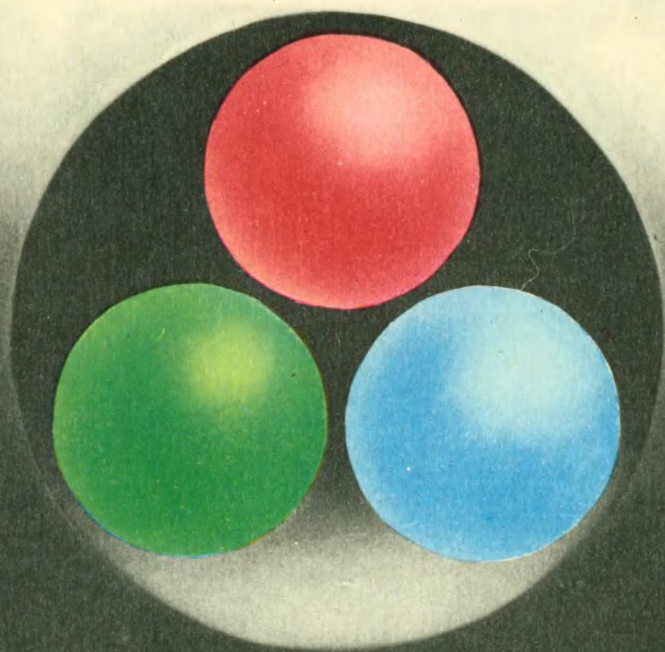


Г. ФРИТШ

ОСНОВА НАШЕГО МИРА



Г.ФРИТШ

ОСНОВА НАШЕГО МИРА

Перевод с немецкого
А.В. Беркова



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1985

ББК 22.38
Ф 89
УДК 539.12



Рецензент Я. А. Смородинский

Scan - nau;
Processing - walerig

HARALD FRITZSCH

QUARKS

Urstoff unserer Welt
R Piper and Co. Verlag
München Zürich, 1983

Фритш Г.

Ф 89 Основа нашего мира: Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1985. — 208 с., ил.

1 р. 20 000 экз.

Увлекательно и с большим мастерством рассказано о новейших достижениях в исследовании структуры материи — создании кварковой модели и ее проверке на опыте. Объясняется суть квантовой хромодинамики — теории сильного взаимодействия, единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий, рассказано о попытках построения единой теории всех взаимодействий в природе. Много внимания уделено описанию экспериментальных установок и результатов опытов, подтверждающих справедливость теоретических идей.

Рассчитана на самые широкие круги читателей, интересующихся современными достижениями физики элементарных частиц.

Ф 1704070000—041 23—85
051 (01) —85

ББК 22.38
530.4

© R. Piper and Co Verlag München
© Перевод на русский язык, Энергоатомиздат, 1985

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ	5
ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ	8
ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЯТОМУ ИЗДАНИЮ	9
ВВЕДЕНИЕ	10
1	
ВЗГЛЯД В ГЛУБЬ АТОМА	21
2	
ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И МАГНЕТИЗМА	32
3	
БОЛЬШИЕ ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ	39
4	
СКОЛЬКО ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ?	43
5	
МЕЗОНЫ, БАРИОНЫ И КВАРКИ	57
6	
РЕНТГЕНОВСКИЙ АНАЛИЗ ПРОТОНА ПО-КАЛИФОРНИЙСКИ	65
7	
СТРАННЫЙ НОВЫЙ КВАРК	73
8	
“ОЧАРОВАННЫЕ” ЧАСТИЦЫ И НОВАЯ СИЛА В ПРИРОДЕ	83
9	
КРАСНЫЕ, ЗЕЛЕННЫЕ И СИНИЕ КВАРКИ	100
10	
КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА – ТЕОРИЯ АДРОНОВ И СИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	111

11

КВАРКИ И ХРОМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛЫ 123

12

ХРОМОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ 133

13

КВАРКИ И ИХ ТОНКАЯ СТРУКТУРА 137

14

СЮРПРИЗ НА УСТАНОВКЕ РЕТРА: КВАРКИ "ВИДНЫ" 142

15

ПРОТОНЫ РАСЩЕПЛЯЮТСЯ НА КВАРКИ 149

16

ГЛЮОНЫ СТАНОВЯТСЯ "ВИДИМЫМИ" 158

17

СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕПТОНОВ И КВАРКОВ 169

18

**ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
И СЛАБЫХ ПРОЦЕССОВ 181**

19

КОНЧИТСЯ ЛИ ФИЗИКА? 187

20

LEP, HERA И ФИЗИКА БУДУЩЕГО 197

ПРИЛОЖЕНИЯ 202

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ 203

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 207

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 207

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Последние годы ознаменовались рядом выдающихся достижений в исследовании фундаментальной структуры материи. Не прекращающиеся со времен античности попытки понять эту структуру — одна из отличительных черт развития научного знания. Путь в 2500 лет от Демокрита до наших дней — это драматическая история побед и поражений, гениальных озарений и заблуждений, попыток все глубже проникнуть в тайны материи, ответить на вопрос: "Из чего все устроено?"

Лишь в XX веке возникли условия, когда стало возможным стремительное продвижение вперед в решении загадок строения материи. Несомненно, что в наши дни вопрос о том, как устроен мир, задают не только специалисты, занимающиеся подобными исследованиями, но и просто любознательные люди, не обладающие специальной подготовкой, но желающие лучше понять тот мир, в котором мы живем. Поэтому понятен интерес, который вызывает появление книг, предназначенных для широкого круга читателей, прежде всего для молодежи, и рассказывающих о последних достижениях фундаментальной физики.

Хорошо известно, что просто и доступно рассказать об очень сложных вещах может только специалист высокого класса. Автор предлагаемой книги — видный физик-теоретик из ФРГ Г. Фритш, внесший значительный вклад в разработку современной теории элементарных частиц и прежде всего квантовой хромодинамики, о которой и рассказывается в книге. Доступное изложение основных идей этой на самом деле непростой теории вызовет, на наш взгляд, интерес не только непосвященных.

Большим достоинством книги является и то, что изложению новых теоретических идей сопутствует мастерское описание сути опытов, которые были проделаны в самые последние годы для подтверждения этих идей. Автор много внимания уделяет рассказу о действующих в настоящее время и строящихся гигантских ускорителях элементарных частиц и планируемых на них экспериментах. Тем самым читатель лучше осознает не только успехи, достигнутые в понимании структуры материи, но и те колоссальные трудности, с которыми сопряжен каждый новый шаг в познании микромира.

Бурное развитие физики элементарных частиц началось примерно 30 лет назад. В конце 50-х годов список известных частиц

с описанием их свойств умещался на одной страничке. Сейчас такой список занимает несколько десятков страниц и счет числа частиц идет уже на сотни. Главной задачей физиков было разобраться в этом хаосе и попытаться свести такое множество частиц к их меньшему числу. На этом пути достигнут за последние десятилетия необычайный прогресс. В те же 50-е годы единственной теорией, успешно описывавшей наблюдаемые явления, была квантовая электродинамика — теория взаимодействия заряженных частиц и света. Теперь же построена теория, объединяющая электромагнитные и слабые взаимодействия, предсказания которой триумфально подтверждаются экспериментом (последний выдающийся успех — открытие в начале 1983 г. предсказанного теорией электрослабого взаимодействия W и Z -бозонов с вычисленными значениями масс). Есть все основания доверять и современной теории сильного взаимодействия — квантовой хромодинамике, основанной на идее о том, что все адроны состоят из фундаментальных частиц — кварков. Сейчас наступил такой этап в развитии теории взаимодействий элементарных частиц, когда начинают сбываться мечты многих выдающихся физиков о построении теории, которая объединяла бы все известные в природе силы, включая гравитацию.

Основной темой книги Фритша является объяснение кварковой модели строения сильновзаимодействующих частиц — адронов и созданной на основе этой модели теории сильного взаимодействия. Идея о том, что протон, нейтрон и другие адроны состоят из более фундаментальных составляющих — кварков, родилась 20 лет назад. Отношение к этой идее со стороны физиков прошло через три обычных этапа: “этого не может быть”, “в этом что-то есть”, “ведь это всем известно”. Мы надеемся, что читатель книги Фритша сумеет не только оценить красоту модели кварков, ставшей сейчас общепринятой, но и увидеть за кажущейся простотой титанические усилия множества физиков — теоретиков и экспериментаторов, потраченные на то, чтобы подтвердить справедливость этой модели и сделать ее основные положения доступными пониманию школьника.

Хотелось бы отметить еще одно удивительное обстоятельство, выяснившееся в самые последние годы и лишь вскользь упомянутое в книге Фритша. Это — теснейшая связь между физикой высоких энергий (физикой элементарных частиц) и космологией. Вопрос о том, как устроен наш мир в большом, столь же фундаментален, как и вопрос об устройстве мира в малом. Общепринятый в настоящее время сценарий рождения и эволюции Вселенной предусматривает весьма необычные условия в первые крошечные доли секунды после так называемого большого взрыва 15 — 20 млрд. лет назад и характеризующиеся колоссальными значениями температуры и плотности

материи. В этих условиях поведение такой сверхплотной и сверхгорячей смеси определяется взаимодействием всех возможных типов фундаментальных частиц. Таким образом, способность сделать какие-то предсказания о первых мгновениях эволюции Вселенной, определивших ее дальнейшее развитие в наблюдаемый сейчас мир, непосредственно связана с нашим пониманием того, как устроен мир частиц и как они взаимодействуют друг с другом. Имеется и обратная связь между физикой частиц и космологией: соображения, основанные на космологических теориях и наблюдаемых свойствах Вселенной, накладывают определенные ограничения на свойства и даже число типов элементарных частиц. Одним из критериев отбора жизнеспособных теорий в области физики частиц стало согласие предсказаний этих теорий с космологией. Таким образом, структура микромира определяет структуру и эволюцию Вселенной.

Книга Фритша подводит итог важному этапу в развитии нашего понимания структуры материи, ознаменовавшемуся рядом выдающихся открытий. Но сам автор неоднократно подчеркивает, сколько вопросов еще ждет ответа, сколько еще удивительных открытий впереди. Сейчас никто не может представить себе, к какому перевороту в жизни человечества приведут фундаментальные исследования микромира. Многие ответы на поставленные вопросы можно получить только с помощью новых ускорителей. Здесь, пожалуй, следует заметить, что Фритш основное внимание уделяет экспериментам, планируемыми в Западной Европе, и даже подчеркивает конкуренцию между западноевропейскими физиками и учеными других стран. Отчасти это связано с тем, что строительство новых гигантских ускорителей требует огромных затрат и развития новой технологии, что дает тем самым сильный импульс развитию ряда отраслей промышленности и прикладной науки. Немаловажны и соображения престижа. Но, как подчеркивают многие видные ученые, не конкуренция, а тесное международное сотрудничество должно определять будущее развитие физики высоких энергий. Строящиеся сейчас в СССР, США и Западной Европе крупнейшие установки отличаются тем, что их возможности не перекрывают друг друга. Поэтому в исследованиях на новых ускорителях в 90-е годы международное сотрудничество будет особенно важным и полезным.

При переводе книги сделан ряд примечаний, прежде всего касающихся вклада советской науки в развитие физики высоких энергий, а также тех данных, которые получены после выхода в свет последнего немецкого издания. Кроме того, в списке литературы добавлены ссылки на ряд изданных в нашей стране популярных книг, посвященных физике элементарных частиц и космологии.

А. Берков

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Для того чтобы приобщить более широкие слои населения к новейшим выдающимся открытиям в физике элементарных частиц, все ученые должны стараться доступно рассказать о них, освободив этот рассказ от несущественных технических подробностей и особенно от профессионального жаргона. В конце публичных лекций мне часто задавали вопрос, где можно прочесть что-нибудь о кварках, глюонах, "великом объединении" и тому подобных понятиях. До недавнего времени я, к сожалению, не мог назвать такую книгу. Предлагаемая книга заполняет этот пробел. Ее автор, блестящий молодой физик, внесший заметный вклад в развитие современной теории, поставил своей целью познакомить читателя с новейшими достижениями в области физики элементарных частиц, не используя при этом математический аппарат, и попытаться заглянуть в будущее.

Вопрос о том, как устроен наш мир в малом, всегда волновал человечество, причем центральным всегда был вопрос об основных структурных элементах материи. Радостно сознавать, что и в наше время, которое часто характеризуют как эпоху голого практицизма, подобные вопросы, не имеющие пока что никакого практического применения, живо интересуют людей, в частности молодежь. В этом проявляется желание установить связующие нити между происходящими вокруг нас природными явлениями и тем самым прийти к лучшему пониманию места человека в Космосе и разрешить извечную проблему: правят ли нами случай и хаос или явления природы управляются разумом и порядком. Вытекающие отсюда следствия относительно существования какого-то мирового порядка, существенные для философии и даже религии, предусматривают в качестве элемента нашей культуры свободные от определенной цели фундаментальные научные исследования.

Проникновение в микромир, точно так же как и распространение наших исследований на космическое пространство, требует все больших по своим размерам и стоимости приборов и установок. Находящиеся в стадии разработки проекты исследований по физике элементарных частиц в Европе, США и СССР связаны на самом деле с постройкой гигантских сооружений. Так, предлагаемый в Европейском Центре ядерных исследований ЦЕРН в Женеве проект LEP требует постройки туннеля окружностью 30 км, а обсуждаемая в лаборатории ДЕЗИ в Гамбурге дополняющая проект LEP установка HERA будет иметь туннель окружностью более 6 км, что представляется весьма значительным размером для национального проекта. Эта кажущаяся склонность к гигантомании уже подвергалась критике со стороны общественности. При этом совершенно не учитывается, что большие постройки отнюдь не являются типичной приметой нашего времени. Например, построенные

монгольскими завоевателями в XV — XVII вв. большие обсерватории в Самарканде и на севере Индии являются огромными исследовательскими сооружениями даже по современным масштабам. Как и тогда, исследование фундаментальных законов природы требует увеличения размеров установок. Реализация подобных проектов находится на грани технических возможностей и порождает многочисленные технические новшества, находящие неожиданные применения совершенно в других областях. Следует отметить, что работа над большими установками приводит к глубокому и плодотворному международному сотрудничеству, способствующему укреплению связей между странами с различными социальными системами.

Исследование микромира на протяжении последних 200 лет привело к открытию множества новых фундаментальных явлений, и достижения последних лет убеждают нас, что этому нет предела. Изучение новых явлений природы имеет и большое практическое значение для решения насущных проблем, стоящих перед человечеством. Так, открытие электрических и магнитных явлений в прошлом столетии повлекло за собой революцию в нашей сегодняшней жизни. С помощью электромоторов мы смогли освободиться от тяжелого физического труда. Объединение электрических и магнитных явлений привело к открытию электромагнитных волн, и сегодня мы уже не можем представить себя без радио и телевидения. Без использования ядерных сил, впервые открытых в нашем веке, вряд ли оказалось бы возможным обеспечить в долгосрочной перспективе энергетические потребности человечества.

Сейчас теоретики и экспериментаторы предпринимают значительные усилия для того, чтобы объединить известные в природе силы и свести их к одной первичной силе, что, вполне вероятно, приведет к столь же далеко идущим последствиям, как объединение электричества и магнетизма. Но возможно, что будут открыты совершенно новые силы. Приобретаемые нами фундаментальные знания помогают пересмотреть некоторые возникшие без достаточных оснований и часто весьма пессимистически звучащие прогнозы на будущее. Как и в прошлом, научные исследования указывают нам новые возможности, активно используя которые, мы можем определить наше будущее.

Гамбург, ноябрь 1980 г.

*Хервиг Шонпер,
генеральный директор ЦЕРН*

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЯТОМУ ИЗДАНИЮ

Пятое, последнее издание книги несколько отличается от предыдущего. В частности, вставлен абзац об открытии в январе 1983 г. в ЦЕРН *W*-бозона. Открытие этой частицы представляет собой важный шаг в установлении теории электромагнитных и слабых процессов. Дальнейшие экспериментальные тесты можно будет провести с помощью новых ускорителей LEP под Женевой и HERA в Гамбурге. В настоящее время строительство LEP идет полным ходом. Весной 1983 г. началась подготовка к строительству машины HERA.

Мюнхен—Женева, март 1983 г.

Гаральд Фритш

ВВЕДЕНИЕ

Человеку свойственно любопытство. Мы интересуемся тем, что происходит вокруг нас, тем, что творится в мире, тем, что поделывают наши ближние, и многим другим. Но, пожалуй, главный вопрос, который с самого зарождения цивилизации чаще всего ставили

Все начинается с любопытства перед собой мыслящие люди: как устроен наш мир и окружающая нас материя? Мыслители всех времен пытались найти ответ на него, раздумывая

над примечательными явлениями природы и свойствами веществ. В наши дни на исследование строения материи государственными организациями и частными лицами выделяются огромные средства. Я уверен, что результаты этих исследований представляют такую же культурную ценность, как живопись Рембрандта или фортепианные сонаты Бетховена. Как и всякая поистине созидательная деятельность, исследование окружающего нас физического мира доставляет глубокое удовлетворение и радость. Разумеется, в наше время не каждый может принять непосредственное участие в проникновении в тайны природы. Тем не менее каждый принимает в этом участие косвенно, поскольку платит налоги и обеспечивает тем самым средства на проведение становящихся все более дорогостоящими исследований.

Еще никогда не была так велика пропасть, разделяющая представления естествоиспытателя и рядового гражданина об окружающем нас мире. Отчуждение между погруженным в свои изыскания научным работником и неспециалистом приняло устрашающие размеры. Одна из причин того, почему я написал эту книгу, заключается в желании противодействовать этому отчуждению. Я намерен дать обзор фундаментальных современных достижений в физике, который должен быть доступен любому образованному человеку, обладающему лишь знанием некоторых основ физики. Нет ничего прекраснее, чем неожиданно понять какую-то вещь, над которой ты раздумывал днями, неделями, а то и годами. Я надеюсь, что читатель ощутит нечто подобное, став свидетелем того, как физики шаг за шагом все глубже проникают в тайны природы.

Наше столетие войдет в историю как время, когда физикам удалось широко исследовать структуру нашего мира в большом и малом. Результаты, полученные за последние десятилетия, позволили нам лучше представить суть происходящих в природе явлений. Так, современные астрофизика и космология изучают звездные скопления, галактики и т. п., невообразимо удаленные от нас, и процессы, происходившие при зарождении нашей Вселенной примерно 20 млрд. лет назад. Были открыты новые, весьма редкие объекты, такие как пульсары и квазары.

В то же время физики, занимавшиеся элементарными частицами, исследовали структуру материи на расстояниях, по сравнению с которыми размеры атома представляются гигантскими. Были найдены новые, почти мистические объекты — кварки, о которых я и собираюсь подробнее рассказать в этой книге.

Элементарные частицы и кварки

Глубокое проникновение в явления природы, которому способствует современное естествознание, в частности физика, есть по существу триумф рационального образа мышления, основы которого более 2 тыс. лет назад заложили греческие философы Фалес, Гераклит, Платон и Аристотель. Уже почти 500 лет этот образ мышления определяет методiku современного естествознания, заключающуюся в том, чтобы задавать природе определенные вопросы путем постановки экспериментов. Рождение современной физики связано со ставшими знаменитыми опытами Галилео Галилея. Первые эксперименты в физике проводились с помощью очень примитивных средств либо вообще без них. Так, Галилей "использовал" падающую башню в Пизе, с верхушки которой он бросал вниз камни различной величины. Во многих своих экспериментах для измерения времени он использовал за неимением часов удары собственного пульса.

По сравнению с этими примитивными подручными средствами гигантские исследовательские установки современной физики, например ускоритель частиц в ЦЕРН в Женеве¹, выглядят как нечто качественно новое. Но в основе лежит все тот же принцип. При определенных экспериментальных условиях природе задается определенный вопрос, т. е. ставится опыт.

В начале нашего века возникли две теории, решительным образом повлиявшие на развитие физики начиная с 1910 г.: квантовая теория и теория относительности.

Кванты и относительность

¹ ЦЕРН — Европейский Центр ядерных исследований, Швейцария; международный институт, занимающийся исследованиями в области физики высоких энергий. — *Прим. пер.*

Теория относительности, сформулированная в 1905 г. 26-летним служащим Бернского патентного бюро Альбертом Эйнштейном, привела к революции в наших представлениях о пространстве и времени. Эти интуитивные представления, записанные в математической форме еще Исааком Ньютоном, оказываются уже недействительными при больших скоростях. Одним из следствий теории относительности является то, что существует максимальная скорость, а именно, скорость света² ($c \approx 300\,000$ км/с). Ни одно тело не может двигаться со скоростью, большей скорости света. Другим следствием этой теории является несохранение массы. В обычной нерелятивистской механике считается, что масса какого-то объекта, состоящего из двух частей, равна сумме масс этих частей. Например, если мы соединим два стальных шара каждый массой 1 кг, то мы ожидаем, что система в целом будет иметь массу 2 кг. В релятивистской теории это уже не так; масса может как уничтожаться, так и порождаться. Можно, например, соединить две ядерные части-

Один плюс один не всегда равно двум	цы — протон и нейтрон — в одну связанную систему, так называемый дейтрон. Оказывается, что масса конечного продукта (дейтрона) несколько меньше суммы масс протона и нейтрона.
--	--

В то время как теория относительности изменила основы наших представлений о пространстве и времени, квантовая теория совершила революцию в нашем восприятии знания о собы-

Нет ничего определенного	тиях в природе. В рамках квантовой теории нельзя более делать абсолютно достоверные утверждения; можно лишь описать вероятность какого-то события. Например, известно, что нейтрон — элементарная частица (с ней мы познакомимся ниже), которая не является стабильной. Нейтрон распадается за определенное время, причем в качестве конечных продуктов распада рождаются протон и другие частицы.
-------------------------------------	--

Однако оказывается невозможным указать точный промежуток времени, по прошествии которого произойдет распад нейтрона. Можно указать лишь вероятность этого события. Напри-

Распадающийся нейтрон	мер, можно сказать, что с вероятностью 50% нейтрон распадается через 10 мин. (Это время называют <i>периодом полураспада</i> .) В частности, это означает, что при наблюдении
----------------------------------	---

большого числа нейтронов примерно половина из них распадается за 10 мин. Мы ожидаем, например, что из 1000 нейтронов через 10 мин останутся "жить" только 500. Через следующие 10 мин распадутся еще 250 нейтронов и т. д.

² Подразумевается скорость света в вакууме. — *Прим. пер.*

Таким образом, вероятностные законы квантовой механики позволяют высказать суждение о большом числе состояний, в данном случае о большом числе нейтронов.

**Нейтроны
не стареют**

В то же время нельзя сказать ничего определенного об отдельном нейтроне. Так, вероятность распада нейтрона по прошествии нескольких минут ничуть не больше, чем до этого. Нейтрон не стареет.

В рамках квантовой механики, разработанной в середине 20-х годов, в частности, Максом Борном, Вернером Гейзенбергом и Паскуалем Иорданом, невозможно с абсолютной достоверностью предсказать результат какого-то физического процесса. Можно лишь утверждать: вероятность того, что произойдет что-то, имеет такую-то величину. Уместно вспомнить игру в рулетку, в которой каждый, кто хоть сколько-нибудь знаком с понятием вероятности, может вычислить свои шансы на выигрыш. (В интересах игорных домов эти шансы, разумеется, очень низки.)

Неоднократно делались попытки интерпретировать вероятностные предсказания квантовой теории как следствие нашего незнания соответствующих элементарных процессов. Можно попытаться представить себе, что нейтрон по существу является весьма сложным образованием, внутри которого протекают какие-то неведомые процессы. Когда происходит совершенно определенный процесс, нейтрон распадается. Незнание этих процессов будет заставлять внешнего наблюдателя делать лишь вероятностные предсказания. Если бы, однако, удалось сделать видимыми протекающие внутри нейтрона процессы, например с помощью специального микроскопа, то в этом случае наблюдатель, обладающий таким микроскопом, смог бы точно указать момент времени, в который распадется наблюдаемый им нейтрон.

Сегодня мы убеждены, что вероятностные предсказания квантовой теории отнюдь не отражают наше незнание соответствующих элементарных событий, а представляют абсолютную границу нашей способности познания. Никогда не станет возможным сказать с абсолютной точностью, в какой момент распадется определенный нейтрон. Таким образом, квантовая теория устанавливает некую незыблемую границу, так же как теория относительности утверждает, что скорость

**Границы
познания**

света — максимально возможная скорость в природе. Многие физики с большим трудом принимали ограничение нашей способности познания, накладываемое квантовой теорией, причем даже те из них, которые вначале внесли в ее развитие заметный вклад, например Альберт Эйнштейн. До конца своих дней Эйнштейн сомневался в вероятностной интерпретации кван-

товой теории, что, в частности, нашло выражение в его знаменитой фразе "Бог не играет в кости!".

Все же постепенно эта интерпретация стала общепринятой. По существу вероятностная интерпретация событий в природе, даваемая квантовой теорией, есть следствие неполноты исполь-

Наши понятия неполны

зуемых нами понятий. Обычные физические понятия определяются и вводятся только посредством опытов в области макроскопической физики. Нет ничего удивительного в том, что эти понятия не могут быть без каких-либо трудностей перенесены на область атомов, элементарных частиц и т. п. Иными словами, вероятностная интерпретация квантовой физики представляет собой возможность описания микроскопических процессов без отказа от привычных понятий макроскопической физики, таких как координата, скорость, масса. Принимая такое описание, мы, разумеется, идем на компромисс.

Так, например, невозможно одновременно точно определить координату и скорость элементарной частицы, скажем, протона, хотя в случае макроскопического объекта это делается без

Координата и скорость

труда. К примеру, всякий понимает, что означают слова: автомобиль едет со скоростью 50 км/ч по Штахусу в Мюнхене¹. Иначе говоря, мы знаем, что скорость автомобиля равна 50 км/ч и что в данный момент времени он находится на Штахусе; мы знаем, таким образом, координату и скорость автомобиля. В случае элементарной частицы нельзя одновременно указать ее координату и скорость. Чтобы понять, в чем заключается трудность, рассмотрим снова приведенный выше пример. Скорость автомобиля можно измерить, если направить на него волны, излученные радиолокатором, а затем исследовать волны, отраженные от автомобиля (один из излюбленных методов дорожной полиции).

Координату автомобиля можно легко определить, если следить за ним глазами или, пользуясь языком физики, дать возможность глазу принять световые сигналы, испускаемые авто-

мобилем. Видно, что как при определении скорости, так и при определении координаты автомобиля важную роль играют испускаемые автомобилем сигналы, в частности

упомянутые выше световые сигналы. Такие сигналы несут определенные энергию и импульс. Например, необходимый для определения скорости автомобиля радиолокационный сигнал оказывает влияние на состояние движения автомобиля. Когда сигнал попадает на автомобиль, а затем отражается от него, сам

¹ Штахус — центральная площадь Мюнхена. — *Прим. пер.*

автомобиль получает некоторый (хотя и очень маленький) импульс. В случае, когда сигнал попадает на автомобиль сзади, последний несколько ускоряет свое движение. Конечно, это ускорение столь мало, что им можно безусловно пренебречь. (В противном случае попавшийся на превышении скорости водитель мог бы с хорошими основаниями утверждать в суде, что направленные на его автомобиль волны от радиолокатора явились причиной зарегистрированного превышения скорости.) Таким образом, возможность определить без всяких трудностей координату и скорость движущегося автомобиля в любой заданный момент времени основана на возможности пренебречь энергиями и импульсами используемых сигналов.

В случае элементарных частиц все это уже не так. Рассмотрим, например, протон, находящийся в какой-то точке пространства. Чтобы определить координату протона, нужно поставить эксперимент. Например, можно узнать положение протона, направив на него световые лучи. Световые волны отразятся от протона, и по характеру отражения можно сделать заключение о местонахождении протона. Однако падающие световые волны окажут такое влияние на протон, что он изменит свое состояние движения. Если до прихода светового сигнала протон находился в покое, то после его прихода протон начнет двигаться. По этой причине оказывается невозможным одновременно с координатой протона точно измерить и его скорость. Невозможно одновременно с точным определением координаты осуществить и точное определение скорости. В определенном смысле значения координаты и скорости взаимно дополняют друг друга. Когда мы хотим с большой точностью измерить скорость протона, у нас есть возможность это сделать. Но в этом случае мы должны отказаться от точного знания его координаты.

Впервые в полном объеме важное значение подобных связей (описанных здесь для случая координаты и скорости) между различными дополнительными по отношению друг к другу

Неопределенности и связь между ними

физическими величинами понял Вернер Гейзенберг; соотношение между пределами точности одновременного определения различных величин носит название *соотношения неопределенностей*.

Качественно неопределенности значений физических величин определяются некоторой мировой постоянной, которая носит название постоянной Планка h . Эта постоянная впервые введена в физику в начале столетия Максом Планком. Она имеет фундаментальное значение для всей квантовой физики. Экспериментальное значение $h = 6,6 \times 10^{-34}$ Дж/с. Видно, что она чрезвычайно мала. Этим и объясняется то, что в нашей повседневной жизни мы не сталкиваемся с квантовофизическими неопределенностями физических понятий. Например, существуют неопределенности в определе-

нии координаты и скорости движущегося автомобиля. Однако эти неопределенности столь малы (к примеру, неопределенность при определении координаты много меньше размера атома), что для практических целей ими можно полностью пренебречь.

Квантовая теория, а также в определенной степени и теория относительности позволили в принципе понять структуру атомов. Таким образом, начиная примерно с 1950 г. фундаментальные физические исследования сосредоточены

Элементарные частицы — источник сюрпризов на изучении мельчайших кирпичиков материи — элементарных частиц. В частности, после 1969 г. было сделано много важных и интересных открытий в физике высоких энергий или физике элементарных частиц, так что сегодня создается впечатление, что физикам удалось сделать большой шаг вперед в исследовании окружающего нас мира.

В этой книге я намереваюсь описать те новые открытия, которые совершили переворот в физике элементарных частиц за последние 10 лет. Вполне возможно, что эти новые открытия в физике элементарных частиц имеют такое же значение для будущего развития физики, как создание квантовой механики в 1920 — 1930 гг. Во всяком случае многие ученые, активно работающие в области физики высоких энергий, чувствуют, что за прошедшее десятилетие произошло нечто важное. По этой причине я начну описание развития физики элементарных частиц с краткого обзора той ситуации, которая сложилась в физике в начале нашего столетия. Главное

Кварки и структура материи внимание в книге будет уделено описанию концепции кварков и нашим сегодняшним представлениям о структуре материи на очень малых расстояниях.

Общая тема этой книги — физика высоких энергий или физика элементарных частиц. Задачей физики высоких энергий является изучение явлений, происходящих при очень больших энергиях, т. е. при энергиях, много больших

Материя при экстремальных условиях тех, которые типичны для атомной или ядерной физики. В экспериментах по физике высоких энергий проверяется поведение материи при весьма необычных условиях, которые в определенных обстоятельствах настолько экстремальны, что становятся существенными новые законы природы, не известные до сих пор.

В ускорительных лабораториях частицы, обычно протоны или электроны, ускоряются до энергий, которые так велики, что частицы движутся практически со скоростью света. В соответствии с эйнштейновским принципом относительности скорость

нии координаты и скорости движущегося автомобиля. Однако эти неопределенности столь малы (к примеру, неопределенность при определении координаты много меньше размера атома), что для практических целей ими можно полностью пренебречь.

Квантовая теория, а также в определенной степени и теория относительности позволили в принципе понять структуру атомов. Таким образом, начиная примерно с 1950 г. фундаментальные физические исследования сосредоточены

Элементарные частицы — источник сюрпризов на изучении мельчайших кирпичиков материи — элементарных частиц. В частности, после 1969 г. было сделано много важных и интересных открытий в физике высоких энергий или физике элементарных частиц, так что сегодня создается впечатление, что физикам удалось сделать большой шаг вперед в исследовании окружающего нас мира.

В этой книге я намереваюсь описать те новые открытия, которые совершили переворот в физике элементарных частиц за последние 10 лет. Вполне возможно, что эти новые открытия в физике элементарных частиц имеют такое же значение для будущего развития физики, как создание квантовой механики в 1920 — 1930 гг. Во всяком случае многие ученые, активно работающие в области физики высоких энергий, чувствуют, что за прошедшее десятилетие произошло нечто важное. По этой причине я начну описание развития физики элементарных частиц с краткого обзора той ситуации, которая сложилась в

Кварки и структура материи физике в начале нашего столетия. Главное внимание в книге будет уделено описанию концепции кварков и нашим сегодняшним представлениям о структуре материи на очень малых расстояниях.

Общая тема этой книги — физика высоких энергий или физика элементарных частиц. Задачей физики высоких энергий является изучение явлений, происходящих при очень больших энергиях, т. е. при энергиях, много больших

Материя при экстремальных условиях тех, которые типичны для атомной или ядерной физики. В экспериментах по физике высоких энергий проверяется поведение материи при весьма необычных условиях, которые в определенных обстоятельствах настолько экстремальны, что становятся существенными новые законы природы, не известные до сих пор.

В ускорительных лабораториях частицы, обычно протоны или электроны, ускоряются до энергий, которые так велики, что частицы движутся практически со скоростью света. В соответствии с эйнштейновским принципом относительности скорость



Рис. 1. Европейский центр ядерных исследований

частицы должна быть всегда меньше скорости света. Поэтому скорость частиц в ускорителях несколько меньше скорости света, но лишь на очень незначительную часть. (Так, например, на ускорителе PETRA в Гамбурге электроны ускоряются до скорости, составляющей $0,999999999998$ долей скорости света.) Сразу после ускорения частицы ударяются о кусок вещества (так называемую мишень, например кусок железа) или сталкиваются с другими ускоренными частицами. В результате подобных соударений происходят, вообще говоря, очень сложные реакции, и задачей физиков, занимающихся элементарными частицами, является исследова-



Рис. 2. Национальная ускорительная лаборатория им. Э. Ферми (ФНАЛ) вблизи Чикаго. Отчетливо виден кольцевой протонный ускоритель



Рис. 3. Станфордский Центр линейного ускорителя (СЛАК) вблизи Пало Альто в Калифорнии. Виден туннель ускорителя длиной в несколько километров, в котором можно ускорять электроны до энергий свыше 20 ГэВ. Туннель ускорителя пересекается с автострадой из Сан-Франциско в Сан-Хосе



Рис. 4. Лаборатория ДЕЗИ в Гамбурге. На границе территории ДЕЗИ видна часть кольцевого электрон-позитронного накопительного кольца РЕТРА

ние того, что на самом деле происходит при этих соударениях.

За последние 20 лет экспериментальное оборудование в области физики высоких энергий стало столь сложным и дорогостоящим, что малые страны уже не могут содержать собственные исследовательские лаборатории. По этой причине наиболее важные исследования проводятся в наши

ЦЕРН и ФНАЛ

дни только в крупных, большей частью международных исследовательских центрах. Ведущими лабораториями, в которых осуществляется ускорение протонов до очень высоких энергий, является ЦЕРН (Швейцария) (рис. 1) и Национальная ускорительная лаборатория им. Э. Ферми ФНАЛ (США) (рис. 2)¹.

Важнейшие открытия последнего десятилетия были сделаны не только в тех ускорительных лабораториях, в которых про-

¹ В СССР крупнейшими лабораториями, в которых имеются протонные ускорители, являются Институт физики высоких энергий под Серпуховом и Объединенный Институт ядерных исследований в Дубне, объединяющий ученых социалистических стран. — *Прим. пер.*

водятся эксперименты с ускоренными протонами, но и на электронных ускорителях. Последние способны ускорять до очень больших энергий электроны или их античастицы — позитроны. Ведущими лабораториями в этой области являются Станфордский Центр линейного ускорителя СЛАК в Пало Альто (Калифорния) (рис. 3) и лаборатория ДЕЗИ в Гамбурге (рис. 4)¹.

Мне самому довелось много работать в этих лабораториях. Царящая в них вдохновляющая атмосфера исследований и стимулирующее общение с коллегами из ЦЕРН, ФНАЛ, СЛАК и ДЕЗИ были для меня чрезвычайно ценными. Иначе мне вряд ли пришла бы в голову мысль написать эту книгу. Я хочу воспользоваться случаем и поблагодарить физиков из названных лабораторий за неоценимую помощь, которую я получил во время написания этой книги.

¹ В СССР крупнейшая лаборатория, занимающаяся ускорением электронов и позитронов до очень больших энергий, находится в Институте ядерной физики СО АН СССР в Новосибирске. — *Прим. пер.*

1

ВЗГЛЯД В ГЛУБЬ АТОМА

Сегодня мы знаем, что вся окружающая нас материя, включая нас самих, состоит из атомов. Как правило, атомы не существуют в свободном состоянии, а образуют молекулы. Таким образом, возникает большое число различных веществ, наблюдаемых нами. Наука, которая изучает объединение различных атомов в молекулы, — это химия. Для физика в наши дни химия не очень интересна; во всяком случае, нельзя ожидать, что в этой области, например в молекулярной физике, будут открыты новые, до сих пор не известные физические законы. Сегодня физики уже не интересуются молекулами или атомами как объектами исследования, а занимаются изучением строения атомов и тех частиц, из которых состоят сами атомы¹.

Первоначально представления об атомах развивались на протяжении прошлого столетия химиками, стремившимися понять наблюдавшиеся ими своеобразные законы различных хими-

ческих реакций. Для химиков прошлого века атомы представлялись просто маленькими кусочками вещества шарообразной формы с совершенно определенными свойствами и радиусом, по порядку величины равным 10^{-8} см (т. е. $1/100000000$ доле сантиметра). Отсюда следует, что 100 млн. атомов, выстроенных в ряд, занимают отрезок длиной 1 см.

В начале нашего века физики поставили вопрос: имеют ли атомы внутреннюю структуру или же они бесструктурны? Как распределена материя внутри атома? Чтобы найти ответ на эти вопросы, были поставлены эксперименты, очень напоминающие те, которые осуществляются в наши дни с помощью

**Взгляд в
глубь атома**

¹ Автор имеет в виду, конечно, физиков, занимающихся элементарными частицами и стремящихся открыть новые фундаментальные законы природы. В то же время атомная и молекулярная физика — весьма бурно развивающиеся области, хотя развитие здесь идет скорее вширь, а не вглубь. По общему мнению уже установленных фундаментальных законов, в частности законов квантовой механики, достаточно для полного объяснения в принципе всех явлений в атомной и молекулярной физике. — *Прим. пер.*

пучков частиц в больших ускорительных лабораториях. В начале века не было никаких ускорителей, с помощью которых можно было бы создать пучки частиц большой энергии. Выход заключался в использовании α -частиц. (Определенные радиоактивные вещества испускают излучение, состоящее из положительно заряженных частиц — так называемые α -частицы.) Эти α -частицы направлялись на мишень, представлявшую собой тонкий металлический

Проникающие α -частицы

листок. При прохождении через металл α -частицы сталкивались с атомами. В случае, если материя распределена внутри атома

более или менее равномерно, можно было ожидать, что при таком соударении α -частица лишь немного изменит направление своего движения, подобно тому как это происходит с пулей, пролетающей через какую-то среду, например воду. Из-за сопротивления среды пуля за определенное время несколько замедляет свой полет, но ни при каких обстоятельствах направление полета не может резко измениться.

Эксперименты дали ошеломляющие результаты. Действительно, чаще всего α -частицы пролетали через вещество, практически не меняя направления движения. Однако изредка при прохождении через вещество α -частицы резко меняли направление полета (рис. 5). Точные измерения этих изменений в направлении полета показали, что α -частицы ведут себя так, как

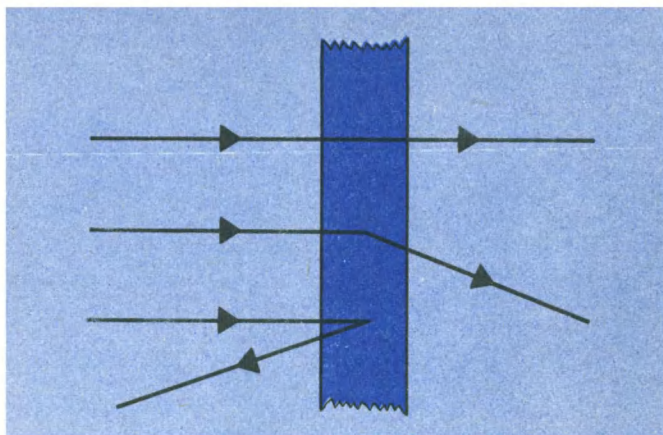


Рис. 5. Схема прохождения α -частиц через тонкую металлическую фольгу. Иногда частицы отклоняются под большим углом

будто они испытали столкновение с маленькими объектами внутри атомов. Эти объекты много меньше самих атомов; их диаметр составляет примерно 10^{-12} см, т. е. они в 10 000 раз меньше атомов.

Далее обнаружилось, что в этих объектах сосредоточена практически вся масса атомов. По этой причине их называли *атомными ядрами*. Согласно такой картине атомы практически пусты. Почти вся масса содержится в ядре. Попробуем представить себе (для большей наглядности) атомное ядро в виде объекта с размером футбольного мяча, тогда сам атом будет иметь размер, равный 1 км.

Строгий анализ экспериментов по рассеянию, описанных выше, привел в начале нашего века к модели атома Эрнеста Резерфорда и Нильса Бора. Согласно этой модели атомы состоят из положительно заряженного *ядра*, в котором сосредоточено более 99% полной массы атома. Атомное ядро окружено облаком из отрицательно заряженных электронов. *Электроны* — очень легкие элементарные частицы (частицы с вполне определенной массой). В физике высоких энергий принято выражать все массы в энергетических единицах, пользуясь эквивалентностью массы и энергии¹. Таким образом,

Атомы пусты масса электрона составляет примерно 0,5 МэВ (1 МэВ — миллион электрон-вольт или мегаэлектрон-вольт). Ниже мы чаще всего будем использовать единицу энергии гигаэлектрон-вольт: $1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$. Конечно, можно выразить массу электрона и в обычных единицах массы, но это довольно бессмысленно, так как мы получим невероятно маленькое число. Так, электрон имеет массу $9 \times 10^{-31} \text{ кг}$. Видно, на самом деле электроны — очень легкие частицы.

Энергия и масса

Электроны электрически заряжены. *Электрический заряд* электронов — одна из важных мировых постоянных. Все электроны обладают одинаковым электрическим зарядом, или электрический заряд электронов квантован. Атомы электрически нейтральны. Следовательно, электрический заряд (положительный) атомного ядра должен полностью компенсировать электрический заряд (отрицательный) электронов в облаке.

В течение первой половины нашего столетия проводилось интенсивное исследование атомных ядер. Оказалось, что они

¹ Имеется в виду соотношение Эйнштейна $E = mc^2$. В физике высоких энергий принято использовать в качестве единицы энергии $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ (электрон-вольт, равный энергии, приобретаемой зарядом $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ при прохождении разности потенциалов 1 В). — *Прим. пер.*

**Электроны,
протоны,
нейтроны**

имеют довольно сложное строение и состоят из двух типов элементарных частиц: положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов (обе эти частицы иногда объединяют под одним названием *нуклоны*). Электрический заряд протонов в точности равен электрическому заряду электронов (не считая знака). Нуклоны много тяжелее электронов. Их масса составляет около 940 МэВ; это означает, что нуклоны почти в 2000 раз тяжелее электронов. С хорошей точностью массы нейтронов и протонов равны (нейтрон всего лишь на 1,3 МэВ тяжелее протона).

На самом деле весьма примечательно, что электрические заряды протонов и электронов равны по величине и противоположны по знаку. Электроны и нуклоны весьма отличаются по своим физическим свойствам, о чем можно судить уже по разнице их масс. Несмотря на это между электронами и протонами должно быть что-то общее, что определяет равенство по величине и противоположный знак электрического заряда у обеих частиц.

Естественно, что физики пытались обнаружить это общее нечто — до сих пор без всякого успеха. Создается впечатление, что между электронами и протонами нет ничего общего,

**Квантование
электрического
заряда**

что позволило бы сделать вывод о квантовании заряда. Хотя физики, занимающиеся элементарными частицами, обнаружили на сегодняшний день очень многое, касающееся свойств и структуры электронов и протонов, мы и сегодня не понимаем, почему электрический заряд существует в квантованной форме. Ниже мы вновь вернемся к этой фундаментальной проблеме.

Наиболее простым атомом является атом водорода. Его атомное ядро состоит всего лишь из одного протона, а атомная оболочка содержит один-единственный электрон, который вращается вокруг протона по более или менее круговой орбите. Именно такими были представления английского физика-атомщика Резерфорда после того, как он осуществил свои знаменитые опыты с α -частицами, подробно описанные выше. Однако

**Почему атомы
не излучают?**

в этой простейшей модели атома имеется фундаментальная трудность. Согласно законам электродинамики любой электрически заряженный объект, движущийся по круговой орбите, непрерывно излучает электромагнитные волны. Поскольку электромагнитное излучение, например свет, есть не что иное, как особая форма энергии, все это означало бы, что электрон в атоме водорода непрерывно теряет энергию. Потеря энергии должна приводить к изменению движения электрона по орбите. Следовательно, из-за потери энергии элект-

рон должен был бы все больше приближаться к протону и в конце концов упасть на атомное ядро, т. е. на протон. Все это находится в вопиющем противоречии с экспериментальными фактами. Легко вычислить, как долго мог бы существовать атом водорода до падения электрона на ядро. Результат расчета ошеломляет, так как полученное время значительно меньше 1 с. С другой стороны, мы хорошо знаем, что атомы водорода существуют много дольше 1 с, более того, судя по тому, что нам известно, они могут существовать бесконечно долго. Следовательно, должен существовать механизм, позволяющий электрону стабильно вращаться по своей орбите.

Такой механизм предлагает квантовая теория. Квантовая механика утверждает, что электроны могут двигаться только по очень специальным орбитам (соответствующим так называемым *стационарным состояниям*).

