -модели кварков был положен фундаментальный триплет (u, d, s) , в основу SU_5 -теории кладутся два фундаментальных пентаплета левых и правых частиц:

$$\begin{pmatrix} \bar{d}_R \\ \bar{d}_G \\ \bar{d}_B \\ e \\ \nu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} d_R \\ d_G \\ d_B \\ \bar{e} \\ \bar{\nu} \end{pmatrix}_R$$

Вы спросите: а как остальные частицы? Ответ на этот вопрос будет дан позже.



Первое и второе поколения кварков и лептонов.

Если принять, что все частицы внутри пентаплета эквивалентны, то получится теория с симметрией SU_5 , при которой допустимы любые перестановки указанных частиц. Если же разделить первые три и последние две частицы и ограничиться только перестановками внутри таких подмножеств, то симметрия соответствующих преобразований будет описываться группами SU_3 и SU_2 .

Как ясно из приведенной записи пентаплетов, группа SU_3 описывает переходы между цветами кварков, а SU_2 — между ароматами лептонов, т. е. эти группы относятся соответственно к сильному и слабому взаимодействиям. Заметим, кроме того, что, согласно $V-A$ -теории, кварки $(\bar{d}_i)_L$ и $(d_i)_R$ не принимают участия в слабом взаимодействии. Следовательно, в данном случае речь идет о цветовой группе симметрии SU_3 и группе SU_2 , фигурирующей в теории ВС.

Рассматриваемая в теории ВС группа U_1 связана с квантовым числом, при помощи которого различаются кварки (первые три компоненты пентаплетов) и лептоны (последние две компоненты). Распределение электрического заряда по компонентам пентаплетов

$$\begin{pmatrix} 1/3 \\ 1/3 \\ 1/3 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} -1/3 \\ -1/3 \\ -1/3 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}_R$$

таково, что средний заряд пентаплета равен нулю (это правило соответствует гипотезе кварков Гелл-Манна и Цвейга).

Существуют ли частицы, представляющие более глубокий уровень организации материи, чем кварки и лептоны?

Как же рассматриваются в SU_5 -теории кварк u и все остальные частицы? Ответ на этот вопрос немного сложен, но в общих чертах он сводится к тому, что если интересоваться только квантовыми числами, то остальные частицы ведут себя как образования, составленные из компонент правых пентаплетов. В этом отношении SU_5 -теория напоминает старую модель Сакаты (см. стр. 98).

Напомним, что в модели Сакаты фундаментальными частицами — носителями ароматов группы SU_3 — считались протон, нейтрон и лямбда-частица, а остальные барионы, именно сигма- и кси-частицы, строились как составные системы, образованные из указанных трех фундаментальных частиц.

Заметим, что использованный в SU_5 -теории прием не нов для теоретиков, занимающихся построением составных моделей. По существу он сводится к выбору минимально возможного для данной симметрии числа частиц в качестве фундаментальных составляющих и представлению остальных частиц как систем, составленных из выделенных частиц. Но ведь замена модели Сакаты моделью кварков как раз и объяснялась неразумностью выделения из восьми барионов трех как более фундаментальных.

Не повторится ли подобная история в случае SU_5 -теории? Не окажется ли, что компоненты пентаплетов являются частицами, принадлежащими более глубокому слою организации вещества, чем кварки и лептоны?

Высказанные сомнения, конечно, естественны, и теоретики уже дали волю своему воображению в направлении конструирования соответствующих моделей. Однако не ясно, нужно ли идти по такому пути. Дело в том, что в отличие от адронов в случае кварков и лептонов нет никаких признаков наличия пространственной протяженности у составных систем. Поэтому даже с помощью существующей схемы SU_5 можно построить теорию, в которой частицы одного поколения совершенно эквивалентны друг другу.

Основная цель SU_5 -теории — объединение кварков и лептонов. Считается, что по существу они неразличимы, но в



«Век журавля» — тысяча лет, «черепахи» — десять тысяч, а протона — 10^{30} лет?

результате происходящего по той или иной причине спонтанного нарушения симметрии пентаплет расщепляется на триплет кварков и дублет лептонов, которые в области «низких энергий» приобретают совершенно разные свойства. Поскольку «низкими» считаются энергии, малые по сравнению с энергией объединения, для теории нежелательно, чтобы симметрия кварков и лептонов проявлялась уже в современных экспериментах.

Поразительный вывод: все вещество нестабильно!

Тем не менее уже сейчас в SU_5 -теории сделан один очень важный вывод: между кварками и лептонами возможны переходы. Собственно говоря, в противном случае не было бы смысла вводить пентаплеты. Заметим кстати, что кварки, будучи составными элементами барионов и атомных ядер, являются носителями так называемого барионного числа. Обычно считают, что барионное число строго сохраняется подобно электрическому заряду. Однако в результате нарушения SU_5 -симметрии закон сохранения барионного числа должен нарушаться. Атомные ядра могут превращаться в лептоны, элементы должны исчезать! Например, возможен распад протона

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

Это серьезная проблема, мимо которой нельзя пройти просто так. Прежде всего в голову приходит вопрос: не ошибается ли в данном случае теория SU_5 ? Однако, вообще говоря, нет оснований считать, что барионное число должно сохраняться столь же безусловно, как электрический заряд. Дело в том, что не существует сил кулоновского типа (калибровочных полей с большим радиусом действия), пропорциональных барионному числу. Таким образом, отсутствует механизм, гарантирующий его сохранение.