Электрон на отдыхе Когда электрон движется по одной из таких орбит, он не излучает электромагнитные волны, и поэтому соответствующая орбита оказывается стабильной; это означает, что электрон может двигаться по такой орбите сравнительно долго. Далее квантовая теория утверждает, что для атома водорода подобных возможных стационарных орбит имеется очень много (точнее говоря, бесконечно много, рис. 6). Особенно важно то, что стационарным орбитам электронов соответствуют совершенно определенные энергетические состояния. В частности, существует стационарная орбита, отвечающая наименьшей возможной

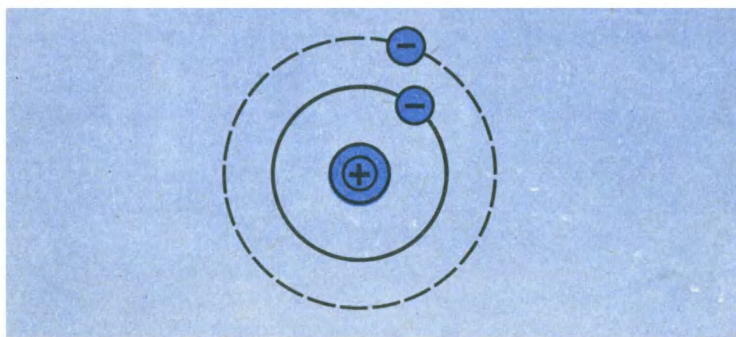


Рис. 6. Схематическое изображение атома водорода. В центре находится протон — ядро атома. Обычно электрон находится на орбите с наименьшей энергией, которая расположена ближе всего к протону. Если же электрону сообщается достаточная энергия, он может перейти на другие стационарные орбиты, которым соответствует большая энергия (штриховая окружность)

энергии электрона. Такую орбиту называют *основным состоянием* атома водорода. Если атом водорода, находящийся в основном состоянии, получает извне энергию, например, в форме электромагнитного излучения, то может случиться, что электрон перепрыгнет с наименьшей орбиты на более высокую — такой процесс называют *возбуждением* атома водорода. Чтобы произошло возбуждение, атом водорода должен получить в точности такую энергию, которая необходима для перехода с одной орбиты на другую.

Что же произойдет, когда электрон окажется на одной из возбужденных орбит? Он проведет на такой орбите лишь очень короткий промежуток времени — всего одну стомиллионную долю секунды, а затем упадет назад на орбиту основного состояния, причем разница в энергиях между обоими

Возбужденные атомы

состояниями излучится в виде электромагнитной энергии, например в виде света. Тот свет, который мы получаем от неоновой лампы, возникает в результате того, что электроны в атомах неона прыгают туда-сюда между различными возможными стационарными орбитами, излучая энергию в виде света.

Выше было отмечено, что различные стационарные орбиты электронов в атоме водорода можно охарактеризовать определенными значениями энергии.

Оказывается, что при рассмотрении атома водорода задание энергии не определяет однозначно ту орбиту, по которой движется электрон. Требуется задать еще некоторое число других величин. В частности, различные орбиты можно описать, задав *момент импульса электрона*¹. (Момент импульса — физическая величина, характеризующая, как быстро электрон вращается вокруг протона.) В рамках квантовой теории оказывается, что момент импульса электрона в атоме водорода может кроме нулевого значения принимать лишь совершенно определенные дискретные значения. Эти значения

Момент импульса дискретен

момента импульса являются целыми кратными наименьшего возможного значения момента импульса, связанного с введенной выше постоянной Планка и равного $h/2\pi$ (эту величину обычно обозначают символом \hbar). Таким образом, возможные значения момента импульса кроме нуля равны \hbar , $2\hbar$, $3\hbar$ и т. д.

Электрон в атоме водорода может еще и вращаться вокруг собственной оси; это означает, что он может обладать *собствен-*

¹ Имеется в виду, что одному и тому же значению энергии электрона отвечает, вообще говоря, несколько орбит (состояний) с разными значениями момента импульса. — *Прим. пер.*

ным моментом импульса. Если мы представим себе электрон в виде маленького вращающегося вокруг своей оси шарика, то собственный момент импульса такого электрона мог бы, конечно, принимать любые значения. Но в рамках квантовой механики такое невозможно. Оказывается, что собственный момент импульса электрона всегда равен $1/2\hbar$, т. е. он в 2 раза меньше наименьшего значения момента импульса, отвечающего движению электрона по орбите. Поскольку момент импульса вообще и собственный момент импульса электрона в частности являются направленной величиной (вектором), для собственного момента импульса электрона имеются всего лишь две возможности: он может принимать значения, равные $\pm 1/2\hbar$ ¹, т. е. принято говорить о двух возможных состояниях электрона.

Для собственного момента импульса электрона принято специальное название — *спин*. Можно, таким образом, сказать, что электрон находится в одном из двух

Что такое спин? возможных спиновых состояний. Спин может быть направлен либо по заданному направлению, либо в направлении, противоположном заданному. Это показано на рис. 7. Как отмечено выше, электрон в атомной оболочке может быть однозначно охарактеризован заданием определенных чисел, например заданием его момента импульса и его спина². Эти числа называют *квантовыми числами*.

В период глубокого изучения атомов, в особенности их энергетических состояний, между 1910 и 1925 гг., было открыто много странных закономерностей. В середине 20-х годов 25-летний Вольфганг Паули обнаружил, что большинство непонятных до того времени закономерностей можно объяснить, если постулировать, что два электрона в одном атоме никогда не могут иметь одинаковых квантовых чисел. Это правило, естественно, действует тогда, когда в атомной оболочке больше одного электрона; это означает, что следует рассматривать атомы более сложные, чем водородный.

Обнаруженное Паули правило вошло в историю физики под названием *принципа запрета Паули*.

¹ Здесь имеется в виду, что если задать в пространстве определенное направление (ось квантования), то проекция вектора собственного момента импульса электрона на это направление может принимать лишь два указанных значения. — *Прим. пер.*

² Для однозначной характеристики состояния электрона нужно, конечно, задать еще его энергию (или связанное с ней квантовое число), а также проекцию момента импульса электрона на некоторое направление. — *Прим. пер.*

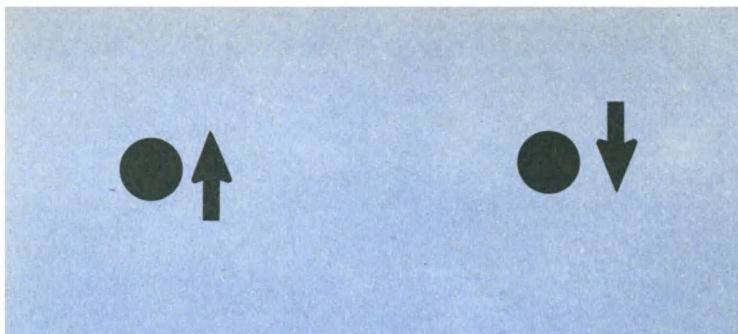


Рис. 7. Электрон может находиться в двух спиновых состояниях (направление спина изображено стрелкой)

Лишь в начале 40-х годов было показано, что принцип запрета Паули является необходимым следствием квантовой механики, если дополнить ее теорией относительности.

Оказалось, что как следствие квантовой механики и теории относительности принцип запрета выполняется для всех частиц (а не только для электрона), спин которых равен $1/2 \hbar$ (или, короче, спин которых равен $1/2$; часто полагают квантовомеханическую постоянную \hbar равной 1). Таким образом, и для других элементарных частиц, например протонов и нейтронов, действует правило, аналогичное принципу запрета Паули для электронов. Однако этот принцип не действует для частиц, спин которых равен 0, 1, 2, 3, . . . , т. е. является целым числом. Примерами таких частиц могут служить рассматриваемые ниже π -мезоны, спин которых равен 0 (это означает, что такие частицы не могут иметь собственного момента импульса), или световые частицы (фотоны), имеющие спин, равный 1.

Поскольку далее мы собираемся рассматривать структуру элементарных частиц в рамках модели кварков, не имеет смысла обсуждать здесь частные вопросы, касающиеся атомов и атомной физики, а следует обратиться к списку литературы в конце книги. Сейчас же очень кратко рассмотрим структуру *позитрония*, очень похожего на атом водорода.

Позитроний представляет собой образование, состоящее из электрона и его античастицы — *позитрона* (подробнее понятие античастицы обсуждается в гл. 2). Таким

Позитроний образом, позитроний является связанным состоянием, похожим на атом водорода, так как электрический заряд позитрона равен электрическому заряду протона. Отсюда следует, что электрон и позитрон элект-

рически притягиваются друг к другу, так же как электрон и протон. Разница между позитронием и атомом водорода заключается, главным образом, в том, что протон много тяжелее электрона и позитрона. (Масса частицы всегда равна массе соответствующей античастицы.) По этой причине при рассмотрении позитрония нельзя уже говорить о ядре атома, так как электрон вращается вокруг позитрона, но и позитрон вращается вокруг электрона. Обе составные части позитрония равновесны.

Можно сравнить позитроний с двойной звездной системой в астрономии, т. е. с системой, состоящей из двух примерно равных по величине звезд, обращающихся вокруг друг друга, в то время как атом водорода можно сравнить с системой Земля — Солнце. В последнем случае движением Солнца можно по существу пренебречь, поскольку масса Солнца много больше массы Земли.

Другое отличие атома водорода от позитрония заключается в том, что атом водорода живет практически бесконечно долго (новые открытия в физике свидетельствуют, по-видимому, что время жизни атома водорода не бесконечно; этот вопрос обсуждается в конце книги), а время жизни позитрония очень мало — меньше одной миллионной доли секунды. Причина здесь в том, что позитроний состоит из частицы и ее античастицы. Но в случае, когда частицы и античастицы сближаются на малое расстояние, они имеют тенденцию взаимно уничтожаться, "пожирать" самих себя, аннигилировать. Именно это происходит и с позитронием. Через очень короткое время после того как позитроний рожден в лаборатории, он превращается в электромагнитное излучение — определенный вид света. Превращение позитрония в электромагнитное излучение, т. е. в энергию — один из наиболее выразительных примеров прямого превращения массы (т. е. материи) в энергию в соответствии с найденным Эйнштейном законом эквивалентности материи¹ и энергии.

Впрочем, нечто подобное происходит во всех случаях, когда материя реагирует с антиматерией. Так, например, системы, состоящие из протонов и антипротонов, превращаются в излучение подобно позитронию. В последнее время удалось создать пучки частиц, состоящие из очень большого числа антипротонов. Когда такие пучки направляются на материю, допустим, кусок железа, антипротоны и протоны попарно аннигилируют. В результате получается энергия в форме излучения, состоящего

¹ Заметим, что слово *материя* употребляется автором на протяжении всей книги как синоним слова *вещество*. — Прим. пер.

из фотонов, электронов, позитронов и так называемых нейтрино.

Удалось также породить в лаборатории и более сложные формы антиматерии. Так, например, созданы системы, состоящие из одного антипротона и одного антинейтрона — так называемые антидейтроны. В принципе, если бы удалось создать антипротоны и антинейтроны в больших количествах и дать им возможность прореагировать друг с другом, то можно было бы получить довольно сложные атомные ядра, состоящие из большого числа антипротонов и антинейтронов.

Но это практически невозможно, так как всякая научная аппаратура, которую мы создаем в лабораториях, должна естественно состоять из обычного вещества. Античастицы имеют тенденцию вступать в реакцию с веществом исследовательской аппаратуры, т. е. аннигилировать. Это не исключает того, что где-нибудь в Космосе имеются большие области антиматерии, например целые антизвезды, антизвездные системы и антигалактики. Тем не менее до сих пор не обнаружено никаких доказательств тому, что это имеет место, и ниже мы еще раз вернемся к проблеме антиматерии. Однако в принципе можно представить себе, что существуют антижелезо, антизолото или антисвинец и т. д. Кусок антижелеза, попавший на Землю, например, в виде метеорита, немедленно проаннигилировал бы с материей на Земле; это означает, что возникла бы энергия в форме электромагнитного излучения. Можно легко

Антивода ценнее бензина подсчитать, сколь велико было бы в этом случае выделение энергии. Так, достаточно дать возможность 1 кг вещества проанниги-

лировать с 1 кг антивещества, чтобы удовлетворить все энергетические потребности такой области, как Бавария, в течение года.

Превращение вещества и антивещества в излучение нашло свое отражение в стихотворении американского физика Гарольда П. Фюрта, которое приведено ниже и является откликом на опубликованную Эдвардом Теллером в журнале "Сан Франциско Кроникл" статью о существовании и значении антиматерии.

*Опасности современной жизни*¹

На удаленном антителе
В укромных звездных областях
Жил д-р Эдвард Анти-Теллер,
Не знавший синтеза простак.

Не ведая о нас, землянах,
Считал, что в Космосе один

¹ Пер. с англ. Т. Воронцовой.

Они: он сам с антидрузьями
И табуном антиродни.

Но вот однажды спозаранку,
У моря сидючи без дел,
С Земли пришельца у жестянки
С названием КАЭ¹ разглядел.

Как две бобовых половинки
Желают слиться в боб один,
Так в звездной сумрачной глубинке
Соединились их пути.

Они от счастья рассмеялись,
Друг к другу радостно помчались
И при пожатьи правых рук
Гамма-лучами стали вдруг.

Это стихотворение было опубликовано в 1955 г. Всего год спустя текст его оказался устаревшим, так как благодаря достижениям науки выяснилось, что при переходе от материи к антиматерии должно еще иметь место зеркальное отражение пространства. Строго говоря, доктор Теллер должен был подать для приветствия свою правую руку, а доктор Анти-Теллер — левую.

Рассмотрим несколько подробнее строение позитрония. Как электрон, так и позитрон имеют определенный спин. Кроме того, состояние позитрония можно описать, задав момент импульса обеих составных частей. При этом спины частиц могут быть направлены по любому произвольному направлению. Поскольку очевидно, что важно не само это направление, а относительная ориентация обеих спинов, т. е. спина электрона и спина позитрона, возникают два возможных спиновых состояния позитрония: оба спина направлены в разные стороны (рис. 8, а) и оба спина направлены в одну сторону (рис. 8, б).

Орто- и парапозитроний

Этим двум возможностям соответствуют разные названия. Когда оба спина направлены в одну сторону, говорят о так называемом *ортопозитронии*, когда же спины направлены в противоположные стороны — о *парапозитронии*. В лаборатории можно довольно легко различить эти два состояния позитрония, так как время жизни парапозитрония много меньше времени жизни ортопозитрония. Как будет объяснено ниже, это является следствием того, что аннигиляция электрона и позитрона в позитронии обусловлена электромагнитным воздействием.

При рассмотрении выше двух возможных состояний позитрония (орто- и парапозитроний) я был не совсем точен. На са-

¹ КАЭ — Комиссия по атомной энергии (США). — *Прим. пер.*

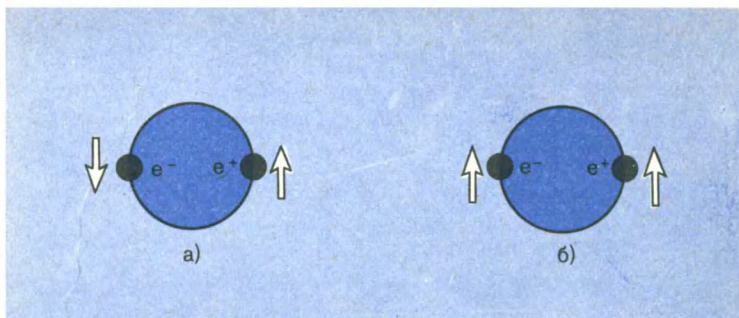


Рис. 8. Пара- и ортопозитроний. В парaposитронии спины направлены в разные стороны, в ортопозитронии — в одну сторону

мом деле следует говорить о двух классах состояний; дело в том, что как в орто-, так и в параконфигурации обе составные части позитрония могут иметь различные значения момента импульса своего относительного движения и, кроме того, могут находиться ближе друг к другу или дальше друг от друга. Все эти конфигурации различаются по другим квантовым числам, например квантовому числу момента импульса. Таким образом, имеется по существу бесконечно много состояний парaposитрония и ортопозитрония. Но аннигиляция позитрония происходит всегда только в наинизшем энергетическом состоянии, т. е. в основном.

Перейдем теперь к обсуждению элементарных типов взаимодействий между частицами.

2 ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И МАГНЕТИЗМА

Электромагнитное взаимодействие знакомо каждому в наши дни, по крайней мере косвенно. Это взаимодействие является, например, причиной существования электрических токов. Без электромагнитного взаимодействия не было бы телевизоров, автомобилей, не существовали бы практически все привычные нам предметы современной жизни. Наконец, за последние 80 лет обнаружилось, что электромагнитные взаимодействия ответственны также и за структуру атомов, и за химическую связь атомов в молекулах, а также за образование кристаллов.

Сегодня мы можем описать все эти различные явления с помощью одной-единственной теории электромагнетизма. Но так было не всегда. В частности, в первой половине прошлого столетия сложилась совершенно противоположная ситуация. К этому времени были изучены три различных класса явлений, каждый из которых был хорошо известен всем физикам и кото-

**Электричество,
магнетизм,
свет**

рые, как выяснилось позднее, оказались различными проявлениями одного и того же фундаментального взаимодействия. Это были: чисто электрические явления (например, притяжение двух противоположно заряженных тел), магнитные явления (например, ориентация стрелки компаса в магнитном поле Земли) и световые явления. Первоначально ни у кого не было и мысли, что эти три класса явлений могут иметь между собой что-то общее.

Все это, однако, довольно быстро изменилось, как только в начале XIX в. было обнаружено, что электрические токи вызывают появление магнитных сил. Например, положение стрелки компаса меняется, если одновременно поблизости течет электрический ток. Указанное открытие связано с именем датского физика Ганса Христиана Эрстеда. Несколько позднее английский физик Майкл Фарадей сделал очень важное открытие. Он обнаружил, что при внезапных изменениях магнитных полей (скажем, при движении магнита вблизи проводника) могут возникать электрические токи. Это явление используется в наши дни при получении электроэнергии на электростанциях.

Явление, открытое Фарадеем, в определенном смысле обратное явлению, обнаруженному Эрстедом. Фарадей еще в 1822 г., вскоре после того, как услышал о работах Эрстеда, предсказал, что, по-видимому, возможно превратить магнетизм в электричество. Потребовалось почти девять лет напряженной экспериментальной работы, прежде чем Фарадей смог наконец подтвердить свое предсказание.

**Предвидение
Фарадея**

В то время полагали, что электрические, а также гравитационные силы представляют собой силы, действующие на определенном расстоянии. Так, считалось, что Солнце притягивает Землю потому, что сила тяготения Солнца действует на Землю на расстоянии, равном взаимному удалению Солнца и Земли. В частности, полагали, что та сила тяготения, которая действует со стороны Солнца на Землю, является свойством Солнца и не имеет никакого отношения к пространству между Землей и Солнцем, в том числе и к пространству, окружающему Землю. После многих лет экспериментальных исследований Фарадей отказался от этой концепции так называемого действия на расстоянии, по крайней мере, для случая электрических сил.

(Позднее то же самое сделал Альберт Эйнштейн для сил тяготения.) Представления Фарадея сводились к тому, что электрические силы (притяжение или отталкивание электрически заряженных тел) возникают из-за наличия силовых линий, выходящих из заряженных тел, но являющихся при этом определенной самостоятельной сущностью. Это означает, что они определенным образом заполняют пространство

**Силовые линии
заполняют
пространство**

между заряженными телами. Можно дать и другое объяснение. Электрически заряженные тела притягиваются или отталкиваются в результате того, что пространство, в котором находятся тела, меняется из-за существования силовых линий. Пространство между заряженными телами заполнено электрическими силовыми линиями.

Эта идея Фарадея породила почти современное представление об электромагнитном поле. В последующем, особенно в результате развития физики после 1930 г., выяснилось, что понятие электромагнитного поля или поля вообще является, возможно, самым фундаментальным понятием, известным в физике. Ниже мы обсудим современные теории элементарных частиц. Оказывается, что все они являются так называемыми теориями поля, т. е. такими теориями, которые в основе своей содержат понятие поля.

Поначалу Фарадей считал, что электрическое поле есть нечто, существующее всегда вместе с электрически заряженными

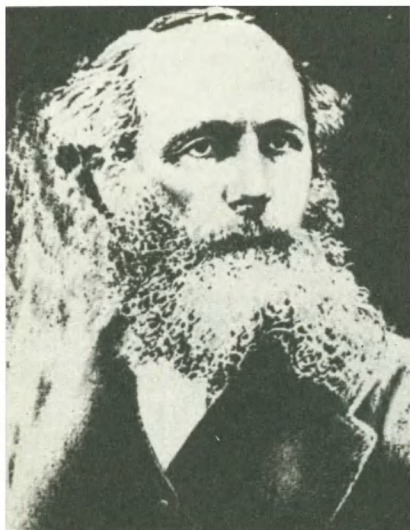


Рис. 9. Шотландский физик
Джеймс Клерк Максвелл

объектами, т. е. не может существовать электромагнитного поля без соответствующих электрически заряженных тел. Однако вскоре Фарадей отказался от этой мысли и пришел к идее, что должны быть и такие поля, которые непосредственно не связаны с заряженными объектами, а живут собственной жизнью. Он предположил, что такие поля состоят из магнитного и электрического полей, причем магнитное поле определяет и сопровождает соответствующее электрическое поле. В частности, Фарадей высказал мнение, что свет есть не что иное, как подобное электромагнитное поле.

Все же Фарадею не удалось построить законченную теорию на базе своих довольно интуитивных идей. Эту очень трудную задачу решил шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл (рис. 9). Он впервые записал уравнения,

Уравнения Максвелла

описывающие электромагнитные явления. Мы не будем здесь их приводить. В наши дни максвелловские уравнения известны

любому студенту-физику. Рассматривая эти уравнения с современной точки зрения (более чем через 100 лет после того, как они были впервые написаны), мы видим, что даже сегодня, после создания Эйнштейном теории относительности и развития квантовой механики, уравнения Максвелла остаются справедливыми по существу в той же форме, в какой они были первоначально написаны.

Электродинамика — успешная теория

остаются справедливыми по существу в

Сегодня мы знаем, что максвелловские уравнения описывают все электромагнитные явления, начиная с огромных по протяженности электромагнитных полей, наблюдаемых в галактиках, вплоть до полей в областях размером 10^{-16} см, т. е. до расстояний, составляющих $1/10000$ долю размера атомного ядра.

Со временем все же изменилась интерпретация уравнений Максвелла. На современном языке квантовой механики и квантовой теории поля уравнения Максвелла описывают распространение в пространстве квантов электромагнитного поля — так называемых *фотонов* (частиц света).

Фотоны — кванты света

Можно следующим образом описать электрическое притяжение или отталкивание между двумя заряженными объектами. Напри-

мер, если два электрона пролетают близко друг от друга, они испытывают взаимное влияние в результате электрического отталкивания. (В этом случае говорят также о рассеянии электронов друг на друге.) Этот процесс схематически изображен на рис. 10.

Два электрона сближаются и обмениваются друг с другом фотонами; правда, в этом специальном случае происходит обмен

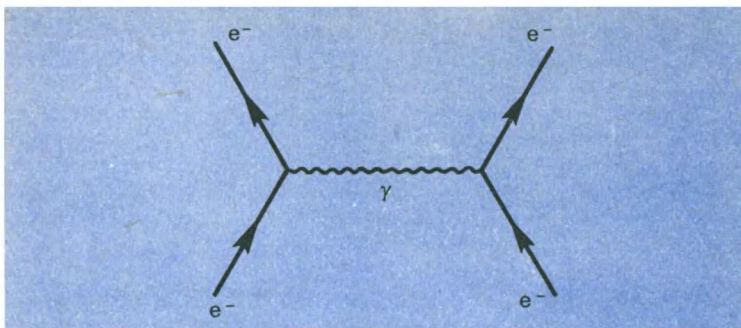


Рис. 10. Рассеяние двух электронов, обусловленное обменом виртуальным фотоном γ

так называемыми *виртуальными фотонами* в противоположность реальным фотонам, например квантам видимого света.

Диаграмма Фейнмана

Подобный обмен виртуальными фотонами приводит к электромагнитному отталкиванию обоих электронов. Картинки, подобные той, которая изображена на рис. 10, были введены Ричардом Фейнманом (рис. 11) и названы поэтому *диаграммами Фейнмана*. Они очень полезны при описании электромагнитных процессов на языке квантовой механики.

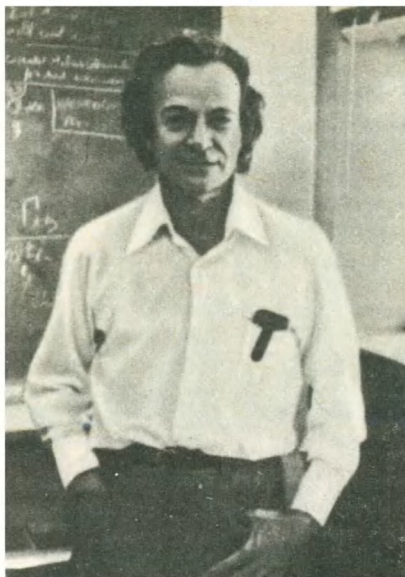
В квантовой физике принято описывать силу какого-то взаимодействия с помощью параметра, называемого *константой связи*. Если константа велика, например больше 1, то говорят об очень сильном взаимодействии. Если константа связи много меньше 1, то говорят об очень слабом взаимодействии. Сила электромагнитного взаимодействия описывается констан-

Постоянная Зоммерфельда

той связи, которую обозначают обычно α и называют *постоянной тонкой структуры*. Эта константа была введена в начале нашего века немецким физиком Арнольдом Зоммерфельдом; она является безразмерным числом и должна быть найдена из опыта.

Установлено, что α — довольно маленькое число: $\alpha = 1/137,036$. То обстоятельство, что постоянная α очень мала, чрезвычайно важно. Именно поэтому оказывается возможным вычислить с большой точностью так называемые *квантовые поправки* к известным электромагнитным процессам. Все эксперименты, выполненные до сих пор для проверки так называемой *квантовой электродинамики* (теория, которая возникает при объединении квантовой механики с уравнениями Максвелла), дают

Рис. 11. Американский физик Ричард Фейнман. Один из создателей квантовой электродинамики. Внес значительный вклад в развитие современной физики элементарных частиц. В 1964 г. был удостоен Нобелевской премии



исключительно хорошее согласие результатов теории и эксперимента.

Новый важный шаг в развитии современной физики элементарных частиц был сделан в 1928 г. английским физиком Полем Дираком. Вскоре после того, как Вернер Гейзенберг, Эрвин Шредингер, Макс Борн, Вольфганг Паули и другие создали квантовую механику, Дирак попытался объединить только

**Уравнение
Дирака
и антиматерия**

что родившуюся теорию с идеями теории относительности и уравнениями Максвелла. В результате он пришел к уравнению для движения заряженной частицы, обладавшему поразительными свойствами. Помимо того,

что это уравнение, названное по имени его создателя уравнением Дирака, хорошо описывало физические свойства электрона, оно же, как обнаружил Дирак, предсказывало существование еще одной частицы, которая должна иметь ту же массу, что и электрон, но положительный электрический заряд. Вскоре существование этой частицы, называемой сегодня *позитроном*, было подтверждено, так как позитрон был найден в эксперименте, в котором изучалось космическое излучение. Это открытие было сделано Чарльзом Дэвидом Андерсоном из Калифорнийского технологического института в Пасадене.

Дирак пришел к выводу, что все частицы, описываемые его уравнением, обязаны иметь античастицы; это, в частности, от-

носится и к электрону. Мы знаем сегодня, что этот вывод Дирака применим не только к электронам: все частицы имеют свои античастицы (это уже отмечалось в предыдущей главе).

Выше говорилось, что позитроний, т. е. система, состоящая из электрона и его античастицы, обладает тем свойством, что за короткое время он превращается в излучение. С помощью

Аннигиляция позитрония в фотоны

фейнмановских диаграмм можно очень легко изобразить этот процесс. Так, аннигиляция парапозитрония описывается диаграммой, на которой слева электрон сближается с позитроном и при этом они взаимно уничтожаются, в результате чего рождаются два фотона (рис. 12).

Точно так же можно изобразить аннигиляцию ортопозитрония диаграммой, на которой электрон взаимно уничтожается с позитроном, но при этом образуются уже три фотона. То обстоятельство, что парапозитроний всегда превращается в два фотона, а ортопозитроний — в три, есть одно из следствий уравнений Максвелла. Оказывается, что два фотона никогда не могут образовывать вместе состояние с моментом импульса, равным единице (в единицах \hbar). Но парапозитроний представляет собой такое состояние электрона и позитрона, в котором спины этих частиц противоположно направлены, т. е. момент импульса такого состояния равен нулю, если, конечно, рассматривать состояние с наименьшим моментом импульса орбитального движения, равным нулю. С другой стороны, ортопозитроний является состоянием, в котором векторы обоих спинов направлены в одну сторону; это означает, что ортопозитроний есть состояние с моментом импульса, равным единице. По этой при-

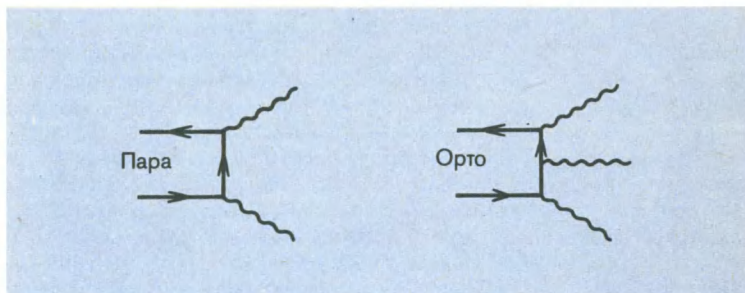


Рис. 12. Распад пара- и ортопозитрония на фотоны. Электрон изображается прямой линией со стрелкой, позитрон — прямой линией со стрелкой, направленной в противоположную сторону, а фотон — волнистой линией. Парапозитроний распадается на два фотона, ортопозитроний — на три. Время жизни ортопозитрония больше времени жизни парапозитрония

чине невозможно, чтобы ортопозитроний превратился, как и парапозитроний, в два фотона; он может превратиться лишь в три или большее число фотонов¹.

Время жизни орто- и парапозитрония различно. В рамках квантовой электродинамики это легко объяснить: за каждый лишний фотон, принимающий участие в реакции, нужно заплатить определенную цену, а именно, ввести дополнительный множитель, равный константе связи α . Отсюда следует, что интенсивность распада ортопозитрония подавлена по сравнению с аналогичной интенсивностью распада парапозитрония множителем α . Вследствие этого ортопозитроний живет много дольше парапозитрония.

В заключение напомним важнейшие различия между фотонами и электронами и позитронами. Электрон (позитрон) электрически заряжен, имеет массу, спин его равен $1/2$. Фотон электрически нейтрален, не имеет массы, спин его равен 1^2 . Фотону не соответствует какая-то отдельная античастица; в определенном смысле он есть античастица по отношению к самому себе.

3

БОЛЬШИЕ ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Как только физики задумались над структурой атомного ядра, они сразу же столкнулись с загадочным явлением. Было известно, что атомные ядра состоят из двух типов частиц: протонов и нейтронов. В частности, в тяжелых атомных ядрах, например в ядрах атома урана, содержится довольно большое число протонов и нейтронов. Так, в ядре урана имеется 92 протона. С точки зрения электродинамики чрезвычайно трудно удержать столь большое число протонов в таком маленьком объеме, как объем атомного ядра. Трудность здесь заключается в *электрическом отталкивании* между протонами. Это отталкивание протонов внутри ядра урана так велико, что следовало бы

**Почему
не взрываются
атомные ядра?**

¹ Точнее, ортопозитроний может превращаться лишь в нечетное число фотонов, а парапозитроний — в четное. — *Прим. пер.*

² Автор имеет в виду массу покоя фотона. Она равна нулю, так как фотон (квант света) движется, естественно, со скоростью света, а теория относительности допускает движение с такой скоростью только частиц с нулевой массой покоя. — *Прим. пер.*

ожидать, что ядро через короткое время должно взорваться, если только нет каких-то других сил кроме электрических, которые стабилизируют ядро.

Сегодня мы знаем, что такие силы действительно существуют. Их называют *ядерными силами* или, иначе, силами, обусловленными сильным взаимодействием. Они ответственны за образование атомных ядер. Ядерные силы на самом деле очень велики. Наивные оценки приводят к тому, что ядерные силы по крайней мере в 100 раз больше электрических сил, значение которых определяется постоянной тонкой структуры α .

В этой связи сразу возникает вопрос: почему мы не наблюдаем эффектов сильного взаимодействия в нашей повседневной жизни, так же как мы наблюдаем ежедневно эффекты электромагнитного взаимодействия?

Ответ следует искать в весьма специфическом свойстве сильного взаимодействия. Ядерные силы оказываются большими лишь на очень малых расстояниях, именно, на расстояниях порядка 10^{-13} см (одна стотысячная доля размера атома). Когда мы рассматриваем, например, две ядерные частицы, удаленные друг от друга на расстояние, много большее 10^{-13} см, допустим, на расстояние 10^{-10} см, то эти частицы не испытывают практически никакого влияния сильного взаимодействия и главной является электромагнитная сила, действующая между ними. Если речь идет о двух протонах, то они отталкиваются друг от друга. Но ситуация резко меняется, если обе частицы начинают сближаться. Как только расстояние между ними достигает 10^{-13} см, вступает в свои права сильное взаимодействие и обе частицы притягиваются друг к другу. Это притяжение, обусловленное сильным взаимодействием, и является причиной образования *атомных ядер*, а также причиной того, что типичный размер атомного ядра равен по порядку величины $10^{-12} - 10^{-13}$ см.

Мы уже указывали, что электроны принимают участие только в электромагнитном (не сильном) взаимодействии, в то время как протоны и нейтроны участвуют в сильном взаимодействии. Пока мы не будем обсуждать, почему это так.

Поскольку сильное взаимодействие существенно лишь на очень малых расстояниях (меньших 10^{-13} см), его называют *взаимодействием с коротким радиусом действия*. Ограниченный радиус действия сильного взаимодействия препятствует наблюдению ядерных сил на макроскопических расстояниях. При электромагнитном взаимодействии ситуация иная. Нельзя указать никакого определенного расстояния, на котором исчезают электрические силы

Малый радиус действия ядерных сил

(аналогичного расстоянию 10^{-13} см для сильного взаимодействия). По этой причине говорят, что электромагнитное взаимодействие имеет неограниченный радиус действия.

Выше было отмечено, что взаимодействие между электрически заряженными объектами (притяжение или отталкивание) можно описать как результат обмена виртуальными фотонами. Теперь можно задать вопрос и в отношении сильных взаимодействий: нельзя ли аналогичным образом объяснить и ядерные силы? Первые идеи в этом направлении были высказаны в

Идея Юкавы

30-е годы японским физиком Хидеки Юкавой. Он попытался описать сильное взаимодействие между нуклонами как результат обмена некими новыми частицами. В рамках квантовой теории существует тесная связь между массой обмениваемой частицы и радиусом действия соответствующего взаимодействия. Например, фотоны не имеют массы. По этой причине радиус электромагнитного взаимодействия неограничен и у нас есть возможность наблюдать электрические силы и на больших расстояниях. На основании ограниченности радиуса действия ядерных сил мы должны заключить, что сильное взаимодействие обусловлено обменом массивными частицами. Поскольку характерная длина сильного взаимодействия равна 10^{-13} см, отсюда можно легко найти значение массы обмениваемой частицы. Она получается равной 100 — 150 МэВ в энергетических единицах, т. е. $1/7$ — $1/9$ массы протона.

Не прошло и десяти лет с момента предсказания Юкавы, как эти частицы, π -мезоны, были обнаружены на опыте. В проти-

π -мезоны и ядерные силы

воположность нуклонам π -мезоны не имеют спина. По этой причине их называют *скалярными частицами*. Масса π -мезонов равна 140 МэВ. Всего наблюдаются три различных π -мезона: положительно заряженный (π^+), отрицательно заряженный (π^-) и нейтральный (π^0). Частицы π^+ и π^- являются античастицами по отношению друг к другу, а π^0 -мезон совпадает со своей античастицей.

Считая π -мезоны частицами, обмен которыми обуславливает сильное взаимодействие, можно построить теорию этого взаимодействия, очень похожую на обсуждавшуюся выше квантовую электродинамику. Но пытаясь сделать это, мы сталкиваемся со значительными трудностями. Интенсивность как сильного, так и электромагнитного взаимодействия определяется некоторой константой связи. Оказывается, однако, что константа связи для сильных взаимодействий не только много больше α , но и больше единицы (около 10). По этой причине невозможно построить теорию сильного взаимодействия, аналогичную квантовой электродинамике; для последней чрезвычайно существенно, что постоянная α много меньше единицы. Почему

это так, видно на следующем примере. Рассмотрим, например, два электрона, удаленные на расстояние 1 см друг от друга. Сила отталкивания между обоими электронами обусловлена обменом одним виртуальным фотоном. Однако имеется воз-

Электродинамика и теория возмущений

можность того, что электроны обмениваются двумя или более фотонами. В рамках квантовой электродинамики эти двух- или многофотонные процессы сильно подавлены. При вычислении каждый дополнительный фотон вносит дополнительный множитель, равный постоянной тонкой структуры α . По этой причине можно с хорошей точностью пренебречь двухфотонными процессами. Если же к точности вычислений предъявляются очень высокие требования, то необходимо при вычислениях учесть по крайней мере двухфотонные процессы. Это сделать просто, трудности возникают лишь при вычислении сложных интегралов. Этот метод носит название *теории возмущений*; двух- или многофотонные процессы можно рассматривать как малые возмущения основного процесса обмена одним фотоном, и при этом их можно точно вычислить.

В случае сильного взаимодействия уже нельзя применять теорию возмущений. Поскольку константа связи сильного взаимодействия велика, не имеет никакого смысла рассматривать обмен двумя или более π -мезонами между двумя нуклонами как малое возмущение основного процесса (обмен единственным мезоном). Напротив, вероятность того, что в сильном взаимодействии между нуклонами принимают участие два или более π -мезонов, много больше вероятности обмена одним мезоном. Теория возмущений неприменима, и до сегодняшнего дня физики-теоретики не придумали другого метода обращения с теорией Юкавы.

Несмотря на эту, скорее техническую, проблему, мы все же полагаем сегодня, что истинная теория сильного взаимодействия не имеет ничего общего со старой теорией Юкавы. Начиная

с 1970 г. физики, занимающиеся изучением элементарных частиц, открыли много новых свойств сильного взаимодействия, не укладывающихся в рамки теории Юкавы. Это произошло в результате изучения поведения нуклонов в весьма необычных условиях, например при изучении столкновений нуклонов очень больших энергий или при рассеянии очень энергичных электронов на атомных ядрах.

Вновь обретенные знания привели к тому, что в течение нескольких лет была разработана теория

Кварки

сильного взаимодействия, имеющая все шансы оказаться истинной теорией, — так называемая *квантовая хромодинамика* (КХД). Эта теория имеет дело с очень своеобразными объектами — так называемыми

кварками. Одна из задач этой книги состоит в том, чтобы познакомить читателя с идеей кварков и квантовой хромодинамикой. Но перед этим нам следует познакомиться еще с некоторыми другими аспектами современной физики элементарных частиц, в частности стоит поговорить о том, что с течением времени число элементарных частиц необычайно возросло.

4

СКОЛЬКО ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ?

К 1932 г. физикам было известно четыре типа частиц, а именно: электроны, фотоны, протоны и нейтроны. Если не считать фотона, эти частицы являются составными частями наблюдаемой материи. При этом предполагалось, что они являются элементарными объектами, т. е. не состоят из еще меньших частей. С тех пор ситуация резко изменилась; сегодня нам известно несколько сотен элементарных частиц, причем с течением времени стало ясно, что большинство так называемых элементарных частиц отнюдь не элементарны.

Одной из самых своеобразных в этом зоопарке элементарных частиц является нейтрино. В начале 30-х годов нашего столетия Вольфганг Паули предсказал существование этой частицы, основываясь на странных экспериментальных результатах, полученных при исследовании β -распада. Некоторые атомные ядра, а также нейтрон, нестабильны, а распадаются с испусканием электронов (называемых β -лучами).

β -Распад вызван специальным типом взаимодействия — слабым взаимодействием. Оно существует в природе наряду с сильным и электромагнитным взаимодействиями. В процессе изложения мы будем часто возвращаться к различным свойствам слабого взаимодействия.

Поскольку нейтрон немного тяжелее протона, он может распасться на протон и электрон. Масса нейтрона приблизительно на 1,3 МэВ больше массы протона, если выразить их в энергетических единицах. Если бы протон был тяжелее нейтрона, то нейтрон был бы стабильным, а протон должен был бы распадаться на нейтрон и позитрон. Но, к счастью, это не так. В противном случае, например, атом водорода был бы нестабилен и распадался бы за несколько минут. Это означало бы, что нельзя создать никакой органической материи. Жизнь была бы невозможной.

Я хотел бы заметить в связи с этим, что мы до сих пор не понимаем, почему нейтрон тяжелее протона. На самом деле,

непредубежденный физик должен принять, что разница в массах нейтрона и протона имеет какое-то отношение к электромагнитному взаимодействию. Поскольку протон из-за наличия электрического заряда окружен электрическим полем, а у нейтрона заряда и поля нет, следует признать, что масса протона должна быть несколько больше массы нейтрона. Действительно, электрическому полю протона соответствует некоторая энергия и она должна вносить вклад в массу протона. Аналогичный эффект имеет место и для π -мезонов. Заряженные π -мезоны несколько тяжелее нейтральных. Мы знаем сегодня: это так, потому что заряженные π -мезоны "несут"

Одетые мезоны с собой собственное электрическое поле, чего нет у нейтральных π -мезонов (рис. 13).

В случае нуклонов все совершенно наоборот: нейтральная частица (нейтрон) тяжелее положительно заряженной частицы (протон).

Одним из фундаментальных физических законов является *закон сохранения энергии*. В каждом физическом процессе энергия сохраняется, т. е. энергия в начале процесса в точности равна энергии в конце, если при этом считать, что процесс происходит в замкнутой системе и никакая энергия не поступает извне и не уходит наружу. Закон сохранения энергии справедлив также и для процессов с участием эле-

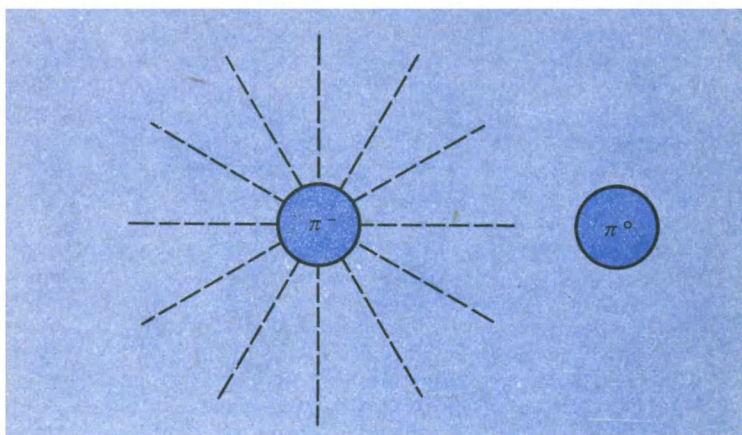


Рис. 13. Заряженные и нейтральные π -мезоны. Заряженные π -мезоны окружены электрическим полем. Этому полю соответствует энергия, дающая вклад в массу мезона. Заряженные π -мезоны несколько тяжелее нейтральных π -мезонов

**Энергия
сохраняется**

ментарных частиц. Например, мы, естественно, ожидаем, что при β -распаде нейтрона энергия сохраняется. Следовательно, сумма энергий конечных частиц в процессе распада (энергия протона плюс энергия электрона) в точности равна энергии первоначального нейтрона (для покоящегося нейтрона эта энергия определяется его массой). Но эксперименты, проводившиеся с начала века в ядерной физике, приводили к выводу о кажущемся нарушении закона сохранения энергии в β -распаде. Сумма энергий конечных частиц оказывалась меньше первоначальной энергии. Поэтому физики столкнулись с серьезной проблемой, и одно время даже обсуждалась возможность того, что закон сохранения энергии может не всегда выполняться, по крайней мере в реакциях с элементарными частицами.

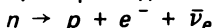
**Энергетический
кризис в физике**

В конце концов правильное решение проблемы было найдено Вольфгангом Паули. Он пришел к выводу о существовании еще одной нейтральной частицы, испускаемой при β -распаде одновременно с протоном и электроном. Эта частица должна быть относительно легкой (масса ее должна быть меньше или

**Паули
открывает
нейтрино**

порядка массы электрона) и должна принимать участие только в слабых взаимодействиях. Тогда еще невозможно было непосредственно наблюдать такую частицу. Итальянский физик Энрико Ферми назвал новую

частицу *нейтрино*, так как она представляла собой как бы маленький нейтрон. Позднее оказалось целесообразным принять, что испускаемое в β -распаде нейтрино на самом деле является антинейтрино, точнее, электронным антинейтрино, обозначаемым $\bar{\nu}_e$ (ниже мы увидим, что существуют и другие типы нейтрино). Процесс распада нейтрона запишем в виде



(рис. 14). Сам Паули не был удовлетворен своим открытием. Он считал, что постулированную им частицу никогда нельзя будет непосредственно наблюдать и поэтому его гипотеза остается недоказанной. В письме¹ к "Группе радиоактивных", собравшихся на конференцию в Тюбингене, Паули в 1930 г. писал:

¹ Полностью письмо Паули приводится в его статье "К старой и новой истории нейтрино", помещенной в сборнике "Теоретическая физика XX в." (М.: Изд-во иностр. лит., 1962). В связи с тем что Паули назвал новую частицу *нейтроном*, напомним, что настоящий нейтрон еще не был открыт в 1930 г. На опыте наблюдался только β -распад тяжелых ядер, в результате которого получалось ядро с зарядом, на одну единицу большим, и вылетал электрон. — *Прим. пер.*

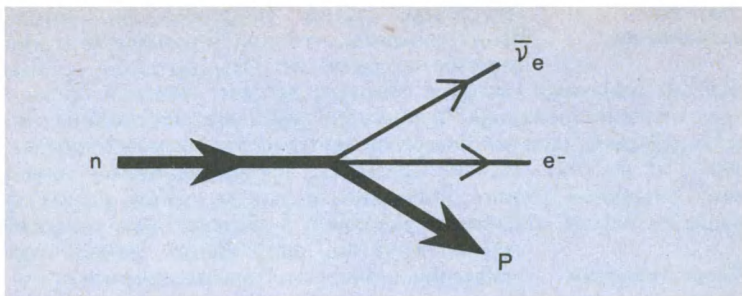


Рис. 14. β -Распад нейтрона. Нейтрон (n) распадается на протон p , электрон e^- и электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$

*"Физический институт высшей технической школы в Цюрихе".
Цюрих, 4 декабря 1930 г.*

Дорогие радиоактивные дамы и господа, как расскажет Вам во всех подробностях предъявитель этих строк (и я прошу выслушать его благосклонно), имея в виду . . . непрерывный β -спектр, я предпринял отчаянную попытку спасти . . . закон сохранения энергии. Именно, имеется возможность того, что в ядрах существуют электрически нейтральные частицы, которые я буду называть нейтронами и которые обладают спином $1/2$; они подчиняются принципу запрета и отличаются от световых квантов помимо этого еще и тем, что движутся не со скоростью света. Масса нейтрона по порядку величины должна быть сравнимой с массой электрона и во всяком случае не более $0,01$ массы протона. Непрерывный β -спектр тогда стал бы понятным, если предположить, что при β -распаде вместе с электроном испускается еще нейтрон таким образом, что сумма энергий нейтрона и электрона остается постоянной . . .

Однако пока я не решаюсь публиковать что-нибудь по поводу этой идеи и с доверием обращаюсь только к Вам, дорогие радиоактивные дамы и господа, с вопросом, можно ли экспериментально доказать существование такого нейтрона, если он будет обладать проникающей способностью примерно такой же или в 10 раз большей, чем γ -квант?

Я признаюсь, что мой выход может показаться на первый взгляд маловероятным, потому что нейтроны, если они существуют, пожалуй, давно были бы уже обнаружены. Однако не рискуя, не выиграешь; серьезность положения с непрерывным β -спектром хорошо проиллюстрировал мой уважаемый предшественник г-н Дебай, который недавно заявил мне в Брюсселе: "О . . . об этом лучше не думать вовсе, как о новых налогах". Поэтому, дорогие радиоактивные дамы и господа, проверяйте и судите. К сожалению, я сам не могу появиться в Тюбингене, так как предстоящий в Цюрихе бал в ночь с 6 на 7 декабря лишит меня этой возможности. С большим приветом Вам, а также г-ну Баку, Ваш верноподданнейший слуга.

**Закон
сохранения
энергии
и налоги**

думать вовсе, как о новых налогах". Поэтому, дорогие радиоактивные дамы и господа, проверяйте и судите. К сожалению, я сам не могу появиться в Тюбингене, так как предстоящий в Цюрихе бал в ночь с 6 на 7 декабря лишит меня этой возможности.

В. Паули

**Ядерные
реакторы
рождают
нейтрино**

Паули ничуть не преувеличил трудности, связанные с экспериментальным обнаружением нейтрино (в своем письме он называет эту частицу нейтроном). Потребовалось более двадцати лет, прежде чем нейтрино было открыто в первой половине 50-х годов; это удалось сделать, изучая поток нейтрино, идущий от ядерного реактора.

Сегодня мы знаем о нейтрино очень много. В различных исследовательских центрах физики высоких энергий, например в ЦЕРН, созданы специальные установки, с помощью которых образуются высокоэнергичные пучки нейтрино, используемые затем для разнообразных экспериментов. Во всяком случае, Паули был бы очень поражен, если бы мог услышать сегодня, что удастся сделать с помощью нейтрино.

Доказано, что нейтрино — очень легкие частицы. Их масса много меньше той, которую первоначально называл Паули, и может быть так, что нейтрино, как фотоны, вообще не имеют массы. Во всяком случае, до сегодняшнего дня нет никаких прямых экспериментальных свидетельств наличия массы у нейтрино¹. В результате экспериментов, проведенных за это время, по изучению свойств β -распадов была найдена очень маленькая верхняя граница для массы испускаемого при β -распаде нейтрино — приблизительно 30 эВ; это означает, что нейтрино, испускаемое при β -распаде, должно быть более чем в 10 тыс. раз легче самой легкой из известных нам частиц — электрона.

Физические свойства нейтрино весьма примечательны. Как говорилось выше, нейтрино полностью игнорируют сильные и электромагнитные взаимодействия. Они принимают участие только в слабом взаимодействии. Отсюда следует, что нейтрино очень слабо взаимодействуют с обычной материей; они без труда могут проходить через большие скопления вещества. Например, поток нейтрино с легкостью проходит сквозь Землю или Солнце. Лишь чрезвычайно редко нейтрино вступает во взаимодействие с атомным ядром или электроном атомной оболочки. Свойства нейтрино очень метко отражены в следующем стихотворении Джона Апдайка, появившемся в 1960 г.:

¹ Опыты, проведенные в 1980 г. в Москве в Институте теоретической и экспериментальной физики, свидетельствуют о наличии у нейтрино отличной от нуля массы покоя от 10 до 40 эВ. Этот важнейший вывод нуждается в дополнительном подтверждении, и соответствующие эксперименты проводятся сейчас в нескольких лабораториях мира. — *Прим. пер.*

Малы нейтрино, где там глазу,
Зачем им масса и заряд,
Взаимодействовать ни с газом,
Ни с твердым телом не хотят.
Земля для них как шар дурацкий,
И им пройти сквозь медь и сталь
Как мотыльку сквозь сад промчаться
Или фотонам сквозь хрусталь.
Пронзают толщу стен кирпичных
И ярых в стойле жеребцов,
К барьерам классов безразличны,
Меня и вас в конце концов.
Невидимая гильотина,
От маковки до ног нейтрино
Пронижут каждого и всех

.....

Вам это кажется прекрасным,
А мне, поверите ль, ужасным.

Хотя нейтрино очень редко взаимодействуют с веществом, именно эти редкие реакции оказались в высшей степени интересными. По этой причине за прошедшие годы физика нейтрино заняла одно из центральных мест в физике элементарных частиц. Мы будем в процессе изложения неоднократно возвращаться к обсуждению важнейших результатов нейтринной физики.

**Реакции
с нейтрино —
редкие, но
ценные**

Начиная с 1950 г. наряду с нейтрино было открыто множество новых частиц. Отличительным свойством всех этих частиц является то, что они не представляют собой составные части наблюдаемой нами материи, а живут лишь очень короткое время. Они рождаются в лабораториях и через крошечные доли секунды вновь распадаются на знакомые нам частицы. В рамках этой книги невозможно дать точное описание всех новых частиц; я ограничусь лишь кратким обзором современной ситуации.

**Зоопарк
элементарных
частиц**

Когда со вновь открытыми частицами познакомились поближе, стало ясно, что необходимо разделить их на отдельные группы.

Первая группа включает все сильновзаимодействующие частицы. До этого момента мы уже познакомились с пятью таки-

¹ Пер. с англ. Т. Воронцовой.

ми частицами: с протоном, нейтроном и тремя π -мезонами. Сильновзаимодействующие частицы называют *адронами*. Сегодня известно очень большое число адронов. При этом обнаружилось, что внутри класса адронов существуют два различных семейства частиц, называемых *мезонами* и *барионами*.

Типичным представителем группы мезонов является π -мезон, кстати самый легкий из известных нам мезонов. Примерами других мезонов являются K -мезоны, к которым мы еще вернемся и масса которых примерно равна половине массы протона, а также ρ -мезоны, масса которых составляет $3/4$ массы протона.

Все мезоны нестабильны и в конце концов распадаются на электроны, позитроны, фотоны и нейтрино; это означает, что в результате их распада не остается никаких сильновзаимодействующих частиц. Другим свойством мезонов является то,

**Мезоны имеют
целый спин**

что все они имеют целый спин. Мы уже знаем, что спин π -мезона равен 0; это же верно и для K -мезона. Упомянутый выше ρ -мезон имеет спин, равный 1; физики по этой причине называют ρ -мезон *векторным мезоном*. Существуют и мезоны со спином 2, 3, 4 и т. д. При этом для спектра наблюдаемых мезонов характерно, что масса частиц возрастает с увеличением спина. Хотя эксперименты не вполне однозначны, все же физики, занимающиеся элементарными частицами, полагают, что существует бесконечное число мезонов, причем с произвольно большими спинами.

Другое семейство сильновзаимодействующих частиц включает уже знакомые нам нуклоны. Однако помимо нуклонов существует еще целый ряд частиц, родственных им, например *гипероны* (обозначаемые Λ , Σ , Ξ) и так называемые Δ -частицы. Все указанные частицы тяжелее нуклонов, которые в свою очередь много тяжелее легчайшего π -мезона. По этой причине второе семейство сильновзаимодействующих частиц получило название *барионов* (производное от греческого слова "бариос", что означает "тяжелый"). Особенностью барионов является то, что их спин полуцелый. Нуклоны и упомянутые выше гипероны имеют спин, равный $1/2$, Δ -частицы имеют спин $3/2$. Помимо этого существуют барионы со спинами $5/2$, $7/2$ и т. д., причем, как и в случае мезонов, считается, что эта цепочка не обрывается, т. е. существует бесконечно много барионов с произвольно большими спинами.

Все барионы, за исключением протона, нестабильны, причем они распадаются так, что в результате остается один протон наряду с другими сильно не взаимодействующими частицами, например электронами. Так, Λ -гиперон, имеющий массу 1116 МэВ,

**Распадающиеся
барионы**

распадается на протон и π^- -мезон; время жизни Λ -гиперона составляет примерно 10^{-10} с (рис. 15). Все это есть следствие одного важного закона сохранения, а именно *закона сохранения барионного числа*. Этот закон утверждает,

**Загадка
сохранения
барионного
числа**

что число барионов минус число антибарионов сохраняется в любом физическом процессе. Когда мы, например, сталкиваем вместе два протона (это ежедневно делается в лабораториях физики высоких энергий, причем при этом рождается целый ряд новых частиц), то в начале число барионов равно двум. Следовательно, и в конце барионное число должно тоже равняться двум. Это может произойти многими различными способами. Простейший заключается в том, что в результате процесса соударения вновь образуется два бариона, например два протона, протон и нейтрон, либо два нейтрона (наряду с другими небарионами вроде мезонов, электронов, позитронов и т. п.). Но может быть и так, что образуются три бариона и один антибарион (либо p , либо n), например, в процессе

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

И вновь число барионов минус число антибарионов равно двум. Мы получим простое математическое описание этого закона, если введем специальное квантовое число — *барионное число* B . Тогда закон легко формулируется, если приписать каждому бариону барионное число $B = +1$, а каждому антибариону — барионное число $B = -1$. Мезонам, а также всем сильно не взаимодействующим частицам вроде электронов следует приписать барионное число, равное 0. В любом физическом процессе барионное число сохраняется.

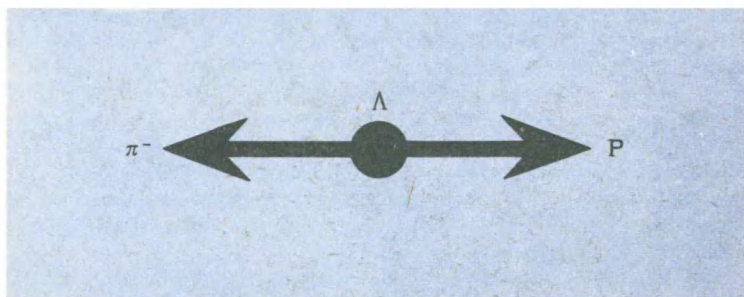


Рис. 15. Находящаяся в покое Λ -частица распадается через 10^{-10} с, превращаясь, например, в протон и π -мезон

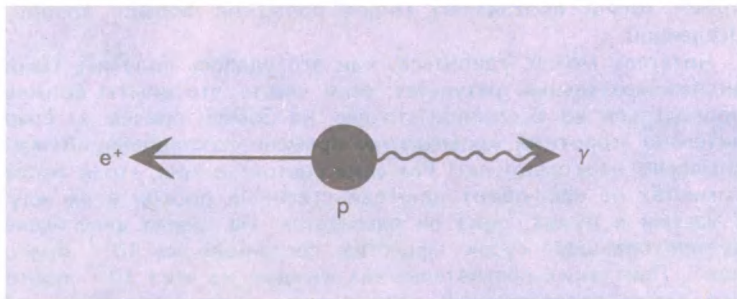


Рис. 16. Гипотетический распад протона на позитрон и фотон. Подобный распад совместим с законом сохранения электрического заряда, однако закон сохранения барионного числа здесь нарушается

По своему значению в физике закон сохранения барионного числа аналогичен закону сохранения электрического заряда. В обоих случаях до сего дня нет никаких указаний на то, что эти законы сохранения выполняются неточно. Мы должны специально подчеркнуть: сохранение барионного числа гарантирует, что протон является стабильной частицей. В принципе было бы возможно, что протон нестабилен. С учетом только закона сохранения электрического заряда он мог бы, например, распадаться на позитрон и фотон (рис. 16).

Умирующие протоны?

Но подобный процесс нарушал бы закон сохранения барионного числа, так как конечные продукты имеют барионное число, равное 0, а начальное состояние имеет барионное число, равное 1. Таким образом, сохранение барионного числа обеспечивает стабильность протона. Существует тесная связь между сохранением барионного числа и стабильностью материи.

Если барионное число строго сохраняется, то это, естественно, означает, что протон не распадается, т. е. живет бесконечно долго. Но может оказаться и так, что протон на самом деле распадается, но мы до сего дня не наблюдали такого распада, так как он происходит сравнительно редко. В прошлом были проведены различные прецизионные эксперименты для обнаружения возможного распада протона. Эти эксперименты дали

Протон живет много дольше Вселенной

нижнюю границу для времени жизни протона, оказавшуюся по обычным понятиям чудовищно большой, а именно 10^{29} лет. Можно составить некоторое представление о величине этого промежутка времени, если учесть, что установленный астрофизиками возраст Вселенной составляет примерно 10 миллиардов лет, так что

время жизни протона на много порядков больше возраста Вселенной.

Читатель может удивиться, как это удалось получить такой экспериментальный результат, если учесть, что опыты должны проводиться во Вселенной, точнее, на Земле, причем за сравнительно короткий промежуток времени, составляющий максимум несколько лет! Разгадка состоит в том, что в экспериментах не наблюдают один-единственный протон и не ждут с часами в руках, пока он распадется. На самом деле исследуется большой кусок вещества, состоящий из 10^{29} протонов¹. При таких обстоятельствах каждый из этих 10^{29} протонов имеет определенный, хотя и очень маленький, шанс распасться за сравнительно короткое время (в первых экспериментах — за несколько месяцев). Таким способом и получается столь ошеломляюще большой промежуток времени в качестве нижней границы времени жизни протона².

Тем не менее вопрос остается: живет ли протон бесконечно долго или его время жизни конечно? Возможно, читатель удивлен, почему мы так подробно остановились на вопросе о времени жизни протона. Почему нельзя просто принять, что время жизни протона бесконечно? Причина того, почему я не могу с самого начала принять это, заключается в следующем.

Сохранение барионного числа — очень своеобразное явление в физике. Между сохранением электрического заряда и сохранением барионного числа существует важное различие. Электрический заряд — это не просто число наподобие барионного, которое приписывается различным частицам (+1 для протона, 0 для нейтрона, -1 для электрона), электрический заряд описывает также динамическое поведение частиц в электрическом поле. Заряженная частица отклоняется электрическим полем, а нейтральная не отклоняется. К тому же заряженная частица окружена своим собственным электрическим полем, а у нейтральной частицы нет собственного поля. Так как с помощью соответствующих приборов можно сравнительно легко изме-

¹ Такое число протонов содержится примерно в 1 т воды. — *Прим. пер.*

² Надо подчеркнуть, что до сих пор никто не наблюдал с достоверностью ни одного распада протона. Когда говорят о нижней границе времени жизни протона, подразумевают, что, скажем, за год наблюдений в образце, содержащем 10^{29} протонов, не наблюдалось ни одного распада, откуда и следует, что время жизни протона больше 10^{29} лет. — *Прим. пер.*

ритель электрические поля, то можно с большого расстояния определить электрический заряд некоторого объекта без более близкого знакомства с ним.

Ничего похожего нет в случае барионного числа. Барион никак не влияет на окружающее его пространство, например, из-за наличия какого-то поля, аналогичного электрическому. По этой причине невозможно установить с какого-то расстояния, сколь велико барионное число некоторого объекта. Барионное число играет в физике скорее роль некоего бухгалтера, который строго следит за тем, чтобы все было в порядке, но никак не влияет на динамику происходящих процессов. Непредубежденный читатель может спросить: а вдруг все это не так и на самом деле существует какое-то физическое поле, связанное с барионным числом или, как еще говорят, с барионным зарядом? Возможно, что это поле просто много слабее электрического и по этой причине его до сих пор не наблюдали.

Довольно легко оценить, насколько слабым должно быть такое "баромагнитное" поле, чтобы ускользнуть от наблюдения.

Существует ли баромагнитное поле?

Допустим, что это поле независимо от его интенсивности связано с барионным числом так же, как электрическое поле с электрическим зарядом. Но каждый макроскопический кусок вещества, например кусок железа, имеет невероятно большое барионное число, равное числу содержащихся в нем нуклонов. Поскольку наблюдаемая материя состоит только из барионов, но не содержит антибарионов, барионное число любого куска вещества положительно, т. е. два куска вещества должны отталкиваться друг от друга. В частности, такой эффект должен быть заметным в астрономии, например при отталкивании Земли от Солнца, которое, таким образом, противостоит притяжению, обусловленному силами тяготения. Отсюда возникает ограничение на значение "барионной" силы: она не может быть больше гравитационной.

С другой стороны, можно легко подсчитать, сколь сильным было бы отталкивание, если принять, что баромагнитная сила так же велика, как электрическая сила; иными словами, если принять, что константа связи баромагнитной силы равна по величине константе α . Результат чудовищен: возникающее из-за наличия баромагнитной силы отталкивание должно быть в 10^{36} раз сильнее притяжения, обусловленного гравитацией. Все это позволяет считать, что, по-видимому, не существует никаких баромагнитных сил.

Нам известно еще одно физическое явление, связанное с сохранением барионного заряда, а именно, то обстоятельство, что наш мир состоит из барионов, и нет никаких свидетельств, что во Вселенной существует в больших

Почему нет антиматерии?

количествах антиматерия. Это чрезвычайно удивительно, так как в рамках физики элементарных частиц существует симметрия

между барионами и антибарионами. Кажется, что в случае строгого сохранения барионного числа нет ничего, что отличало бы барионы от антибарионов, и по этой причине следует ожидать, что в Космосе существует равное число барионов и антибарионов. Однако оказывается, что можно понять отсутствие антиматерии во Вселенной, если отказаться от точного закона сохранения барионного числа и, таким образом, допустить возможность распада протона. В процессе дальнейшего изложения выяснится, что несохранение барионного числа представляется совершенно естественным в рамках современной полевой теории элементарных частиц. Ожидается, что время жизни протона равно примерно 10^{30} лет — всего

Протоны должны распадаться

лишь немногим больше полученной из эксперимента нижней границы для времени жизни. В настоящее время в различных лабораториях США и Западной Европы готовятся эксперименты, которые позволяют либо поднять нижнюю границу для времени жизни протона, либо в конце концов увидеть распад протона. Мы вернемся еще к этому вопросу в конце книги.

Помимо мезонов и барионов необходимо рассмотреть еще одну группу частиц со спином $1/2$, не принимающих участие в сильных взаимодействиях. К этой группе относятся, естественно, электрон и обсуждавшееся выше нейтрино. Но существуют и другие частицы этого типа; их называют *лептонами*. Это

Лептоны

название произошло от греческого слова "лептос" (легкий), так как самый выдающийся представитель этой группы частиц электрон является очень легкой частицей по сравнению с протоном. (Совсем недавно установлено, что название лептон не имеет большого смысла. Мы знаем сегодня, что существуют также тяжелые лептоны, т. е. лептоны, которые тяжелее протона.)

До недавних пор считалось, что существуют только четыре лептона. Кроме электрона и связанного с ним нейтрино были обнаружены электрически заряженный лептон, который в

Мюон распадается

200 раз тяжелее электрона, названный мюоном (обозначается μ), а также связанное с ним мюонное нейтрино ν_μ . В противоположность электрону мюон нестабилен и распадается за одну миллионную долю секунды на электрон, электронное антинейтрино и мюонное нейтрино:

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

Бросается в глаза, что электрон, мюон и оба нейтрино являются относительно легкими частицами по сравнению с барионами.

Можно принять точку зрения, что лептоны имеют столь малые массы потому, что они не принимают участие в сильном взаимодействии. Эта точка зрения была, однако, поколеблена в середине 70-х годов в результате проведенных в СЛАК и ДЕЗИ экспериментов. Был найден новый лептон,

**Тяжелые
лептоны**

получивший название τ -лептона, масса которого равна примерно 1,8 ГэВ, т. е. почти вдвое больше массы протона. Наряду с этим

лептоном существует и связанное с ним нейтрино, обозначаемое ν_τ . Масса τ -нейтрино неизвестна, но она должна быть много меньше массы τ -лептона¹. Не исключено, что все нейтрино, в том числе и ν_τ , не имеют массы.

**Спаривание
лептонов**

Если повнимательнее рассмотреть группу известных сейчас лептонов, то можно заметить, что лептоны выступают парами, причем каждая пара состоит из нейтрино и заряженного лептона. Имеются три такие пары:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}.$$

Ниже мы увидим, что это спаривание лептонов имеет глубокое значение; отсюда вытекают весьма специфические свойства лептонов по отношению к слабому взаимодействию.

Если сравнить мир адронов с обсуждавшимся выше миром лептонов, можно заметить одно удивительное обстоятельство: адронов много больше, чем лептонов. На сегодняшний день

**Лептоны
элементарны**

нам известно всего шесть лептонов и несколько сотен адронов. Отсюда можно прийти к выводу, что лептоны являются более фундаментальными объектами, нежели

адроны. В течение 70-х годов было установлено, что эта идея правильна. Оказалось, что адроны представляют собой системы, состоящие из элементарных составляющих —

**Адроны
и кварки**

кварков. Первоначальная концепция кварков была предложена в 1964 г. Марри Гелл-Маном (рис. 17) и Джорджем Цвейгом (рис. 18). С того времени кварковая модель адронов из

смелой гипотезы превратилась в современную теорию адронов.

Мы увидим, что число три играет в кварковой модели особую роль; например, протон состоит из трех кварков. В этом причина возникновения названия *кварк*; Гелл-Ман выбрал

¹ В настоящее время экспериментально найдено, что масса τ -нейтрино меньше 250 МэВ. — *Прим. пер.*



Рис. 17. Американский физик Марри Гелл-Ман, работы которого определили развитие современной физики элементарных частиц. В 1969 г. был удостоен Нобелевской премии



Рис. 18. Американский физик Джордж Цвейг, который независимо от Гелл-Мана ввел в физику понятие кварков (и назвал их "тузами"). Цвейг преподает в Калифорнийском технологическом институте в Пасадене

его, ссылаясь на роман Джеймса Джойса "Поминки по Финнегану". Там мы находим следующий текст:

Три кварка и протон

Три кварка для мистера Марка!
Ему уж точно немного достанется на барке,
И все его богатство ему уж ни к чему.
О, боже, ведь правда, смехом наполнятся облака,
Когда мы увидим, как эта старая кашляющая развалина
Будет искать в темноте свою рубашку
И гоняться за своими пятнистыми штанами
По Пальмерстонскому Парку.

Роман Джойса полон трудной для понимания игры слов. Многое здесь до сего дня не разгадано. В "Поминках по Финнегану" описывается биография г-на Финна (иногда он появляется и в образе г-на Марка, как в приведенном отрывке). Три кварка — дети г-на Финна. Иногда они

выступают в роли самого г-на Финна. Отсюда становится ясной ассоциация с физикой элементарных частиц. Г-н Финн (то бишь г-н Марк) представляет протон. В определенных ситуациях протон ведет себя так, будто он состоит из трех кварков. Ниже мы разъясним, когда такое случается¹.

5

МЕЗОНЫ, БАРИОНЫ И КВАРКИ

Выше мы установили, что существенное отличие мира адронов от мира лептонов заключается в том, что адронов много больше, чем лептонов. Нам следует поближе познакомиться со спектром адронов. В этом спектре наблюдаются различные закономерности. Одна из них была замечена Вернером Гейзенбергом еще в 30-е годы, вскоре после открытия нейтрона. Гейзенберг был поражен тем обстоятельством, что протон и нейтрон очень похожи по своим физическим свойствам, исключение составляет лишь их электрический заряд. И действительно, протон и нейтрон чрезвычайно похожи. Спин обеих частиц равен $1/2$, а барионное число $+1$. Их массы почти одинаковы —

**Родство
нейтрона
и протона**

нейтрон очень ненамного тяжелее протона. Разность масс протона и нейтрона составляет всего 0,14% полной массы протона. Поскольку и нейтрон, и протон принимают

¹ Чтобы немного пояснить приведенную малопонятную цитату из романа Джойса, дадим краткую справку. Главного героя романа "Поминки по Финнегану" (1939 г.) зовут Хэмфри Чимпенс Эрвикер, и по ходу романа он перевоплощается во множество других лиц, в том числе в Финна, Марка и двух своих сыновей Шема и Шауна (у него еще есть дочь Изольда). Приведенный отрывок относится к тому месту романа, где главный герой засыпает и ему чудится, что он — король Корнуэллский Марк, который послал своего племянника, рыцаря Тристана, на свадебном корабле (барке) за невестой короля Марка, Изольдой. Тристан и Изольда полюбили друг друга. Чайки, вьющиеся над барком, издеваются над обманутым королем Марком и поют шуточную и довольно двусмысленную песенку, начало которой приведено выше. Поскольку Марк в романе — одновременно и главный герой, ирландец, то понятно и упоминание парка в Дублине. Следует заметить, что данный нами перевод очень приблизителен, так как роман Джойса непереводим на другие языки и построен на словотворчестве. Судя по дальнейшим строкам песенки, можно думать, что слова "три кварка" означают, что король Марк был обманут трижды. Заметим еще, что в немецком языке слово "кварк" буквально означает "творог", а в разговорной речи имеет смысл "чепуха, ерунда". Любопытно, что Гете употребил это слово, вложив его в уста Мефистофеля в первой части "Фауста". — *Прим. пер.*

участие в сильном взаимодействии — том взаимодействии, которое порождает ядерные силы, Гейзенберг пришел к мысли, что, возможно, сильное взаимодействие не различает нейтрона и протона. Это означало бы, что нейтроны и протоны одинаковым образом участвуют в сильном взаимодействии. Иными словами, сильное взаимодействие инвариантно относительно замены нейтронов на протоны и наоборот. Такая инвариантность носит название *изоспиновой симметрии*.

С течением времени выяснилось, что изоспиновая симметрия в природе очень хорошо выполняется, особенно в сильных взаимодействиях. Конечно, изоспиновая симметрия и не может

быть совершенно точной. Мы уже знаем, что электромагнитное взаимодействие явно нарушает изоспиновую симметрию, поскольку протоны и нейтроны ведут себя по отношению к электромагнитному взаимодействию по-разному.

Так как, по-видимому, идея изоспиновой симметрии в мире адронов вполне разумна, следует ожидать, что все адроны группируются определенным образом. Все члены одной группы имеют одинаковый спин, одинаковое барионное число и почти одинаковую массу, однако различаются электрическим зарядом. Примером является уже рассмотренная группа, состоящая из протона и нейтрона. Существование подобных групп подтверждается при рассмотрении наблюдаемого спектра адронов. Примерами изоспиновых групп, или, как их еще называют, *изоспиновых мультиплетов*, являются упомянутые выше π -мезоны, а именно три мезона π^+ , π^0 , π^- и так называемые Δ -частицы. Последние были обнаружены в

начале 50-х годов в экспериментах по рассеянию π -мезонов на нуклонах. Масса Δ -частиц равна примерно 1230 МэВ, т. е. они на 25% тяжелее протона. Всего имеется четыре Δ -частицы: Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^- . В частности, здесь мы встречаемся с элементарной частицей Δ^{++} , обладающей электрическим зарядом +2. Известны также и частицы, не имеющие изоспинового партнера, а выступающие, так сказать, в одиночку, например η -мезон, который электрически нейтрален и примерно в 4 раза тяжелее π -мезона.

Мы упоминали еще группу ρ -мезонов. Спин этих частиц равен 1, а масса составляет примерно 3/4 массы нуклона. Кроме того, существует нейтральный мезон ω , который также имеет спин 1 и чуть тяжелее ρ -мезона. Спектр этих частиц изображен на рис. 19.

Помимо изомультиплетов, упомянутых выше, в природе существует еще много других подобных мультиплетов, но частицы, входящие в них, много тяжелее тех, о которых мы уже

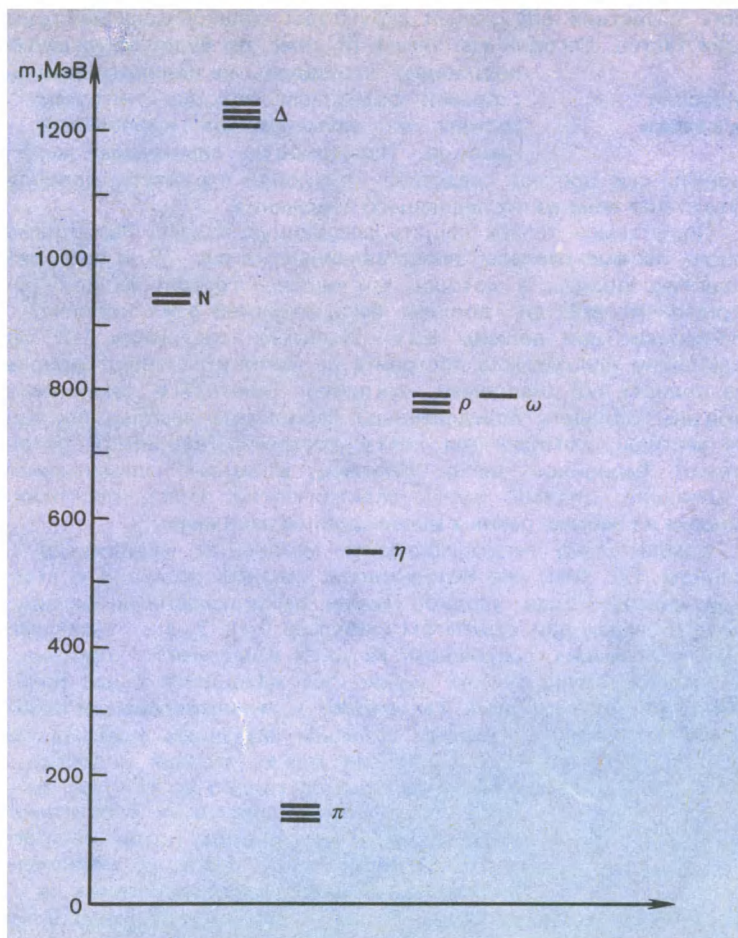


Рис. 19. Спектр относительно легких адронов. Массы соответствующих частиц приведены в мегаэлектрон-вольтах

говорили. Изоспиновая симметрия сильного взаимодействия является сегодня твердо установленной¹.

В чем же глубокая физическая причина существования изоспиновой симметрии? Установлено, что изоспиновая симметрия

¹ С математической точки зрения изоспиновая симметрия отвечает симметрии по отношению к группе $SU(2)$ (см с. 78). — Прим. пер.

есть следствие внутренней структуры сильновзаимодействующих частиц. Сегодня мы знаем (и ниже это будет обсуждаться подробнее), что адроны не являются элементарными объектами подобно лептонам, а

Изоспин и кварки

состоят из элементарных кирпичиков — кварков. Изоспиновую симметрию можно понять как простое следствие кварковой структуры адронов. Это станет ясно из последующего изложения.

Попытаемся теперь решить следующую задачу. Рассмотрим вновь изомультиплеты, представленные на рис. 19, и построим простую модель, в которой эти частицы состоят из каких-то компонент. Каковы должны быть свойства этих компонент? Во-первых, они должны быть объектами со спином $1/2$, так как иначе невозможно построить из таких компонент барионы со спином $1/2$ (например, нуклоны). Во-вторых, компоненты должны обладать определенным барионным числом, так как те частицы, которые мы хотим построить, например протон, имеют барионное число. Наконец, в-третьих, элементарные кирпичики должны иметь электрический заряд, поскольку многие из рассмотренных выше адронов заряжены.

Сравнительно легко построить мезоны из кирпичиков со спином $1/2$. Мы уже использовали похожий принцип в атомной физике. Если угодно, можно рассматривать атом водорода, обладающий моментом импульса $0, 1, 2, 3, \dots$, как особый тип мезона, состоящего из двух компонент — протона и электрона. Точно так же можно обсуждавшийся выше позитроний интерпретировать как мезон; и атом водорода, и позитроний являются системами с целым значением момента импульса. Конечно, такая аналогия между атомом водорода и позитронием и мезоном имеет смысл только до тех пор, пока речь идет о моменте импульса. В остальном атом водорода не слишком похож на мезон

Атомные "мезоны"

(атом водорода как целое не принимает участия в сильных взаимодействиях, в то время как мезон, например π -мезон, конечно, принимает в них участие). Все же аналогия между атомами и мезонами полезна и ниже мы будем часто ей пользоваться.

Попытаемся теперь сконструировать мезоны из кирпичиков со спином $1/2$. Конкретно: будем строить мезоны из какой-то частицы со спином $1/2$ и какой-то античастицы. Естественно, такая система имеет целый спин ($0, 1, 2, 3, \dots$). Сколько нужно ввести различных простейших кирпичиков, чтобы сконструировать все упомянутые выше мезоны? Очевидно, нам потребуется более одного сорта компонент, в противном случае все мезоны окажутся электрически нейтральными (система, состоящая из частицы и ее античастицы, с необходимостью нейтральна, так как электрический заряд античастицы в точности противо-

положен электрическому заряду соответствующей частицы).

Допустим, что имеются всего две различные компоненты, которые мы назовем *u*- и *d*-кварками (обозначения соответствуют английским словам *up* и *down*, т. е.

Кварки по имени *u* и *d* *верхний* и *нижний*). Имея два различных кварка *q*, можно построить всего четыре различные кварк-антикварковые системы:

$\bar{u}u, \bar{u}d, \bar{d}u, \bar{d}d$. Рассмотрим вновь наблюдаемый спектр мезонов. Мы замечаем, что мезоны всегда образуют группу по четыре, например группу $\pi^+, \pi^0, \pi^-, \eta$ или группу $\rho^+, \rho^0, \rho^-, \omega$. Поэтому мы уже близки к тому, чтобы интерпретировать мезоны как кварк-антикварковые системы. Прежде чем исследовать это в деталях, рассмотрим сначала барионы.

Пытаясь интерпретировать барионы (и мезоны) как системы, состоящие из нескольких кварков, мы, естественно, считаем, что для построения нуклона непременно требуется больше одного кварка. С другой стороны, невозможно построить барион, например нуклон, из двух кварков, так как спин двухкварковой системы не может быть полужелым, как у нуклона. Поэтому проще всего интерпретировать барионы как системы, состоящие из трех кварков. Обратимся опять к рис. 11.

Нуклон получается из трех кварков Можно ли построить представленные там барионы из введенных выше *u*- и *d*-кварков? Рассмотрим сначала Δ -частицы. Легко видеть, что существуют лишь четыре различные возможности построить систему qqq из *u*- и *d*-кварков: uuu, uud, udd, ddd . Мы следующим образом сопоставляем четыре различные Δ -частицы с этими четырьмя кварковыми конфигурациями:

$$\Delta^{++} = (uuu), \quad \Delta^+ = (uud),$$

$$\Delta^0 = (udd), \quad \Delta^- = (ddd).$$

Принимая такое сопоставление, можно теперь установить свойства кварков, в частности их квантовые числа. То, что мы получим, будет весьма удивительным. Рассмотрим сначала

Кварки со странными свойствами барионное число. Так как мы интерпретируем барионы как системы qqq , то барионное число кварков должно равняться трети барионного числа нуклона, т. е. $1/3$; *барионное число кварка дробное*. Чтобы сделать

следующий вывод, нужно принять, что Δ^{++} -частица состоит из трех *u*-кварков. По этой причине электрический заряд *u*-кварка должен равняться точно $1/3$ электрического заряда Δ^{++} , т. е. *электрический заряд u-кварка равен $2/3$* . Аналогично получается, что электрический заряд *d*-кварка равен $-1/3$. Таким образом, мы впервые в физике сталкиваемся с объекта-

ми, имеющими дробные барионное число и электрический заряд.

Теперь, наконец, можно аналогичным образом построить нуклоны из u - и d -кварков. Мы должны интерпретировать протон, имеющий электрический заряд $+1$, как систему, имеющую кварковую структуру (uud) , а нейтрон — как систему (udd) .

Вернемся опять к мезонам. Поскольку из рассуждений, относящихся к случаю барионов, мы уже установили электрические заряды кварков, возникает вопрос, как правильно

получить электрические заряды мезонов, интерпретируемых как кварк-антикварковые системы. Естественно, что электрический заряд системы $\bar{u}d$ равен -1 , так как электрический заряд анти- u -кварка равен

$-2/3$. Аналогично электрический заряд системы $\bar{d}u$ равен $+1$, а заряды систем $\bar{u}u$ и $\bar{d}d$ равны 0 . Поэтому мы проводим следующее сопоставление: $\pi^+ = (\bar{d}u)$, $\pi^- = (\bar{u}d)$, $\rho^+ = (\bar{d}u)$, $\rho^- = (\bar{u}d)$. Нейтральные мезоны π^0 и η или ρ^0 и ω имеют более сложную структуру, так как оказывается, что они являются суперпозициями нескольких нейтральных кварк-антикварковых конфигураций.

В целом можно уже сделать вывод, что мы способны с помощью идеи кварков простым образом описывать наблюдаемые в природе барионы и мезоны. Мезоны представляют собой системы кварк-антикварк, а барионы состоят из трех кварков. Схематично это изображено на рис. 20.

Выше мы описали π - и ρ -мезоны одинаковыми кварковыми конфигурациями. Это же верно и для нуклонов и двух Δ -частиц. В то же время эти частицы имеют совершенно разные массы. Так, ρ -мезон на 600 МэВ тяжелее π -мезона, а Δ -частица

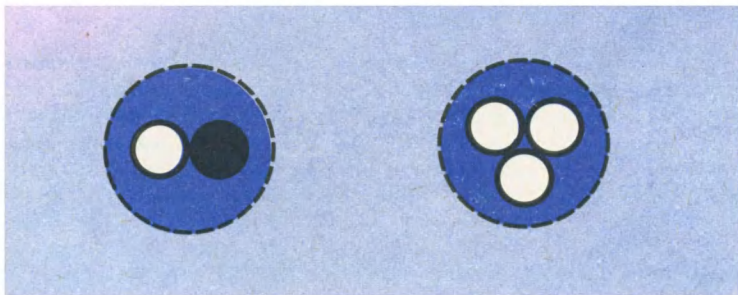


Рис. 20. Структура мезонов и барионов. Мезоны состоят из кварка и антикварка, барионы — из трех кварков (кварки изображены светлыми кружочками, антикварки — темными)

на 300 МэВ тяжелее нуклона. Как же частицы со столь различными массами могут описываться одинаковыми кварковыми конфигурациями?

Ответ найти нетрудно. До сих пор мы не принимали во внимание спин кварков. Спин π -мезонов равен 0, и мы должны так расположить спины обоих кварков, точнее, кварка и антикварка, чтобы в результате получился объект со спином 0. Это произойдет в том случае, если спины кварков направлены в противоположные стороны. Спин ρ -мезонов равен 1. Следовательно, спины кварков должны быть направлены в одну сторону. Ситуация здесь аналогична случаю позитрония, описанному выше. По своей спиновой структуре π -мезон соответствует парапозитронию, а ρ -мезон — ортопозитронию.

Все получается из-за наличия спина

Спин Δ -частиц равен $3/2$. Такое возможно, когда спины всех трех кварков направлены в одну сторону. В нуклоне, имеющем спин $1/2$, два кварка должны иметь одинаково направленные спины, а спин третьего кварка должен быть им противоположен. В результате получается общий спин $1/2$. Спиновые конфигурации кварков в различных частицах показаны на рис. 21.

Если теперь рассмотреть различные спиновые конфигурации, зная массы соответствующих частиц, можно прийти к важному заключению. Сила, действующая между двумя кварками, должна быть такова, чтобы спины в мезоне были по возможности противоположно направлены, а для того чтобы направить спины в одну сторону, например как в ρ -мезоне, нужно затратить

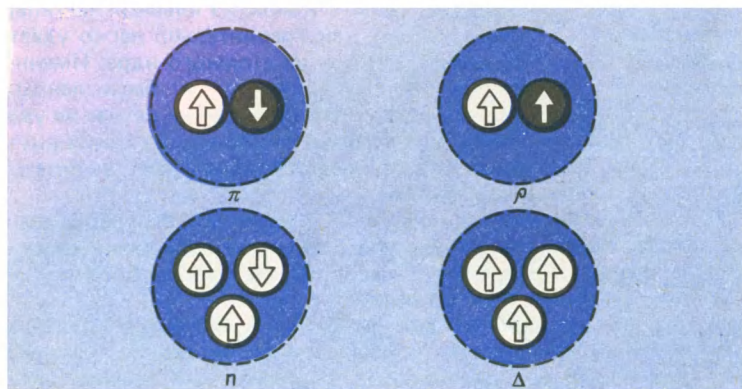


Рис. 21. Расположение спинов кварков в простейших мезонных и барионных состояниях: π - и ρ -мезоны, нуклон и Δ -частица

энергию. Разница в массах π - и ρ -мезона есть не что иное, как та энергия, которую нужно затратить, чтобы "повернуть" спин кварка в π -мезоне и получить ρ -мезон. Ана-

**Спины
стремятся
к насыщению**

логично обстоит дело с барионами. Поскольку нуклоны легче Δ -частиц, сила между кварками должна быть такой, чтобы на ориентацию спинов всех кварков для получения Δ -частицы тратилась энергия. Всякий, кто пытается построить конкретную теорию кварков и сильного взаимодействия (и мы тоже попробуем это сделать ниже), должен учитывать отмеченное обстоятельство; в рамках подобной теории оно должно найти свое объяснение.

Когда идея кварков была опубликована в 1964 г., нашлось немало физиков, которые отнеслись к ней скептически. Причиной такого отношения были весьма необычные свойства кварковой модели (дробный электрический заряд кварков, барионное число, равное $1/3$). К тому же было не ясно, почему все адроны должны иметь структуру $\bar{q}q$ или qqq , а не qq или $qqqq$. (Конфигурацию со структурой qq называют *дикварком*.) В различных экспериментах производились поиски подобных экзотических типов адронов, но до сих пор без всякого успеха. Сколько мы не ищем, мы находим только обычные адроны, т. е. образования со структурой $\bar{q}q$ или qqq .

Другая проблема, связанная с идеей кварков, заключается в том, что до сих пор кварки не наблюдались как истинные частицы. Если самым наивным образом рассматривать адроны как составные частицы, то можно представлять себе, что кварковая структура нуклонов не слишком отличается от структуры атомного ядра. В таком случае должно быть сравнительно нетрудно выбить кварк из ядерной частицы, точно так же, как сравнительно легко удаётся выбить нуклон из атомного ядра. Именно это и пытались сделать в бесчисленных экспериментах. Но ни в одном случае не удалось высвободить кварк как отдельную частицу из союза внутри нуклона. Во всяком случае представляется, что "вырезать" кварк из нуклона очень трудно.

**Кварки как
свободные
частицы?**

Если бы нам удалось получить кварки в виде свободных настоящих частиц, то это были бы на самом деле очень экзотические объекты. Их можно было бы, например, опознать по нецелому значению электрического заряда.

Ниже мы увидим, что все связанные с кварковой моделью проблемы можно решить в рамках простой теории, называемой квантовой хромодинамикой. В этой теории кварки фигурируют как фундаментальные объекты физики адронов. Ситуация аналогична электродинамике, в которой в качестве фундаментального объекта рассматривается электрон. В квантовой

хромодинамике рассматриваются кварки со всеми упомянутыми выше странными свойствами, однако они не могут их открыто показать; кварки постоянно связаны внутри адронов. Невозможно наблюдать их как свободные частицы, например как электроны. По этой причине физикам пришлось поломать голову над возможностями по крайней мере косвенно наблюдать и изучать кварки внутри адронов. Одну из таких возможностей мы опишем в следующей главе.

**Кварки всегда
прикованы
друг к другу**

то показать; кварки постоянно связаны внутри адронов. Невозможно наблюдать их как свободные частицы, например как электроны. По этой причине физикам пришлось поломать голову над возможностя-

Примечательной была реакция физиков-теоретиков после создания кварковой модели. Так, Джордж Цвейг, выдвинувший вместе с Гелл-Маном идею кварков, писал в опубликованном в 1980 г. отчете Калифорнийского технологического института: "Реакция физиков-теоретиков на модель в целом была неблагоприятной. Намереваясь опубликовать в ЦЕРН свой отчет в приемлемой для меня форме, я столкнулся с такими трудностями, что в результате отказался от этой затеи. Физический факультет одного большого университета в США планировал взять меня на работу и держал для меня ставку. Но она была заблокирована после того, как ведущий теоретик этого университета заметил, что модель кварков — изобретение "шарлатана". Идея о том, что адроны, граждане ядерной демократии, состоят из еще более мелких частей, считалась многими сумасшедшей. Очевидно, они были правы."

6

РЕНТГЕНОВСКИЙ АНАЛИЗ ПРОТОНА ПО-КАЛИФОРНИЙСКИ

Для того чтобы понять наблюдаемый спектр адронов, мы ввели кварки. Но существует ли возможность более или менее непосредственно наблюдать сами кварки? Вернемся еще раз к обсуждавшимся выше методам исследования атома. Эрнест Резерфорд использовал α -излучение, чтобы заглянуть внутрь атома, подобно тому, как врач-рентгенолог использует рентгеновское излучение, т. е. пучок фотонов, чтобы просветить, например, легкие своего пациента.