Экспериментальных доказательств распада протона не существует, а его время жизни сейчас оценивается как величина порядка 10^{30} лет. Это очень много по сравнению с возрастом нашей Вселенной (10^{10} лет), так что нет оснований для беспокойства об исчезновении вещества, но с принципиальной точки зрения вопрос имеет важное значение. Кстати, если бы теоретическая оценка оказалась чуть меньше, чем 10^{30} лет, и немного поднапряглись экспериментаторы, то уже сейчас можно было бы наблюдать эффекты, связанные с распадом нуклонов. Поэтому во многих странах разрабатываются проекты соответствующих экспериментов.

Попытки Великого объединения начались совсем недавно, еще нет твердо установленной теории и остается масса нерешенных проблем. Общая черта всех вариантов теории — крайне большое значение энергии объединения. Некоторые физики утверждают, что после создания следующего поколения ускорителей (10^3 ГэВ) не будет наблюдаться никаких существенно новых явлений до тех пор, пока энергия ускорителей не достигнет значений порядка 10^{15} ГэВ. Этот огромный энергетический интервал объявляют «бесплодной пустыней», подобной Сахаре. Если это действительно так, то в текущем столетии физика элементарных частиц, вероятно, зайдет в тупик.

Слияние физики элементарных частиц и космологии

Достичь энергии 10^{15} ГэВ в лаборатории невозможно, но физики обдумывают возможности использования для этой цели других явлений. Прежде всего речь идет о космологии. Изложение этой науки не входит в задачу моей книги, поэтому я не смогу дать здесь детальных объяснений, укажу только, что, согласно общепринятой в настоящее время точке зрения, наша Вселенная образовалась примерно $2 \cdot 10^{10}$ лет назад в результате Большого взрыва и продолжает свое расширение до сих пор.

Это расширение описывается уравнением Эйнштейна (стр. 197). Размер Вселенной изменился от величины порядка планковской длины 10^{-33} см до современного значения порядка 10^{28} см. Планковская длина — параметр размерности длины, обратно пропорциональный планковской массе 10^{19} ГэВ (см. стр. 195), поэтому сжатое в таком малом объеме вещество начинало свою эволюцию с энергии (или температуры) порядка планковской. Нетрудно понять, что тип эволюции Вселенной зависел от свойств элементарных частиц и калибровочных полей.

В частности, надо объяснить, почему вещество нашей Вселенной состоит из барионов (протонов и нейтронов), а антибарионы во Вселенной отсутствуют. Барионное число Вселенной огромно (10^{80}), хотя оно, казалось бы, должно равняться нулю вследствие симметрии относительно замены частиц античастицами (*C*) (указанное значение барионного числа мало по сравнению с числом фотонов во Вселенной (10^{88}), но присутствие большого количества фотонов неудивительно, так как оно не имеет отношения к зарядовой симметрии).

Теория объединения позволяет решить этот вопрос. В этой книге неоднократно говорилось, что слабое взаимодействие нарушает многие законы сохранения. Недавно было показано, что если учесть несохранение *CP*-четности и барионного числа (распад протона), то можно удовлетворительно объяснить, как в ходе эволюции Вселенной образовалась диспропорция между числом барионов и антибарионов.

Другая интересная проблема — масса нейтрино. Ее экспериментальное значение крайне мало, и обычно считают, что нейтрино — безмассовая частица. Однако строгого теоретического запрета, такого, как для массы кванта калибровочного поля, в данном случае не существует; поэтому в принципе масса нейтрино может быть отлична от нуля. В последнее время появились эксперименты, как будто бы подтверждающие такую возможность. Если действительно окажется, что нейтрино — массивная частица, то это будет означать наличие во Вселенной довольно значительной «скрытой» массы.

Заключение

Итак, оказалось, что физика элементарных частиц и космология теснейшим образом взаимосвязаны и помогают друг другу в решении общих проблем. Это прекрасно, но вот вопрос: действительно ли существует предсказываемая приближительными теориями великого объединения бесплодная

«энергетическая пустыня»? Лично я не придерживаюсь такого мнения. Независимо от успехов теории калибровочных полей в физике остается еще огромное количество нерешенных проблем, а как показывает опыт развития науки, природа часто оказывается сложнее и богаче наших представлений о ней. Думаю, что так будет и впредь.

Чему по-настоящему нельзя не поражаться, так это тому, что мы вновь и вновь оказываемся в состоянии разгадывать тайны природы. Человечество, составляющее ничтожную долю окружающего вещества, существующее лишь краткий миг по сравнению с огромным интервалом в двадцать миллиардов лет, отделяющим его от момента образования Вселенной, открывает ее законы, узнает историю ее развития и, наконец, понимает, что само вещество не вечно! Разве это не удивительно?

ОБЪЯСНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЕРМИНОВ

Абелевы и неабелевы группы

Известно, что $2+3=3+2$, $2\times 3=3\times 2$.

Однако если человек сначала пройдет вперед, а потом повернет направо, то результат его движения не совпадет с результатом для случая, когда он сначала повернет направо, а потом пройдет вперед. Таким образом, операции сложения и умножения обычных чисел коммутативны (результат не зависит от порядка выполнения операций), а операции прямолинейного движения и поворота некоммутируют (результат изменяется при изменении порядка выполнения операций).

Группу, все операции которой коммутативны, называют абелевой. В противном случае группа неабелева. Совокупность всех вращений вокруг одной и той же оси образует абелеву группу, а совокупность вращений вокруг разных осей (вращений в трехмерном пространстве) — неабелеву группу. В гл. 8 указывалось, что в квантовой механике моментом количества движения называют величину, сохранение которой обусловлено симметрией относительно вращений в пространстве. Электрический заряд частицы в математическом отношении похож на компоненту момента количества движения, связанную с поворотами вокруг одной и той же определенной оси. Напротив, изоспин поля Янга — Миллса (величина, заменяющая в теории Янга — Миллса электрический заряд), как указывает само его название, математически напоминает момент количества движения, связанный с вращениями в трехмерном пространстве. Этим объясняется, почему электромагнитное поле называют абелевым калибровочным полем (абелевым полем), а поле Янга — Миллса — неабелевым калибровочным полем (неабелевым полем).

Возбужденные состояния

Составные частицы (атомы, атомные ядра, адроны), как правило, имеют много энергетических уровней; состояния с наименьшей энергией называют основными, а остальные

состояния — возбужденными. Возбужденные состояния, вообще говоря, нестабильны: распадаясь с испусканием фотонов и других частиц, они возвращаются в основное состояние, которое, таким образом, является обычным состоянием составной системы.

Для перевода системы в возбужденное состояние ей надо сообщить определенную энергию от какого-либо внешнего источника. Один из способов сделать это — инициировать процесс, обратный процессу распада. Например, бомбардируя составные частицы мишени фотонами, можно вызвать нужную реакцию, если подобрать энергию фотонов так, чтобы она совпадала с энергией, необходимой для возбуждения системы (энергией возбуждения); рассеяние фотонов, возникающее за счет их обратного излучения при распадах возбужденного состояния, наблюдается как резонансное рассеяние.

Квантование

В квантовой механике часто бывает, что физическая величина (ее собственные значения) не может изменяться непрерывно, а принимает только некоторые определенные значения, удовлетворяющие «квантовым условиям». Процедуру нахождения значений физической величины, удовлетворяющих таким условиям, называют квантованием этой величины. Например, квантованы энергия и момент количества движения внутриатомных электронов. Фотоны возникают в результате квантования колебаний в электромагнитных волнах. О (внутренних) квантовых числах электрического заряда, изоспина и т. п. говорят потому, что соответствующие физические величины тоже считают квантованными.

Комптоновская длина волны

В основу системы единиц физических величин кладут единицы длины, времени и массы; единицы всех других величин можно выразить через эти три. Легко убедиться, однако, что три основные единицы можно переводить друг в друга при помощи соответствующих комбинаций скорости света c и постоянной Планка \hbar с одновременным использованием эйнштейновского соотношения между энергией и массой $E = mc^2$ и соотношений Эйнштейна и де Бройля между энергией и импульсом частицы, с одной стороны, и ее частотой и волновым числом — с другой (см. *Соотношения Эйнштейна и де Бройля*).

Комптоновской длиной волны элементарной частицы называют ее массу m , выраженную в единицах длины; соответствующая длина равна \hbar/mc . Она выражает характерный размер волнового пакета, сопоставляемого частице в квантовой механике. Комптоновская длина волны электрона составляет $1/137$ размера атома водорода, т. е. равна примерно 10^{-11} см. В случае пиона комптоновская длина волны имеет порядок размера атомного ядра (10^{-13} см).

Лэмбовский сдвиг

Лэмбовским сдвигом уровней атомных электронов называют незначительную разницу между истинными значениями уровней и значениями, рассчитанными по уравнению Дирака. Этот эффект был обнаружен в 1947 г. сотрудником Колумбийского университета (США) Лэмбом. Как раз в это время была создана теория перенормировок, и лэмбовский сдвиг оказался первым физическим эффектом, на котором подтвердилась ее правильность. Он возникает в результате «размывания» электрона за счет эффекта отдачи при непрерывном испускании и обратном поглощении виртуальных фотонов. За свою работу Лэмб был удостоен Нобелевской премии.