**Исследование
внутренности
протона**

нуть внутрь атома, подобно тому, как врач-рентгенолог использует рентгеновское излучение, т. е. пучок фотонов, чтобы просветить, например, легкие своего пациента.

А что если и кварки можно наблюдать аналогичным образом? По крайней мере, такова была идея.

Чтобы ее осуществить, следовало найти способ глубоко проникнуть внутрь протона. Очевидно, что невозможно просто повторить эксперимент Резерфорда при большей энергии. Так

как мы желаем исследовать субструктуру протона, необходимо в качестве пробных частиц использовать не α -частицы или даже протоны, а частицы, имеющие менее сложную структуру, чем протон. Таковыми являются электроны. Они не участвуют в сильном взаимодействии, и при условии, что их энергия достаточно велика, они должны достаточно легко проникать в глубь протона. На основании этих соображений было предпринято строительство специального ускорителя, который мог бы ускорять электроны до энергии более 20 000 МэВ, т. е. до энергии, соответствующей примерно 20 массам протона.

В конце 60-х годов этот ускоритель, построенный американской Комиссией по атомной энергии вблизи студенческого городка Станфордского университета к югу от Сан-Франциско, был готов к работе (рис. 22). Какие надежды питали физики, направляя первые пучки электронов Станфордского Центра линейного ускорителя (СЛАК) на мишень? Считалось, что электроны проникнут внутрь нуклонов мишени и смогут выявить соответствующую структуру нуклона. Поскольку электроны принимают участие не в сильном, а только в электромагнитном взаимодействии, сильновзаимодействующая

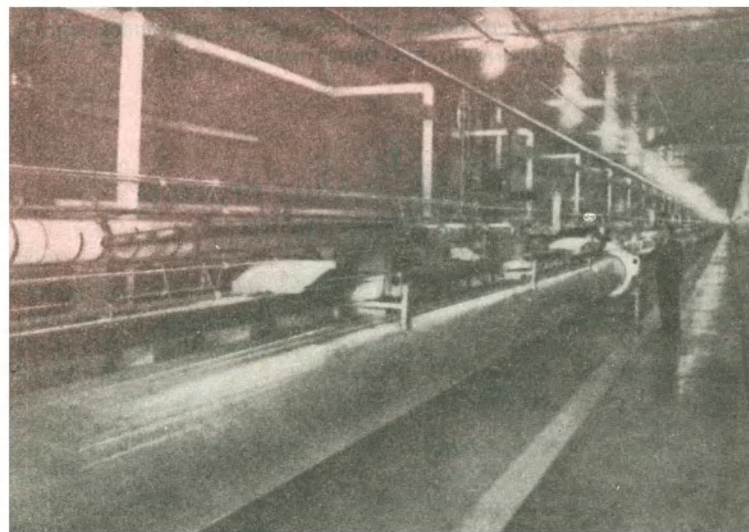


Рис. 22. Внутренняя часть электронного ускорителя в Станфордском Центре линейного ускорителя СЛАК. Отчетливо видна вакуумная труба, в которой электроны ускоряются до больших энергий

материя внутри протона не будет служить препятствием для электронов, если только она не имеет электрического заряда. По тому, как и насколько сильно отклоняется пролетающий электрон от направления первоначального полета, можно выяснить распределение электрического заряда внутри протона.

Серьезно обсуждались две следующие

**Две
возможности
распределения
заряда**

возможности.

1. Электрически заряженная материя распределена внутри протона более или менее равномерно. В этом случае проникающий электрон не обнаружит никакой сильной концентрации заряда и будет поэтому лишь слабо рассеиваться (рис. 23, а).

2. Электрический заряд внутри протона сконцентрирован в нескольких точках (в рамках кварковой модели в этих точках находятся кварки, являющиеся носителями электрического заряда, рис. 23, б).

Первые же эксперименты показали, что осуществляется вторая возможность. Обнаружилось, что электроны очень часто

**Точечные
электрические
заряды**

рассеиваются на большие углы, так, будто при пролете через нуклон они сталкиваются с электрически заряженными точечными составляющими¹. Напомним читателю, что нечто очень похожее произошло в начале

нашего века, когда атомы обстреливались α -частицами (см. обсуждение опытов Резерфорда выше).

Идентичны ли эти составляющие кваркам? Чтобы доказать это, следовало измерить электрический заряд составляющих. Вообще говоря, это не так просто сделать, так как нуклон состоит из нескольких составляющих, влияние которых перекрывается. В результате детальных измерений и сравнения опытов по рассеянию на различных мишенях удалось выделить вклады

**Кварки
"видны"**

отдельных составляющих в рассеяние электронов. Отсюда можно было определить и электрические заряды составляющих. Оказалось, что они совпадают с зарядами кварков,

а именно $2/3$ и $-1/3$. Таким образом, кварковая модель выдержала важную проверку: внутри протона стали "видны" те самые кирпичики, которые были угаданы на основании структуры адронного спектра.

С помощью СЛАК оказалось возможным не только установить заряды кварков внутри протона, но и определить скорости

¹ По предложению Фейнмана эти составляющие называли *партонами* (от англ. слова *part*, т. е. *часть*). В рамках кварковой модели заряженные партоны и кварки — одно и то же. — *Прим. пер.*

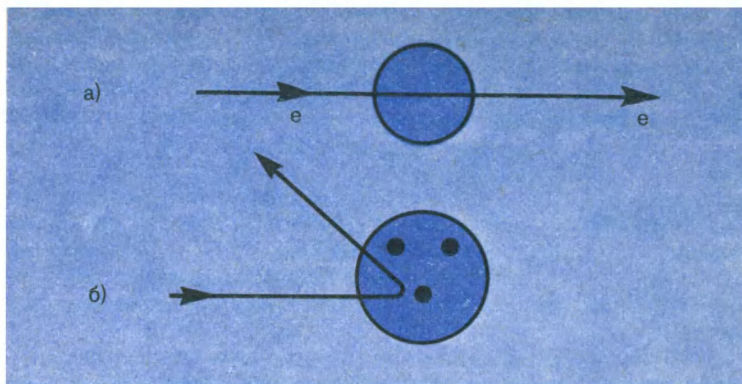


Рис. 23. Рассеяние электрона на протоне. Электрический заряд внутри протона распределен непрерывно. Электрон отклоняется очень незначительно (а). Электрический заряд сконцентрирован в кварках — точечных составляющих протона. Электрон может отклоняться очень сильно (б)

кварков или, точнее говоря, вклад кварков в полный импульс протона, когда последний движется с большой скоростью. В физике существует всеобщий закон, утверждающий, что полный импульс некоторого объекта равен сумме импульсов составляющих его частей. На основании этого следовало ожидать, что импульс протона большой энергии должен складываться из импульсов отдельных кварков. Поскольку и полный импульс протона, и импульсы кварков были известны, возникала возможность еще одной проверки кварковой теории: сумма импульсов кварков должна была равняться полному импульсу нуклона.

Когда такая проверка была проведена, физики пережили большое потрясение: не получалось ничего похожего. Сумма импульсов кварков равнялась примерно половине импульса нуклона, а почти 50% импульса куда-то терялось. Возник вопрос, где этот недостающий импульс? Эта

Потерявшийся импульс

проблема имеет только одно разумное решение. Наряду с кварками должны существовать другие субъядерные составляющие, которые не видны в экспериментах по рассеянию электронов на нуклонах. В таких экспериментах можно “видеть” только электрически заряженные составляющие, откуда следует, что новые составляющие нейтральны. Такие объекты не имеют электрического заряда,

Глюоны — еще одни кирпичики наряду с кварками

но “видеть” только электрически заряженные составляющие, откуда следует, что новые составляющие нейтральны. Такие объекты не имеют электрического заряда,

но обладают импульсом и ответственны за нарушение обсуждавшегося выше баланса импульса. Имея в виду последующее обсуждение, будем называть эти объекты *глюонами*. Подобное название выбрано не случайно. Как будет показано, глюоны осуществляют связь кварков в адроны; они являются тем "клеем" (по английски *glue*), который формирует нуклоны.

Итак, можно следующим образом описать движущийся с большой скоростью нуклон: полный импульс нуклона делится между импульсами трех кварков и импульсами глюонов. Суммарный импульс кварков составляет примерно половину импульса нуклона, а остальная половина приходится на импульсы глюонов (рис. 24).

Другая возможность исследовать субструктуру протона заключается в использовании нейтрино. Как и электроны, нейтрино не принимают участия в сильном взаимодействии. Следовательно, как и электроны, нейтрино могут без особого труда проникнуть в глубь нуклонов. Мы уже отмечали выше, что нейтрино участвуют только в слабом взаимодействии; с помощью пучков нейтрино можно, таким образом, "увидеть" внутри нуклона центры слабого взаимодействия.

Что происходит с нейтрино, когда оно сталкивается, например, внутри протона, с одним из кварков? Естественно, что это представляет собой задачу из области слабых взаимодействий, которые мы еще не обсуждали, но, забегаая вперед, скажем,

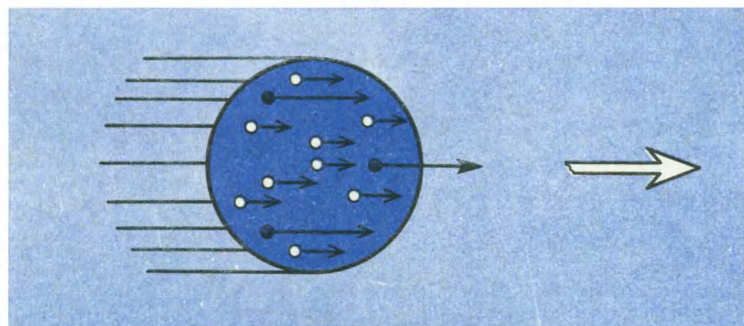


Рис. 24. Протон движется с большой скоростью в направлении, указанном стрелкой. Полный импульс протона складывается из импульсов трех кварков (темные кружочки) и импульсов большого числа глюонов (светлые кружочки). Полный импульс глюонов почти такой же, как у кварков

что в этом случае нейтрино может превратиться в заряженный лептон (электрон или мюон). Например, электронное нейтрино превращается в электрон, электронное антинейтрино — в позитрон, мюонное нейтрино — в отрицательно заряженный мюон и т. д. Одновременно кварк, с которым сталкивается нейтрино, превращается в другой кварк, причем чаще всего u -кварк превращается в d -кварк, а d -кварк — в u -кварк. С экспериментальной точки зрения превращение нейтрино в заряженный лептон очень важно, так как при этом появляется возможность наблюдать процесс рассеяния нейтрино в лаборатории.

В 1973 г. появились первые отчетливые результаты по рассеянию нейтрино на нуклонах, причем одновременно в европейском исследовательском центре ЦЕРН и в США. Специально для исследований в области физики нейтрино в ЦЕРН была построена гигантская по тем временам пузырьковая камера Гаргамель

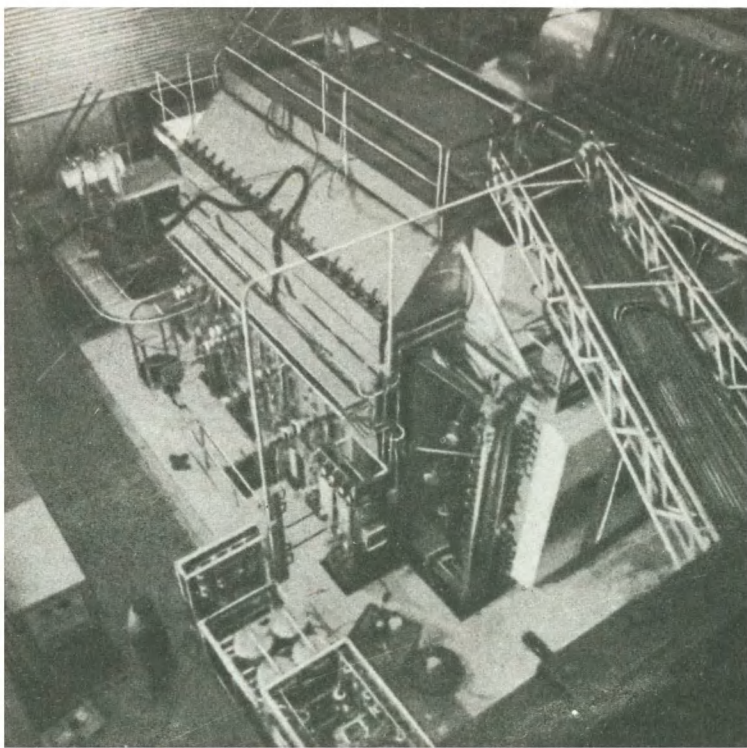


Рис. 25. Пузырьковая камера Гаргамель в ЦЕРН (вид сверху)

(рис. 25)¹. Она, как и все другие пузырьковые камеры, представляла собой по существу емкость, заполненную жидкостью (например, фреоном), находящейся вблизи точки кипения под определенным давлением. Периодически давление менялось и в жидкости образовывались маленькие пузырьки. Образование пузырьков происходило именно в тех местах, через которые пролетела электрически заряженная частица; таким образом, можно было непосредственно видеть след этой частицы. Такие следы аналогичны тем, которые иногда оставляет в небе самолет. Следы частиц фотографировались и затем анализировались. Снаружи пузырьковая камера окружена сильным магнитом, создающим внутри камеры магнитное поле. В результате этого следы электрически заряженных частиц искривляются. По характеру и величине возникшего искривления можно сделать заключение о заряде и энергии соответствующей частицы.

Полученные с помощью камеры Гаргамель результаты были очень содержательными. Как и в эксперименте СЛАК, оказалось возможным наблюдать кварки внутри протона. То, что было видно, полностью согласовывалось с результатами эксперимента по рассеянию электронов на протонах. Но появились и дополнительные возможности исследовать кварковую структуру адронов (рис. 26).

Кварки, косвенным образом наблюдавшиеся в экспериментах по рассеянию нейтрино и электронов, оказались бесструктурными объектами, как лептоны. Это свойство поразительно, так как кварки являются сильновзаимодействующими объектами в противоположность лептонам. Все выглядит так, будто кварки "забывают" свою способность к сильному взаимодействию, если только они сталкиваются с электроном или нейтрино большой энергии (так называемое *скейлинговое поведение*).

Что является причиной такого "выключения" сильного взаимодействия? Теория кварков и сильного взаимодействия должна обладать тем свойством, что силы, обусловленные сильным взаимодействием, внезапно при больших энергиях становятся слабыми. Теоретики придумали очень красивое название для подобной теории. Они назвали ее "асимптотически свободной"; это означает, что при больших энергиях кварки ведут себя как свободные частицы, подобные лептонам. Ниже мы увидим, что квантовая хромодинамика как раз обладает этим свойством; при больших энергиях или (что в соответствии с квантовой теорией одно и то же) на очень малых расстояниях (много

¹ Так звали великаншу — мать Гаргантюа в романе Ф. Рабле "Гаргантюа и Пантагрюэль". — *Прим. пер.*

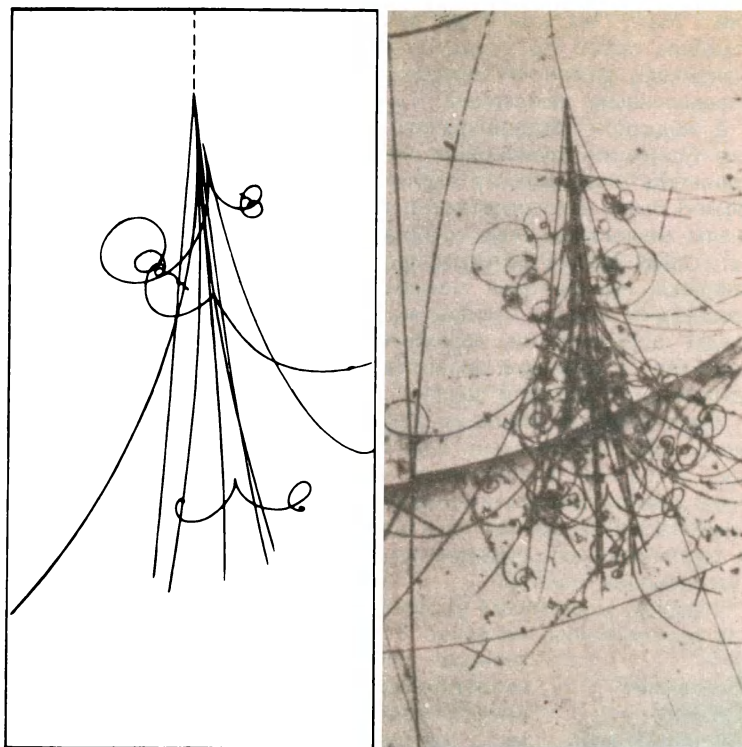


Рис. 26. Типичное событие нейтринной физики, зарегистрированное с помощью большой европейской пузырьковой камеры BEBC в ЦЕРН. Нейтрино большой энергии влетает сверху и сталкивается с протоном. Нейтрино превращается в мюон, летящий затем вниз. Протон в таком процессе разрушается, порождая целый ряд заряженных частиц (а также не видимых на снимке нейтральных). Справа показана фотография, полученная с помощью пузырьковой камеры, слева — следы частиц

меньших размера нуклона, составляющего 10^{-13} см) кварки ведут себя практически как свободные частицы. Прежде чем мы детально обсудим все это, познакомимся в следующих главах с еще одним важным аспектом физики элементарных частиц — существованием других типов кварков, кроме u и d .

СТРАННЫЙ НОВЫЙ КВАРК

В 1950 г. мир элементарных частиц казался довольно простым. В нем были адроны и лептоны. Все известные в то время адроны (нуклоны, π -мезоны) можно было построить из двух кварков (u и d). (Конечно, никто тогда не думал о кварках, так что мы имеем в виду гипотетическую возможность.) В принципе можно было объединить лептоны и кварки в некое единое целое, просто записав табличку

$$\begin{pmatrix} \nu_e : u \\ e : d \end{pmatrix}.$$

Если упорядочить лептоны и кварки указанным выше образом, то для мюона и соответствующего ему нейтрино не остается места. Мюон оказывается чужаком в мире частиц. Поэтому американский физик-ядерщик лауреат Нобелевской премии Исидор Раби с полным основанием задавал вопрос:

“Мюон — кому он понадобился?”. Ясно, что физики не могли оспаривать самого факта существования мюона. Природа определенно “имела что-то в виду”, создавая мюон при зарождении мира, и вопрос заключался в том, чтобы понять, что именно?

Сегодня у нас есть по крайней мере частичный ответ на этот вопрос, полученный в результате открытия в начале 50-х годов целого ряда новых частиц. Они были обнаружены главным образом в результате тщательного анализа космического излучения, постоянно приходящего на Землю. У новых частиц были странные свойства. Поэтому их позднее так и называли — *странные частицы* (по-английски: *strange particles*). Начался новый этап в развитии физики элементарных частиц.

Первой была найдена нейтральная частица, названная Λ , оказавшаяся на 20% тяжелее протона (ее масса равна 1116 МэВ). Поразительным и поначалу непонятным свойством Λ -частицы было то, что она могла сравнительно часто рождаться в адронных взаимодействиях, но при этом распадалась очень медленно. В то время как большинство частиц, рождающихся в адронных процессах, например Δ -частицы, распадаются столь же быстро, как и образуются (время жизни Δ -частицы равно всего 10^{-24} с, т. е. промежутку времени, который затрачивает луч света, чтобы пройти расстояние, равное размеру нуклона 10^{-13} см), Λ -частица живет намного дольше, а именно 10^{-10} с. Кроме того, обнаружилось, что Λ -частица никогда не рождается в одиночку, а всегда вместе с еще

**Новое
возникает
парами** одной новой частицей, K -мезоном, масса которого примерно в 3 раза больше массы π -мезона (495 МэВ). Явление парного образования новых частиц получило название *ассоциированного рождения*.

Было предложено много различных гипотез для объяснения ассоциированного рождения новых частиц. В конце концов было найдено правильное решение проблемы. Оказалось, что наряду с изоспином существует другое квантовое число, названное *странностью*. Это число, как и барионное число, можно приписать каждой частице. Оно равно нулю для обычных частиц — нуклонов, π -мезонов и т. п. Λ -частице приписывается значение странности, равное -1 . Далее принимается, что в процессах сильного взаимодействия странность сохраняется. Это означает, что если в начале странность равнялась нулю, например при столкновении двух нуклонов, то и полная странность конечных продуктов также должна быть равной нулю. Отсюда понятно, почему странные частицы могут рождаться только парами; образуется частица со странностью -1 (например, Λ -частица) и одновременно образуется другая частица со странностью $+1$. В результате полная странность образованных частиц равна нулю.

Между квантовым числом странность и барионным числом существует важное различие. Странность не сохраняется точно, в противном случае Λ -частица, легчайшая из частиц со странностью -1 , не могла бы распадаться, а должна была бы быть такой же стабильной, как протон. Если подробнее изучить распад Λ -частицы (она распадается, например, на протон и отрицательно заряженный π -мезон и сама является барионом), то можно заметить, что процесс, приводящий к распаду, имеет ту же интенсивность, что и процесс, приводящий к β -распаду нейтрона. Это

**Как
распадаются
странные
частицы?** должно вызвать недоумение у внимательного читателя, так как нейтрон живет много дольше Λ -частицы (10 мин по сравнению с промежутком времени 10^{-10} с). Но дело обстоит именно так. Причина, по которой нейтрон живет настолько дольше Λ -частицы, не имеет никакого отношения к интенсивности процесса распада, а связана с соответствующей разностью масс частиц. Разность масс нейтрона и протона очень мала по сравнению с разностью масс Λ и протона. Если бы разность масс нейтрона и протона была сравнима с разностью масс Λ и протона, то и нейтрон распадался бы чрезвычайно быстро (его время жизни составляло бы 10^{-10} с).

Мы знаем уже, что β -распад нейтрона обусловлен слабым взаимодействием. Поэтому и распад частиц с ненулевой стран-

ностью оказывается процессом слабого взаимодействия. Становится понятным, почему странные частицы могут рождаться довольно быстро, но при этом распадаются медленно.

Выше из существования изоспиновой симметрии мы сделали вывод о существовании двух кварков. Нет ничего естественнее,

**Странный
новый кварк** как связать существование странности с существованием еще одного нового кварка, который мы назовем странным и обозначим s . В частности, сопоставим Λ -частицу с барионом, состоящим из трех разных кварков: $\Lambda = (uds)$. Так как электрический заряд Λ -частицы равен нулю, отсюда можно установить электрический заряд s -кварка; он равен $-1/3$, т. е. совпадает с электрическим зарядом d -кварка.

Можно представлять себе s -кварк как собрата d -кварка. Он имеет тот же электрический заряд, что и d , но несколько тя-

**Кварк- s —
тяжелый собрат
 d -кварка** желейее. Отсюда вытекает, что частицы, содержащие один или более s -кварков, должны быть тяжелее соответствующих частиц без s -кварков. Разность масс между s -кварком и d -кварком составляет около 150 МэВ.

Можно, например, превратить нейтрон в Λ -частицу, заменив один из d -кварков в нейтроне на s -кварк. Чтобы сделать это, нужно сообщить нейтрону энергию, причем именно ту, которая необходима, чтобы сделать из d -кварка s -кварк — около 150 МэВ. Отсюда ясно, почему Λ -частица примерно на 150 МэВ тяжелее нейтрона.

Если принять, что наряду с u - и d -кварками существует и s -кварк, можно поставить вопрос, сколько новых частиц должно существовать. Полезно обсудить это более

**Странные
партнеры
нуклонов** подробно. Прежде всего рассмотрим странных партнеров нуклонов. Одного из них, Λ -частицу (называемую иначе Λ -гипероном), мы уже упоминали выше. Кроме того, должна существовать частица, имеющая кварковую структуру (uus) и, следовательно, электрический заряд $+1$, а также частица с кварковой структурой (dds) и электрическим зарядом -1 .

Видно, что обе указанные частицы переходят друг в друга при взаимной перестановке u и d ; из (uus) получается при этом (dds) и наоборот. Поскольку перестановка $u-d$ есть не что иное, как изоспиновое преобразование, обе частицы должны принадлежать одной группе частиц, связанных изоспиновой симметрией (такую группу называют изомультиплетом). Мы уже познакомились выше с одним изомультиплетом π -мезонов, в который входят заряженные частицы с зарядами $+1$ и -1 . По аналогии мы ожидаем, что имеются три частицы указанного выше типа: две заряженные и одна нейтральная с кварковой структурой (uds) , т. е. с той же структурой, что и у Λ -частицы. В прин-

ципе эта частица могла бы совпадать с Λ -частицей, но оказывается, что это не так. Частицы, имеющие описанную выше кварковую структуру, — это открытые в начале 50-х годов Σ -гипероны Σ^+ , Σ^0 , Σ^- . Масса их почти одинакова, так как они образуют изомультиплет (в данном случае изотриплет), и они тяжелее Λ -частицы (1190 МэВ).

Указанная выше аналогия между π -мезонами и Σ -частицами относится только к изоспину; обе группы частиц являются изотриплетами. Существенное отличие π -мезонов от Σ -частиц заключается в том, что при переходе к соответствующим античастицам в случае π -мезонов триплет не меняется (из π^- получается π^+ и наоборот, а π^0 совпадает со своей античастицей), в то время как античастицы по отношению к Σ -гиперонам образуют новый триплет, состоящий из антигиперонов $\bar{\Sigma}^+$, $\bar{\Sigma}^0$, $\bar{\Sigma}^-$.

Частицы Λ и Σ можно получить, взяв нейтрон или протон и заменив в них один из трех кварков на s -кварк. Например, заменив в протоне d -кварк на s -кварк, мы получим Σ^+ -частицу: $(uud) \rightarrow (uus)$. А что произойдет, если

Барионы с двумя s -кварками два кварка в нуклоне заменить на s -кварки, например оба d -кварка в нейтроне? В этом случае мы получим частицу с кварковой структурой (uss) . Следует ожидать, что такая частица будет на $2 \times 150 = 300$ МэВ тяжелее нуклона

Подобные частицы нашли вскоре после открытия Λ - и Σ -гиперонов. Это — Ξ -частицы, масса которых равна 1320 МэВ. Поскольку они содержат два s -кварка, могут существовать только две Ξ -частицы, отвечающие кварковой структуре $(uss) = \Xi^0$ и $(dss) = \Xi^-$. Эти частицы образуют изодублет.

Экспериментально обнаружено, что Ξ -частицы живут так же долго, как и Λ - и Σ -гипероны; это означает, что распад Ξ -частиц тоже обусловлен слабым взаимодействием. Однако оказывается, что Ξ -частицы всегда распадаются с образованием Λ - или Σ -гиперона. Например, Ξ^- очень часто распадается на $\Lambda\pi^-$. В то же время в распадах Λ или Σ странность меняется на одну единицу; так, в распаде $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ частица со странностью -1 переходит в систему со странностью 0 . Поэтому можно ожидать, что и в распаде Ξ -частицы происходит то же самое, т. е. и в этом случае странность всегда меняется на единицу. Так действительно и происходит. Ξ -частицы обладают странностью -2 . Отсюда ясно, почему Ξ -частицы распадаются на Λ -гипероны, а не сразу на нуклоны (распад типа $\Xi^0 \rightarrow p\pi^-$ не происходит). Поскольку при распаде странность меняется лишь на единицу, конечная система должна иметь странность -1 ; это означает, что среди про-

Каскадные распады Ξ -частиц

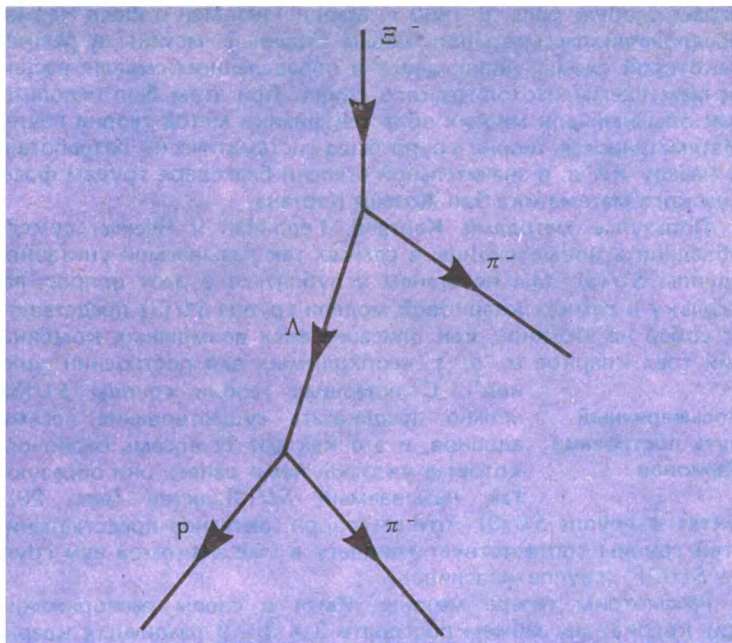


Рис. 27. Схематическое изображение Ξ -распада

чих в конце распада должна быть Λ -частица. Естественно, что последняя в свою очередь распадается и в результате возникает определенный каскад распадов, в котором на каждом этапе странность меняется на одну единицу (рис. 27).

Сравнивая квантовое число странность (-1 для Λ - и Σ^- , -2 для Ξ -частиц) с числом s -кварков в этих частицах (1 для Λ - и Σ^- , 2 для Ξ -частиц), мы обнаруживаем очевидную параллель между этими числами. Число s -кварков в точности соответствует отрицательному значению странности. Это на самом деле несчастный случай. Было бы лучше определить странность с противоположным знаком, так, чтобы Λ -гиперон имел странность $+1$. Но в то время, когда были обнаружены странные частицы, никто не знал о кварках, и получилось так, что по определению странность имеет неправильный знак.

Мера числа s -кварков

Сколько же барионов нам удалось до сих пор найти? Помимо двух нуклонов у нас имеется Λ -частица, три Σ -гиперона и две Ξ -частицы, следовательно, всего восемь частиц. Это число восемь

играет особую роль. В 1960 г. Марри Гелл-Ман и Ювал Нееман предложили рассматривать новые странные частицы в рамках некоторой схемы, являющейся в определенном смысле расширением схемы изотопического спина. При этом был использован обычный для многих областей физики метод теории групп. Математическая теория групп была систематически разработана к началу XX в. в значительной степени благодаря трудам французского математика Эли Жозефа Картана.

Пользуясь методами Картана, Гелл-Ман и Нееман сумели объединить новые частицы в рамках так называемой унитарной группы $SU(3)$. Мы не станем углубляться в этот вопрос, поскольку в рамках кварковой модели группа $SU(3)$ представляет собой не что иное, как описание всех возможных комбинаций трех кварков u , d , s , необходимых для построения адронов¹. С помощью теории группы $SU(3)$

Восьмеричный можно предсказать существование восьми
путь построения адронов, и это как раз те восемь барионов,
барионов которые указаны нами ранее; они образуют
так называемый $SU(3)$ -октет (рис. 28).

Октет в группе $SU(3)$, точнее говоря, октетное представление этой группы соответствует триплету в уже знакомой нам группе $SU(2)$ (группе изоспина).

Рассмотрим теперь мезоны. Имея в своем распоряжении три кварка, мы можем построить $3 \times 3 = 9$ различных кварк-антикварковых систем. В частности, возникают мезоны со странностью 1 или -1 , соответствующие конфигурациям $\bar{s}u$ и $\bar{u}s$ и т. д.; это — уже упоминавшиеся K -мезоны. В рамках теории группы $SU(3)$ мезоны образуют октет и синглет (всего девять частиц). Мы показали это на рис. 29. Нейтральные частицы со странностью 0 строятся из соответствующих кварк-антикварковых конфигураций.

Особенностью сильного взаимодействия между кварками является то, что нейтральные частицы не отвечают какой-то простой кварковой конфигурации. Так, например, частица π^0 представляет собой смесь из $\bar{u}u$ и $\bar{d}d$; она состоит на 50% из $\bar{u}u$ и на 50% из $\bar{d}d$. Смешанные мезоны η состоит на 25% из $\bar{u}u$, на 25% из $\bar{d}d$ и на 50% из $\bar{s}s$, так же как и η' -мезон, имеющий массу 960 МэВ.

Существуют, конечно, и $SU(3)$ -партнеры ρ -мезонов, т. е. векторные мезоны с кварковой структурой $\bar{u}s$, $\bar{d}s$ и $\bar{s}s$. Их называют $K^*(\bar{u}s, \bar{d}s, \bar{s}u, \bar{s}d)$ и $\varphi(\bar{s}s)$. Массы этих мезонов равны 890 и 1020 МэВ соответственно. Как и обсуждавшиеся выше

¹ Аналогично описание всех возможных комбинаций двух кварков u , d соответствует изоспиновой группе $SU(2)$. — Прим. пер.

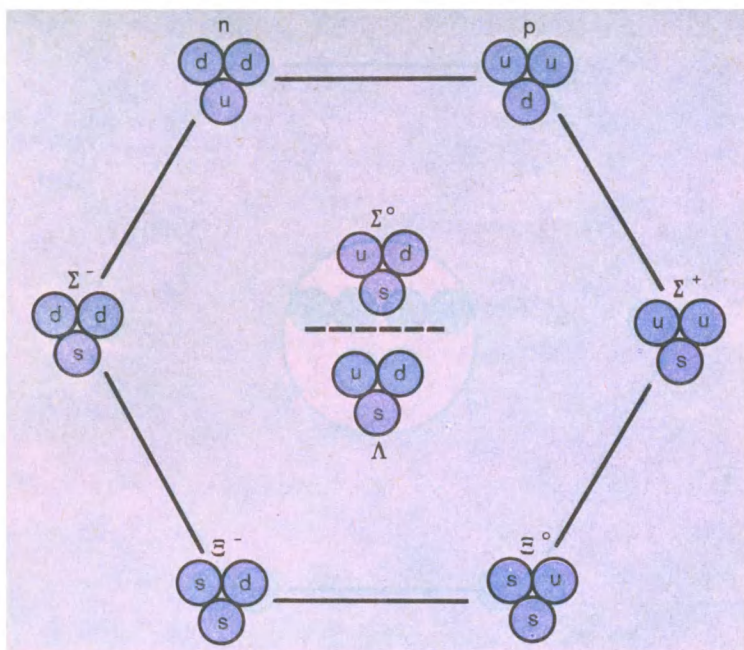


Рис. 28. Восемь легчайших барионов, состоящих из кварков u , d и s , образуют октет

**Странные
векторные
мезоны**

мезоны π , K , η , η' , векторные мезоны образуют октет и синглет по отношению к группе $SU(3)$. Всего, таким образом, имеется девять векторных мезонов.

В этой связи мы должны упомянуть об одном явлении, к которому позднее еще раз вернемся. Можно ожидать, что нейтральные векторные мезоны являются такими же смешанными объектами, как и обсуждавшиеся выше мезоны. Но это неправильно. Оказывается, что кварковая конфигурация $(\bar{s}s)$ соответствует одной частице, а именно ϕ -мезону. Два других нейтральных векторных мезона ρ^0 , ω являются на самом деле смешанными объектами. Они состоят на 50% из $\bar{u}u$ и на 50% из $\bar{d}d$. Фактически ϕ -мезон является на 100% чистой $(\bar{s}s)$ -конфигурацией (рис. 30). Динамика

**Векторные
мезоны
смешиваются
не так, как
псевдо-
скалярные**

мезоны π , K , η , η' , векторные мезоны образуют октет и синглет по отношению к группе $SU(3)$. Всего, таким образом, имеется девять векторных мезонов.

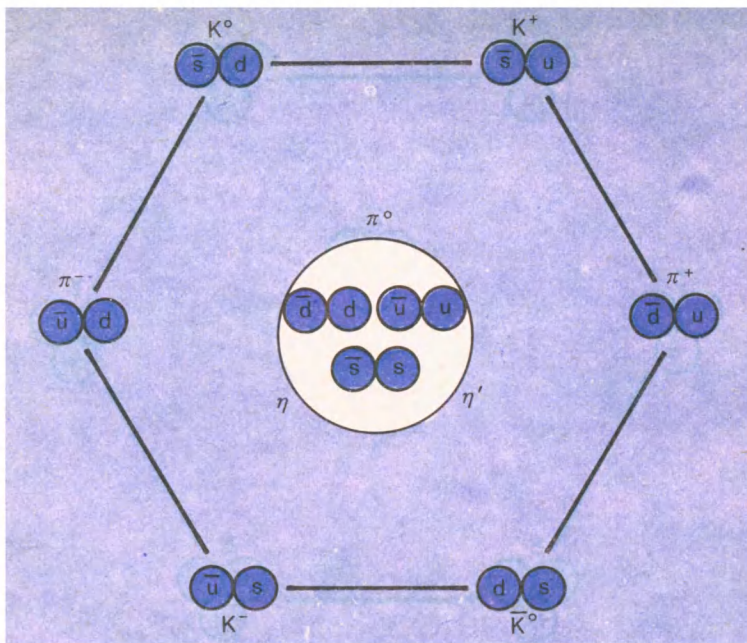


Рис. 29. Девять мезонов π , K , η , η' . Нейтральные мезоны со странностью нуль являются суперпозицией кварковых конфигураций $\bar{u}u$, $\bar{d}d$ и $\bar{s}s$; это символически обозначено большим кружком, внутри которого изображены соответствующие кварковые конфигурации

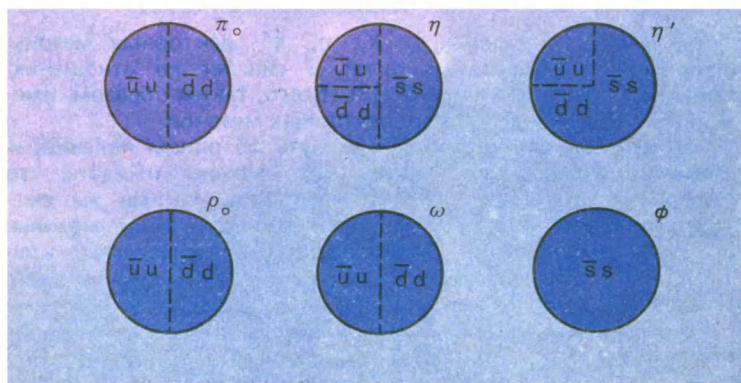


Рис. 30. Нейтральные мезоны являются объектами со смешанной кварковой структурой

векторных мезонов должна существенно отличаться от динамики псевдоскалярных мезонов (η, η'), чтобы приводить к столь различным свойствам смешивания.

Странные партнеры Δ -частицы

В заключение обсуждения странных частиц рассмотрим странных партнеров Δ -частицы. Сколько следует ожидать новых частиц? Четыре уже известные Δ -частицы имеют следующую кварковую структуру:

$$\begin{aligned}\Delta^{++} &\sim (uuu), & \Delta^+ &\sim (uud), \\ \Delta^0 &\sim (udd), & \Delta^- &\sim (ddd).\end{aligned}$$

Подставляя s -кварк, можно получить всего шесть новых конфигураций:

$$\begin{aligned}&(uus) \\ &(uds), & (uss), & (sss). \\ &(dds) & (dss)\end{aligned}$$

Поэтому мы ожидаем, что всего существует десять частиц, а именно барионы со странностью 0 (Δ -частицы), три частицы со странностью -1 , обозначаемые Σ^* , две — со странностью -2 (Ξ^* -частицы) и одна со странностью -3 , названная Ω^- . Эти десять частиц образуют декуплет в рамках теории группы $SU(3)$ (рис. 31), изображаемый в виде равностороннего треугольника.

В развитии физики элементарных частиц Ω^- -частице принадлежит особая роль. В начале 60-х годов, когда была создана $SU(3)$ -теория адронов, были известны не все частицы из декуплета: Ω^- -частица отсутствовала. Теоретики, работавшие над проблемами спектроскопии частиц, не только предсказали существование новой частицы со странностью -3 , но и сделали оценку массы этой частицы. Следовало ожидать,

Ω^- -король странных частиц

Охота за Ω^-

что предсказанная частица почти в 2 раза тяжелее протона и имеет массу 1670 МэВ. В ускорительных лабораториях началась настоящая охота за этой частицей. Приз достался физикам США. В 1964 г. в Брукхейвенской Национальной лаборатории в Лонг-Айленде под Нью-Йорком Ω^- -частица была наконец обнаружена. Ее масса оказалась равной 1672 МэВ. Открытие Ω^- явилось важным шагом в развитии физики элементарных частиц, так как подтвердилась справедливость приведших к ее предсказанию теоретических представлений.

Заканчивая описание новых странных частиц, мы должны кратко описать общую ситуацию в физике частиц после открытия Ω^- . Все адроны, найденные в лаборатории до 1964 г., мож-

но интерпретировать как системы, состоящие из кварков u , d , s . Мы уже упоминали о существовании параллели между лептонами и кварками. В частности, мы сопоставили электрон и его нейтрино (легчайшие лептоны) с легчайшими кварками u и d . По этой причине нужно приветствовать существование нового кварка. Как уже говорилось в начале главы, новый s -кварк следует поставить в соответствие с мюоном. Но при таком сопоставлении сразу же возникает трудность. Наряду с мюоном существует еще один лептон — мюонное нейтрино. Нам приходится, таким образом, ассоциировать четыре лептона с тремя кварками:

$$\begin{pmatrix} \nu_e & \nu_\mu \\ e & \mu \end{pmatrix} \longleftrightarrow \begin{pmatrix} u & \\ d & s \end{pmatrix}.$$

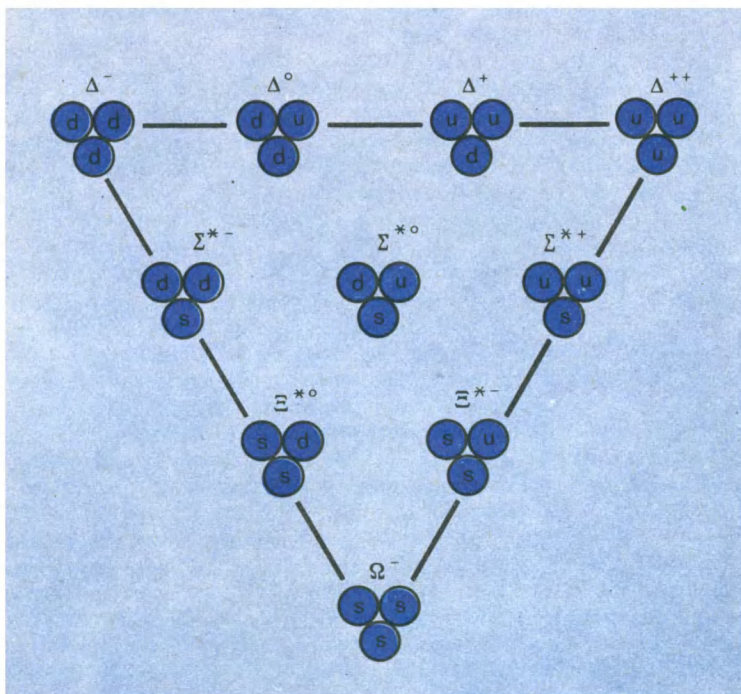


Рис. 31. Девять частиц со спином $3/2$, включающие четыре Δ -частицы без s -кварков, три Σ^* -частицы, содержащие один s -кварк, две Ξ^* -частицы с двумя s -кварками и, наконец, Ω^- -частицу, состоящую из трех s -кварков

Такая схема никак не может считаться удовлетворительной. Она выглядит так, как будто в ней чего-то не хватает. Очевидно, что лептон-кварковая схема классификации, указанная выше, стала бы значительно привлекательнее, если бы имелся еще один кварк.

**Нехватает
кварка**

По крайней мере, в этом заключалась одна из идей, высказанных в середине 60-х годов для усовершенствования схемы лептон-кваркового соответствия. Для возможно существующе-

**“Очарованные”
кварки**

го следующего кварка было предложено и название: “очарованный”. Существует ли следующий кварк на самом деле? Это был вопрос, который поставили перед собой экспериментаторы и теоретики. Ответ на него непосредственно приводит нас к открытиям первой половины 70-х годов и, таким образом, к началу новой важной эпохи в развитии современной физики.

8

“ОЧАРОВАННЫЕ” ЧАСТИЦЫ И НОВАЯ СИЛА В ПРИРОДЕ

Ничто не предвещало того, что должно произойти что-то необычайное, когда в понедельник 11 ноября 1974 г. я вошел в свой кабинет в Калифорнийском технологическом институте. Но все изменилось, когда я услышал возбужденный голос моего коллеги Ричарда Фейнмана. Он зашел ко мне и сообщил о новом открытии, о котором только что узнал по телефону. В лаборатории СЛАК под Сан-Франциско несколько

**Новая частица
с необычными
свойствами**

часов назад была открыта новая частица с весьма необычными свойствами. Эта частица, названная ψ , имела массу примерно 3100 МэВ и жила необычайно долго. Поскольку ожидалось, что частица со столь большой массой легко распадется за счет сильного взаимодействия (как, например, Δ -частицы), она должна была существовать лишь очень короткое время. Но ψ -частицы жили более чем в 1000 раз дольше, чем можно было ожидать в рамках обычных представлений. Поэтому было ясно, что эти частицы представляют собой нечто новое, такое, о чем мы не имеем еще ни малейшего понятия.

Как и ученые во всех лабораториях физики частиц в США и Европе, мы в Калтехе детально обсуждали новые результаты в течение всех памятных ноябрьских дней 1974 г. Чаще всего

мы говорили о наиболее вероятной интерпретации нового явления: "очарование".

Чтобы понять, почему "очарование" является полезным понятием, мы должны вновь рассмотреть слабые взаимодействия, в частности взаимодействие нейтрино с веществом. Выше уже отмечалось, что "Очарование" и слабые силы обычно при взаимодействии с веществом нейтрино превращается в заряженный лептон. Так, электронное нейтрино, вступая во взаимодействие с нуклоном, превращается в электрон и аналогично мюонное нейтрино превращается в мюон (рис. 32). Похожий процесс

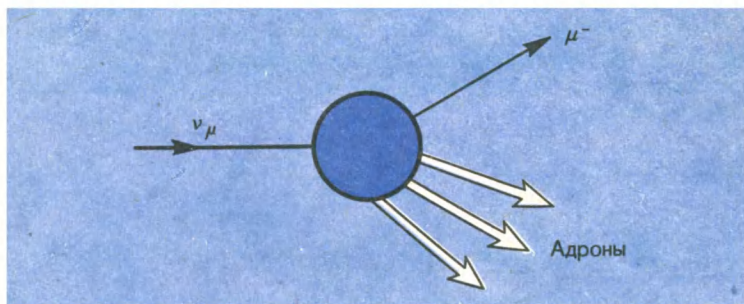


Рис. 32. Нейтринное взаимодействие. Мюонное нейтрино сталкивается с адроном (например, с протоном) и превращается в мюон. Адрон получает большую часть энергии нейтрино. При этом он "перегревается" и распадается на другие частицы

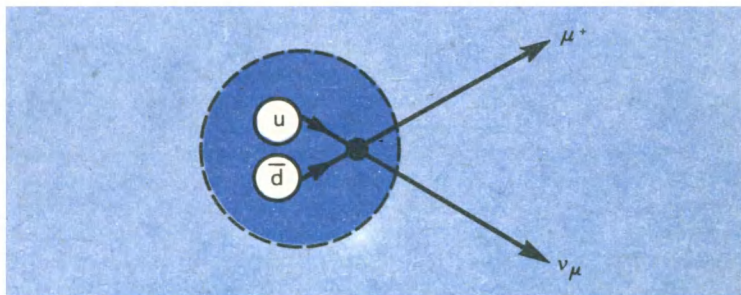


Рис. 33. Распад положительно заряженного π -мезона. Кварки u и \bar{d} аннигилируют друг с другом, в результате чего образуются нейтрино и положительно заряженный мюон

ответствен за распад заряженных π -мезонов. Этот распад можно описать как уничтожение кварк-антикварковых пар внутри π -мезона с превращением их в мюон и мюонное антинейтрино (рис. 33). Аналогично описывается и распад заряженных K -мезонов. В этом случае внутри K -мезона уничтожается пара $(\bar{u}s)$, превращаясь в мюон и нейтрино.

Однако между распадами π - и K -мезонов существует важное различие. Оказывается, что распад K -мезона идет с мень-

Слабый распад мезонов

шей интенсивностью, чем распад π -мезона. K -мезоны живут почти в 20 раз дольше, чем можно было бы naивно ожидать. Было обнаружено, что причину этого следует ис-

кать в структуре самого слабого взаимодействия. Главная часть слабой силы действует на u - и d -кварки, в то время как s -кварк менее интенсивно участвует в слабом взаимодействии.

В начале 60-х годов был поставлен вопрос: а не существует ли еще одна слабая сила, позволяющая нейтрино взаимодействовать с веществом, не превращаясь при этом

Новая сила

в заряженный лептон? Такая сила в определенном смысле аналогична электрической.

Электрон, взаимодействие которого с веществом описывается электрическими силами, ни во что не превращается при таком взаимодействии. Проходя сквозь вещество, он в результате взаимодействия несколько меняет свою энергию и импульс, но при этом остается электроном. По анало-

Нейтрино остаются нейтрино

гии можно предположить, что по крайней мере некоторые из нейтрино, проходя сквозь вещество, вступают с ним во взаимодействие, но все же остаются нейтрино.

Такой процесс изображен на рис. 34. Соответствующее взаимодействие называют *взаимодействием нейтральных токов* (по причинам, которые мы разъясним позднее). Лишь немногие физики верили в то, что такое взаимодействие существует, приводя в поддержку своей точки зрения следующий простой аргумент: если бы существовало взаимодействие нейтральных токов, то его проявления должны были бы видеть и в слабых распадах, точно так же, как можно наблюдать нормальное слабое взаимодействие, называемое *взаимодействием заряженных токов*, в распаде π -мезона. Одной из возможностей было изучение распадов нейтральных K -мезонов.

Почему K^0 не распадается на $\mu^+ \mu^-$?

Можно ожидать, например, что нейтральный K -мезон в результате взаимодействия нейтральных токов будет распадаться на мюонную пару: $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Был проведен тщательный поиск таких распадов и обнаружи-

лось, что нет никаких свидетельств существования взаимодействия нейтральных токов. Экспериментальные данные очень

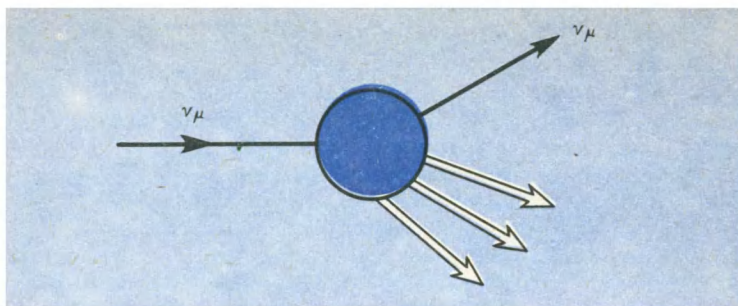


Рис. 34. Нейтринная реакция, в результате которой нейтрино не превращается в заряженный лептон. Падающее нейтрино передает часть энергии и импульса адрону (например, протону в атомном ядре). Последний возбуждается и распадается на адроны, причем число образованных частиц зависит от полученной энергии. Нейтрино при этом остается самим собой. Подобный процесс может иметь место, только если существует новая слабая сила, позволяющая нейтрино ни во что не превращаться в результате слабого взаимодействия или взаимодействия нейтральных токов

надежны. Сегодня мы уже знаем, что на 100 млн. распадов нейтральных K -мезонов приходится лишь один распад с образованием мюонной пары; большинство распадов нейтральных K -мезонов приводят к образованию пары π -мезонов, например $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$. По этой причине и делалось заключение, что не существует взаимодействия нейтральных токов.

Однако приведенный выше аргумент не является убедительным. Из отсутствия распада $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ можно лишь заключить, что взаимодействие нейтральных токов (если оно существует) не действует на d - и \bar{s} -кварки, составляющие K^0 -мезон. Но вся проблема снимается, если взаимодействие нейтральных токов никогда не меняет тип кварка; это означает, что оно действует только на пары $\bar{d}d$, $\bar{u}u$ или $\bar{s}s$, но никогда на $\bar{d}s$. То, что подобное взаимодействие не является бессмыслицей, можно видеть на примере электромагнитного взаимодействия. Оно имеет как раз описанные выше свойства. Виртуальный фотон может породить лишь электрон-позитронную или мюон-антимюонную пары либо пару $\bar{d}d$, но никогда не порождает пары $\bar{e}\mu$ или $\bar{d}s$. Если взаимодействие нейтральных токов действительно должно обладать подобным свойством, то единственная возможность обнаружить и изучить его заключается в исследовании нейтринных взаимодействий.

Поиск возможно существующего взаимодействия нейтральных токов был одной из главных задач группы ученых, работав-

ших на установке Гаргамель, о которой мы уже упоминали. В 1973 г., после более чем года сбора экспериментальных дан-
ных и последующего анализа, ситуация до

Открытие некоторой степени проявилась. Обнаружи-
нового лось, что нейтрино иногда так взаимодей-
взаимодействия ствуют с веществом, что при этом не пре-

вращаются в заряженные лептоны. Так было
установлено существование взаимодействия нейтральных токов.
Вскоре после этого открытия, сделанного в ЦЕРН, существо-
вание новой слабой силы было подтверждено в аналогичном
эксперименте, проведенном в Национальной лаборатории
им. Ферми под Чикаго. Ниже мы подробнее познакомимся со
структурой этого нового взаимодействия. При этом окажется,
что с помощью взаимодействия нейтральных токов можно
построить единую теорию слабого и электромагнитного взаи-
модействия.

Как только обнаружилось, что взаимодействие нейтральных
токов действительно существует, стало очевидным, что должен
существовать какой-то механизм, не позволяющий новому
взаимодействию принимать участие в распаде нейтральных
K-мезонов. К моменту открытия взаимодействия нейтральных
токов имелась лишь одна возможность обеспечить это, и такой
механизм включал существование нового кварка с зарядом $2/3$.

Мы уже отмечали выше, что сразу же после создания модели
кварков в 1964 г. казалась удивительной странная асимметрия

между лептонами и кварками: если мы
Родство между верим в какое-то соответствие или родст-
лептонами и во между кварками и лептонами, то три
кварками кварка против четырех лептонов не имеют

никакого смысла. Простейшая возможность
установить действительное родство между лептонами и кварка-
ми заключалась в добавлении нового кварка с зарядом $2/3$,
т. е. введении тяжелого собрата μ -кварка. На этом основании
запишем следующую схему:

$$\begin{pmatrix} u & : & c \\ d & : & s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_e & : & \nu_\mu \\ e^- & : & \mu^- \end{pmatrix}.$$

Однако на этой стадии добавление нового "очарованного"
с-кварка является всего лишь одним из многих возможных
путей расширения системы лептонов и кварков и установления
соответствия между ними. Для большинства физиков это была
одна из возможностей отразить лептон-кварковую симметрию —
простая, но ни в коей мере не убедительная.

Лишь в 1970 г. стало понятно, что с помощью введения но-
вого кварка, а именно с-кварка, можно избежать того, чтобы
взаимодействие нейтральных токов угрожало стабильности

нейтральных K -мезонов по отношению к распаду на мюоны. Соответствующие аргументы были приведены в 1970 г. Шелдоном Глешоу с сотрудниками, работавшими

Почему должны существовать s -кварки? в Гарвардском университете. Эти аргументы просты и убедительны. Если s -кварк действительно существует, то проще всего пред-

положить, что слабое взаимодействие внутри системы кварков $u-d$ аналогично слабому взаимодействию внутри системы кварков $c-s$. В этом случае оказывается, что взаимодействие нейтральных токов, которое может приводить к распаду нейтральных K -мезонов на лептоны, содержит вклады как от слабой силы, действующей в $(u-d)$ -системе, так и от слабой силы, действующей в $(c-s)$ -сис-

"Очарование" предотвращает распад K^0 на лептоны теме. Оба вклада равны по величине, но противоположны по знаку. Отсюда следует, что взаимодействие нейтральных токов никогда не превращает один тип кварка в другой и по этой причине распад нейтральных

K -мезонов на лептоны запрещен.

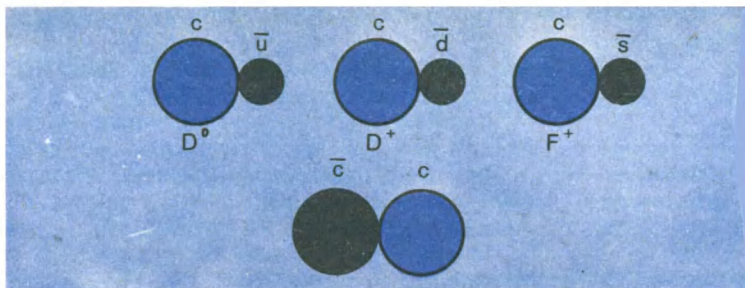
Таким образом, в 1970 г. стало ясно, что в случае, если существует взаимодействие нейтральных токов, должны быть и s -кварки. Хотя нейтральные токи были обнаружены лишь тремя годами позднее, большинство теоретиков в 1973 г. было убеждено, что должна существовать степень свободы, связанная с "очарованием". Однако главный вопрос заключался в следующем: где, при каких энергиях впервые проявятся новые эффекты, связанные с s -кварком? Было очевидно, что эффективная масса s -кварка должна быть много больше эффективной массы u -кварка, так как в противном случае частицы, содержащие s -кварки, должны были бы уже наблюдаться.

Я упомянул выше, что в результате введения s -кварка два различных вклада в силу нейтрального тока, приводящего к распаду нейтрального K -мезона на лептоны,

Сколько весит "очарование?" взаимно уничтожаются. Легко видеть, что это свойство лишь тогда является точным, когда эффективные массы u - и s -кварков

абсолютно одинаковы. Если же принять, как это несомненно и есть на самом деле, что s -кварк много тяжелее u -кварка, то возникает новый вклад во взаимодействие нейтральных токов, сам по себе нежелательный, так как он приводит к лептонному распаду нейтральных K -мезонов. Этот вклад тем больше, чем больше разность масс между s - и u -кварками.

"Очарование" стучится в дверь По этой причине s -кварк не может быть слишком тяжелым. Численный анализ этой проблемы показывает, что s -кварк не может быть много тяжелее 2000 МэВ. В 1973 г. это означало, что физические эффекты, связанные с "очарован-



Чармоний

Рис. 35. Новые мезоны, предсказываемые схемой "очарования"

ной" степенью свободы, находятся в области, доступной эксперименту. Как отмечали некоторые физики, могло быть даже и так, что эти эффекты уже наблюдались в различных экспериментах и были неправильно интерпретированы.

Как должна проявляться новая степень свободы? Каких новых частиц можно ожидать в случае существования "очарованного" кварка? Прежде всего ясно, что имеется нечто вроде замороженной версии новой "очарованной" степени свободы в образе $\bar{c}c$ -состояний — новый кварк объединяется со своим собственным антикварком (в случае s -кварка мы уже познакомились выше с подобным состоянием, а именно с ϕ -мезоном, кварковый состав которого $\bar{s}s$). Состояния, имеющие структуру $\bar{c}c$, получили название *чармония* по аналогии с позитронием, связанным состоянием электрона и позитрона, удерживаемых вместе электрическими силами¹.

Кроме того, мы ожидаем существования мезонов, состоящих из одного c -кварка и одного из старых кварков u или d . Такие частицы должны обладать новым квантовым числом "очарование" и по этой причине они должны быть стабильными по отношению к сильным взаимодействиям; это означает, что они могут распадаться только за счет слабого взаимодействия. Эти новые мезоны получили наименование D -мезонов. Следует ожидать, что D -мезоны живут много дольше, чем, например, cc -мезоны (состояния чармония), которые могут распадаться в результате сильного взаимодействия. На рис. 35

¹ Термин "очарование" по-английски звучит как *чарм* (*charm*). Отсюда и название *чармоний*. — Прим. пер.

схематически представлены различные мезоны, содержащие s -кварки.

Может быть и так, что s -кварк вместе с анти- s -кварком образует мезон, в данном случае с электрическим зарядом $+1$.

Объединение "очарования" и странности того, s -кварк вместе с двумя другими кварками может образовывать барион, обладающий новым квантовым числом "очарование", например, барион со структурой (cud) (который был бы "очарованным" аналогом Λ -гиперона, о котором говорилось выше).

В 1970 г. в Брукхейвенской лаборатории в США под руководством Леона Ледермана был проведен интересный эксперимент. Очень интенсивный пучок протонов направлялся на мишень и отбирался только один тип частиц, выходящих из области взаимодействия, а именно мюоны. В частности, наблюдалось образование мюон-антимюонных пар. Мы уже знаем, что векторные мезоны, например φ -мезон, иногда распадаются в результате электромагнитного взаимодействия на мюонные пары. Поэтому группа Ледермана имела возможность очень

В поисках новых частиц точно изучить образование векторных мезонов в адронных соударениях, что было едва ли возможно сделать другим способом.

В частности, была надежда, что при этом обнаружатся новые типы частиц. Новая частица, распадающаяся на мюонную пару, образует эту пару с такой массой, которая в точности равна массе исходной частицы. Поэтому можно надеяться обнаружить новые частицы, детально исследуя массовый спектр мюонных пар.

Группа Ледермана изучила мюонные пары с массами вплоть до 4000 МэВ. При этом не было найдено никаких новых частиц,

Своеобразные эффекты вблизи 3000 МэВ но обнаружилась своеобразная структура диаграммы, изображающей массы мюонных пар, причем в области масс вблизи 3000 МэВ. Диаграмма выглядела так, как будто в этой области существовало что-то новое. Сам

Ледерман был уверен, что обнаруженный эффект есть следствие существования новой частицы и лишь недостаточная точность измерений импульса мюонов была причиной того, что новую частицу не удалось непосредственно увидеть. Чтобы достичь лучшего разрешения по импульсам, он решил построить новый детектор частиц и детально исследовать эффект в новом эксперименте в лаборатории им. Ферми под Чикаго.

Тем временем в Брукхейвенской лаборатории другая исследовательская группа под руководством Сэма Тинга проводила аналогичный эксперимент. Вместо мюонов группа Тинга использовала электроны, которые регистрировались с помощью очень

сложной аппаратуры. Осенью 1974 г. группа Тинга начала поиск электрон-позитронных пар, образуемых в протон-нуклонных соударениях в области масс между 2000 и 4000 МэВ. Исследователи были потрясены, обнаружив, что особенно много электрон-позитронных пар имеют массу примерно 3100 МэВ. После нескольких недель интенсивной обработки результатов стало ясно, что это не может быть случайностью, а что должна существовать новая частица с массой примерно 3100 МэВ, которая по какой-то причине сравнительно часто распадается на электрон-позитронные пары. Если эта частица столь же часто распадается и на мюонные пары, то становится понятным и сделанное четырьмя годами ранее наблюдение Ледермана.

Между тем в Калифорнии, в Станфордском Центре линейного ускорителя, произошло другое открытие. В 1973 г. начались эксперименты на новом электрон-позитронном накопительном кольце SPEAR (рис. 36). Установка SPEAR представляет собой по существу собрание расположенных по кольцу магнитов, служащих для того, чтобы заставить бегать по кольцу пучки электронов и позитронов. В определенных местах электроны и позитроны сталкиваются друг с другом и аннигилируют.

В принципе новые эксперименты на установке SPEAR были обращением проделанных группой Тинга экспериментов. Если при столкновении протонов образуется частица, которая затем распадается на электрон-позитронную пару, то можно ожидать, что та же самая частица способна родиться при электрон-позитронной аннигиляции и после этого распасться на адроны. Однако преимущество электрон-позитронной аннигиляции состоит в том, что можно заранее точно установить энергии аннигилирующих электрона и позитрона и в частности породить интересующую нас частицу с совершенно определенной массой, не наблюдая при этом никаких побочных (мешающих) эффектов. Чтобы обнаружить новую частицу, необходимо всего лишь детально исследовать подозреваемую область энергии.

В ноябре 1974 г. началось тщательное изучение области энергий вблизи 3100 МэВ на кольце SPEAR. Ничего не зная о том, что группа Тинга в Брукхейвене обнаружила частицу с массой 3100 МэВ, физики в Станфорде медленно приближались к этой энергии. В конце второй недели ноября 1974 г. они наконец достигли энергии 3090 МэВ. Внезапно детекторы зарегистрировали большое число частиц, выходящих из области взаимодействия. Активность детекторов возросла в 100 раз по сравнению с обычной. Это событие стало одним из

**Ноябрьская
революция**

крупных достижений в физике частиц; ученые, занимающиеся физикой частиц, часто называют его ноябрьской революцией. На



Рис. 36. Вид с воздуха на e^+e^- накопительные кольца SPEAR в Стэнфордском Центре линейного ускорителя под Сан-Франциско

самом деле была обнаружена новая частица с весьма необычными свойствами. Об ее открытии одновременно сообщили Сэм Тинг и Бартон Рихтер, руководитель исследовательской группы на установке SPEAR. Так как оказалось невозможным дать ей одно общее имя, эту частицу назвали двойным именем J/ψ ¹. Название J было предложено Тингом (символ J означает по-китайски имя Тинга), в то время как группа SPEAR решила обозначить новую частицу символом ψ . За это открытие Тинг и Рихтер получили в 1976 г. Нобелевскую премию по физике. Сегодня известен целый спектр новых частиц, аналогичных J/ψ -состоянию. Этот спектр показан на рис. 37. Он представля-

¹ Читается джей-пси. — Прим. пер.

$$\overline{\psi(3772)}$$

$$\overline{\psi(3684)}$$

$$\overline{\chi(3550)}$$

$$\overline{\chi(3510)}$$

$$\overline{\chi(3415)}$$

$$\overline{J/\psi(3095)}$$

Рис. 37. Спектр состояний чармония, установленный в экспериментах по аннигиляции e^+ и e^- (масса соответствующих состояний указана в скобках в мегаэлектрон-вольтах)

ет собой спектр состояний чармония, т. е. состояний, образованных из нового c -кварка и его антикварка, удерживаемых вместе силами сильного взаимодействия. Как и в случае других кварков, имеется много различных возможностей сложить

спины обоих кварков вместе с различными моментами импульса. В этом — причина богатого спектра таких состояний. Состояние J/ψ представляет собой не что иное, как основное состояние спектра чармония. Момент импульса обоих кварков равен нулю. Спины обоих кварков направлены в одну сторону, так что состояние в целом имеет полный момент импульса, равный 1. Таким образом, J/ψ -состояние является $\bar{c}c$ -аналогом нейтральных векторных мезонов, о которых мы упоминали выше (ρ^0 -, ω - и φ -мезоны).

Может быть и так, что спины c -кварка и c -антикварка направлены в противоположные стороны. В этом случае возникает псевдоскалярная частица, т. е. частица, аналогичная π -или η -мезонам. Можно ожидать, что масса этой частицы несколько меньше массы J/ψ -частицы и что ее можно наблюдать при распаде J/ψ -состояния на фотон и эту новую частицу, названную η_c (рис. 38).

Несмотря на большие сложности, вскоре удалось обнаружить на опыте η_c -частицу. На кольце SPEAR в Калифорнии было сконструировано специальное устройство — так назы-

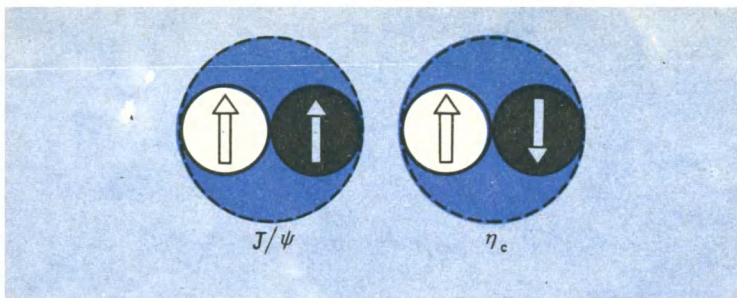


Рис. 38. Частицы J/ψ и η_c . Можно заметить, что в J/ψ -состоянии спины обоих кварков направлены в одну сторону, а в η_c -состоянии — в противоположные

ваемое кристаллическое ядро. Оно обладает тем свойством, что с его помощью можно особенно хорошо наблюдать фотоны. На этой установке удалось в 1979 г. идентифицировать η_c -частицу. Как и ожидалось, она несколько легче J/ψ -частицы. Было найдено, что ее масса равна 2980 МэВ.

Хотя существование целого спектра состояний чармония является, как мы уже разъяснили выше, ясным указанием на то, что новые частицы состоят из нового кварка и его антикварка, все же можно говорить о доказательстве справедливости идеи "очарования" только после того, как будут найдены новые "очарованные" частицы, т. е. частицы, состоящие из нового c -кварка и одного или нескольких уже известных кварков. Следует ожидать, что легчайшей из новых "очарованных" частиц будет уже упоминавшийся D^0 -мезон — частица с кварковым составом $\bar{u}c$. Новые мезоны обладают новым

квантовым числом — "очарованием". По этой причине они не могут в результате сильного взаимодействия распасться на другие частицы, а их распады обусловлены слабым взаимодействием. Отсюда вытекает, что новые "очарованные" частицы живут по крайней мере в 100 млн. раз дольше, чем J/ψ -частица.

С начала 1975 г. во всех лабораториях физики высоких энергий в мире начался поиск "очарованных" частиц. Как их нужно выслеживать? Какие эксперименты и в каких лабораториях имели наилучшие шансы обнаружить "очарованные" частицы? В том году это были вопросы без ответов. Большинство физиков было убеждено, что лучше всего искать

"Очарованные"
мезоны живут
дольше

Охота за
"очарованием"

"очарованные" частицы в процессе e^+e^- -аннигиляции, т. е. в том же процессе, в котором были найдены J/ψ -частицы.

Новый c -кварк был первоначально введен физиками-теоретиками как тяжелый партнер s -кварка. Поэтому можно было ожидать, что c -кварк за счет слабых сил может превращаться в s -кварк, так же как u -кварк в результате слабого взаимодействия способен превращаться в d -кварк. В частности, D -мезон

должен в результате слабого взаимодействия превращаться в состояние, содержащее s -кварк. Такое состояние должно быть частицей со странностью, например K -мезоном. Из "очарования" получается странность

Одной из возможных конечных конфигураций является, например, $K\pi\pi$ -состояние, образованное одним K -мезоном и двумя π -мезонами. Физики-теоретики ожидали также, что при слабом распаде c -кварка наряду с s -кварком иногда образуется лептонная пара, состоящая из нейтрино и электрона или мюона. Это открывало возможность поиска "очарованных" частиц путем наблюдения образования электронов или мюонов.

После почти полугодовых исследований физикам в Стэнфорде удалось идентифицировать "очарованные" частицы. Их нашли после того, как доказали, чему равна масса $K\pi\pi$ -состояний, образующихся в процессе e^+e^- -аннигиляции при больших

энергиях. Оказалось, что большинство таких состояний имеют массу 1,86 ГэВ. Последующие эксперименты подтвердили первоначальное подозрение, что речь идет о D -мезонах. Открытие D -мезонов

Почти в то же время в лаборатории ДЕЗИ в Гамбурге было найдено, что в процессе e^+e^- -аннигиляции при больших энергиях увеличивается число образовавшихся электронов и мюонов. Дальнейшие исследования показали, что обнаруженное свойство можно понять, лишь предположив, что в процессе электрон-позитронной аннигиляции при энергиях, несколько больших 4 ГэВ (при энергиях, больших массы J/ψ -частицы), образуются новые частицы, которые распадаются только в результате слабого взаимодействия. "Очарованные" частицы были наиболее вероятными кандидатами. Таким образом, независимо в двух лабораториях были получены указания на существование "очарованных" частиц. Детекторы, с помощью которых это было сделано, показаны на рис. 39 и 40. В последнее время удалось также наблюдать образование D -мезонов в нейтринных пучках (рис. 41).

До сих пор мы говорили только об "очарованных" мезонах. А как обстоит дело с "очарованными" барионами? Как мы уже знаем, легчайшим странным барионом является Λ -частица, имеющая кварковый состав (uds). По отношению к сильному взаимодействию, т. е. по отношению к силам, которые связыва-

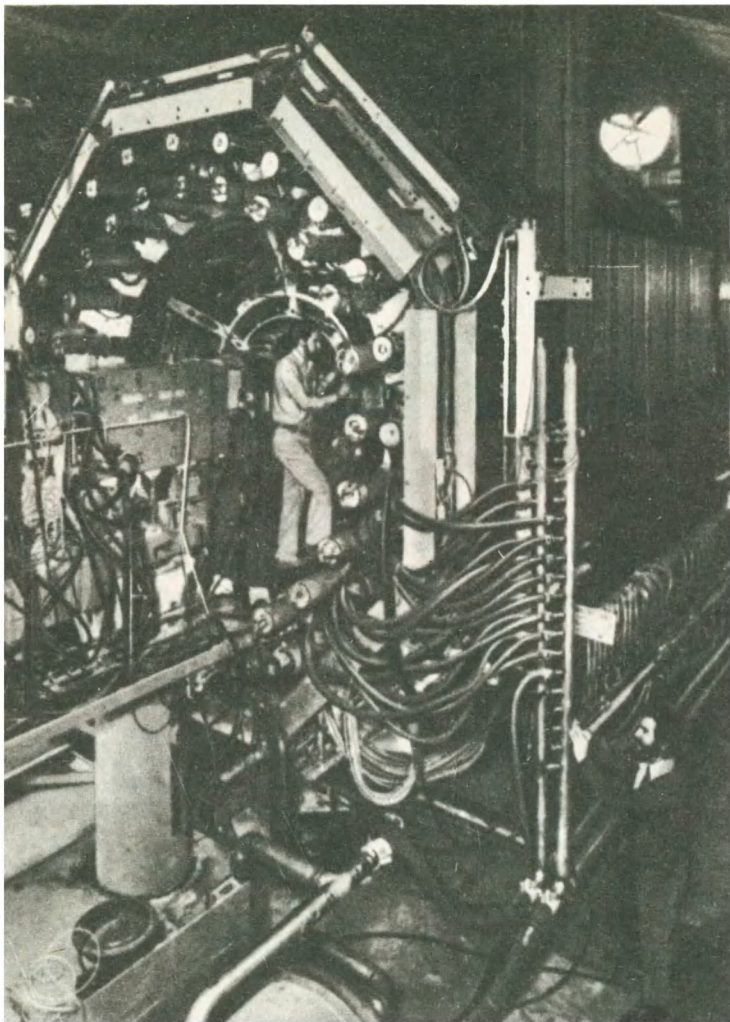


Рис. 39. Внутренний вид детектора Mark-1 в СЛАК, с помощью которого были открыты J/ψ -частицы, другие мезоны-чармонии и D -мезоны



Рис. 40. Детектор DASP в ДЕЗИ, с помощью которого были изучены физические свойства D -мезонов

ют кварки в частицы, s -кварк есть не что иное, как тяжелый партнер s -кварка. Поэтому можно построить легчайший барион, содержащий s -кварк, проведя простейшую операцию. Мы удаляем s -кварк из Λ -конфигурации и заменяем его на c -кварк.

Протоны с "очарованием"

При этом мы получаем "очарованный" аналог Λ -частицы, т. е. частицу с кварковым составом (udc). Ей присвоили название Λ_c . Подчеркнем, что электрический заряд Λ_c -состояния равен не 0, как заряд обычной Λ -частицы, а +1 (электрический заряд c -кварка равен $2/3$). Поскольку c -кварк много тяжелее s -кварка, можно ожидать, что Λ_c -частица по этой причине много тяжелее наблюдаемой Λ -частицы. Согласно приближенным оценкам c -кварк примерно на 1 ГэВ тяжелее s -кварка, так что масса Λ_c -бариона на 1 ГэВ больше массы Λ , т. е. $M(\Lambda_c) \approx 2,2 \div 2,3$ ГэВ.

Начиная с 1975 г. "очарованные" барионы искали во многих различных экспериментах. По некоторым, в основном экспериментальным, причинам "очарованные" барионы наблюдать значительно сложнее, чем "очарованные" мезоны. Лишь в 1979 г.

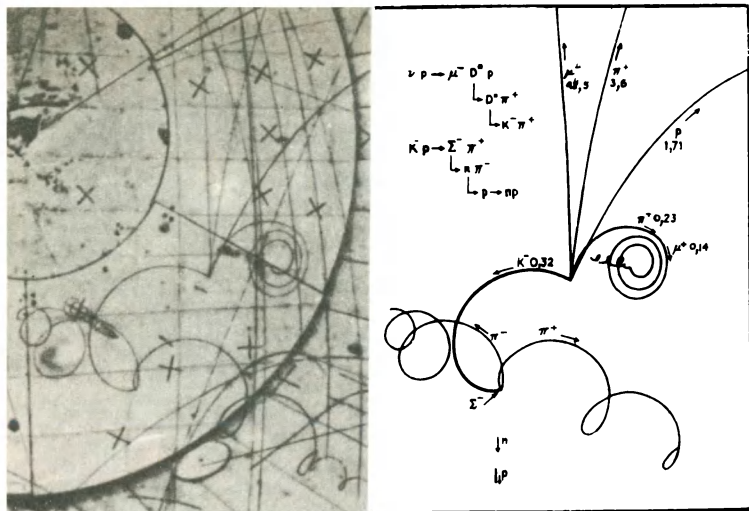


Рис. 41. Рассеяние нейтрино на адронах, в результате которого родился D -мезон (ЦЕРН). Слева — фотография, полученная на пузырьковой камере BEBC, с помощью которой проводились исследования. Справа — следы частиц. Падающее нейтрино (невидимо) взаимодействует с одним из кварков внутри протона, находящегося в пузырьковой камере. Нейтрино превращается в мюон, след которого отчетливо виден. Протон, испытавший соударение, возбуждается и превращается в протон и D -мезон. Последний распадается на K^- , π^+ , π^- . Все четыре частицы легко идентифицируются по их следам. Приведенные цифры указывают импульсы частиц в гигаэлектрон-вольтах

в Брукхейвенской лаборатории (США) было впервые получено прямое указание, что "очарованные" барионы действительно существуют. В частности, в различных экспериментах была найдена Λ_c -частица (рис. 42). Ее масса оказалась как раз такой, которая следует из теоретических расчетов, а именно 2,273 ГэВ. Эту частицу наблюдали по распадам $\Lambda_c \rightarrow \Lambda \pi^+ \pi^+ \pi^-$ и $\Lambda_c \rightarrow \rho K^- \pi^+$.

Открытие Λ_c -частицы завершило первую часть новой главы в развитии физики частиц, начавшейся в ноябре 1974 г. Был обнаружен целый ряд новых частиц, содержащих "очарованные" кварки. Таким образом, был открыт новый вид материи, не существующий в природе сам по себе за исключением экстремальных ситуаций, создаваемых в лабораториях физики высоких энергий.

Новый вид материи

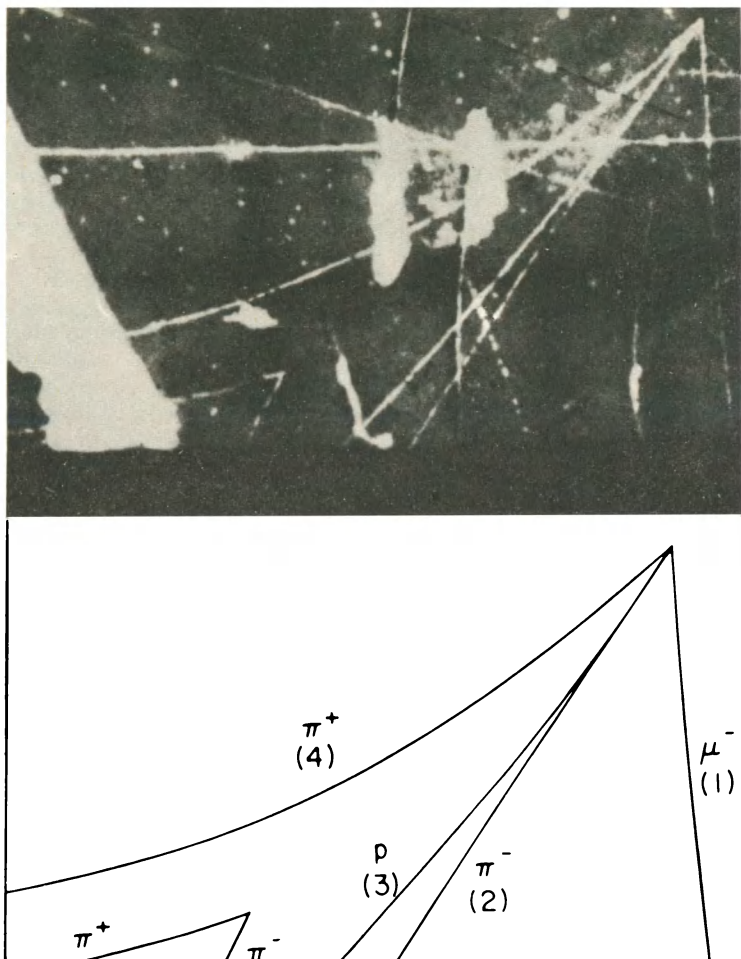


Рис. 42. Рассеяние нейтрино, в результате которого рождается "очарованный" барион. Падающее нейтрино (невидимо) превращается в мюон, след которого ясно виден. Очарованный барион (речь идет о положительно заряженной Λ_c^+ -частице) распадается на $p + \pi^+ + \pi^- + K^0$. Нейтральный K -мезон сам по себе невидим, но идентифицируется по своему распаду на $\pi^+ + \pi^-$. Измеренная масса Λ_c^+ составляет 2,26 ГэВ

Как мы видели, кварки играют фундаментальную роль в понимании структуры адронов и их взаимодействий. Однако оказывается, что они не существуют как свободные частицы вроде π -мезонов или протонов. В чем причина такого своеобразного положения? Может быть так, что объяснение этого феномена, как уже отмечалось выше, весьма просто: кварки являются относительно тяжелыми частицами, и до сего дня их не удавалось наблюдать потому, что не достигнута требуемая для этого энергия. Однако существуют различные указания как экспериментального, так и теоретического характера, что такое объяснение неправильно. Одно из странных свойств кварковой теории состоит в том, что адроны являются либо трехкварковыми системами (барионы), либо кварк-антикварковыми системами (мезоны). Априори можно думать, что в природе имеются и другие конфигурации кварков, например двухкварковые (qq) либо четырехкварковые ($qqqq$) системы. Поскольку электрические заряды кварков равны либо $2/3$, либо $-1/3$, такие объекты должны, естественно, иметь дробные электрические заряды [например, двухкварковое состояние (uu) должно иметь заряд $4/3$]. Подобные объекты никогда не наблюдались на опыте; это означает, что, как и свободные кварки, они не могут существовать в свободном состоянии.

**Кварки
не существуют
как свободные
частицы**

Рассмотрим другой необычный аспект кварковой модели, который легче всего изучить на примере Δ^{++} -частицы. Эта частица имеет массу 1232 МэВ и состоит из трех u -кварков. Она обладает моментом импульса, равным $3/2$, что возможно при условии, если все три кварка имеют спины, направленные в одну сторону (рис. 43). Частица Δ^{++} является легчайшей из существующих в природе частиц с электрическим зарядом $+2$. По этой причине можно ожидать, что три u -кварка в Δ^{++} -состоянии находятся более или менее в покое относительно друг друга, если не считать небольших перемещений, обусловленных законами квантовой механики. Подобное состояние называют *основным состоянием* системы, состоящей из трех u -кварков. Рассмотрим теперь Δ^{++} -состояние в виде, изображенном на рис. 43. Представим себе, что мы меняем местами два u -кварка в Δ^{++} -конфигурации. Результат, который мы получим, будет совпадать с исходным состоянием; таким образом, Δ^{++} -конфигурация симметрична по отношению к перестановке пары кварков.

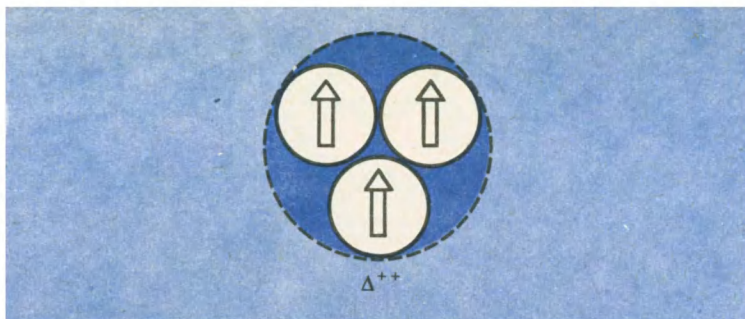


Рис. 43. Частица Δ^{++} , состоящая из трех u -кварков, спины которых направлены в одну сторону

Но кварки, как и электроны, являются объектами со спином $1/2$. Мы говорили выше о том, что такие объекты подчиняются определенному закону, открытому австрийским физиком Вольфгангом Паули. Этот закон утверждает, что два объекта со спином $1/2$ никогда не могут находиться в симметричном состоянии, а всегда находятся только в антисимметричном. (Этот закон иногда также называют *принципом запрета Паули*.) Все наблюдаемые в природе частицы подчиняются принципу Паули, в частности электроны и протоны. Нет никаких оснований думать, что этот принцип несправедлив для кварков. Поэтому мы заключаем, что Δ^{++} -конфигурация является антисимметричной по отношению к перестановке двух u -кварков, а не симметричной, как утверждалось выше. Таким образом, мы подошли к загадочному месту в кварковой теории. Обсуждавшийся парадокс занимал умы физиков с самого момента создания в 1964 г. кварковой модели.

Загадочная Δ^{++} -частица

Возможно, что в случае кварков, не существующих как свободные частицы, справедлив особый принцип, отличающийся от принципа Паули. Такое предположение было высказано в 1965 г. вскоре после создания кварковой модели Вэли Гринбергом, а затем в несколько иной форме М. Ханом и Й. Намбу.

В частности, обсуждался новый тип принципа Паули (так называемая парастатистика ранга три). С помощью модифицированного таким образом принципа Паули можно при определенных условиях понять, почему Δ^{++} -состояние симметрично, а не антисимметрично по отношению к перестановке двух кварков. Пятью годами позднее, в 1970 г., эта идея была подхвачена и модифицирована Марри Гелл-Маном и мной. Это

Новый принцип Паули?

В частности, обсуждался новый тип принципа Паули (так называемая парастатистика ранга три). С помощью модифицированного таким образом принципа Паули можно при определенных условиях понять, почему Δ^{++} -состояние симметрично, а не антисимметрично по отношению к перестановке двух кварков. Пятью годами позднее, в 1970 г., эта идея была подхвачена и модифицирована Марри Гелл-Маном и мной. Это

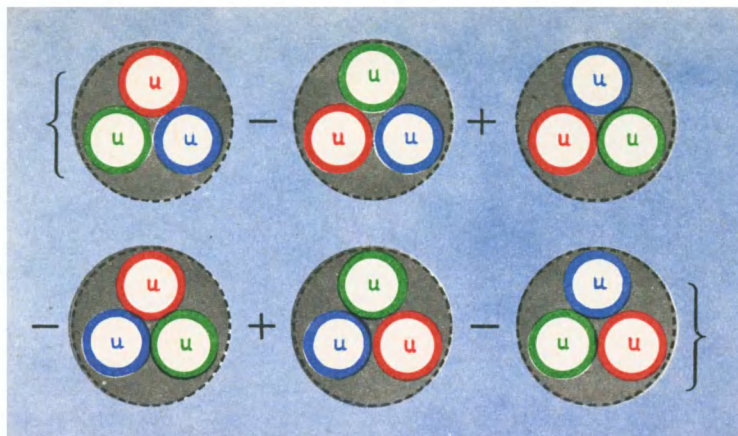


Рис. 44. Кварковая конфигурация Δ^{++} -частицы состоит из шести различных частей с чередующимися знаками. Сумма всех членов антисимметрична по отношению к перестановке любой пары кварков

в конечном итоге привело к введению нового квантового числа **"цвет"**¹, которое мы обсудим ниже, и к созданию современной теории сильных взаимодействий — *квантовой хромодинамике*.

Простейший путь преодолеть обсуждавшуюся выше трудность с принципом Паули заключается в следующем. Предположим, что каждый кварк может существовать в трех физически неразличимых состояниях, которые мы будем отмечать разными **"цветами"**, например красным, зеленым и синим.

Три "цвета" кварков

"Цветовая" структура

В этом случае можно построить Δ^{++} -конфигурацию, используя кварки различного **"цвета"**. Поскольку кварки имеют три разных **"цвета"**, очень просто так построить Δ^{++} -конфигурацию, чтобы она была антисимметричной по отношению к **"цветовому"** квантовому числу; это означает, что мы записываем Δ^{++} -конфигурацию как суперпозицию шести различных возможностей, изображенных на рис. 44.

Каждая из этих возможностей связана с последовательной перестановкой двух **"цветных"** кварков. Например, вторая

¹ Впервые понятие дополнительного квантового числа кварков было введено в СССР Н. Н. Боголюбовым, Б. В. Струминским и А. Н. Тавхелидзе. — *Прим. ред.*

возможность получается из первой перестановкой красного и зеленого кварков, а синий остается нетронутым. Поскольку знак у шести различных членов чередуется, сумма всех членов является антисимметричной по отношению к перестановке любой пары кварков, как и требует принцип Паули.

Эту идею можно обобщить на случай всех барионов, если принять, что все барионы, т. е. все трехкварковые конфигурации, полностью антисимметричны по "цветовому" квантовому числу.

Например, мы получим протонную конфигурацию из Δ^{++} -конфигурации (рис. 44) с помощью замены одного из u -кварков d -кварком и переупорядочивания спинов, соответствующего частице со спином $1/2$.

Если внимательнее рассмотреть барионную конфигурацию, представленную на рис. 44, можно заметить следующее: каждый "цвет" имеет, так сказать, равные права. Ни один "цвет" ничем не выделен по отношению к другому. Так, например, красные кварки представлены столь же часто, как и зеленые. Математики придумали для таких

конфигураций специальное наименование "*цветовые*" синглеты, т. е. синглеты по отношению к "цветовой" группе, представляющей собой группу всех математических преобразований, которые можно произвести в "цветовом" пространстве. Поскольку имеется три "цвета", эта группа является группой $SU(3)$; отсюда следует, что она совпадает с той группой, которая играла выше важную роль в мезонной и барионной спектроскопии и которую мы уже подробно обсуждали. Однако в последнем случае группа $SU(3)$ действовала в пространстве трех различных типов кварков u , d , s . Теперь же эта группа действует в "цветовом" пространстве трех различных "цветов" — красного, зеленого и синего. Таким образом, эти группы выполняют совершенно различные задачи. Одинакова лишь математическая структура соответствующих преобразований. В том, что относится к физике, группа $SU(3)$ для спектроскопии частиц полностью отличается от группы $SU(3)$, действующей в пространстве "цветов".

Чтобы избежать недоразумений, мы будем использовать следующие обозначения. Очень важно различать разные "цвета", которые мы обозначим красным, зеленым и синим (естественно, что используемые здесь "цвета" не имеют

никакого отношения к действительному "цвету" кварков, а есть лишь наглядный способ обозначения различных состояний кварка), и разные кварки u , d , s , c и т. д. Для последних мы используем название "тип". Таким образом, мы можем охарактеризовать каждое кварковое состояние двумя различными ин-

дексами: его "цветом" и его "типом"¹. "Цветовой" индекс принимает всегда значения от одного (красный) до трех (синий), в то время как индекс "типа" нумерует кварки u , d , s , c и последующие. Между "цветовым" индексом и индексом "типа" существует важное различие. "Цветовой" индекс пробегает всегда значения от одного до трех: имеется только три различных "цвета". Подчеркнем, что приведенные выше аргументы в пользу введения "цветового" квантового числа имеют смысл лишь в том случае, когда число "цветов" равно трем.

**Три "цвета"
и три кварка
в нуклоне**

Трудность с принципом Паули, которую мы обсуждали на примере Δ^{++} -конфигурации, может быть разрешена лишь в том случае, если мы введем ровно три "цвета", а не два, четыре или больше. Троичность "цветового"

квантового числа тесно связана с тем, что барионы состоят из трех кварков.