Планковская масса (энергия)

При обсуждении свойств элементарных частиц силу тяжести обычно игнорируют ввиду ее исключительной малости по сравнению с электромагнитными и слабыми силами. Однако оказывается, что при очень больших энергиях, или, что то же, малых расстояниях, силу тяжести надо рассматривать квантовомеханически, и тогда вызываемыми ею эффектами уже нельзя пренебречь. Порядок величины соответствующей энергии называют планковской массой (планковской энергией); эта величина дается выражением

$$(\hbar c/G)^{1/2},$$

где G —ньютоновская постоянная тяготения, c —скорость света, \hbar —постоянная Планка. Планковская масса равна $2 \cdot 10^{-3}$ г, планковская энергия— 10^{19} ГэВ. Соответствующие длина (комптоновская длина волны) и время составляют 10^{-33} см и 10^{-43} с; их называют планковской длиной и планковским временем.

Рассеяние

Изучение рассеяния — основной экспериментальный метод физики элементарных частиц. Явление рассеяния аналогично игре в бильярд; оно возникает, когда какая-нибудь одна частица сталкивается с другой. В результате рассеяния частица может перейти в возбужденное состояние, изменить свою природу, превратиться в две (и более) других частицы и т. п.; такие случаи называют неупругим рассеянием, а рассеяние, подобное столкновению бильярдных шаров, — упругим.

Частица мишени облучается потоком налетающих частиц. Сечением рассеяния называют число частиц, рассеянных за 1 с при условии, что на 1 см² поверхности мишени за 1 с налетает одна частица. Сечение, а также распределение вероятностей направлений рассеяния (угловое распределение) — основные экспериментальные характеристики взаимодействий изучаемых частиц.

Соотношения неопределенностей Гейзенберга

В квантовой механике принципиально невозможно одновременное определение (с бесконечно высокой точностью) координаты частицы x и ее импульса p . Произведение неопределенностей этих величин (разбросов их значений) Δx и Δp не может быть меньше постоянной Планка \hbar . Такое же соотношение справедливо для неопределенностей моментов времени и энергии.

Источник соотношения неопределенностей — волновые свойства частиц в квантовой механике. Волна по самому смыслу этого понятия — протяженный объект. При увеличении длины волны (ее периода) возрастает пространственная (временная) протяженность волны, а поскольку по соотношениям Эйнштейна и де Бройля (см. ниже) эти протяженности обратно пропорциональны импульсу (энергии) частицы, и возникают указанные ограничения.

Если импульс частицы p определен точно, т. е. неопределенность $\Delta p = 0$ (неопределенность Δx бесконечно велика), то частица находится в собственном состоянии с собственным значением p .

Соотношения Эйнштейна и де Бройля

Энергия E и импульс p свободной частицы прямо пропорциональны частоте ν (величине, обратной периоду колебаний) и волновому числу k (величине, обратной длине волны)

бегущей волны, сопоставляемой частице при ее квантовомеханическом описании:

$$E = h\nu, \quad p = hk$$

Здесь h —постоянная Планка. Первое из этих соотношений в применении к частицам введено Эйнштейном, а второе—де Бройлем. Для упрощения записи формул вместо h часто пользуются величиной $\hbar = h/2\pi \sim 10^{-27}$ эрг·с.

Флуктуации (разброс значений)

Наличие флуктуаций означает, что физическая величина не принимает строго определенного значения, а изменяется беспорядочным образом. Причиной такого явления может быть, в частности, взаимодействие со сложным окружением. Однако в квантовой механике случайный разброс значений физических величин вводится как одна из фундаментальных особенностей теории. За исключением специальных случаев (когда система находится в собственных состояниях), разброс значений всегда имеет место, и избавиться от него в принципе невозможно.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Адроны 21, 22, 26, 93, 11, 141
— бесцветные 115
— генерация множественная 141
— цветные 117
Аннигиляция 21, 48
Античастицы 21, 49, 50, 52
Антиэкранирование 163
Аромат 114, 115
Атом водорода 52
Атомы 12, 14
- Барions 21, 22, 105, 204
— семейство 71
Бозоны 51, 57
— виртуальные 57
— W 184
— W^\pm , Z^0 , масса 191
- Вакуум 166
Величина I_1 см. Изоспин, проекция I_1
— Q см. Энергия продуктов распада кинетическая
— R см. Рассеяние, сечение, сумма квадратов заряда
Взаимодействие (см. также Потенциал, Силы, Поля калибровочные)
— сильное 63, 69, 76, 90, 132, 188, 199
— слабое 69, 175, 177, 188
— время жизни 67, 68, 177
— контактное 177, 182
— процессы нейтральные 190
— типа $V-A$ 177
— электромагнитное 69, 188
Волны $НГ$ 168
Времена жизни 67, 68, 117, 203
Время планковское 208
- ГИМ** 179
Гиперзаряд 71
Глюоны 147, 158, 162
— константа связи 192
Гравитон 50
Группа SU 99
— SU_2 99
- Группа SU_3 99
Группы абелевы 206
— неабелевы 206
ГэВ 36
- Действие на расстоянии 46, 47
Дейтон 52, 111
Длина волны 83
— комптоновская 52, 57, 58, 207, 208
— планковская 208
Дублеты кварков 180, 190, 199
— лептонов 180, 190, 199
- Заряд электрический 49, 154, 192
— голый 153, 160, 161
— наблюдаемый 160
— цветовой 160, 161
— голый 160
— наблюдаемый 160
- Изоспин (I) 59, 72, 75
— проекция I_1 , 59, 99
— сильный 191
— слабый 191
Изотопы 28, 111
Импульс 83
Инвариантность калибровочная 170
— CP , нарушение 88
— трансляционная 170
Инверсия комбинированная (CP) 89
— пространственная (P) 59, 84, 85
- Камера Вильсона 29
— пузырьковая 29
Каоны (K) 73, 86, 89
Квантование 207
Кварк b (bottom, beauty; красота) 35, 128
— c (charm; очарование) 125, 126, 178
— d (down; проекция изоспина «вниз») 27, 104
— s (strange; странный) 104

- Кварк t (top, truth: истина) 35, 128
 — u (up; проекция изоспина «вверх») 27, 104
 Кварки 18, 19, 21, 23, 26, 27, 29, 32, 103, 104, 109, 140, 162, 188, 198
 — динамика 162
 — происхождение массы 171
 — удержание в адронах (неразъединимость) 158, 163
 Киральность 171, 172
 Константа связи 58, 193
 — слабого взаимодействия типа $V-A$ 177
 — поля мезонного 58
 — цветowego 192
 — электромагнитного 58
 Космология 203, 204
 КХД 160
 КЭД 149

 Лептон τ см. Частица τ
 Лептоны 19, 22, 63, 188, 199

 Масса планковская 208
 Мезон *Юкавы* 16, 20, 52, 61, 182
 Мезоны 20, 21, 22, 52, 61, 98, 156
 — векторные (ω , ρ , K^* , ϕ) 112
 — семейство 71, 100
 Метод встречных пучков 39
 Механика квантовая 44
 — релятивистская 47
 Модели систем, построенных из кварков 110
 Модель (см. также Теория)
 — атома боровская 43
 — *Гелл-Манна* и *Цвейга* 120
 — *Кара* и *Намбу* 118, 120₃
 — кварков 104, 134, 146
 — барионы 105
 — *Кобяси* и *Маскавы* шестикварковая 98, 180
 — *Маки* и *Хара* четырехкварковая 98, 178
 — мешка 139
 — *НИЛ* 171
 — партонная 147
 — *Сакаты* 98, 103
 — струнная 147
 — *Ферми* и *Янга* 95
 — *SU*, 199
 Момент количества движения орбитальный 180
 — спиновый см. Спин
 МЭВ 36

 Мюоны 20, 60, 61
 — масса 61
 — время жизни 68

 Нейтрино 10, 22, 87, 172, 185—188, 190
 — левое 87, 88, 172
 — масса 204
 — мюонное 60
 — правое 87, 88, 172
 — электронное 60
 Нейтрон 20, 52, 59, 63, 98
 — время жизни 68
 Нуклоны 20, 52
 — размер 24

 Обращение времени (T) 91
 Объединение взаимодействий электромагнитного и сильного (трех) 192, 196
 — слабого 188

 Партоны 144, 147
 — нейтральные 147
 Пары куперовские 170
 — электрон-позитронные виртуальные 151
 Перенормировка 150
 Пионы 20, 59
 — время жизни 68
 — масса 59
 Позитрон 21, 48
 Поколения 180
 Поле глюонное, некоммутативность 159
 — гравитационное 46, 157
 — классическое 49, 52
 — *Хиггса* 191
 — ядерных сил 45, 52
 — квант 45, 52
 Поля калибровочные 157, 196
 — абелевы 157, 192, 206
 — неабелевы 157, 193, 206
 — цветowe 147, 182
 — кванты 147, 158
 — W^\pm , Z^0 191
 — сил (силовые) 46, 51, 198
 — *Янга* — *Миллса* 160, 161
 Порядок величины 36
 Постоянная Планка 47
 — тонкой структуры 154
 — *Ферми* 177, 185
 Потенциал Кулона 56
 — *Юкавы* 56

214 ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Правило масштабной инвариантности
 Бёркена 143
 — *ННГ* 71, 74, 98
 Проблема τ — θ 87
 Протоны 25, 52
 — время жизни 203
 Путь восьмеричный 71
 Пучок нейтрино 185—188, 190
 — пионов 185

 Рассеяние 24, 209
 — диаграммы 137
 — дуальность 138
 — кулоновское 25
 — неупругое 26, 142, 143
 — распределение угловое 25
 — энергетическое 25
 — резонансное 79, 80
 — сечения 24, 77, 118
 — сумма квадратов зарядов R 119, 129
 — степень неупругости 143
 — угол 25
 — упругое 26, 142, 143
 Резонанс 3-3 78
 Резонансы 77, 78, 79, 80, 93, 101
 Рождение пар 21