Однако в случае кварковых типов нельзя привести подобного аргумента. Не было бы ничего неправильного в рассмотрении мира сильных взаимодействий, в котором имелось бы лишь два типа кварков, например u и d . Более того, мог бы быть один тип кварков, например u -кварк. Правда, в этом случае не мог бы существовать протон. Легчайшим барионом

**Сколько типов
кварков
существует
в природе?**

была бы Δ^{++} -частица, которая была бы стабильной, так как не было бы никакой другой частицы, на которую она могла бы распасться. До сего дня мы не знаем, сколько в природе типов кварков, точно так же, как не знаем, сколько существует лептонов.

Выше мы видели, что барионные конфигурации представляют собой "цветовые" синглеты. Можно ли аналогичным образом описать мезонные конфигурации? Их необходимо сконструировать так, чтобы каждый "цветовой" индекс входил равномерно. Поэтому мы должны принять, что мезоны являются суперпозицией трех различных кварк-антикварковых вкладов: одного, состоящего из красного кварка и его антикварка, второго, состоящего из зеленого кварка и его антикварка, и, наконец, третьего, состоящего из синего

**Мезоны
и "цветные"
кварки**

кварка и его антикварка. В результате мы приходим к конфигурации, представленной на рис. 45. Подчеркнем, что в случае мезонных конфигураций каждый "цвет" входит

одинаково часто: мы опять имеем дело с "цветовыми" синглетами.

¹ Физики вместо термина "тип" чаще употребляют термин "аромат".—
Прим. пер.

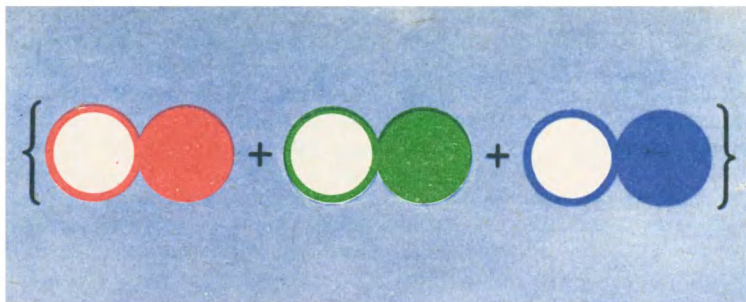


Рис. 45. Структура мезонов в теории цветных кварков. Мезон представляет собой сумму трех конфигураций: красный плюс зеленый плюс синий. Каждая конфигурация равновероятна; сумма трех конфигураций является "цветовым" синглетом — белым состоянием

Введя "цветовое" квантовое число, мы можем для построения адронов использовать очень простое предписание. Примем раз и навсегда, что все адроны (мезоны и барионы) являются синглетами "цветовой" группы в смысле, описанном выше. В этом случае мы сразу получаем только те конфигурации, которые наблюдаются в природе, а именно

**Адроны
являются
"цветовыми"
синглетами**

барионы в виде трехкварковых конфигураций и мезоны в виде кварк-антикварковых конфигураций. Все другие конфигурации исключаются, например обсуждавшаяся выше двухкварковая система, состоящая из двух кварков. Можно легко увидеть, что двухкварковая система никогда не может находиться в состоянии "цветового" синглета. Например, двухкварковая конфигурация красный—зеленый содержит цвета красный и зеленый, но не синий; это означает, что мы не получаем "цветового" синглета, поскольку один из трех цветов, а именно синий, выделен по отношению к другим. То же самое можно сказать и о четырехкварковых системах. И они никогда не могут являться "цветовыми" синглетами. Существуют лишь две простые возможности построить "цветовые" синглеты — кварк-антикварковые системы или трехкварковые системы. Всякий, кто хочет описать наблюдаемые барионы и мезоны наипростейшим образом, может сказать, что нужно ввести три "цвета" и просто постулировать, что все наблюдаемые адроны являются "цветовыми" синглетами. Если же его спросят после этого, что делать со всеми остальными конфигурациями, не являющимися "цветовыми" синглетами, например с самими кварками (триплетами по

отношению к "цветовой" группе) или дикварками (являющимися либо "цветовыми" триплетами, либо "цветовыми" секстетам), то он может ответить: "В данный момент я не знаю, в чем дело. Но возможно существует какой-то до сих пор не известный механизм, запрещающий существование частиц с "цветом". Я вижу, что наблюдаемые адроны являются "цветовыми" синглетами, и воспринимаю это как косвенное указание на то, что в природе могут встречаться только "цветовые" синглеты. Поэтому я постулирую, что "цвет" сам по себе в природе не встречается и что "цветные" частицы вроде кварков всегда находятся в связанном состоянии. Конечно, я не знаю в данный момент, правилен ли этот постулат. Поэтому я воспринимаю его как рабочую гипотезу, которую можно какое-то время использовать. Позднее, однако, я вернусь к этой проблеме и посмотрю, не существует ли действительно какого-то механизма, делающего невозможным существование "цветных" объектов в виде свободных частиц".

Именно такими были представления некоторых физиков, приступивших в начале 70-х годов к построению теории адронов. В физике является обычным делать предположения вроде описанных выше и изучать их следствия, не зная заранее, является ли верной исходная гипотеза. Так, например, Нильс Бор предположил, что электроны в атоме водорода могут двигаться лишь по совершенно определенным орбитам. Таким образом, не все из разрешенных законами классической механики орбит оказывались возможными. Бор не знал, почему это так, однако решил некоторое время не беспокоиться об этом, а посмотреть на следствия своей гипотезы. Таким путем он получил правильные значения уровней энергии в атоме водорода. Лишь спустя десятилетие гипотезы Бора были подтверждены созданием квантовой механики.

Почему же все-таки кажется разумным принять, что в природе в качестве реальных частиц встречаются только "цветовые" синглеты? Рассмотрим еще раз ситуацию, имеющуюся в электродинамике. Примем, что "цветовое" квантовое число ("цветовой заряд") есть нечто, аналогичное электрическому заряду. Общеизвестно, что электрические силы, действующие между заряженными объектами, имеют то свойство, что противоположно заряженные объекты притягиваются, а одноименно заряженные отталкиваются. Рассмотрим, например, электрон и его античастицу. Они образуют связанное состояние позитроний (рис. 46). Электрический заряд электрона равен -1 , а позитрона $+1$. Состояние в целом имеет электрический

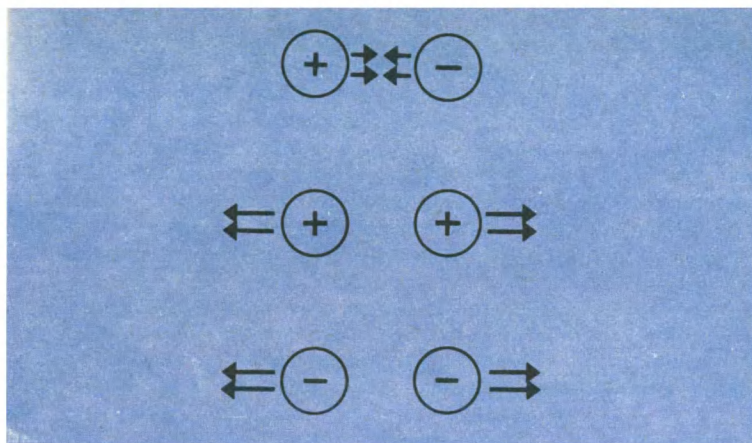


Рис. 46. Электрон и позитрон притягиваются, образуя связанное состояние с электрическим зарядом, равным нулю ("зарядовый синглет"). Два электрона или два позитрона образуют состояния с зарядами -2 или $+2$ и отталкиваются друг от друга; связанных состояний не возникает

заряд, равный 0; мы можем рассматривать это состояние как зарядовый синглет. С другой стороны, два электрона имеют полный заряд -2 , а два позитрона — полный заряд $+2$. Оба электрона или позитрона отталкиваются друг от друга и не возникает никакого связанного состояния. Эти образованные из двух электронов или двух позитронов состояния не являются зарядовыми синглетами. Оказывается,

Электродинамика и хромодинамика таким образом, что динамика электрической силы, которую мы знаем в природе, похожа на динамику "цветовой" силы в том смысле, что синглеты по отношению к соответствующей симметрии (зарядовая симметрия и соответственно "цветовая" симметрия) существуют как связанные состояния. Все другие состояния, не образующие синглетов, не способны к этому. Существует, однако, фундаментальное различие между динамикой электрической и "цветовой" силы. Электроны, являющиеся носителями электрического заряда, могут существовать в виде свободных частиц в природе, в то время как кварки, те составляющие, которые несут "цветовой заряд", открыто в природе не проявляются.

Сравнивая электродинамику и динамику "цвета", мы замечаем еще одно важное различие. Три кварка могут образовать "цветовой" синглет, а именно барионное состояние. С другой

стороны, три электрона образуют состояние с электрическим зарядом -3 , не являющееся зарядовым синглетом. Почему это так? Различие между электродинамикой и хромодинамикой состоит в том, что зарядовая симметрия в электродинамике является очень простой симметрией. Полный заряд физической системы устанавливается простым подсчетом зарядов отдельных составляющих, причем электрону приписывается -1 , а позитрону $+1$. По этой причине состояние с зарядом 0 (синглетное состояние) обязано быть таким, что число положительно заряженных частиц в нем равно числу отрицательно заряженных частиц.

Не так обстоит дело в случае "цветных" кварков. Здесь мы должны иметь дело с тремя различными "цветами", т. е. с большим числом зарядов. По этой причине невозможно подсчитать полный заряд системы путем сложения и вычитания различных зарядов кварков, как будто мы складываем и вычитаем числа.

Сложение "цветов"
"цветового заряда" сложнее и похоже на сложение векторов в трехмерном пространстве. Как знает каждый, нелегко получить нуль, складывая, например, три числа одной величины. Однако возможно получить нуль, складывая три вектора одинаковой длины. Нужно лишь представить себе, что векторы приставлены друг к другу под равными углами, так что конец третьего вектора совпадает с началом первого. Конечно, это только аналогия, и строгие законы сложения "цветовых зарядов" можно понять, лишь изучив групповую теорию "цветовой симметрии". Мы не будем этого делать, а сообщим только результат. В случае трех "цветов" возможно, что три кварка, так же как и кварк с антикварком, образуют "цветовой" синглет, т. е. белое состояние.

Если "цветовое" квантовое число действительно существует в природе, то оно должно непосредственно проявляться. Действительно, такие проявления можно обнаружить. Первые указания на то, что имеется нечто, похожее на "цветовое" квантовое число, были получены в 1971 г. Используя специальную технику, так называемую алгебру токов, введенную Марри Гелл-Маном

Указания на существование "цвета" кварков
в начале 60-х годов, можно показать, что интенсивность распада нейтрального π -мезона становится вычислимой, если известны составляющие адронов. Сразу же после создания кварковой модели были проделаны соответствующие расчеты, в частности вычисления интенсивности распада нейтрального π -мезона на два фотона (такой распад является процессом электромагнитного взаимодействия). Были получены результаты, значительно (в 9 раз), отличающиеся от экспериментально найденного значения. Вычисление времени жизни нейтрального

π -мезона дало значение $0,75 \cdot 10^{-15}$ с. На самом же деле оказалось, что время жизни нейтрального π -мезона равно $0,83 \cdot 10^{-16}$ с. Это расхождение стало одной из главных проблем кварковой теории.

Каким образом введение "цветового" квантового числа может изменить ситуацию? Оказывается, что время жизни нейтрального π -мезона непосредственно зависит от числа "цветов", которыми обладают u - и d -кварковые "ароматы". Чем

Сколько живет π^0 -мезон больше "цветов", тем быстрее распадается нейтральный π -мезон. При наличии трех "цветов" можно ожидать, что распад будет происходить в 9 раз быстрее распада, происходящего при отсутствии "цветового" квантового числа, и таким образом можно предсказать, что время жизни нейтрального π -мезона равно $0,83 \cdot 10^{-16}$ с. Это как раз совпадает с наблюдаемым временем жизни, и мы заключаем поэтому, что должно существовать три различных "цвета" в соответствии с теми выводами, которые были получены при анализе адронных спектров.

Другую возможность сосчитать число "цветов" дает изучение процесса аннигиляции электрона и позитрона с превращением в адроны при больших энергиях. Этот процесс детально изучался начиная с 1972 г. на накопительных электрон-позитронных кольцах в разных лабораториях. Когда электроны аннигилируют с позитронами, они могут при этом

Подсчет числа "цветов" образовать либо пару лептонов (электроны, мюоны) либо кварк-антикварковую пару. В частности, можно ожидать, что образование адронов в процессе электрон-позитронной аннигиляции происходит так, что сначала рождается кварк-антикварковая пара, которая затем образует адронную систему (рис. 47).

Очень трудно предсказать, сколь часто будет образовываться в процессе электрон-позитронной аннигиляции при больших энергиях определенная адронная конфигурация, например система, состоящая из трех π -мезонов. Однако легко предсказывается, сколь часто будут рождаться вообще адроны, по крайней мере при очень больших энергиях, т. е. при энергиях, больших по сравнению с типичными адронными массами вроде массы протона или ρ -мезона. В этом случае принимается, что полная вероятность образования адронов и вероятность образования пары лептонов, например пары мюонов, относятся друг к другу как квадраты зарядов кварков. Причина этого в том, что аннигиляция электрона и позитрона и последующее образование кварк-антикварковой пары происходят в результате электромагнитного взаимодействия, а интенсивность последнего определяется зарядом соответствующих объектов, в данном случае зарядом кварков (точнее, квадратами зарядов). При-

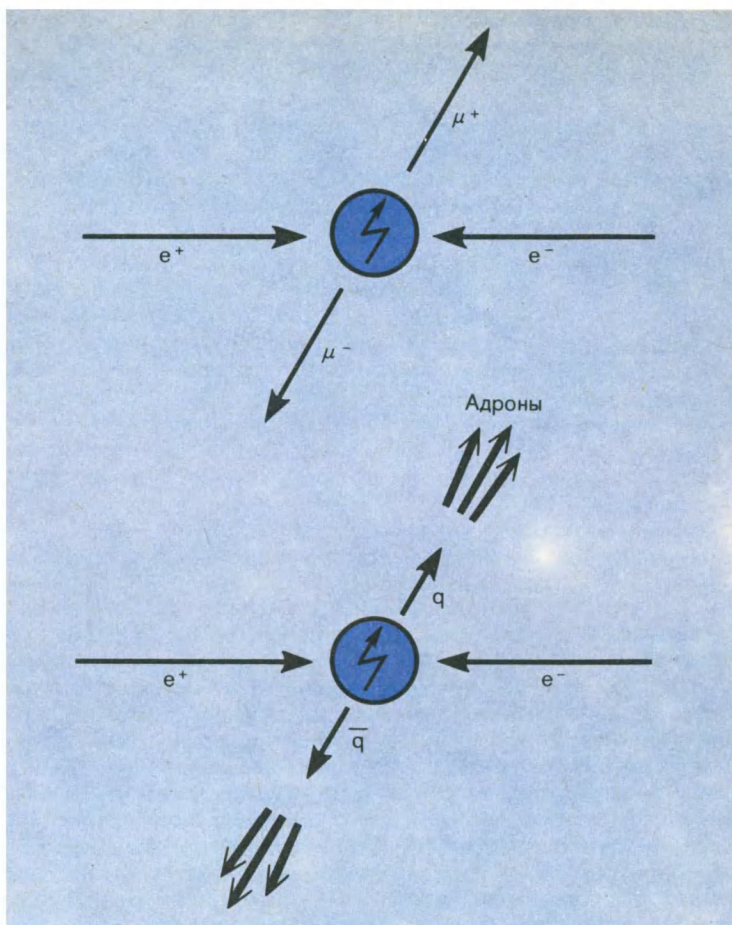


Рис. 47. Аннигиляция электрона и позитрона в пару мюонов и в кварк-антикварковую пару. Образование кварк-антикварковой пары приводит к рождению адронов, регистрируемых соответствующими детекторами частиц

тем, что энергия электрон-позитронной аннигиляции такова, что мы находимся в области чуть ниже порога образования "очарованных" частиц. В этом случае мы можем "породить" только u -, d - и s -кварки и поэтому можем ожидать, что

$$R = \frac{\text{Вероятность образования адронов}}{\text{Вероятность образования мюонов}} =$$

$$= \frac{3[e_u^2 + e_d^2 + e_s^2]}{e_\mu^2} = 3[(2/3)^2 + (-1/3)^2 + (-1/3)^2] = 2.$$

Множитель 3 учитывает здесь число "цветов". Мы просуммировали вклады трех "цветных" u -кварков, трех "цветных" d -кварков и трех "цветных" s -кварков. Окончательный результат заключается в том, что вероятность образования адронов при электрон-позитронной аннигиляции в области энергий от 2 до 4 ГэВ в 2 раза больше вероятности образования пары мюонов.

Эксперименты, проведенные начиная с 1973 г., показали, что введенное выше отношение действительно очень близко к 2. Оказалось, что оно равно 2,2, т. е. всего на 10% больше того, которое предсказывается теорией "цвета". Это можно рассматривать как успех идеи "цвета". Заметим, что без введения "цветового" квантового числа упомянутое отношение было бы в 3 раза меньше и равнялось бы $2/3$ — числу, которое исключается экспериментальными данными.

Подведем итоги: имеются три различных явления в природе, указывающие на существование "цветового" квантового числа: а) структура адронного спектра, в частности спектра барионов; б) время жизни нейтрального π -мезона; в) вероятность образования адронов в процессе электрон-позитронной аннигиляции.

Но об истинном успехе теории "цвета" мы еще не упоминали. Как мы увидим, введение "цветового" квантового числа позволяет построить новую теорию адронов и сильного взаимодействия — квантовую хромодинамику.

10

КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА — ТЕОРИЯ АДРОНОВ И СИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Мы уже упоминали, что важное различие между электродинамикой и кварковой теорией заключается в том, что три электрона никогда не могут образовать связанное состояние, а трем кваркам это легко удается. Какой тип сил нужен для того, чтобы объяснить это своеобразное явление? Это должна быть сила, устроенная так, что между тремя кварками различных

"цветов" возникает притяжение. Чтобы увидеть, какими свойствами должна обладать подобная сила, рассмотрим следующие две конфигурации. Прежде всего обратимся к типичной барионной конфигурации, состоящей из трех кварков красного, зеленого и синего "цветов".

**Отличия
"цветовых"
сигналов**

Затем рассмотрим конфигурацию, состоящую из двух красных и одного синего кварка. Первая конфигурация, в которую входят все три "цвета", может являться состоянием "цветового"

синглета. Во второй конфигурации отсутствует зеленый кварк. Поэтому она никогда не может находиться в состоянии "цветового" синглета.

Если мы на мгновение предположим, что силы между кварками никак не зависят от "цвета", т. е. обладают "цветовой" слепотой, то станет невозможным различить обе приведенные выше конфигурации. Отсюда следовало бы, что обе конфигурации имеют одинаковые энергии. Иными словами, "цветовые" синглеты и состояния, не являющиеся "цветовыми" синглетами, были бы, по-видимому, неразличимы. Но это совершенно не то, что нам нужно. Мы должны добиться, чтобы "цветовые" синглеты сильно отличались от несинглетов. По крайней мере, должно быть так, чтобы "цветовые" синглеты были состояниями с наименьшей энергией, т. е. с наименьшей массой, а несинглеты

**Сила, зависящая
от "цвета"**

обладали бы большей энергией или, что было бы лучше всего, вообще не существовали. Этого можно достичь, только введя силу, явно зависящую от "цвета", т. е. силу, ко-

торая действует на три разных "цвета" с разной интенсивностью.

Рассмотрим снова ситуацию в электродинамике. В ней сила притяжения между двумя заряженными объектами, обладающими противоположными по знаку электрическими зарядами, порождается электромагнитным полем между этими объектами — кулоновским силовым полем. На языке квантовой теории можно сказать, что сила порождается обменом виртуальными фотонами между заряженными объектами. Эти фотоны связаны с заряженными составляющими с интенсивностью, которая определяется электрическим зарядом объекта.

Предположим теперь, что силы между кварками по существу аналогичны силам между электронами и позитронами в том смысле, что они тоже описываются обменом

**Глюоны и
"цветовые"
силы**

виртуальными объектами, похожими на фотоны, которые мы назовем *глюонами*. Примем далее, что связь глюонов с кварками пропорциональна "цветовым зарядам" квар-

ков. Мы построили, таким образом, некий тип электродинамики в пространстве "цветов", где роль электрического заряда

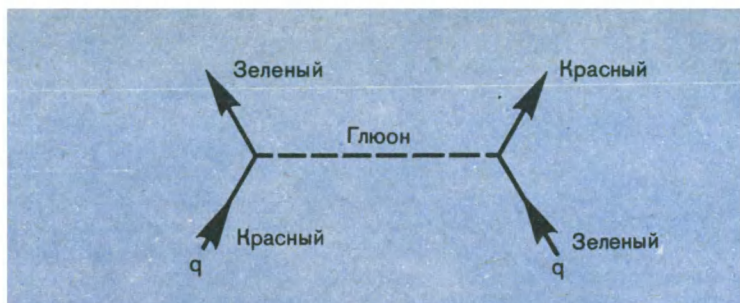


Рис. 48. Пример глюонного взаимодействия между двумя кварками. "Цвета" кварков могут меняться в результате взаимодействия с глюоном

игрывают теперь "цветовые заряды", а фотоны заменены на глюоны.

Однако связь глюонов с кварками сложнее связи фотонов с электронами или позитронами. Когда фотон вступает во взаимодействие с электроном, то электрон остается самим собой; это означает, что структура электрона, например его электрический заряд, не меняется. В то же

Кварки меняют "цвет"

время глюон, взаимодействующий с каким-то кварком, имеет возможность изменить "цвет" кварка. Например, красный кварк в результате взаимодействия с глюоном может превратиться в зеленый (рис. 48). Разные глюоны можно отличать по их свойствам переноса "цвета". В случае трех "цветов" имеется всего девять возможностей связи глюонов с кварками:

красный	→	зеленый,	синий	→	зеленый,
красный	→	синий,	красный	→	красный,
зеленый	→	красный,	зеленый	→	зеленый,
зеленый	→	синий,	синий	→	синий.
синий	→	красный,			

Последние три возможности отличаются от других в том смысле, что здесь не происходит изменения "цвета". Но имеется лишь одна возможность, полностью симметричная по отношению к "цветовому" квантовому числу, а именно суперпозиция красный → красный + зеленый → зеленый + синий → синий. Такая возможность связи отличается от остальных восьми, поскольку является "цветовым" синглетом. Оставшиеся восемь возможностей образуют восемь зарядов "цветовой" группы $SU(3)$. Мы

Восемь глюонов порождают сильное взаимодействие

принимаем теперь, что для каждого из этих "цветовых" зарядов существует свой глюон; таким образом, у нас имеется всего восемь различных глюонов.

Подготовленные таким образом, мы можем теперь перейти к более подробному рассмотрению сил, действующих между кварками. Для этого необходимо некоторое знакомство с теорией групп, но мы не можем вдаваться в детали. Получающийся результат в высшей степени прост. Можно показать, что "цветовые" синглеты являются связанными состояниями в теории точно так же, как зарядовые синглеты образуют связанные состояния в электродинамике. В случае, если силы между кварками определяются "цветовым зарядом", кварки имеют тенденцию существовать в состояниях "цветовых" синглетов. Теперь можно поставить вопрос: возможно ли построить действительную теорию кварков и глюонов, в которой реализуется упомянутое выше свойство? В случае электрических сил подобная теория существует — это теория Максвелла и ее квантовый вариант, квантовая электродинамика (КЭД).

Мы ищем, таким образом, "цветовой" аналог квантовой электродинамики, в котором роль электрического заряда берет на себя "цветовой заряд". Можно описать искомую теорию, составив нечто вроде словарика, в котором различные понятия электродинамики переведены в соответствующие понятия квантовой хромодинамики (КХД):

КЭД	КХД
Электрон	<i>u</i> -Кварк
Мюон	<i>d</i> -Кварк
...	...
Электрический заряд	"Цветовой заряд"
Фотон	Глюон
Атом	Мезон, барион

Рассматривая этот словарик, можно подумать, что квантовая электродинамика и квантовая хромодинамика полностью аналогичны. Но это на самом деле не так.

Маленькая разница между КЭД и КХД

Существенное отличие электродинамики от хромодинамики состоит в том, что имеются восемь различных "цветовых зарядов", но всего один электрический заряд. Как говорилось выше, восемь различных "цветовых зарядов" образуют так называемую "цветовую" группу $SU(3)$. Эту группу называют калибровочной группой хромодинамики, и по этой причине хромодинамику именуют иначе неабелевой калибровочной теорией [группа $SU(3)$ является примером

Хромодинамика как калибровоч- ная теория

неабелевой группы]. Теории такого рода были впервые исследованы в 1953 г. физиками-теоретиками из США Янгом и Миллсом.

Особенно важным свойством хромодинамики является то, что глюоны сами несут "цветовой заряд". Цветовые свойства глюонов такие же, как у "цветовых зарядов": это означает, что они являются октетами по отношению к "цветовой" симметрии. Восемь глюонов можно охарактеризовать их свойствами переноса "цвета". Выше мы описали, каким образом глюоны или "цветовые заряды" могут менять "цвет" кварка:

красный \rightarrow зеленый и т. п. На рис. 49 показано такое изменение "цвета" кварка с помощью глюона (эту картинку называют кварк-глюонной вершиной). Глюоны можно обозначать линиями, несущими два "цвета". Эти два "цветовых" индекса определяют, какой "цвет" в какой превратится.

Как мы увидим позднее, то обстоятельство, что сами глюоны в КХД являются "цветными" объектами, имеет исключительное значение для физики сильного взаимодействия. Мы подчеркиваем еще раз, что здесь возникает ситуация, очень отличающаяся от электродинамики. В случае электродинамики электрически заряженные частицы являются фермионами (электроны, позитроны, протоны и т. д.). Фотон как физический объект, ответственный за существование

Фотоны электрической силы между заряженными
нейтральные частицами, сам по себе электрически нейтрален. Это очень важно для физики электро-

магнитного взаимодействия. Отсюда вытекает, что и при отсутствии материи электромагнитные волны, например свет, могут свободно распространяться в пространстве. Световой луч есть не что иное, как пучок фотонов, которые двигаются в одном направлении независимо друг от друга. Поскольку фотоны электрически нейтральны, они не оказывают друг на друга никакого влияния. Это было бы, конечно, не так, если бы фотоны сами несли электрический заряд. Тогда бы фотоны взаимно отталкивались или притягивались и для нас сложилась бы довольно трудная ситуация.

Хромодинамика как раз является в определенном смысле теорией подобного рода. Глюоны сами являются "цветными" объектами. По этой причине существует

Силы между прямое взаимодействие не только между
глюонами глюонами и кварками, но и между самими глюонами; это означает, что существует

вершина взаимодействия трех различных глюонов. На рис. 50 изображена такая вершина. Красно-зеленый глюон и красносиний глюон сталкиваются, превращаясь в зелено-синий глюон. Можно заметить, что каждый из трех "цветов" непрерыв-

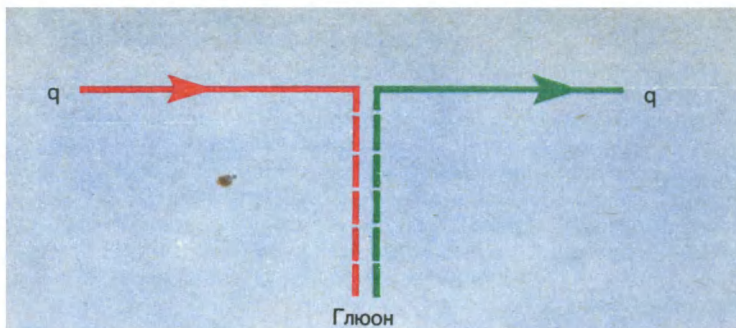


Рис. 49. Пример кварк-глюонной вершины. Глюон изображен штриховой красно-зеленой линией: красный кварк превращается в зеленый

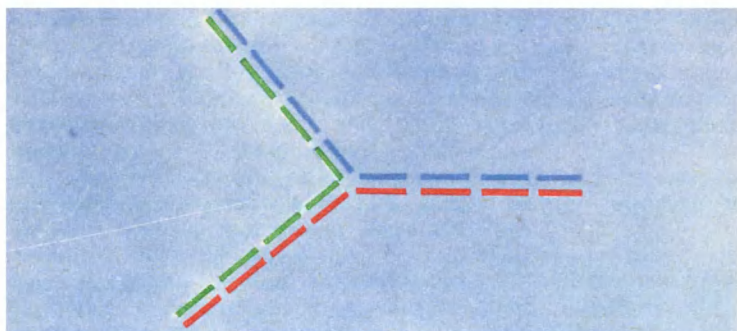


Рис. 50. Схематическое изображение трехглюонной вершины. Разные цветные линии непрерывно переходят от одного глюона к другому

Игра "цветов" но переходит с одного глюона на другой. Не существует "цветовых" линий, которые где-то кончаются или где-то начинаются. Например, по этой причине не существует глюонной вершины, в которой соединяются красно-зеленый и красно-синий глюоны, порождая красно-зеленый глюон. Если бы это было так, тогда синяя линия, идущая справа на рис. 50, должна бы была где-то прерваться и должна была бы начинаться другая красная линия. Это запрещено правилами игры в хромодинамике, т. е. математическими правилами КХД как частного случая неабелевой теории.

Полезно рассмотреть подробнее квантовые свойства хромодинамики. Вновь обратимся сначала к соответствующей ситуации в электродинамике. Мы указывали выше, что при отсутствии материи, т. е. в вакууме, электромагнитные волны могут свободно распространяться в пространстве, пока они на своем пути не столкнутся с электрически заряженными частицами. Но это, строго говоря, верно только в рамках классической физики. С точки зрения квантовой теории вакуум, выглядящий совершенно безобидно для макроскопического наблюдателя, является очень сложной системой. В соответствии с соотношением неопределенностей в квантовой механике, значение которого впервые понял в начале 20-х годов Вернер Гейзенберг, можно лишь тогда измерить с очень высокой точностью импульс или энергию какой-то частицы, если в нашем распоряжении имеется достаточно много места или времени. Если же мы хотим исследовать структуру какого-то объекта на очень малых расстояниях, например на расстояниях, меньших 10^{-12} см, то при этом невозможно очень точно определить импульсы или энергии частиц. Напротив, неопределенность в значении импульсов частиц довольно велика.

В частности, в электродинамике происходит нечто весьма необычное, если неопределенность в энергии больше удвоенной массы электрона (это происходит на расстоянии примерно 10^{-11} см). В этом случае можно породить пару частиц, состоящую из электрона и позитрона. Эта пара частиц рождается непосредственно из вакуума и таким же путем может вновь исчезнуть, если электрон и позитрон взаимно проаннигилируют. Но эту аннигиляцию можно предотвратить, если подвести извне достаточно энергии. Если подведенная извне энергия больше полной массы электрон-позитронной пары, эти частицы могут родиться как настоящие (реальные) частицы, без нарушения закона сохранения энергии. Однако без этого подвода энергии электрон-позитронная пара не может существовать как пара реальных частиц, а может существовать лишь как пара так называемых виртуальных частиц. Таким образом, вакуум заполнен очень большим числом, строго говоря, бесконечно большим числом таких виртуальных электрон-позитронных пар. Они могут оказывать влияние на физические явления на очень малых расстояниях, но не играют никакой роли в макроскопической физике.

Виртуальные электрон-позитронные пары в вакууме влияют на структуру электрона. Представим себе, что мы измеряем в лаборатории электрический заряд электрона. Это можно сделать, наблюдая, например, рассеяние двух электронов. Оба электрона взаимно отталкиваются. Сила отталкивания между

ними пропорциональна квадрату электрического заряда электрона в соответствии с законом Кулона. В обычном случае оба электрона при рассеянии не слишком близко подлетают друг к другу. Расстояние между обоими электронами в типичном случае больше, чем упомянутое выше критическое расстояние 10^{-11} см. Тогда сила между двумя электронами очень точно описывается законом Кулона.

А что происходит, когда мы пытаемся измерить силу между двумя электронами на расстояниях, много меньших 10^{-11} см (это можно сделать, соответственно повысив энергию рассеивающихся электронов)? Обнаруживается, что

Закон Кулона нарушается

в этом случае закон Кулона перестает выполняться, если оба электрона сближаются на расстояние, меньшее 10^{-11} см. Можно наблюдать, что силы между двумя электронами оказываются несколько больше тех, которые ожидаются на основании закона Кулона. Как можно понять это явление?

Здесь мы наблюдаем эффекты, определяющиеся наличием виртуальных электрон-позитронных пар в вакууме. Представим себе, что у нас есть возможность поместить электрон извне в вакуум. Поскольку электрон электрически отрицательно заряжен, он будет отталкивать все виртуальные электроны, находящиеся вблизи него, и соответственно притягивать все виртуальные позитроны.

Электроны не голые

В результате электрон будет окружен облаком виртуальных позитронов. Говорят, что электрон поляризует окружающий вакуум (рис. 51). Окружающее электрон облако виртуальных позитронов частично экранирует электрический заряд электрона. Таким образом, если мы наблюдаем электрон с расстояния, которое столь велико, что эффекты поляризации вакуума не могут уже быть заметными, то мы видим электрон вместе с облаком, состоящим из виртуальных частиц, как одно целое; поэтому невозможно разделить полный электрический заряд электрона на часть, обусловленную зарядом самого электрона, и часть, связанную с облаком виртуальных частиц. Физики называют такой объект *физическим электроном*. Последний состоит, таким образом, из электрона и облака вакуумной поляризации. В то же время электрон, лишенный облака вакуумной поляризации, называют *голым электроном*.

Какой же из них является тем настоящим электроном, существование которого есть причина различных электромагнитных явлений? Ответ в данном случае зависит от ситуации, т. е. от энергии соответствующего процесса. В любом процессе, в котором энергии электронов малы по сравнению с его массой, нельзя явно увидеть эффекты поляризации вакуума, и в этом случае мы имеем дело с физическим электроном, т. е. с электроном,

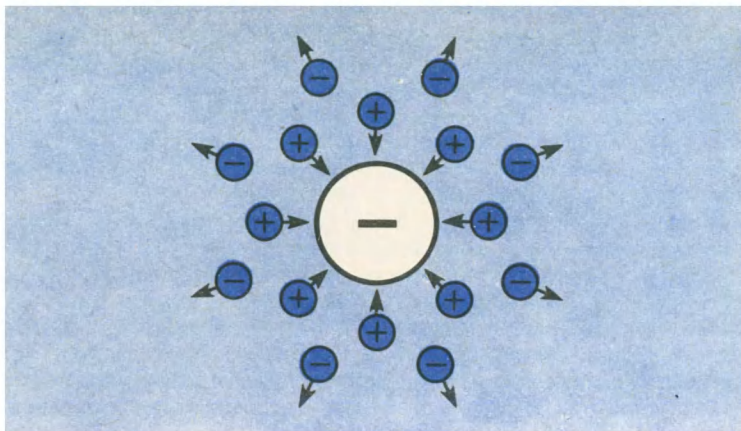


Рис. 51. Поляризация вакуума (электродинамика). Электрон (большой кружок) окружен виртуальными позитронами, которые частично экранируют его электрический заряд

включающим его облако вакуумной поляризации. Если же энергии велики по сравнению с массой электрона, можно непосредственно наблюдать эффекты поляризации вакуума. Поскольку электрический заряд голого электрона больше заряда физического электрона, сила отталкивания между двумя электронами, находящимися очень близко друг от друга, оказывается больше той силы, которая получается на основе закона Кулона. Это объясняет нарушение закона Кулона, упомянутое выше.

До сих пор мы использовали при обсуждении только качественное рассмотрение. Теперь возникает вопрос, возможно ли сделать точные количественные предсказания для любого процесса, в котором существенны эффекты поляризации вакуума? Ответ на этот вопрос утвердительный. Теория, позволяющая нам провести такие вычисления, — это квантовая электродинамика. На протяжении последних 20 лет было установлено, что квантовая электродинамика не только удовлетворительным образом описывает наблюдаемые процессы, но что эта теория намного лучше, чем первоначально ожидалось. За это время были проведены очень точные тесты квантовой электродинамики. Было показано, что теория описывает явления с точностью, много лучшей, чем тысячная доля процен-

Важность поляризации вакуума

Феноменаль- ный успех КЭД

та. Поэтому мы можем утверждать, что во взаимодействии электронов и фотонов не осталось ничего необъясненного. Электромагнитное взаимодействие полностью понятно не только в рамках классической физики, но и с учетом квантовых эффектов. Это чрезвычайно важно, так как отсюда следует, что методы теоретической физики, в особенности методы квантовой механики, пригодны для правильного описания явлений природы на очень малых расстояниях.

Следуя сформулированному нами соответствию между электродинамикой и хромодинамикой, мы можем теперь рассмотреть эффекты поляризации вакуума в хромодинамике. Исследуемый физиками вакуум заполнен не только виртуальными электронами, позитронами и фотонами, но и виртуальными кварками, антикварками и глюонами. Аналогично тому, как это было сделано для электрона, рассмотрим теперь кварк, находящийся в вакууме. Конечно, это гипотетическая процедура, поскольку согласно изложенному выше не должно быть свободных кварков. Тем не менее мы можем представить себе, что при определенных обстоятельствах существует свободный кварк, т. е. мы проводим "мысленный эксперимент".

"Помещающий" кварк в вакуум, мы ожидаем, что в соответствии с квантовой хромодинамикой он будет вести себя так же, как и электрон в аналогичных условиях, т. е. он будет поляризовать вакуум. Поскольку кварк несет "цветовой заряд", он оттолкнет находящиеся вблизи него кварки и притянет соответствующие антикварки. Эта ситуация полностью аналогична соответствующей ситуации в электродинамике. Мы поэтому

ожидаем возникновения эффекта, аналогичного электродинамическому: "цветовой заряд" кварка будет частично экранироваться и голый кварк будет "одет" облаком виртуальных кварков. Получится "физический" кварк.

И это все, что может произойти в рамках КХД? Ни в коем случае! Мы упустили из виду важнейший эффект. Вакуум заполнен не только виртуальными кварками и антикварками, но и виртуальными глюонами. Аналогично в электродинамике вакуум заполнен не только виртуальными электронами и позитронами, но и виртуальными фотонами. Почему же мы не учитывали последних при обсуждении поляризации вакуума? В электродинамике виртуальные фотоны не играют никакой роли, по крайней мере в поляризации вакуума электроном, поскольку фотоны электрически нейтральны. Когда мы "п помещаем" в вакуум электрон, мы влияем лишь на "море" электрон-позитронных пар, но не на "море" виртуальных фотонов. Однако в случае хромодинамики это совершенно не так, поскольку сами глюоны несут "цветовой заряд". Кварк будет, таким образом, влиять не только на "море" кварк-антиквар-

**Глюоны
поляризуют
вакуум**

ковых пар, но и на "море" виртуальных глюонов. Другими словами, облако вакуумной поляризации кварка состоит не только из виртуальных кварков и антикварков, но и из виртуальных глюонов.

Можно думать, что глюонное облако вакуумной поляризации оказывает на кварк тот же эффект, что и кварк-антикварковые пары; это означает, что "физический" кварк имеет "цветовой заряд" меньший, чем "цветовой заряд" "голого" кварка. Конечно, это только предположение, и чтобы точно узнать, что происходит, нужно в рамках хромодинамики вычислить

**Потрясающий
результат**

эффекты, связанные с глюонами. Обнаруживается потрясающий результат. Эффекты, обусловленные глюонами, не такие, как мы ожидали выше, а прямо противоположные.

"Облако" виртуальных глюонов не уменьшает "цветовой заряд" кварка, а увеличивает его.

Чтобы наглядно представить себе это поразительное явление, рассмотрим модель, похожую на электродинамику. Изменим определенным образом законы электродинамики, причем так, чтобы одноименные заряды притягивались, а разноименные отталкивались. Что произойдет в этом случае? Электрон в вакууме будет окружать себя облаком виртуальных электронов и отталкивать виртуальные позитроны. При

Взрыв вакуума

этом электрический заряд электрона будет возрастать (рис. 52). Следствием этого

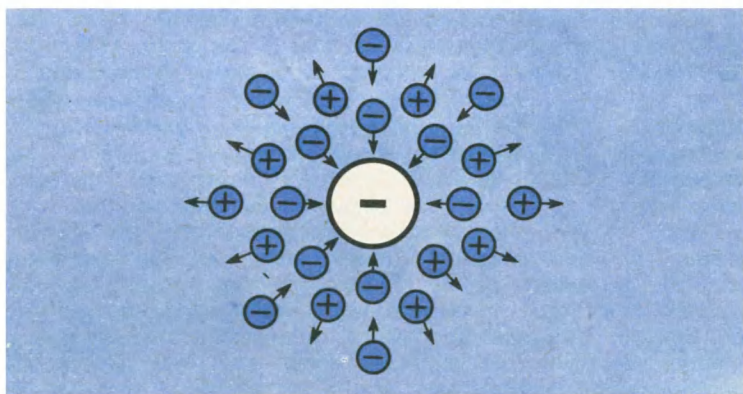


Рис. 52. Поляризация вакуума (модифицированная электродинамика). Одноименные заряды притягиваются, разноименные отталкиваются. Электрон окружает себя облаком виртуальных электронов

будет то, что электрон совместно со своим электронным облаком будет еще сильнее действовать на свое окружение и притягивать еще больше электронов. Мы видим, таким образом, что этот процесс не будет иметь конца. Облако вакуумной поляризации будет становиться все больше и больше за счет того, что все больше и больше электронов будет забираться из "моря" электрон-позитронных пар. У нас получится нечто вроде "взрыва". Это является ясным указанием на то, что в нашей модифицированной электродинамике нет ничего стабильного, и нам следует с большим уважением относиться к обычной электродинамике, в которой ничего подобного не случается. Мы уже понимаем, почему это так. Поскольку в обычной электродинамике разноименные заряды притягиваются, облако вакуумной поляризации уменьшает заряд электрона. Частичная экранировка заряда электрона приводит к тому, что электрон более слабо действует на свое окружение. При этом очень быстро достигается стабильная ситуация.

Электродинамика стабильна

Как же можно интерпретировать модифицированную электродинамику, обсуждавшуюся выше? Описанная нестабильная ситуация возникает тогда, когда мы наблюдаем заряженный электрон в вакууме. Очевидно, никаких проблем не возникло бы, если бы не существовало в изолированной форме никаких электрически заряженных объектов, а существовали только нейтральные объекты, состоящие из электронов и позитронов. По-видимому, в модифицированной электродинамике электрически заряженные объекты постоянно находятся в связанном состоянии.

Не имеет смысла больше исследовать описанную выше модифицированную электродинамику. Уже и так ясно, что глюонное облако поляризации вакуума напоминает электронное облако в модифицированной электродинамике. Глюоны окружают кварк и увеличивают его цветовой заряд. В результате кварк еще сильнее воздействует через свой "цветовой заряд" на окружающее пространство и облако поляризации становится еще больше.

Кварки и странные свойства вакуума

Кварк в хромодинамике ведет себя как хищный зверь, аппетит которого растет с ростом количества съеденных жертв. И в этом случае ситуация нестабильна; весьма скоро хищник обьестся до смерти, и в результате через очень короткое время все хищные звери этой породы вообще исчезнут¹.

¹ Описанная модель поведения впервые рассмотрена в повести братьев Стругацких "Понедельник начинается в субботу". — *Прим. пер.*

Обойти указанную выше проблему можно, предположив, что кварки в изолированной форме вообще не существуют. Если это так, то кварки входят только в состав "цветовых" синглетов (барионы, мезоны) и никакой проблемы вообще нет. Ясно, что это как раз та ситуация, которую мы перед этим исследовали и которая наблюдается в природе.

Но действительно ли в рамках квантовой хромодинамики кварки и вообще все "цветные объекты" не могут существовать изолированно? Проведенное нами рассмотрение делает эту гипотезу весьма правдоподобной, но отнюдь не доказывает ее. И до сего дня не существует доказательства постоянного связывания (конфайнмента¹) цветных объектов в КХД. Однако существует много указаний теоретического и экспериментального характера, что это именно так.

Почему нет кварков? В дальнейшем мы просто примем как факт, что в хромодинамике в качестве изолированных частиц могут выступать только "белые" конфигурации ("цветовые" синглеты). Кварки, глюоны и вообще все "цветные объекты" существуют только внутри "белых" частиц.

11

КВАРКИ И ХРОМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛЫ

В чем физическая причина обсуждавшейся выше нестабильности в КХД? Прежде, чем подробно обсуждать этот вопрос, рассмотрим вновь аналогичную ситуацию в электродинамике.

Два типа фотонов Фотоны, кванты света, существуют в двух различных формах. Существует специальный тип виртуальных фотонов, приводящий к электрическому притяжению двух электрически заряженных объектов, например к притяжению между электроном и протоном в атоме водорода. Мы будем называть эти фотоны *кулоновскими квантами* в соответствии с названием закона Кулона в электродинамике, описывающего электрические силы между заряженными объектами. Кулоновские кванты существуют только при наличии электрически заряженных объектов, но не в изолированной форме.

Фотоны второго рода мы назовем *магнитными квантами*. Они, например, ответственны за возникновение магнитных сил.

¹ Термин "конфайнмент" в переводе с английского означает пленение, тюремное заключение. — *Прим. пер.*

Магнитные кванты могут существовать как свободные частицы, например как составляющие светового луча.

В хромодинамике можно разделить глюоны на кулоновские и магнитные. При конкретном вычислении поляризации вакуума в КХД оказывается, что нестабильность глюонного облака обусловлена странной игрой между кулоновскими и магнитными глюонами. Именно, в хромодинамике существует взаимодействие между кулоновскими и магнитными глюонами.

(В электродинамике такое взаимодействие невозможно, так как фотоны не несут электрического заряда.)

Глюоны влияют друг на друга Например, может быть так, что кулоновский глюон расщепился на другой кулоновский и магнитный глюоны, которые

могут в конце концов опять объединиться в один-единственный кулоновский глюон (рис. 53).