 Сверхпроводимость 170, 189
 Свобода асимптотическая 160, 163
 Сдвиг уровней лэмбовский 208
 Силы (см. также Взаимодействие, Поля калибровочные)
 — гравитационные 24, 46
 — типа *Кулона* 24, 56, 190
 — — *Юкавы* 24, 56, 190
 — ядерные 24, 46, 63, 69, 156
 — радиус действия 24, 57, 190
 Симметрия 82, 83, 165
 — изотопическая 99
 — киральная 171
 — нарушение спонтанное 166, 168
 — SU_2 99
 — SU_3 по ароматам 99
 — SU_3 цветовая 158
 — смесь *Кабиббо* 178, 199
 — Соотношение между спином и статистикой *Паули* 51
 — неопределенностей *Гейзенберга* 23, 57, 209
 — Соотношения *Эйнштейна* и *де Бройля* 83, 209
 — Спряжение зарядовое (C) 89
 — Состояния возбужденные 206
 — резонансные см. Резонансы

 Сохранение гиперзаряда 76
 — заряда электрического 83, 170
 — изоспина 76, 83
 — импульса 83
 — момента количества движения орбитального 83
 — странности 65
 — — нарушение 69
 — четности 85, 86
 — числа барионного, нарушение 202
 — энергии 83
 Спин 47, 50, 80
 Статистика *Бозе* 51
 — пара-ферми 114
 — *Ферми* 51
 Странность 65, 71, 99
 Структура протонов и нейтронов 27
 Струна 139

 Теорема *CPT* 91
 Теория (см. также Модель)
 — *БКШ* 170
 — *Вильсона* решеточная 163
 — *BC* 182
 — *Гинзбурга*—*Ландау* 191
 — гравитации эйнштейновская 197
 — Теория *Джорджи*—*Глэшоу* великого объединения 199
 — *ИОО* 99
 — *Кабиббо* 178, 180
 — *Кобаяси* и *Маскавы* 180
 — относительности общая 55
 — — частная 47
 — перенормировок 152
 — поля 46
 — квантовая 150
 — суперсимметрии 198
 — типа $V-A$ 177
 — *Ферми* 185
 — цветových калибровочных полей квантовая 147, 160
 — электромагнетизма максвелловская 46
 — *Юкавы* мезонная 46, 156, 182
 — *Янга*—*Миллса* 85
 — SU_3 99, 100, 113, 115, 199
 — SU_3 199—202
 — SU_6 111
 — Токи нейтральные 179
 — Точка материальная 49
 — Траектории *Редже* 133
 — Тритон 111

 Уравнение *Дирака* 47, 48
 — *Клейна*—*Гордона* 52

- Уравнение Лапласа 46
 — Шредингера 44, 47
 Уравнения Максвелла 49
 — Эйнштейна 46, 197
 Ускорители 35
- Фермионы 51, 52
 Ферромагнетизм 167
 Флуктуации 210
 Формула Гелл-Манна и Окубо массовая 108
 — ННГ 71, 74, 76
 Фотон 26, 50
 Фотоны 36, 78, 56
 — виртуальные 151
 — число во Вселенной 204
 Фотоземля 62
 Функция волновая, фаза 84
- Хромодинамика 158
 — квантовая (КХД) 160
- Цвет 114, 115, 116, 158, 188
 — интенсивность 161, 162
- Частица (см. также Гравитон, Дейтон, Кварк, Мезон Юкавы, Нейтрино, Нейтрон, Позитрон, Резонанс 3-3, Тритон, Фотон, Электрон)
 — голая 153
 — классическая 49, 52
 — точечная 143, 151
 Частица альфа (α) 43
 — джипси (J/ψ) 120, 123, 128
 — ипсилон (Υ) 128, 180
 — кси (Ξ) 101
 — лямбда (Λ) 20, 98, 104
 — омега-минус (Ω^-) 108, 113
 — сигма (Σ) 101
 — тау (лептон τ) 21, 122, 127
- Частицы (см. также Адроны, Античастицы, Барions, Бозоны, Глюоны, Кварки, Лептоны, Мезоны, Мионы, Нуклоны, Партоны, Пионы, Протоны, Резонансы, Фермионы, Фотоны, Электроны) 21
 — виртуальные 67
 — размер 23, 24
 — составные 96
 — странные 75
 — фундаментальные 96
 — элементарные 96
 — V, совместное рождение 64
 Четность 59, 85
 — несохранение 86
 — CP 90
 Числа квантовые 21, 59, 99, 165
 Число барийное 204
- Эйсы 103
 Экранирование 163, 189, 190
 Электродинамика квантовая (КЭД) 149, 150, 152
 Электрон (e) 19, 21, 43, 51, 150
 — дираковский 47
 — заряд 153
 — магнитный момент 149
 — масса 153
 — размер 151, 152
 Электронвольт (эВ) 36
 Электроны 25
 Элемент 11
 Энергия 83
 — в системе покоя центра инерции 39
 — объединения взаимодействий 194
 — отдачи 39, 60
 — планковская 208
 — продуктов распада кинетическая (Q) 67, 68
 — связи 28, 96, 112
 — собственная 150, 151
 Эффект Мейснера