Проиллюстрируем следующим образом важность этого явления. Обсуждавшиеся выше нестабильности в хромодинамике возникают только на больших расстояниях, которые велики по сравнению с размером протона (10^{-13} см). В этой области эффективный "цветовой заряд" кварка становится большим, что оказывается невозможным провести конкретные вычисления. Однако такие вычисления можно проделать, рассматривая кварки и глюоны на очень малых расстояниях. В этом случае можно в рамках хромодинамики действовать так же, как и в рамках электродинамики, и конкретно вычислить эффекты поляризации вакуума. Чтобы проделать это, используем следующий прием. Рассмотрим максимально тяжелый кварк и соответствующий антикварк. Они образуют

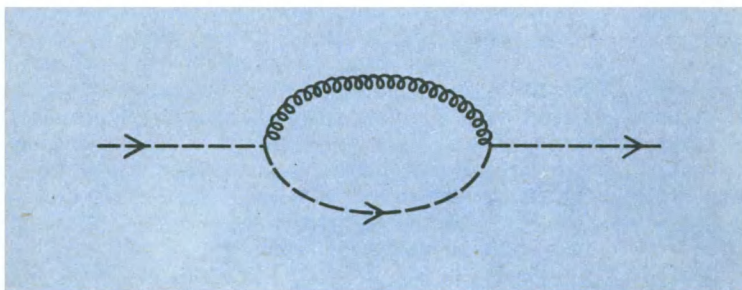


Рис. 53. Важное явление в КХД: "цветной" кулоновский квант (пунктирная линия) расщепляется на другой кулоновский и магнитный кванты. Затем они опять объединяются в кулоновский квант

тяжелый мезон. Для примера можно взять тяжелый кварк с эффективной массой 50 000 МэВ. Соответствующее кварк-антикварковое связанное состояние будет в этом случае более чем в 100 раз тяжелее протона. В настоящее время мы не знаем, существуют ли в природе столь тяжелые кварки. Но даже если это и не так, мы можем формально ввести подобный кварк и провести мысленный эксперимент.

Связанное состояние тяжелых кварков обладает тем свойством, что обе составляющие находятся очень близко друг от друга. Размер такого мезонного состояния имеет порядок величины 10^{-15} см или меньше. Подобное состояние более чем в 50 раз меньше протона, размер которого составляет 10^{-13} см. Когда тяжелые кварки находятся столь близко друг от друга, мы можем пренебречь эффектами, связанными с глюонным облаком поляризации вакуума. Сила между кварками будет тогда в основном описываться законом Кулона. Таким образом, тяжелые мезоны будут по своей структуре очень похожими на электрон-позитронное связанное состояние в электродинамике или на атом водорода. Во всяком случае, именно это ожидается в рамках хромодинамики для очень тяжелых кварк-антикварковых систем. В случае, если в природе действительно существуют подобные тяжелые системы, было бы интересно убедиться, является ли спектр этих состояний таким, каким его можно предсказать на основании следующих из хромодинамики расчетов.

Описанная выше схема тяжелой кварк-антикварковой системы все же не совсем правильна. Глюоны, окружающие кварки, играют определенную роль и в очень тяжелых кварк-антикварковых системах. Можно описать кулоновскую силу между двумя тяжелыми кварками, указав хромозлектрические силовые линии (рис. 54). Эти силовые линии совершенно аналогичны хорошо известным силовым линиям в электродинамике. Они исходят из кварка и заканчиваются

Хромозлектрические силовые линии на соответствующем антикварке. Чем реже распределены силовые линии в пространстве, тем слабее в рассматриваемой точке соответствующая "цветовая" сила. Когда мы удаляем кварки друг от друга, хромозлектрические силовые линии становятся все реже и реже и поэтому сила между обоими кварками становится все слабее и слабее. Если сила определяется законом Кулона, она уменьшается как квадрат расстояния между обоими кварками.

Рассмотрим теперь эффекты поляризации вакуума, обусловленные глюонами. Их можно очень просто описать следующим образом. Вспомним, что в хромодинамике кулоновские

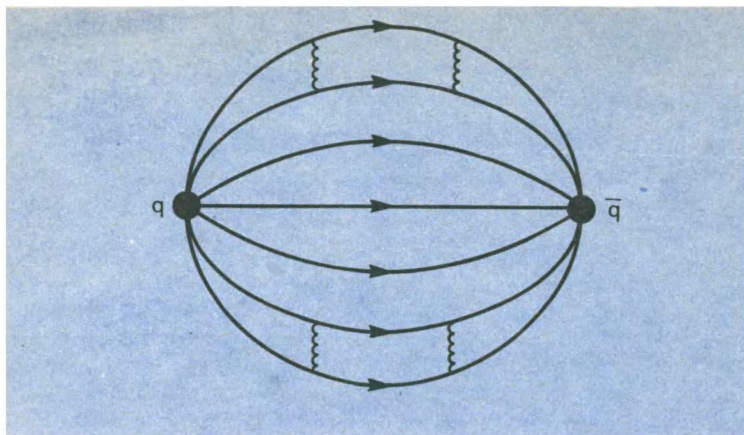


Рис. 54. Хромоэлектрические кулоноподобные силовые линии между тяжелым кварком и его антикварком. Волнистые линии изображают обмен магнитными глюонами, что приводит к притяжению хромоэлектрических силовых линий

кванты могут непосредственно взаимодействовать с магнитными глюонными квантами (см. рис. 53). В нашей картине силовых линий это означает, что существует хромомагнитное притяжение между хромоэлектрическими силовыми линиями. Это притяжение порождается магнитными квантами, бегающими от одной силовой линии к другой (см. схему на рис. 54). В рамках хромодинамики можно непосредственно вычислить такое хромомагнитное притяжение хромоэлектрических силовых линий в случае, если кварки находятся достаточно близко друг к другу. Получающийся результат интуитивно очевиден. Силовые линии будут в результате хромомагнитного притяжения сжиматься; это означает, что они будут гуще распределены в пространстве, чем можно было бы получить на основании закона Кулона. Именно этого мы и ожидаем на осно-

**Вакуум
уплотняет
хромоэлектри-
ческие силовые
линии**

вании предыдущего рассмотрения. На больших расстояниях должны увеличиться "цветовые заряды" кварков; при этом мы получим силу, которая будет несколько больше получающейся на основании закона Кулона. Это соответствует уплотнению хромоэлектрических силовых линий.

Подчеркнем еще раз, что важным новым свойством хромодинамики является хромомагнитное притяжение между хромоэлектрическими силовыми линиями. Оно

Хромо-магнетизм

возникает потому, что сами глюоны несут "цветовой заряд". В электродинамике подобный эффект отсутствует. Однако в электродинамике существует ситуация, в определенном смысле похожая на ситуацию в хромодинамике, описанную выше. Рассмотрим два электрических провода, протянутых параллельно друг другу, по которым текут электрические токи в одном направлении (рис. 55). Оба провода притягиваются. Это притяжение обусловлено магнитными силами, действующими на провода, и обменом магнитными квантами между проводами. (Магнитное притяжение проводов было впервые детально изучено в прошлом столетии Андре Ампером.) В определенном смысле притяжение хромозлектрических силовых линий в хромодинамике аналогично магнитному притяжению между двумя электрическими проводами. Можно представить себе хромозлектрические силовые линии между обоими кварками как маленькие электрические провода, притягивающиеся магнитными силами. Конечно, такая аналогия довольно груба и ее нельзя воспринимать очень серьезно, но она помогает представить себе поведение хромозлектрических силовых линий в хромодинамике.

Вновь рассмотрим нашу тяжелую кварк-антикварковую систему. Допустим, что у нас имеется возможность медленно удалять друг от друга кварки, которые первоначально были очень близко расположены друг к другу. Известно, что на очень малых расстояниях силовой закон, описывающий силы между кварками, в основном является законом Кулона. Мы знаем также, что имеются малые отклонения от закона Кулона, обусловленные эффектами глюонной поляризации вакуума. Эти отклонения являются причиной того, что истинная сила между кварками несколько больше, чем можно ожидать на основании закона Кулона. Теперь можно поставить вопрос, что произойдет, если кварки будут все дальше удаляться друг от друга. До определенного момента силы будут уменьшаться в соответ-

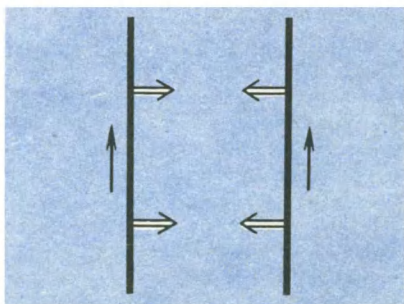


Рис. 55. Два параллельных провода притягиваются, если по ним течет ток в одном направлении. Это притяжение порождается магнитными силами

ствии с законом Кулона. Однако затем глюонные эффекты поляризации вакуума на больших расстояниях будут становиться все сильнее и сильнее; это означает, что "цветовые заряды" кварков будут расти. Хромозлектрические силовые линии между кварками будут все больше и больше прижиматься друг к другу хромагнитным притяжением.

Теперь мы можем спросить, что произойдет, если мы удалим кварки на большие расстояния друг от друга, допустим, на макроскопическое расстояние порядка 1 м. К сожалению, до сих пор не удастся вычислить, что произойдет в этом случае. В рамках хромодинамики мы сегодня можем вычислить лишь то, что происходит, когда кварки находятся относительно близко друг к другу, на расстоянии, меньшем 10^{-13} см. Мы можем лишь высказывать гипотезы о том, что произойдет в описанном выше случае. Ясно, что нелегко раздвинуть кварки на расстояние порядка 1 м друг от друга. Тогда было бы в принципе возможно изучать каждый кварк отдельно от другого. Мы могли бы, например, измерить его электрический заряд. Таким образом, разнесение кварков тяжелой мезонной системы на расстояние порядка 1 м практически эквивалентно рождению свободных кварков. Однако, как мы знаем, это либо невозможно, либо очень трудно.

Разложение мезона

Большинство физиков, занимающихся проблемой связи кварков, считают, что в принципе возможно удалить кварки в какой-то мезонной системе на макроскопическое расстояние друг от друга. За это нужно лишь заплатить определенную цену, а именно, в форме энергии. Считается, что хромозлектрические силовые линии, выходящие из кварка и оканчивающиеся на антикварке, все больше уплотняются, когда мы пытаемся удалить кварки друг от друга. В конце концов мы приходим к конфигурации, в которой силовые линии направлены параллельно друг другу, как электрические силовые линии в плоском конденсаторе (рис. 56). Мы считаем, что силовые линии становятся параллельными, если кварки удалены друг от друга на расстояние больше 10^{-13} см.

Известно, что сила, действующая между пластинами конденсатора, не зависит от расстояния между пластинами. То же самое должно теперь выполняться и для силы между кварками. Следовательно, на больших расстояниях сила, действующая между кварками, постоянна. Если нам удастся удалить кварки в мезонной системе на макроскопическое расстояние друг от друга, то сила, действующая между кварками, будет такой же, как и на расстоянии 10^{-12} см. Эта большая сила между кварками будет порождаться тонкой нитью из глюонов (хромозлектрических силовых линий). Такая нить выходит из кварка и кончается на антикварке (рис. 57).

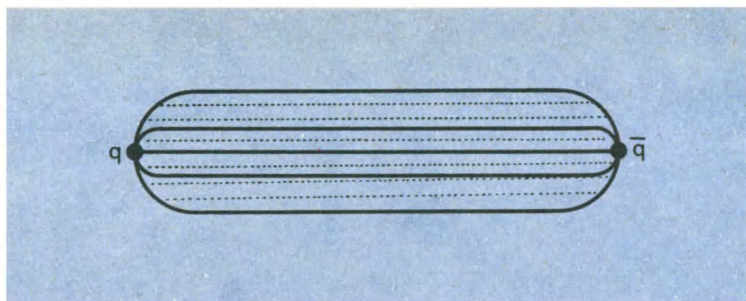


Рис. 56. Если удалить кварки друг от друга на расстояние, большее 10^{-13} см, то возникает конфигурация, в которой хромозлектрические силовые линии становятся параллельными, а действующая между кварками сила — постоянной

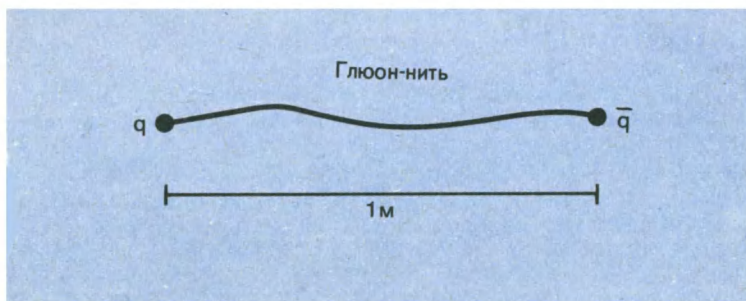


Рис. 57. Кварк удален от антикварка на расстояние 1 м. Между ними действует большая хромозлектрическая сила, порождаемая тонкой нитью из глюонов (толщиной порядка 10^{-13} см)

Сколь велика сила, действующая между кварками? Мы упоминали выше, что до сих пор не удастся вычислить эту силу в рамках хромодинамики. Однако можно сделать другое. Спектр адронов сравнительно хорошо известен. Если мы рассмотрим спектр кварк-антикварковых систем, мы сможем что-то узнать о силе между кварками в полной аналогии с ситуацией в электродинамике. Когда мы точно исследуем спектр, т. е. энергетические состояния атома водорода, мы можем предсказать силу, действующую между протоном и электроном внутри атома. То, что получается в данном случае, естественно, является хорошо известной силой, действующей

между электрически заряженными объектами и определяющей-ся законом Кулона. Если применить такой же принцип к мезон-ному спектру, то можно с очень хорошей точностью обнару-жить, что сила между кварками на относительно больших рас-стояниях (больших 10^{-14} см) на самом деле постоянна. Кроме

Колоссальная сила между кварками того, эта сила относительно велика. Она столь велика, что требуется затратить очень много энергии на то, чтобы удалить кварки на расстояние 1 м друг от друга. Для этого требуется энергия, соответствующая той, которую нужно затратить, чтобы поднять 1 т груза на высоту 1 м. Эта энергия так велика, что практически никогда не стан-нет возможным разъединить кварки на макроскопическое рас-стояние друг от друга. Действующие между кварками силы не только много больше электрических сил, определяющих струк-

Самая большая сила в природе туру атомов. Они много больше ядерных сил, ответственных за строение атомных ядер. Таким образом, при изучении адронов мы сталкиваемся с самой большой из наблю-даемых в природе сил — хромозлектрической силой между кварками.

До сих пор мы обсуждали проявления роста хромозлектри-ческих сил в КХД на больших расстояниях и сумели показать, что этот эффект ответствен за постоянную связь кварков внут-ри адронов. А как обстоит дело с ослаблением сил в КХД на малых расстояниях? Вспомним то, что мы говорили в связи с экспериментами на установке СЛАК. Результат этих экспери-ментов заключался в том, что кварки, наблюдаемые в процессе рассеяния электронов, ведут себя как бесструктурные или в основном бесструктурные объекты. Отсюда мы сделали вывод, что возникающие при сильном взаимодействии силы между кварками на малых расстояниях должны

Большие силы становятся слабыми быть небольшими. В хромодинамике имен-но это и происходит. Квантовая хромодина-мика является единственной теорией, с по-мощью которой можно понять результаты экспериментов СЛАК, а также нейтринных экспериментов. Это — еще одно основание для веры в то, что хромодинамика является правильной теорией адронов и кварков.

То обстоятельство, что силы между кварками на очень малых расстояниях становятся очень слабыми, называют *асимп-тотической свободой*. Благодаря ей на малых расстояниях кварки ведут себя как квазисвободные частицы. С другой сто-роны, мы верим в то, что кварки связываются в адроны пото-му, что "цветовые заряды" становятся очень большими на больших расстояниях. На языке квантовой механики большие расстояния иногда называют также *инфракрасными расстояния-*

Асимптотическая свобода и "инфракрасное" рабство

ми, и по этой причине явление роста сил на больших расстояниях называют *инфракрасным рабством*. Таким образом, кварки в определенном смысле являются рабами собственного "цветового заряда". Мы можем

даже сравнить их с некоторым числом рабов, скованных друг с другом цепями определенной длины, скажем, двухметровыми. Если эти рабы решат никогда не удаляться друг от друга на расстояние, большее 2 м, они будут мало обращать внимание на свои цепи. Они смогут двигаться более или менее свободно. Проблемы возникнут лишь в том случае, если один из рабов попытается удалиться от других. В этом случае он почувствует наличие цепей. Если мы заменим рабов на кварки, а цепи — на хромозлектрические нити, то получим ситуацию, описывающую динамику кварков и глюонов внутри адронов. Однако между нашим примером и кварками имеется важное отличие. Каждую цепь, как бы крепка она не была, может разбить хороший кузнец. Цепи между кварками, построенные из глюонов, разбить нельзя. Так что кварки навсегда остаются рабами своих собственных "цветовых зарядов".

В течение нескольких десятилетий толчком к развитию физики частиц служило желание физиков понять силы, действующие внутри атомных ядер. В чем причина того, что протон и нейтрон, объединяясь, образуют дейтрон? Какие силы ответственны за то, что шесть протонов и шесть нейтронов объединяются, образуя ядро углерода? Мы до сих

Откуда берутся ядерные силы?

пор исследовали физику кварков и глюонов и знаем теперь, почему кварки объединяются, образуя адроны. Но в чем причина

того, что нейтроны и протоны притягиваются и образуют атомные ядра? Теперь, вооруженные знаниями о кварках, мы можем вновь поставить вопрос: какова природа ядерных сил?

Прежде, чем мы попытаемся ответить на него, еще раз вернемся к электродинамике. Электроны и протоны внутри атома притягиваются друг к другу, и в этом причина того, что образуются атомы, которые сами по себе нейтральны. Таким образом, раз у атомов нет электрического заряда, между ними не действуют никакие электрические силы. Но это верно лишь приблизительно, а именно тогда, когда атомы сравнительно далеки друг от друга и находятся на расстояниях, значительно больших размеров самих атомов, составляющих по порядку величины 10^{-8} см. Если же атомы сближаются, то между ними возникают силы. Эти силы появляются потому, что атомы имеют конечный размер, и в особенности потому, что заряды внутри атомов сконцентрированы не все в одной точке, а распределены по всему атому. Если два атома пролетают очень близко друг от друга, то электроны в обеих атомных оболочках порождают

сильное отталкивание между атомами. Это отталкивание является причиной того, что обычное атомарное вещество не так-то легко сжать. Силы, действующие между атомами, были впервые изучены в прошлом веке голландским физиком Ван-дер-Ваальсом.

Силы Ван-дер-Ваальса В его честь их называют силами Ван-дер-Ваальса. Но какое отношение имеют эти силы к ядерным силам? Можно думать, что ядерные силы являются не чем иным, как силами Ван-дер-Ваальса в хромодинامي́ке. Адроны являются "цветовыми" синглетами. По этой причине сверхсильные "цветовые" силы действуют не на адроны, а только на кварки и глюоны. Однако "цветовые" силы между кварками порождают и эффективные силы между "цветовыми" синглетами, причем в тех случаях, когда "цветные" составляющие адронов распределены внутри адронов, а не сконцентрированы в одной точке. Как и в случае обычных сил Ван-дер-Ваальса, можно ожидать, что хромодинамические силы Ван-дер-Ваальса очень быстро уменьшаются при увеличении расстояния между адронами. Эти силы можно заметить только на сравнительно малых расстояниях, и они быстро исчезают, если адроны удалены друг от друга на расстояние, большее 10^{-13} см. Именно это и наблюдается на опыте. Ядерные силы очень велики на малых расстояниях, но быстро исчезают, когда расстояние между обеими ядерными частицами превышает 10^{-13} см.

В рамках хромодинامي́ки удастся построить картину ядерных сил, которая оказалась неожиданной. Вплоть до последних лет большинство физиков полагало, что ядерные силы являются чем-то фундаментальным. Сегодня же эта

Ядерная сила — реликт хромоелектрической силы между кварками ситуация совершенно изменилась. Ядерные силы сами по себе не являются элементарными силами, а лишь следствием сверхбольших хромодинамических сил. Они в такой же малой степени фундаментальны, как силы Ван-дер-Ваальса в атомной физике. Это очень

примечательно; несколько десятилетий назад началось развитие физики элементарных частиц, с тем чтобы понять силы, действующие внутри атомных ядер. Но за это время открылся целый новый мир частиц и сил: мир кварков, глюонов и хромодинамических сил. Они-то и являются теми силами, на которых держится наш мир.

До сих пор мы в основном обсуждали хромоэлектрические силы между кварками. Как подчеркивалось, эти силы ответственны за существование адронов как связанных состояний кварков. Однако наряду с хромоэлектрическими силами существуют аналогично электродинамике и хромомагнитные силы. Последние являются не чем иным, как "цветовыми" аналогами магнитных сил в электродинамике. Как обсуждалось выше, эти магнитные силы ответственны за уплотнение хромоэлектрических силовых линий в КХД и, следовательно, за постоянное удержание кварков внутри адронов. Есть ли возможность непосредственно наблюдать хромомагнитные силы? Чтобы ответить на этот вопрос, вернемся еще раз к электродинамике.

Общеизвестно, что магнитные силы играют большую роль в современной технике. Без них было бы невозможно производить в больших количествах электрическую энергию. Не было бы электромоторов и т. п.

Но магнитные силы играют важную роль и в структуре атомов. Конечно, основная сила, действующая между электронами атомной оболочки и атомным ядром, — это сила электрического притяжения. Однако имеется и небольшая магнитная сила. Она существует потому, что как электроны, так и атомное ядро имеют собственный момент импульса, т. е. *спин*.

Из наличия момента импульса у заряженной частицы вытекает, что электрические заряды как бы двигаются по окружности. Поэтому заряженная частица со спином обладает магнитным полем. Оно напоминает магнитное поле постоянного магнита (рис. 58).

Два электрона, спины которых направлены в одну сторону, испытывают магнитное притяжение. Если же спины направлены в противоположные стороны, электроны отталкиваются. Однако оказывается, что магнитные силы между двумя электронами очень малы по сравнению с относительно большими силами электрического отталкивания и в большинстве случаев ими можно полностью пренебречь.

Рассмотрим теперь другой случай, а именно магнитные силы между электроном и позитроном. Так как позитрон имеет положительный электрический заряд, то ситуация меняется. Когда спины электрона и позитрона направлены в одну сторону, возникает отталкивающая сила. Если же спины направлены в противоположные стороны, то сила становится притягивающей. Это

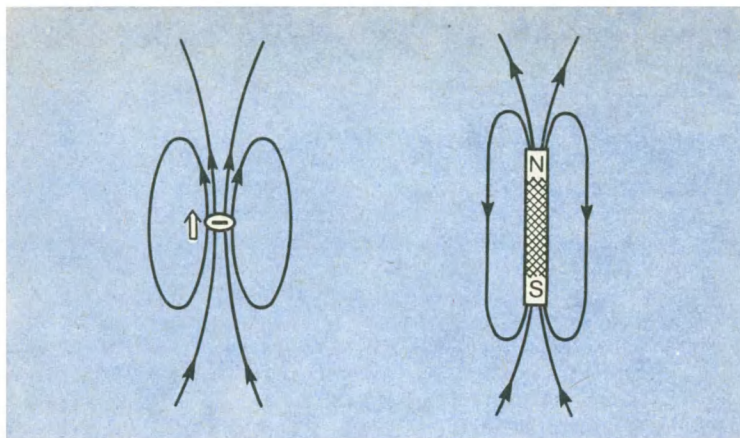


Рис. 58. Магнитное поле электрона (спин направлен вверх) напоминает магнитное поле постоянного магнита

обстоятельство очень важно для структуры позитрония — связанного состояния, образованного из электрона и позитрона. Имеются два типа позитрония: ортопозитроний и парапозитроний. Состояние ортопозитрония возникает, когда спины электрона и позитрона направлены в одну сторону. В этом случае полный спин системы равен 1 (спин электрона или позитрона всегда равен $1/2$). Состояние парапозитрония возникает, когда спины электрона и позитрона антипараллельны. Можно получить парапозитроний из ортопозитрония, “перевернув” спин одной из составляющих позитроний частиц. Поскольку магнитные силы в орто- и парапозитронии различны, следует ожидать, что энергии орто- и парапозитрония также несколько отлича-

ются. Мы можем даже сказать, какое из двух состояний будет иметь большую энергию. Когда мы объединяем электрон с позитроном, чтобы образовать ортопозитроний, то нам в этом, естественно, помогает сила электрического притяжения между электроном и позитроном. Но мы должны преодолевать магнитное отталкивание. В случае парапозитрония дело обстоит иначе. Здесь как электрические, так и магнитные силы имеют характер притяжения. Таким образом, магнитные силы помогают образовать связанное состояние. По этой причине энергия ортопозитрония несколько больше, чем парапозитрония.

Что следует ожидать в хромодинамике? Прежде всего рассмотрим мезоны, являющиеся очевидными аналогами позитрония в КХД. Мы ожидаем, что хромомагнитные силы между двумя кварками в мезоне полностью аналогичны магнитным силам в позитронии. Поэтому мезоны, у которых спины составляющих их кварков направлены в одну сторону, должны быть тяжелее тех мезонов, у которых спины кварков направлены в противоположные стороны. Это соответствует тому, что наблюдается в природе. Например, ρ -мезон тяжелее π -мезона, K^* -мезон тяжелее K -мезона и т. д. В какую бы область мезонного спектра мы ни взглянули, везде ситуация одна и та же. По этой причине мы заключаем, что имеется прямое указание на существование хромомагнитных сил внутри адронов. Именно они являются причиной того, что, в частности, векторные мезоны тяжелее соответствующих псевдоскалярных мезонов.

Векторные мезоны тяжелее псевдоскалярных

Впрочем, наши рассуждения справедливы, конечно, и для мезонов, содержащих "очарованные" кварки. Например, J/ψ -мезон тяжелее η_c -мезона. В J/ψ -мезоне спины обоих кварков направлены в одну сторону, а в η_c -мезоне — в противоположные. Но здесь наблюдается и нечто иное. Разность масс между ρ -мезоном и π -мезоном довольно велика — примерно 600 МэВ. В то же время разность масс между J/ψ -мезоном и η_c -мезоном много меньше — всего лишь около 100 МэВ. Что за этим кроется? И это явление легко понять. Как электромагнитные, так и хромомагнитные силы между кварками определяются так называемыми *магнитными моментами кварков*. Последние можно вычислить. Оказывается, что они пропорциональны известной нам постоянной Планка \hbar , но обратно пропорциональны эффективной массе кварка.

Магнитные моменты кварков

Чем больше эффективная масса кварка, тем меньше магнитный момент и тем меньше возникающая от рассматриваемого кварка электромагнитная или хромомагнитная сила. В случае s -кварка магнитные силы уже заметно меньше, чем для u - или d -кварков. По этой причине разность масс между J/ψ -мезоном и η_c -мезоном много меньше разности масс между ρ - и π -мезонами.

Рассмотрим теперь спектр барионов. И здесь есть возможность сравнить адроны с различными спинами. Например, единственное различие между Δ -частицей и протоном заключается в том, что у Δ -частицы спины трех кварков направлены в одну сторону, в то время как у протона спины двух кварков взаимно противоположны. Но Δ -частица тяжелее нуклона. Без сомнения, мы должны связать это с разной спиновой структурой кварковых конфигураций. Однако оказывается, что ситуация здесь

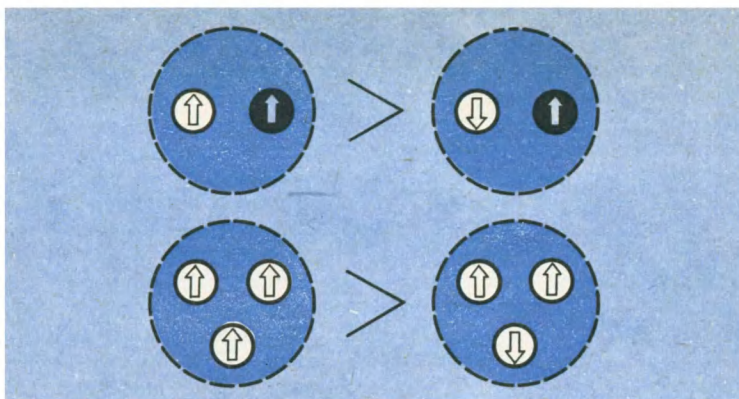


Рис. 59. Хромомагнитные силы являются причиной того, что мезоны, состоящие из кварков с одинаково направленными спинами, тяжелее мезонов, у которых спины кварков противоположно направлены. Аналогично системы, состоящие из трех кварков с одинаково направленными спинами, тяжелее систем, у которых спин одного из кварков противоположен спинам двух других. В этом причина того, что Δ -частица тяжелее нуклона

сложнее, чем с мезонами. В случае барионов нет столь прямой аналогии между электродинамикой и хромодинамикой. В электродинамике не существует связанного состояния из трех электронов. В то же время в хромодинамике имеются связанные состояния из трех кварков, а именно барионы. Мы уже знаем глубокую причину этого — различие в структуре зарядов в электродинамике и хромодинамике (один электрический заряд против восьми хромоэлектрических).

Хромомагнитные силы между кварками внутри барионов складываются аналогично хромоэлектрическим. Точно так же, как имеется восемь различных хромоэлектрических сил, соответствующих восьми разным "цветовым" зарядам, имеется и восемь различных типов хромомагнитных сил. Таким образом, чтобы быть точными, нужно детально учесть эти восемь хромомагнитных сил. Только тогда мы сможем сказать, как обстоит дело с хромомагнитными свойствами систем из трех кварков. В принципе подобную процедуру можно проводить и при рассмотрении кварк-антикварковых систем, т. е. мезонов. Оказывается, однако, что в случае мезонов нет разницы, рассматриваем ли мы одну магнитную силу или восемь различных магнитных сил. Здесь существует полная аналогия между электродинамикой и хромодинамикой.

Но эта аналогия несправедлива для барионов. Если вычислить эффекты, связанные с восемью различными хромомagnetными силами, для барионной системы, то получается поразительный результат. Если спины трех кварков направлены в одну сторону, то магнитные силы являются отталкивающими, если же спины двух кварков противоположно направлены, то эти силы притягивающие (рис. 59). Подчеркнем, что для получения желаемого результата необходимо существование "цветового" квантового числа. Таким образом, то обстоятельство, что Δ -частица имеет большую массу, чем протон, является дополнительным указанием на существование "цветового" квантового числа.

**Хромо-
магнетизм
и Δ -частицы**

Обсуждавшееся выше явление очень важно для структуры нашего мира. Только представьте себе, что было бы, если бы Δ -частица была легче протона. В этом случае протон распадался бы на Δ^{++} -частицу. Не существовало бы атомов водорода. Легчайший элемент состоял бы из Δ^{++} -ядра и двух электронов. Мир был бы очень не похожим на тот, в котором мы живем.

13

КВАРКИ И ИХ ТОНКАЯ СТРУКТУРА

В физике частицу называют элементарной, если она не обладает внутренней структурой, т. е. рассматриваемая частица не состоит из еще меньших объектов. Однако такое определение относительно. В различных областях физики существуют различные представления об элементарности. Так, например, для большого раздела физической химии безразлично, обладают ли атомы специфической внутренней структурой. Достаточно рассматривать сами атомы как мельчайшие частицы материи. В то же время вся ценность атомной физики заключается в изучении внутренней структуры атома. Для ученого, занимающегося атомной физикой, атомы состоят из атомного ядра и облака электронов. Атомное ядро принимается этими учеными за неделимое, т. е. рассматривается как элементарный объект. Для физика-ядерщика нуклоны, составляющие атомное ядро, выступают как элементарные объекты. Но физик, изучающий элементарные частицы, рассматривает нуклоны как неэлементарные системы, состоящие из кварков.

Встает вопрос: а как обстоит дело с кварками и лептонами. Уж они-то являются элементарными объектами или состоят в свою очередь из еще меньших частиц? Сразу же хочу ответить, что этот вопрос до сего дня остается неясным. Хотя экспери-

ментально и велись поиски субструктуры кварков и лептонов, однако пока что без всякого успеха. Тем не менее не исключено, что существуют еще меньшие физические объекты, из которых состоят кварки и лептоны. В конце книги мы вернемся еще раз к этим проблемам.

В частности, физики подробно исследовали электрон, имея в виду возможно существующую у него субструктуру. Оказа-

**Насколько
элементарен
электрон?**

лось, что электрон ведет себя как точечный объект, т. е. объект, не имеющий внутренней структуры, вплоть до очень малых расстояний, составляющих по порядку величины 10^{-17} см.

Неправильно говорить, что электрон вообще не имеет никакой структуры. Выше мы уже видели, что каждый электрон окружен своим облаком вакуумной поляризации. Оно явля-

**Тонкая
структура
электрона**

ется довольно сложным образованием. Таким образом, в этом смысле у электрона есть субструктура, возникающая в результате его электромагнитного взаимодействия.

Но существует большая разница между таким типом субструктуры, обусловленной взаимодействием электрона, и субструктурой протона, состоящего из кварков. Такая субструктура есть нечто новое, чего нельзя было заранее предвидеть.

В то же время субструктура электрона представляет собой явление, которое можно точно вычислить в рамках квантовой электродинамики. Назовем эту вычислимую субструктуру *тонкой структурой электрона*. В 40–50-х годах нашего столетия физикам-теоретикам удалось с большой точностью рассчитать тонкую структуру электрона. Результаты были сопоставлены с экспериментальными данными, и оказалось, что квантовая электродинамика описывает тонкую структуру электрона весьма удовлетворительно.

Что же можно ожидать в рамках хромодинамики для кварков? Поскольку кварки находятся во взаимодействии с глюо-

**У кварков есть
тонкая
структура**

нами, они также должны иметь тонкую структуру. Она аналогична тонкой структуре электрона и вычислима. Отсюда возникает один из важнейших экспериментальных тестов КХД, заключающийся в том,

чтобы сравнить вычисленную тонкую структуру кварков с соответствующими экспериментальными данными. Но какие же эксперименты следует провести, чтобы измерить тонкую структуру кварков? Очевидно, что измерить тонкую структуру кварков, т. е. объектов, существующих только внутри адронов, труднее, чем электронов, существующих в природе в виде свободных частиц. Напомним читателям об экспериментах по рас-

сеянию электронов и нейтрино. С их помощью удалось твердо установить, что кварки внутри нуклонов существуют в основном в виде точечных частиц. Но если кварки действительно обладают тонкой структурой, обусловленной их хромодинамическим взаимодействием, то должно быть возможно увидеть это при изучении рассеяния электронов или нейтрино.

В частности, с помощью названных экспериментов мы обнаруживаем, что при больших энергиях лишь 50% импульса нуклона переносится кварками. Остальную часть должен принять на себя другой носитель, к тому же не имеющий электрического заряда. В рамках КХД у нас есть кандидат на место этого носителя импульса, а именно совокупность глюонов внутри нуклона. Глюоны электрически нейтральны; помимо "цвета" они несут только энергию и импульс. Таким образом, мы делаем вывод: около 50% импульса нуклона переносится глюонами. По этой причине глюоны наряду с кварками играют важную роль внутри нуклонов.

Представим себе, что мы простреливаем нуклон электроном, так что он пролетает близко от одного из кварков и по этой причине искажает свою траекторию. Когда электрон имеет сравнительно небольшой импульс и его траектория искажается не слишком сильно, он не оказывает большого влияния на соответствующий кварк. В этом случае кварк ведет себя в основном как точечное образование, не имеющее тонкой структуры. Но все меняется, если мы повысим энергию электрона и тем самым позволим ему передать кварку больший импульс (такое происходит, когда электрон пролетает ближе к рассматриваемому кварку). В этом случае мы ожидаем, что постепенно будет становиться заметной тонкая структура кварков. Кварк будет иногда вести себя не как один кварк сам по себе, а как кварк, окруженный облаком глюонов. Это можно экспериментально установить следующим образом.

Поскольку электрон вступает во взаимодействие только с электрически заряженной материей, т. е. с кварками, но не с глюонами, он будет игнорировать глюонное облако. Но импульс кварка, окруженного глюонным облаком, будет меньше импульса кварка, глюонное облако которого мало или вообще отсутствует. С точки зрения эксперимента это означает, что так называемое скейлинговое поведение, о котором мы говорили выше, будет выполняться не точно, а лишь приближенно.

Можно вычислить, насколько велик этот эффект. С помощью лептон-нуклонного рассеяния измеряются так называемые кварковые функции распределения. Они описывают распределение импульсов кварков внутри нуклона в зависимости

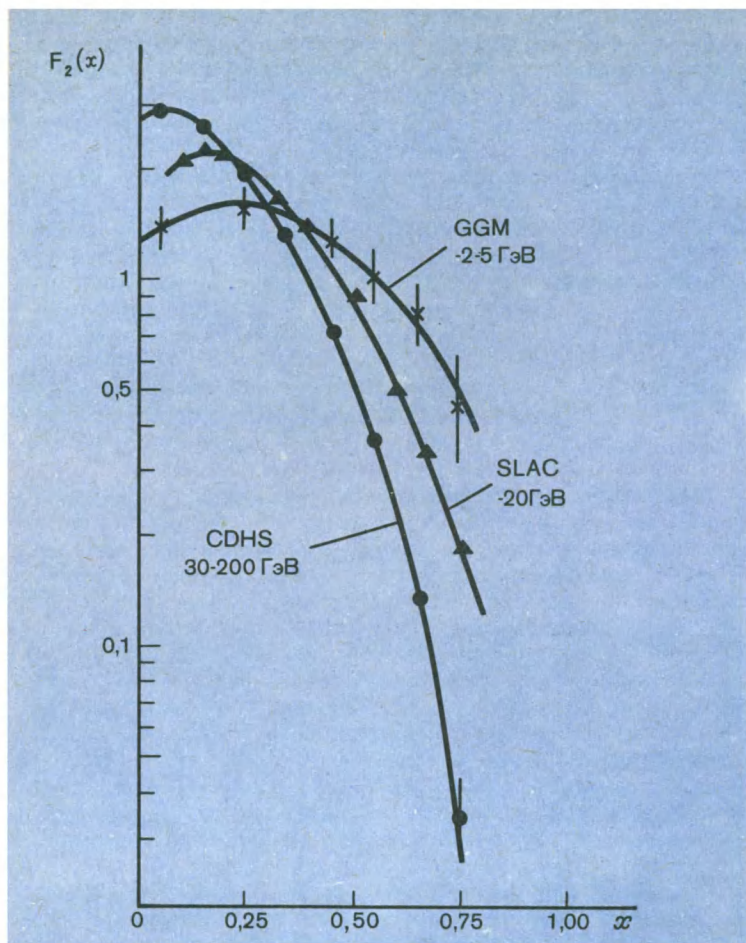


Рис. 60. Функция распределения кварков в протоне, измеренная в разных экспериментах. С ростом энергии эта функция при больших значениях x уменьшается. Это явление интерпретируется как следствие хромодинамического взаимодействия. Параметр x описывает долю импульса кварков в полном импульсе

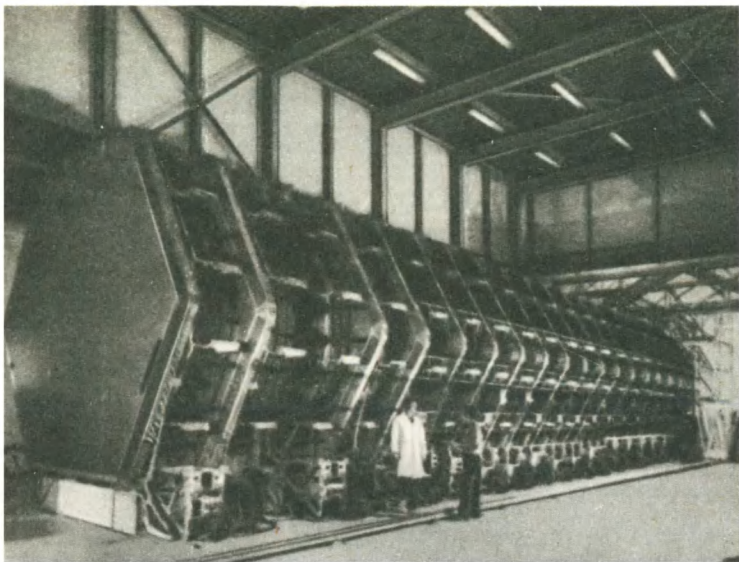


Рис. 61. Детектор CDHS ЦЕРН, названный по имени тех мест, где находятся институты, принимавшие участие в его строительстве и проведении экспериментов: ЦЕРН, Дортмунд, Гамбург, Сакле (под Парижем)

от так называемого параметра скейлинга x . Так как ожидается, что вклад кварка в полный импульс нуклона уменьшается при больших энергиях, должно наблюдаться уменьшение кварковой функции распределения при заданном параметре x . Это уменьшение можно вычислить, предполагая, что нам известно значение хромодинамической константы связи α_s (рис. 60).

**Эксперименты
подтверждают
предсказания
КХД**

За прошедшие годы был проведен очень точный анализ результатов экспериментов по рассеянию электронов и нейтрино. (На рис. 61 показан один из больших детекторов, с помощью которого были получены важные результаты.) Было обнаружено, что скейлинговое поведение нарушается. Результаты находятся в хорошем согласии с предсказаниями квантовой хромодинамики.

**Насколько
велика хромо-
динамическая
постоянная
тонкой
структуры?**

С помощью полученных экспериментальных результатов удалось определить константу связи в КХД. Этот параметр оказался равным $1/3$. Хромодинамическая постоянная тонкой структуры, таким образом, существ-

венно больше электродинамической постоянной тонкой структуры α . Этого и следовало ожидать, поскольку взаимодействие кварков внутри адронов существенно сильнее взаимодействия электронов внутри атома (которое и описывается постоянной тонкой структуры α).

Лишь совсем недавно удалось довольно точно определить значение хромодинамической постоянной тонкой структуры в экспериментах по аннигиляции электронов и позитронов.

14

СЮПРИЗ НА УСТАНОВКЕ РЕТРА: КВАРКИ "ВИДНЫ"

В физике высоких энергий существует процесс, отличающийся по своей важности от всех других процессов, а именно аннигиляция электронов и позитронов. В этом процессе полностью

**Важность
процесса
электрон-
позитронной
аннигиляции**

взаимно уничтожаются частицы и соответствующие античастицы, превращаясь в чистую энергию. Эту энергию можно использовать для того, чтобы породить все мыслимые типы новых частиц. Такая реакция сильно отличается от других реакций между элементарными частицами, например от рас-

сеяния двух протонов друг на друге. Как известно, в последнем случае после рассеяния обязательно должны получиться два протона вместе с другими рожденными при рассеянии частицами (в основном π -мезонами). По этой причине с помощью протон-протонного рассеяния можно получить не так много информации, как с помощью электрон-позитронной аннигиляции. Мы в основном узнаем что-то о самом протоне, но не так уж много о возможно существующих новых частицах.

При аннигиляции электронов и позитронов все обстоит иначе. Из получающейся энергии можно породить практически все, что только способно образоваться при данной энергии. По существу новые частицы рождаются из ничего, т. е. из вакуума. Поэтому специалисты по физике элементарных частиц часто говорят, что с помощью аннигиляции электронов и позитронов исследуется структура вакуума.

**Исследуется
вакуум**

(Мы неоднократно отмечали выше, что вакуум в физике элементарных частиц является весьма сложным образованием.) При-

ведем пример: рождение "очарованных" частиц в процессе аннигиляции электронов и позитронов. Если только в нашем распоряжении имеется достаточная энергия, нетрудно породить

в таком процессе "очарованные" частицы вместе с их античастицами.

В то же время довольно трудно образовать "очарованные" частицы в чисто адронных процессах, например в протон-протонном рассеянии. Лишь в 1979 г., через 4 года после открытия очарованных частиц, удалось действительно породить их в адронных процессах.

Какой механизм позволяет адронам рождаться в процессе электрон-позитронной аннигиляции? Это происходит потому, что первоначально образуется кварк-антикварковая пара, причем как результат электромагнитного взаимодействия. Напомним в связи с этим, что аннигиляция электрона с позитроном является электромагнитным процессом. Поэтому в таком процессе можно "родить" только кварки и антикварки, но не глюоны. Как мы уже знаем, первоначально родившиеся кварк-антикварковые пары превращаются в адронные конечные состояния, наблюдаемые на опыте, и это происходит за счет хромодинамического взаимодействия.

Представим себе, что у нас есть возможность выбрать энергии аннигилирующих электрона и позитрона очень большими.

Аннигиляция электронов и позитронов при очень больших энергиях

Наиболее мощными на сегодняшний день машинами в этой области являются установка PETRA в ДЕЗИ и накопительное кольцо PEP в калифорнийском исследовательском центре СЛАК. Как на PETRA, так и на PEP возможно ускорять электроны и позитроны до энергии, равной 18 ГэВ.

Таким образом, при аннигиляции электронов и позитронов может образоваться адронная система частиц с максимальной энергией 36 ГэВ. В ЦЕРН ведется подготовка к строительству накопительного кольца LEP. С помощью машины LEP станет возможным сталкивать друг с другом электроны и позитроны с энергиями более 50 ГэВ.

Мы хотим еще раз детально рассмотреть такой процесс аннигиляции при очень больших энергиях. Сталкивающиеся электрон и позитрон взаимно уничтожаются. Они порождают виртуальный фотон, который вскоре после этого образует из вакуума кварк-антикварковую пару, например пару $\bar{u}u$. На основании законов сохранения энергии и импульса кварк и антикварк имеют ту же энергию, что и сталкивающиеся лептоны, допустим, 18 ГэВ. Эта энергия столь велика, что оба кварка удаляются от места своего рождения со скоростью, практически равной скорости света. Но мы знаем, что сами кварки не могут образоваться как свободные частицы. Образованная при аннигиляции кварк-антикварковая пара в действительности превращается в систему адронов, которую и можно наблюдать с помощью детекторов частиц.

Как можно себе представить такое превращение? Выше уже говорилось, что кварки, далеко удаленные друг от друга, связаны глюонной нитью. Однако это верно только в очень специальном случае — в рассмотренном здесь случае весьма тяжелых кварков. Но мы знаем, что существуют и легкие кварки u и d . Их учет следующим образом меняет ситуацию.