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Андерсон 49, 61
Аристотель 12

Бардин 170
Боголюбов 115, 150, 170
Бозе 51
Бор 48
Бьёркен 143

Вайнберг 183, 189
Вайскопф 151
Вейль 195
Вигнер 150
Вильсон 163
Вильчек 191
Ву 87

Гейзенберг 43, 59, 150
Гелл-Манн 18, 26, 65, 103
Гинзбург 191
Глэшоу 179, 183, 189, 199
Гринберг 114
Гросс 160
Гюрсей 111

Дайсон 152
де Бройль 83, 209
Декарт 45
Демокрит 13
Джонсон 139
Джорджи 199
Дирак 45, 47, 48, 150

Зоммерфельд 154

Иваненко 45
Икэда 99
Иллиопулос 179
Иноуэ 62
Иона 171

Кабиббо 178, 191
Кара 114
Киношита 150, 155
Кобаяси Макото 180
Кобаяси Минору 97
Кронин 89
Купер 170

Ландау 89, 191
Ласинио 171
Ледерман 87
Ли 86
Лоренц 151
Лоу 104

Майани 179
Маки 179
Максвелл 46, 47
Марков 74, 144
Маскава 180
Милликен 29
Миямото 115
Морпурго 33

Накано 74
Намбу 36, 115, 171
Нееман 104
Нетер 82
Нишиджима 74

Огава 99
Онуки 99

Паули 51, 150
Пауэлл 62
Перл 122, 127
Подольский 45
Палитцер 160
Пуанкаре 45

Радзикатти 111
Редже 133

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 217

Резерфорд 43
Рихтер 121

Саката 61, 97, 179
Сакита 111
Салам 168, 183, 189
Струминский 115

Тавхелидзе 115
Такэцани 94
Тамм 45
Танигава 61
Тинг 121
Томонага 97, 149
т'Хоофт 160, 191

Фейнман 97, 145
Фербанк 33
Ферми 97
Фитч 89
Фок 45

Хара 179
Хофштадтер 142

Цвейг 26, 104

Чандрасекар 86

Швингер 74, 97, 152
Шредингер 48
Шриффер 170

Эйнштейн 47, 195, 197

Юкава 94

Ямаути 99
Янг 85

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА	5
ПРЕДИСЛОВИЕ	9
1. О ПОНЯТИИ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЧАСТИЦЫ	11
Вопросы, которые могут и не иметь ответа 11	
О сохраняющихся величинах и законах при- роды 13	
Что значит «действительно существо- вать»? 14	
2. КВАРКИ И ЛЕПТОНЫ	18
Совершенно новые фундаментальные части- цы— кварки, которых пока никто еще не наблюдал 18	
Барионы, лептоны, мезоны 19	
Что такое «размер» частицы? 23	
Об информации, извлекаемой из экспери- мента по рассеянию 24	
3. ПОИСК КВАРКОВ	27
О структуре протонов и нейтронов 27	
Поиск частиц с дробным электрическим зарядом 29	
4. ОБ УСКОРИТЕЛЯХ	34
Чем сильнее удар, тем мощнее звучание природы 34	

	Принципы работы ускорителей	35
	Метод встречных пучков, использующий сокрушительную мощь лобового соударения	39
5.	РОЖДЕНИЕ ТЕОРИИ ЮКАВЫ	43
	От атома к атомному ядру	43
	Мезонная теория Юкавы	46
	Релятивистская квантовая механика	47
	Поль Дирак	48
	Как зародилась идея о мезоне	52
	Хидэки Юкава (1907—1981)	53
	Эпоха 1930-х годов	54
6.	НОВЫЕ ЧАСТИЦЫ	56
	Потенциалы Кулона и Юкавы	56
	Пионы	59
	От гипотезы о двух мезонах к открытию мюона	61
	Драматический выход на сцену V-частиц	64
	Попытки справиться с затруднениями	65
7.	СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ	70
	Правило Накано — Нишиджимы — Гелл-Манна	70
	Кадзухико Нишиджима	74
	Сущность идеи трех авторов	75
	Сильное взаимодействие и сохранение изоспина	76
	3-3-резонанс в πN -рассеянии	78
8.	СИММЕТРИЯ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ	82
	О понятии симметрии	82
	Янг (Янг Чжэньнин) и Ли (Ли Цзундао)	85
	Несохранение четности	86
	Нарушение CP -инвариантности	88
	Инвариантны ли законы природы по отношению к операции обращения времени?	91

9. СОСТАВНЫЕ МОДЕЛИ АДРОНОВ	93
Аргументы в пользу существования фундаментальных частиц	93
Энрико Ферми	94
Составная модель Ферми—Янга	95
О смысле понятий «элементарный» и «составной» применительно к миру элементарных частиц	95
Сёити Саката (1911—1970)	97
Модель Сакаты	98
10. МОДЕЛЬ КВАРКОВ	103
Отличия от модели Сакаты	103
Мюррей Гелл-Манн	103
Барионы в модели кварков	105
Обнаружение Ω^- -частицы, имевшей заранее предсказанные свойства	108
11. ЭВОЛЮЦИЯ МОДЕЛИ КВАРКОВ	110
Модели систем, построенных из кварков	110
Аналогия с атомным ядром	112
Классификация кварков по цвету и аромату	114
Модели с девятью кварками	115
Существуют ли цветные адроны?	117
Может ли электрический заряд кварков принимать целочисленные значения?	118
Сюрприз J/ψ	120
12. ОЧАРОВАНИЕ И ЕГО ПОСЛЕДСТВИЯ	121
Предъявлением частицы J/ψ природа демонстрирует свою сложность	121
Самюэл Тинг и Бартон Рихтер	122
Истинная природа частицы J/ψ	124

	Четвертый кварк s , введение которого придало модели кварков заверченный вид	126
	Природа вновь перехитрила физиков	128
	Лептоны шести видов и кварки по крайней мере пяти ароматов	130
13.	КВАРКИ НА СТРУНАХ	132
	Об одном парадоксе	132
	Струнная модель адронов	135
	О природе струны	140
14.	О ПАРТОНАХ	142
	Рыхлые адроны	142
	О не имеющих размера точечных частицах	144
	Фейнмановская модель партонов	145
	Ричард Фейнман	146
	Сравнение с моделью кварков	147
15.	ТЕОРИЯ ПЕРЕНОРМИРОВОК	149
	Физика элементарных частиц целиком поглощена погоней за новыми эффектами	149
	Сяньитиро Томонага	150
	Квантовая электродинамика	150
	Бесконечность собственной энергии	151
	Теория перенормировок как воплощение идеи примирения с действительностью	153
	Юлиан Швингер	153
16.	КХД— КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА	157
	От мезонной теории к хромодинамике	157
	О калибровочных полях	158
	Хромодинамика	159
	Глюоны—клей, скрепляющий кварки	159
	Асимптотическая свобода	161
	Решеточная теория Вильсона	164

- 17. СПОНТАННОЕ НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ** 166
- Немного о симметрии 166
 - Спонтанное нарушение симметрии 167
 - Память о спонтанном нарушении симметрии — НГ-волны 169
 - Сверхпроводимость — тоже нарушение симметрии 171
 - К вопросу о происхождении массы у кварков (модель НИЛ) 172
- 18. «ПОКОСИВШИЙСЯ ХРАМ» СЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ** 175
- Недоделка творца? 175
 - О слабых взаимодействиях 176
 - Поиски порядка в слабых взаимодействиях 178
 - Должен существовать очарованный кварк! 179
- 19. ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ВАЙНБЕРГА — САЛАМА** 183
- Юкава ожидал от своего мезона слишком многого 183
 - Шелдон Ли Глэшоу, Стивен Вайнберг, Абдус Салам 184
 - W-бозоны 185
 - Путь к объединению электромагнитного и слабого взаимодействий 189
 - Аналогия с явлением сверхпроводимости 190
- 20. ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ** 193
- Задача объединения трех взаимодействий 193
 - Такие колоссальные энергии... Нет! Это нелепо! 194

Неосуществленная мечта Эйнштейна 196
 Задача объединения трех взаимодействий и
 материальных частиц 197

21. ПРОГРАММА ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ	198
Последний вопрос 198	
Теория Великого объединения Джорджи— Глэшоу 200	
Существуют ли частицы, представляющие более глубокий уровень организации мате- рии, чем кварки и лептоны? 201	
Поразительный вывод — все вещество неста- бильно! 203	
Слияние физики элементарных частиц и космологии 204	
Заключение 205	
ОБЪЯСНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЕРМИНОВ	207
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	212
ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ	216

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, изд-во «Мир».

Ёитиро Намбу

КВАРКИ

Научн. редактор А. И. Власенко
Мл. научн. редактор В. И. Аксенова
Художник Л. М. Муратова
Художественный редактор С. И. Кравцова
Технический редактор В. П. Сизова
Корректор В. И. Киселева

ИБ № 3753

Сдано в набор 5.01.84.
Подписано к печати 1.08.84.
Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага типографская № 2.
Гарнитура таймс. Печать высокая.
Объем 3,50 бум. л.
Усл. печ. л. 11,76. Усл. кр.-отт. 11,87.
Уч.-изд. л. 11,62. Изд. № 2/2712.
Тираж 42.500 экз. Зак. 2545. Цена 60 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., 2.

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054, Москва, Валовая, 28. Заказ № 2545.



ЁИТИРО НАМБУ

Родился в 1921 г. Окончил физический факультет Токийского университета, там же работал. Вскоре получил место профессора в Университете Осаки.

В 1952 г. рекомендован Томоногай в Институт перспективных исследований в Принстоне, США. С 1958 г. - профессор Чикагского университета.

Внес большой вклад в развитие теории элементарных частиц, в частности выдвинул идею спонтанного нарушения симметрии. Много внимания

уделяет подготовке молодых исследователей, приезжающих из Японии. Удостоен почетных званий и наград различных американских и японских научных обществ. Избран действительным членом Академии наук США.