Когда мы удаляем друг от друга два кварка, например, два очень тяжелых кварка, то между ними, как мы уже знаем, образуется глюонная нить. Но постройка такой нити требует энергии. Иначе говоря, мы должны преодолеть значительную силу, чтобы удалить кварки друг от друга. Но не

**Легкие кварки
важны**

забудем, что вакуум заполнен бесконечным числом виртуальных кварк-антикварковых пар. Вообще-то мы их не замечаем. Однако они только и ждут случая проявиться в форме частиц (адронов). Это возможно лишь при условии, что в нашем распоряжении достаточно энергии. Тогда оказывается, что виртуальные кварки и антикварки начинают вести себя очень своеобразно. Они по существу "крадут" ту энергию, которую мы тратим на удаление друг от друга двух кварков. В результате кварки объединяются с одним из имеющихся в наличии виртуальных кварков или антикварков и образуют один или более мезонов. Таким образом, глюонная нить вообще перестает образовываться; она разрушается благодаря рождению мезонов. Все, что наблюдается в конце, — это некоторое число мезонов. Когда, например, в электрон-позитронной аннигиляции рождаются кварки s и \bar{s} , то они с большой скоростью разлетаются в разные стороны. Но это не приводит к образованию глюонной нити; разлет длится недолго, затем s -кварк находит в вакууме u -кварк, с которым он объединяется, образуя D -мезон. Аналогично на другом конце образуется анти- D -мезон. Такой процесс называют *адронизацией*.

Как можно наблюдать эти адронные системы? Поскольку имеющаяся в нашем распоряжении энергия очень велика, следует ожидать, что образуется целый ряд частиц. Их может быть более десяти (π -мезоны, K -мезоны, протоны, антипротоны и т. д.). В частности, поставим вопрос: как распределены импульсы отдельных частиц? Летят ли рожденные частицы более или менее одинаково, во все стороны, или они предпочитают определенные направления?

С помощью теории хромодинамики можно предсказать распределение рожденных частиц по импульсам. Но даже без глубоких теоретических познаний можно легко представить себе, как выглядит рожденная в электрон-позитронной аннигиляции при больших энергиях адронная система. Следует ожидать, что импульсы адронов тесно связаны с импульсами обоих кварков. В частности, адроны будут образовывать конечные со-

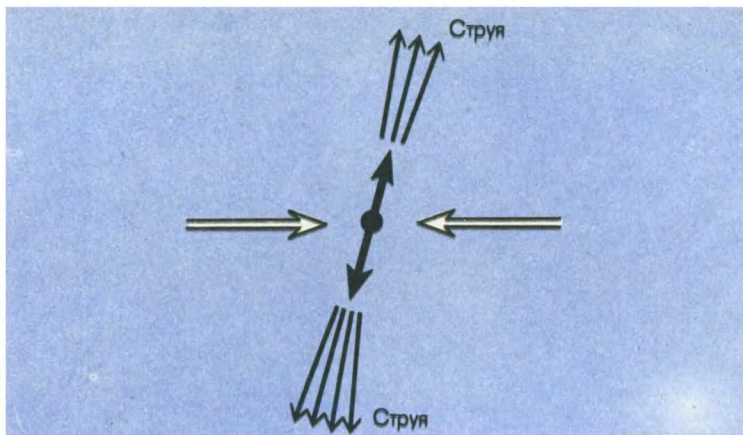


Рис. 62. Электрон аннигилирует с позитроном, рождая кварк и антикварк. Последние фрагментируют в адроны (π -мезоны, K -мезоны, нуклоны и т. д.). Возникшие адроны образуют две струи частиц

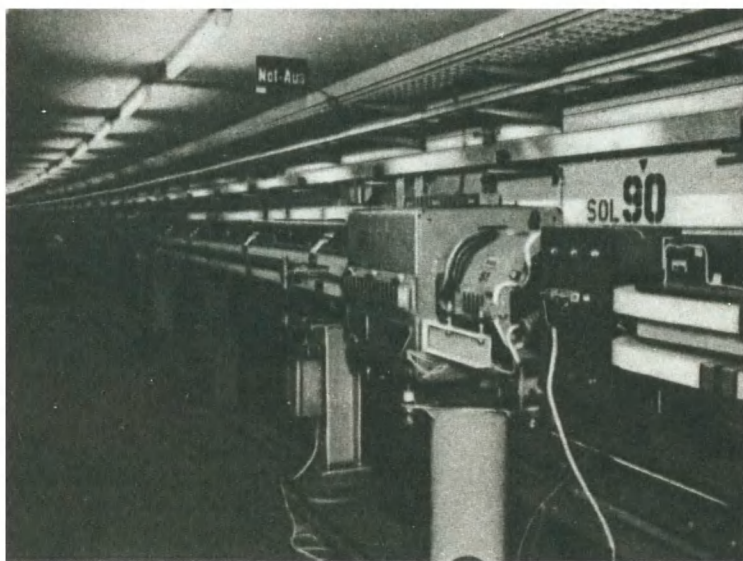


Рис. 63. Внутренний вид туннеля установки PETRA в лаборатории ДЕЗИ. Видна окруженная магнитами вакуумная труба, в которой ускоряются электроны и позитроны

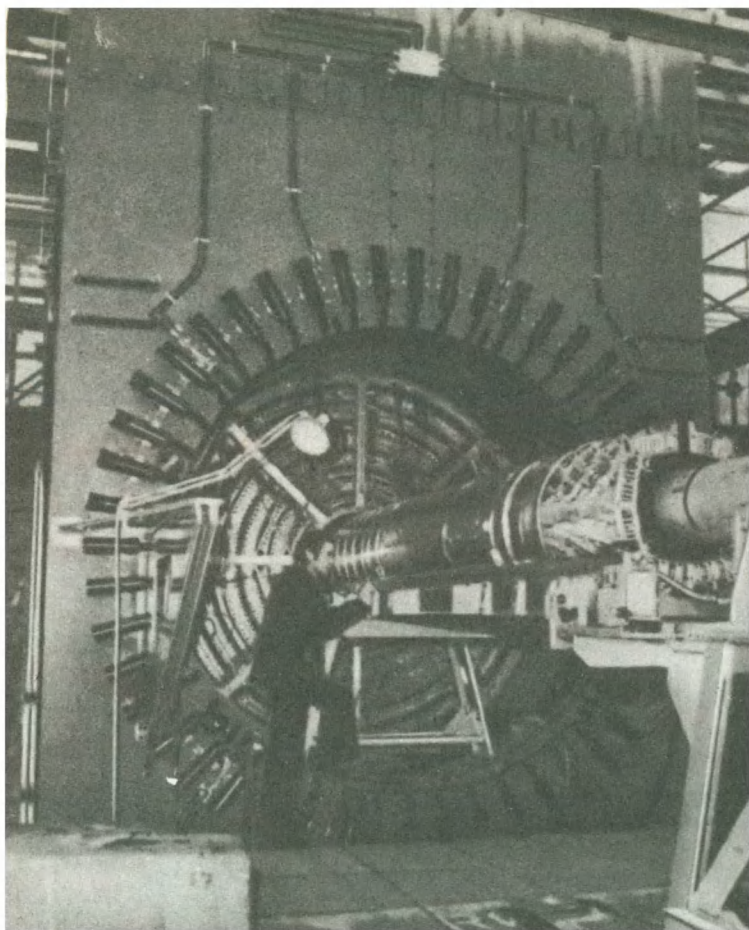


Рис. 64. Вид детектора TASSO в ДЕЗИ. Видна входящая в детектор вакуумная труба. Внутри детектора с помощью специально подобранных магнитных полей электроны и позитроны приводятся в соударение. Рождающиеся при электрон-позитронной аннигиляции частицы регистрируются детектором

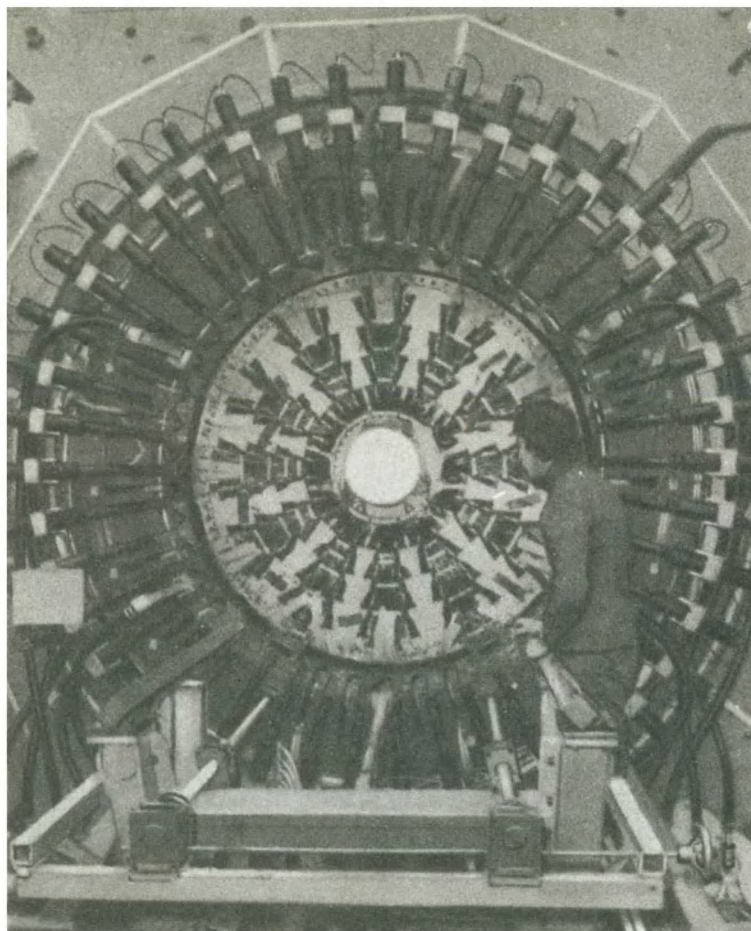


Рис. 65. Внутренний вид детектора **JADE** на накопительном кольце **PETRA** в Гамбурге. В центре видно отверстие вакуумной трубы, в которой происходит аннигиляция электронов и позитронов. Труба окружена устройствами регистрации частиц, с помощью которых можно изучать физические свойства образующихся частиц

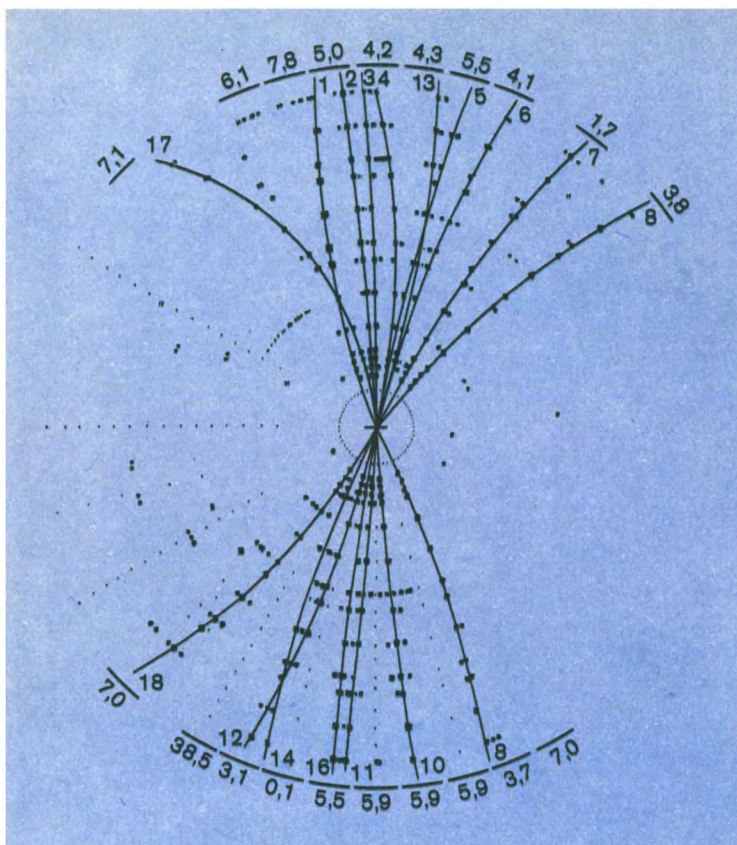


Рис. 66. Электрон-позитронная аннигиляция, наблюдаемая на детекторе TASSO. Энергии электрона и позитрона составляют 17,5 ГэВ. Отчетливо видны порожденные кварками струи частиц, состоящие большей частью из π -мезонов. В этом эксперименте впервые стали видны кварки, правда, косвенно (числа означают измеренные импульсы частиц)

стояния, в которых кварки "фрагментировали" в адроны; это означает, что они породили струи частиц, причем первоначальный импульс кварка равен сумме импульсов частиц в струе (рис. 62). По этой

Струи частиц

причине мы ожидаем, что при аннигиляции электронов и позитронов при достаточно больших энергиях должно наблюдаться образование двух струй. Так как струи яв-

ляются по существу продуктами распада первоначально родившихся кварков, то говорят о так называемых кварковых струях. Итак, в процессе электрон-позитронной аннигиляции можно "видеть" кварки, правда, не непосредственно как реальные частицы, но, по крайней мере, в виде струй.

Действительно, было установлено, что ожидаемая струйная структура обнаруживается при аннигиляции электронов и позитронов. Первые указания на струи появились в 1975 г. на накопительном кольце SPEAR в СЛАК. Но они были еще довольно неясными. Энергия установки SPEAR была недостаточно велика, чтобы можно было отчетливо увидеть струи. Лишь в 1979 г. с помощью установки PETRA (рис. 63) и новых больших и дорогостоящих детекторов частиц удалось убедительно доказать существование струй. Детекторы кварки "видны" носят звучные имена вроде PLUTO, MARKJ, TASSO (рис. 64), JADE (рис. 65) и CELLO. На рис. 66 показано одно из зарегистрированных детектором TASSO событий. Ясно видны обе струи частиц. Наглядно видно, как рождаются оба кварка, фрагментируя затем в адроны. В настоящее время эксперименты на PETRA идут полным ходом и очевидно, что в будущем будет получена еще более точная картина струй и кварков.

15

ПРОТОНЫ РАСЩЕПЛЯЮТСЯ НА КВАРКИ

Выше мы уже обсуждали, как можно с помощью высокоэнергичных нейтрино или электронов "увидеть" кварки внутри нуклонов. Теперь нам следует более детально познакомиться с этими процессами. Поставим, в частности, вопрос: что произойдет с протоном после того, как в один из его кварков попадет электрон? При этом мы считаем, что у нас есть возможность использовать пучки электронов очень большой энергии—100 ГэВ или более.

Когда электрон такой большой энергии рассеивается на протоне, происходит так, что он вступает во взаимодействие с одним из кварков внутри протона. При этом значительная часть энергии электрона передается кварку. Кварк Эта передачу энергии можно легко определить путем измерения энергии электрона ускоряется после рассеяния. Это было сделано в уже известных нам экспериментах на СЛАК. Отсюда была получена информация о распределении кварков внутри нуклонов.

Но существует возможность не только детектировать электрон, испытавший рассеяние на нуклоне, но и проследить за тем,

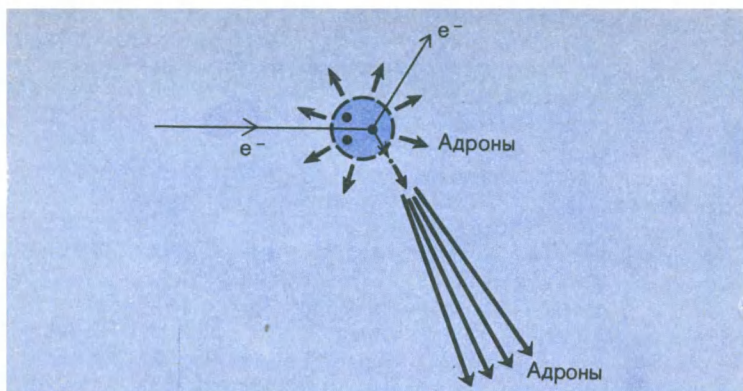


Рис. 67. Электрон большой энергии сталкивается с кварком внутри протона. Кварк с большой скоростью (практически равной скорости света) выбивается из протона и порождает струю частиц

что происходит после рассеяния с самим нуклоном. Перед взаимодействием с налетающим электроном протон состоит из трех кварков, находящихся более или менее в покое относительно друг друга. Но в результате рассеяния это внезапно меняется. Налетающий электрон передает большую часть своей энергии, скажем, 50 ГэВ, одному из трех кварков, причем состояние двух других кварков меняется не сильно.

Мы получаем следующую кварковую конфигурацию. Два кварка продолжают находиться в покое относительно друг друга, в то время как третий кварк с большой скоростью (почти со скоростью света) начинает от них удаляться. С аналогичной ситуацией мы познакомились выше в процессе электрон-позитронной аннигиляции. Там мы имели дело с кварком и антикварком, которые разлетались в противоположные стороны с большой скоростью. Теперь нетрудно догадаться, что произойдет с нуклоном после рассеяния электрона. Мы ожидаем, что выбитый кварк "фрагментирует" в адроны,

**Протон
"расщепился"**

причем опять образуется струя частиц, которая должна быть очень похожа на уже обсуждавшиеся струи в электрон-позитронной аннигиляции (рис. 67). Таким образом, адронное состояние содержит две группы частиц: фрагменты выбитого кварка и остатки двух кварков, в которые не попал электрон. Эти последние образуют частицы, имеющие произвольные энергии и направления импульсов, которые должны быть распределены более или менее изотропно.

Итак, наблюдая кварковые струи при рассеянии электронов большой энергии на нуклонах, мы также можем по существу видеть кварки внутри нуклонов. Поиск кварковых струй при лептон-нуклонном рассеянии был проведен как в СЛАК, так и в американском исследовательском центре ФНАЛ и в ЦЕРН. Наблюдения не противоречат ожиданиям. В то же время нельзя утверждать, что струи наблюдались. Чтобы наблюдать кварковые струи, требуется энергия, превышающая 500 ГэВ. Полученные до настоящего времени пучки электронов, мюонов и нейтрино имеют максимальную энергию 200 ГэВ. Она очень мала для того, чтобы ясно наблюдать струи в неупругом лептон-нуклонном рассеянии. Поэтому

HERA сделает ученые планируют постройку машины, с **это возможным** мощностью которой стало бы возможным рассеивать друг на друге электроны и протоны очень больших энергий. Есть возможность осуществить такой проект в ДЕЗИ. Имя новой машины уже известно: HERA. Строительство этого ускорителя должно быть завершено к 1990 г.

До сих пор мы почти не обсуждали рассеяние протонов на нуклонах. Нетрудно угадать причину этого. Чтобы увидеть кварковую структуру нуклонов, лучше рассеивать на них не протоны, а лептоны, т. е. электроны, нейтрино и т. д. Лептоны являются бесструктурными образованиями, в то время как протон состоит из трех кварков. По этой причине протон-нуклонное рассеяние является значительно более сложным процессом, чем, скажем, электрон-нуклонное. В последнем случае мы знаем, что электрон взаимодействует всегда только с одним кварком внутри нуклона. При протон-нуклонном рассеянии все кварки, вообще говоря, взаимодействуют друг с другом и поэтому очень трудно сказать что-то определенное о динамике такого рассеяния. Однако при определенных обстоятельствах это можно сделать.

Протон-протонное протон-протонное рассеяние при больших энергиях В настоящее время максимальная энергия в протон-протонном рассеянии достигнута на так называемых пересекающихся накопительных кольцах ISR в ЦЕРН (рис. 68, 69)¹. На этой установке протоны с максимальной энергией 27 ГэВ испытывают лобовое столкновение с протонами равной энергии. Зоны взаимодействия окружены детекторами частиц, с помощью которых устанавливается, что произошло при соударении протонов. Уже много лет существует простая картина такого про-

¹ В конце 1983 г. установка ISR после завершения всех запланированных экспериментов была выключена. — *Прим. пер.*



Рис. 68. Вид с воздуха на ускоритель ISR, ЦЕРН. На этом ускорителе протоны ускоряются до энергий почти 30 ГэВ. Затем протоны сталкиваются друг с другом в специально отведенных для этого зонах взаимодействия

цесса. Она состоит в следующем: при соударении оба протона "нагреваются" и при этом рождается большое число адронов, летящих вперед или назад по направлению сталкивающихся протонов (рис. 70). О летящих вперед или назад частицах обычно говорят как о фрагментах обоих протонов.

Первые эксперименты, проведенные на ISR в ЦЕРН в начале 70-х годов, показали, что очерченная выше картина протон-протонного рассеяния при больших энергиях в целом правильна. Наблюдались летящие вперед и назад струи частиц. Детальный анализ экспериментов по рассеянию привел, однако, к неожиданному результату. Иногда образовывались частицы, имевшие относительно большой импульс в направлении, перпендикулярном направлению соударения протонов (так называемый *поперечный импульс*; в энергетических единицах эти поперечные импульсы иногда превышали 5 ГэВ). Как можно интерпретировать это неожиданное явление?

**Неожиданно
большой
поперечный
импульс**

разовывались частицы, имевшие относительно большой импульс в направлении, перпендикулярном направлению соударения протонов (так называемый *поперечный импульс*; в энергетических единицах эти поперечные импульсы иногда превышали 5 ГэВ). Как можно интерпретировать это неожиданное явление?

перечные импульсы иногда превышали 5 ГэВ). Как можно интерпретировать это неожиданное явление?

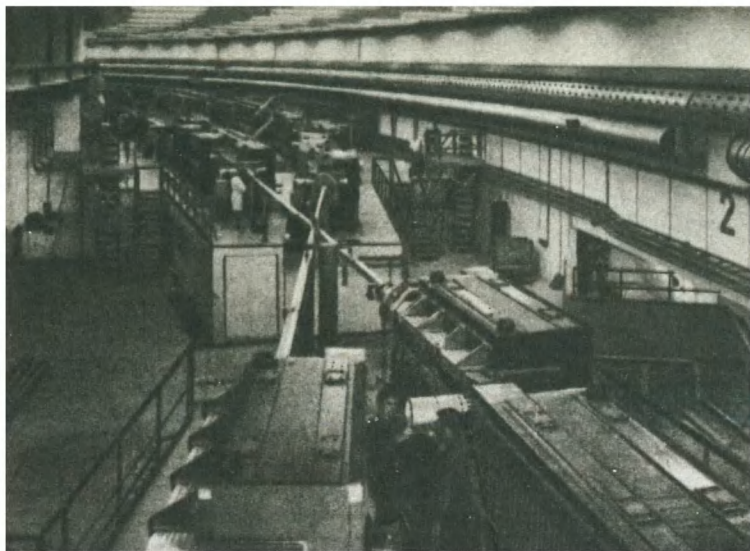


Рис. 69. Одна из зон взаимодействия на ускорителе ISR, ЦЕРН. Ясно видно пересечение двух вакуумных труб, внутри которых летят протоны со скоростью, практически равной скорости света. В точке пересечения протоны сталкиваются друг с другом

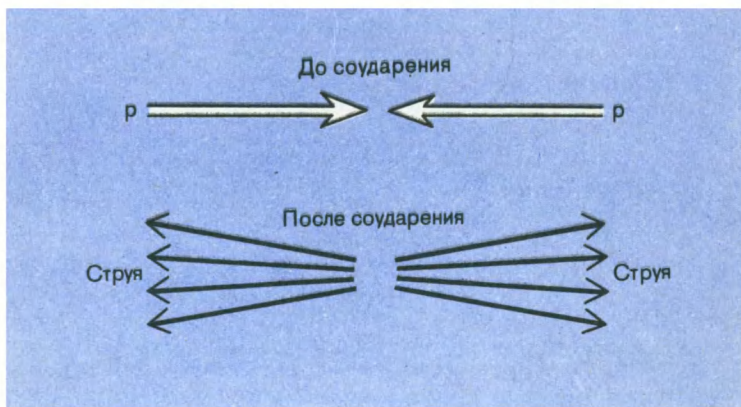


Рис. 70. Схема протон-протонного рассеяния при больших энергиях, в результате которого образуются две струи, направления импульсов в которых совпадают с направлениями импульсов начальных протонов. Импульсы частиц, перпендикулярные импульсам начальных протонов, относительно малы (меньше 1 ГэВ)

Появление больших поперечных импульсов можно понять лишь в том случае, если внутри протона существуют маленькие составляющие, сталкивающиеся друг с другом и в результате очень сильно меняющие первоначальное направление движения. Читатель может представить себе два сталкивающихся бильярдных шара. При этом часто бывает так, что направление движения шаров меняется очень сильно.

Напрашивается мысль сопоставить предполагаемые составляющие нуклонов с кварками. Тогда наблюдаемые большие поперечные импульсы можно было бы интерпретировать как следствие сильного рассеяния двух кварков. В процессе рассеяния два кварка сталкиваются друг с другом и выбиваются из адронного окружения, состоящего из двух сталкивающихся протонов. Оба кварка "фрагментируют" в адроны описанным выше способом. Таким образом, образуются еще две кварковые струи. Принадлежащие им частицы имеют относительно большие поперечные импульсы (рис. 71).

**Четыре струи
частиц при
больших
энергиях**

Следовательно, конечное адронное состояние состоит всего из четырех струй, причем две из них направлены вперед и назад, а две другие обладают большим поперечным импульсом.

С момента открытия больших поперечных импульсов на накопительном кольце ISR в различных экспериментах проводился поиск ожидаемой четырехструйной структуры. Однако при имевшихся до недавнего времени в распоряжении физиков энергиях сделать это было довольно трудно. В частности, совсем не просто отделить друг от друга различные струи (если действительно имеются четыре струи), поскольку энергии частиц в струях в среднем сравнительно малы.

Но с лета 1982 г. ситуация изменилась. С этого времени стало возможным наблюдать протон-антипротонные соударения при очень больших энергиях с помощью протон-антипротонного коллайдера¹ в ЦЕРН. Этот ускоритель был построен всего за несколько лет. Он состоит из обычного протонного ускорительного кольца CERN—SPS (супер-протонный синхротрон) и дополнительного кольца, в котором ускоряются антипротоны до максимальной энергии 270 НэВ. Таким образом, с помощью коллайдера ЦЕРН можно наблюдать соударения протонов и антипротонов с энергией, достигающей 270 ГэВ. На рис. 72 показан большой детектор, с помощью которого детально исследуются процессы соударения (см. также рис. 73). Еще слишком

¹ Ускорителя, работающего на сталкивающихся пучках. — *Прим. пер.*

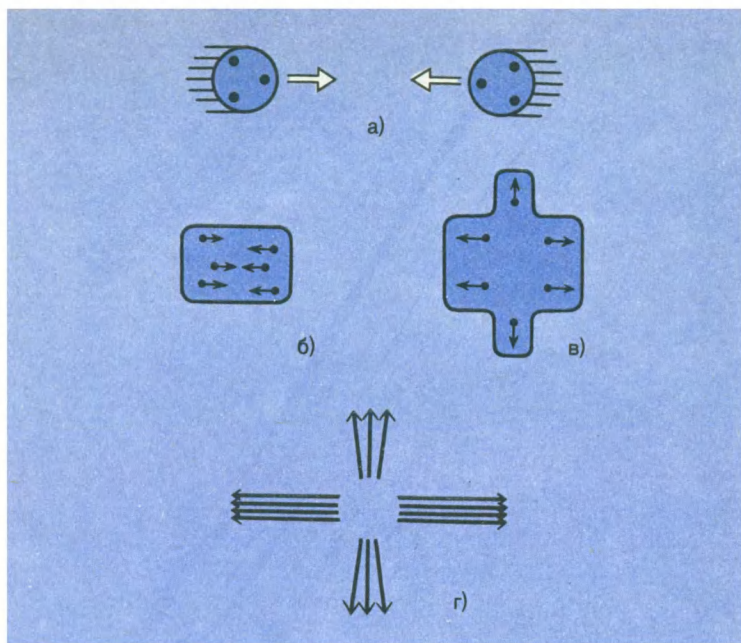


Рис. 71. Четыре струи частиц в протон-протонном рассеянии: а — два протона летят навстречу друг другу: б — оба протона соединяются в одну адронную систему, состоящую из шести кварков; в — два каких-то кварка пролетают близко друг от друга и выбиваются из адронной системы. Другие кварки не меняют своего полета; г — конечный результат: образуются две направленные вперед и назад струи частиц, порожденные теми кварками, которые практически не изменили своего направления движения. Выбитые кварки образуют две кварковые струи, частицы которых имеют большие поперечные импульсы

рано делать какие-то выводы из полученных в ЦЕРН экспериментальных результатов. Однако ожидается, что окажется возможным наблюдать рассеяние кварков друг на друге. Это явится важным тестом идеи кварков, а также хромодинамического взаимодействия, причем по следующим соображениям. До сих пор мы не выяснили, почему собственно кварки рассеиваются друг на друге. Можно наивно полагать, что рассеяние кварков происходит именно в тот момент, когда при соударении двух адронов кварки сталкиваются, так сказать, лобовым образом. Но такое представление не совсем верно. Кварки могут рассеиваться друг на друге лишь тогда, когда между ними есть

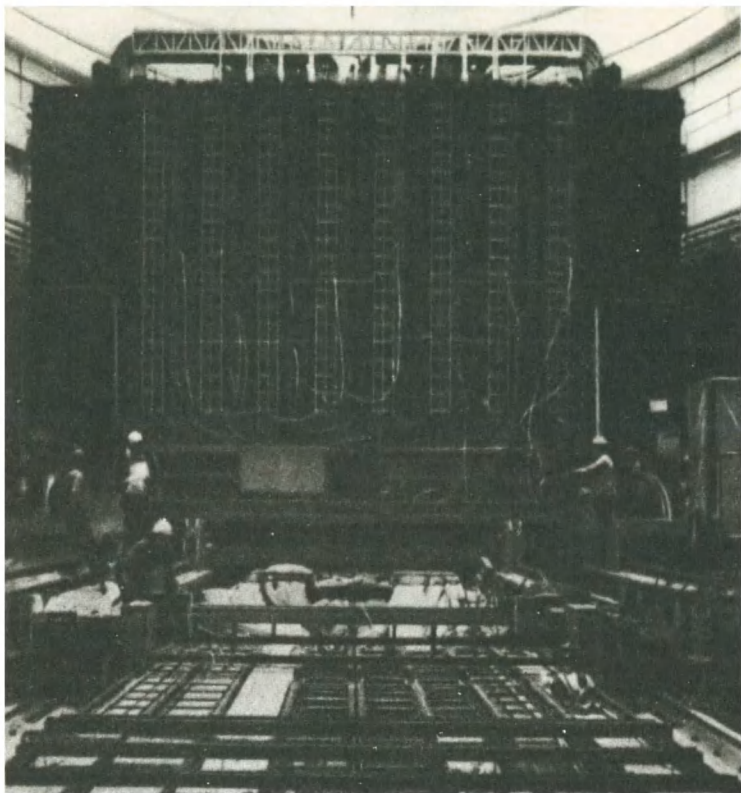


Рис. 72. Большой детектор UA-1 (ЦЕРН), с помощью которого можно наблюдать частицы, рождающиеся при соударении протонов и антипротонов

взаимодействие. То же самое верно и для процесса лептон-кваркового рассеяния, детально обсуждавшегося выше. Электрон будет рассеиваться на кварке внутри нуклона в том случае, если он благодаря электромагнитному взаимодействию вступит с кварком в связь. Если бы не было электрических сил, то электроны без труда пролетали бы сквозь протон. Таким образом, возникает вопрос: какая сила ответственна за рассеяние двух кварков в адронных реакциях? В чем причина появления больших поперечных импульсов в протон-протонном рассеянии при больших энергиях? В рамках хромодинамики имеется только одно объяснение этой силы: она ответственна за связы-

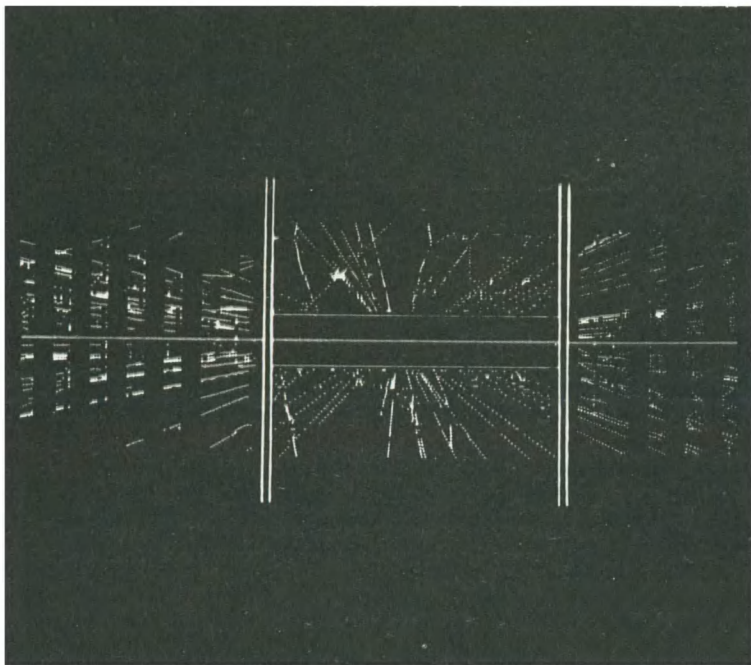


Рис. 73. Рождение целого ряда частиц (в основном π -мезонов) при соударении протонов и антипротонов (ЦЕРН)

вание кварков в "цветовые" синглеты — адроны, т. е. это — глюонная сила.

Изучение адронных столкновений при больших энергиях, в частности наблюдение кварковых струй в таких реакциях, дает возможность провести дополнительную проверку квантовой хромодинамики. Мы можем точно вычислить, сколь часто кварки будут рассеиваться друг на друге. В частности, можно установить, как часто должны наблюдаться

**Глюонные силы
можно увидеть**

частицы с относительно большими поперечными импульсами. Детальный анализ тех результатов, которые будут получены с помощью новой машины в ЦЕРН, будет иметь большое значение, поскольку эти результаты могут быть самым важным тестом хромодинамики.

Наряду с электронами фундаментальными частицами материи являются кварки и глюоны. По крайней мере так считается в рамках хромодинамики. Мы в основном занимались до сих пор кварками. В частности, мы показали, как можно неявно наблюдать кварки. Возникает вопрос: а можно ли косвенным образом наблюдать и глюоны? Мы упоминали уже о такой возможности, заключающейся в изучении сил между кварками. Эти силы порождаются обменом виртуальными глюонами. Но без сомнения не доставляет радости остаться на такой стадии глюонной физики.

Кварки и глюоны являются "цветными" объектами, которые согласно гипотезе "конфайнмента" не должны существовать как свободные частицы. Если хромодинамика является правильной теорией сильного взаимодействия, можно ожидать, что существуют адроны, состоящие только из глюонов. Например, два глюона могут образовать "цветовой" синглет. Таким образом, простейшее глюонное состояние, какое только можно представить, состоит из двух глюонов. Конечно, есть возможность построить "цветовые" синглеты из трех и более глюонов. Для такого типа адронов придумано специальное имя. Их называют

Глюонные шаровые молнии

глюболами (глюонными шарами)¹. Глюбол представляет собой не что иное, как кусок чисто глюонной материи — нечто вроде шаровой молнии, состоящей из глюонной энергии.

Поскольку глюоны электрически нейтральны и способны, кроме того, в небольшой степени к слабому взаимодействию,

Частицы без свойств

такие объекты являются по существу "частицами без свойств". Они, можно сказать, состоят из чистой энергии и почти неуловимы. В разных экспериментах искали глюболы, но пока что без всякого успеха. По различным теоретическим соображениям ожидается, что легчайший глюбол имеет массу между 1 и 2 ГэВ. Вероятно, нейтральные частицы такой массы очень легко распадаются на несколько π -мезонов. Поэтому и должно быть трудно непосредственно наблюдать глюболы на опыте. Все же недавно появились указания на их существование. При изучении распадов J/ψ -мезона в лаборатории СЛАК обнаружено, что в таком распаде особенно часто

¹ Используют и название "глюоний". — Прим. пер.

образуется частица с массой около 1,4 ГэВ, которая затем очень быстро распадается на π -мезоны. Но гипотеза, что эта частица действительно является глюоболом, остается недоказанной.

Как обсуждалось выше, одним из наиболее ясных указаний на существование кварков является появление кварковых струй в процессе аннигиляции электрона и позитрона при больших энергиях. Эти струи возникают тогда, когда кварки в e^+e^- -аннигиляции рождаются с особенно большими импульсами. Встает вопрос: нельзя ли наблюдать процессы, в которых рождаются глюоны с большими импульсами? В этом случае можно было бы ожидать, что глюон совершит нечто похожее на

то, что делает при тех же обстоятельствах кварк, т. е. образует струю частиц, которую в этом случае называют глюонной. Таким образом, нужно найти процесс, в котором можно порождать глюоны особенно больших энергий.

Чтобы обнаружить такой процесс, рассмотрим снова распады J/ψ -мезона. Выше мы отмечали, что этот мезон сравнительно часто может распадаться на электрон-позитронную или мюонную пары. Такие распады совершенно понятны, они обусловлены электромагнитным взаимодействием. Но в большинстве случаев J/ψ -мезон распадается в результате процессов сильного взаимодействия. Мы должны ближе познакомиться с этими распадами. Как мы знаем, J/ψ -мезон является связанным состоянием, состоящим из c -кварка и его антикварка. Как же вообще может быть, чтобы эта частица распадалась на π -мезоны, K -мезоны и т. п., т. е. на частицы, не содержащие c -кварка, а состоящие из легких кварков u , d , s ? Без сомнения при распаде c -кварк и соответствующий антикварк должны взаимно уничтожаться.

Чтобы лучше понять этот процесс, рассмотрим еще раз аналогичную ситуацию в электродинамике. J/ψ -частица является состоянием чармония, т. е. частицы, представляющей собой хромодинамический аналог позитрония. Поэтому представляется необходимым вновь исследовать распады позитрония.

Позитроний — физический объект, который живет не очень долго. Едва он успевает родиться в лаборатории, как сразу же распадается. Он превращается в фотоны, т. е. в свет, причем электрон и позитрон взаимно уничтожаются. Как мы уже знаем, существуют два типа позитрония, называемые парапозитронием и ортопозитронием. Парапозитроний является состоянием, в котором спин электрона и спин позитрона взаимно противоположны. В ортопозитронии оба спина направлены в одну сторону. Оказывается, что парапозитроний всегда распадается на два фотона. В то же время ортопозитроний распадается на три фотона (рис. 74).

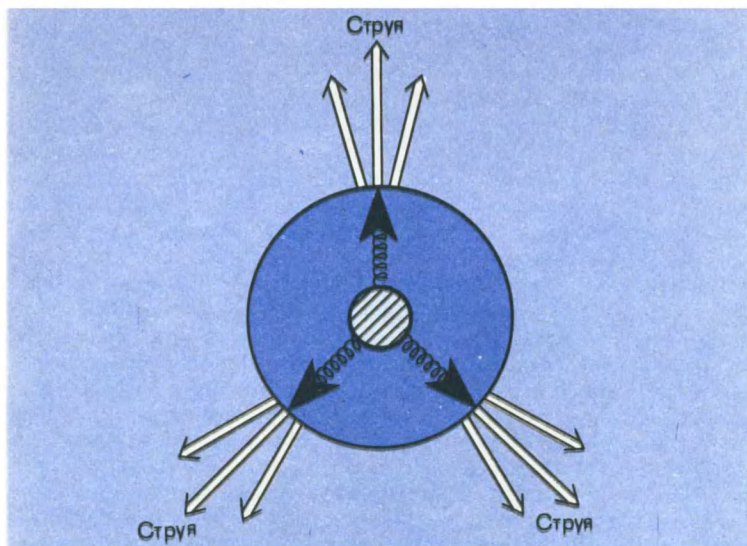
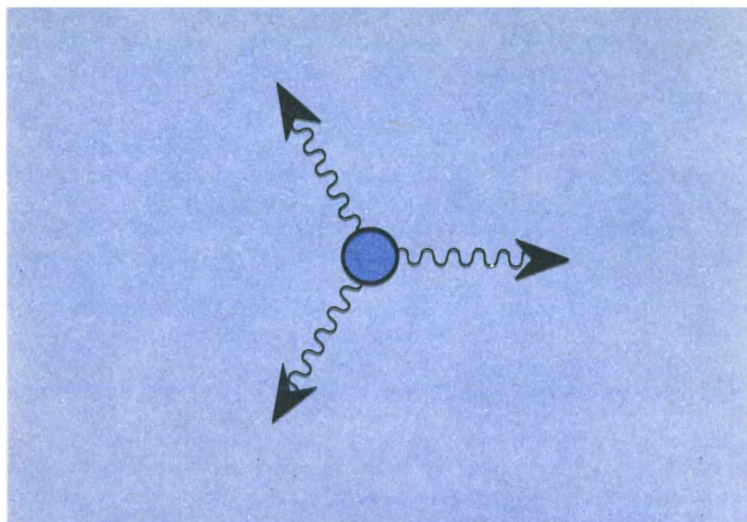


Рис. 74. Распад позитрония на три фотона и распад J/ψ -мезона (чармония) на три глюона. Глюоны фрагментируют в адроны, при этом образуются три глюонные струи. Если энергии глюонов достаточно велики, то струи можно наблюдать

Поскольку J/ψ -мезон есть хромодинамический аналог ортопозитрония, можно ожидать, что при аннигиляции c -кварка и его антикварка образуются три глюона. Конечно, эти глюоны не рождаются в виде настоящих частиц. Вместо этого получают глюонные струи. Глюоны фрагментируют в адроны аналогично кваркам (рис. 74).

**Чармоний
распадается
на глюоны**

Так как при распаде J/ψ возникают глюоны, мы ожидаем, что адронное конечное состояние содержит особенно много глюоболов. По этой причине изучение распадов важно для детального установления динамики глюонов и глюоболов. Как отмечалось, считается, что по крайней мере один глюбол в этом процессе уже обнаружен.

Те глюоны, которые образуются при аннигиляции c -кварка и его антикварка в J/ψ -распаде, не обладают особенно большой энергией. В среднем их энергия порядка 1 ГэВ. По этой причине нельзя ожидать наблюдения глюонных струй в J/ψ -распаде. Чтобы такое стало возможным, глюоны должны иметь много большую энергию, по крайней мере 3 ГэВ. Существует возможность "породить" в лаборатории глюоны со сравнительно большими энергиями. Для этого следует изучать распад тяжелых кваркониевых состояний, т. е. объектов, состоящих из кварков значительно более тяжелых, чем c -кварк. Но существуют ли такие кварки в природе?

В 1977 г. Леон Ледерман с сотрудниками провел в американском исследовательском центре ФНАЛ специальный эксперимент. Пучок протонов с энергией 400 ГэВ направлялся на кусок вещества. В этом эксперименте особенно интересовались рождением мюонных пар. При изучении массы родившихся мюонных пар группа Ледермана получила потрясающий результат. Очень многие мюонные пары имели

**Частица,
которая в 10 раз
тяжелее протона**

массу 9,5 ГэВ. Вскоре стало ясно, что эти мюонные пары должны быть продуктами распада новой частицы с колоссальной массой 9,5 ГэВ. Таким образом, масса этой частицы почти в 10 раз больше массы протона.

Вновь открытая частица во многих отношениях напоминала J/ψ -частицу, и с самого начала было высказано предположение, что она представляет собой связанное состояние очень тяжелого кварка и его антикварка. Эффективная масса нового кварка должна быть почти в 3 раза больше массы "очарованного" кварка.

Как и в случае c -кварка, доказательство того, что мы имеем дело с новым кварком, можно надеяться получить в экспериментах по аннигиляции электронов и позитронов. В лаборатории ДЕЗИ в начале 1978 г. началась специальная программа исследований, чтобы достичь желаемой энергии 9,5 ГэВ. Не-

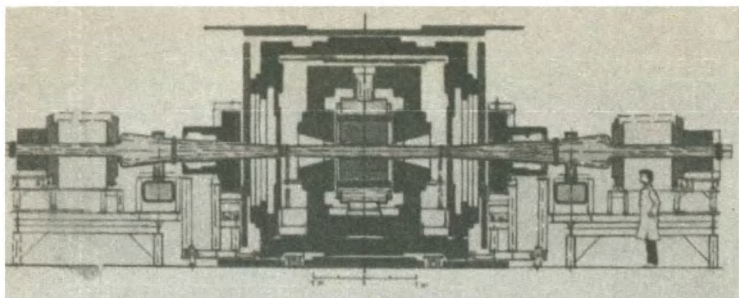


Рис. 75. Схематический разрез детектора PLUTO на установке PETRA в Гамбурге. С помощью этого детектора удалось найти Υ -частицы в процессе электрон-позитронной аннигиляции. Можно ясно видеть вакуумную трубу, в которой сталкиваются ускоренные до больших энергий электроны и позитроны. Рожденные в результате аннигиляции частицы регистрируются различными приборами

ДЕЗИ
обнаруживает
 Υ -частицу

смотря на большие технические трудности, физикам ДЕЗИ удалось в течение июня 1978 г. приступить к работе в области энергий 9,5 ГэВ. При энергии

9,46 ГэВ наблюдалось образование новой частицы (на рис. 75 и 76 показан один из детекторов, с помощью которого было сделано это открытие).

Как и ожидалось, свойства этой частицы оказались очень похожими на свойства J/ψ -частицы. Поэтому стало ясно, что мы имеем дело с новой кварковой степенью свободы. Новую частицу назвали Υ (ипсилон).

Детальное изучение образования новых Υ -частиц показало, что электрический заряд нового кварка равен не $2/3$, как заряд s -кварка, а $-1/3$. Таким образом, тяжелый кварк имеет тот же электрический заряд, что и d - или s -кварк. Новый кварк получил название b^1 . Таким образом, Υ -мезон является связанным состоянием вида $\bar{b}b$.

Роль нового b -кварка несколько отличается от той роли, которую играет в физике s -кварк. Перед открытием s -кварка многие физики были убеждены, как на основании лептон-кварковой симметрии, так и по другим чисто

**Зачем нужен
 b -кварк?**

теоретическим соображениям, что s -кварк должен существовать. С b -кварком все иначе. Его никто не ожидал, он нико-

¹ От английского слова *beauty* — красивый. — Прим. пер.

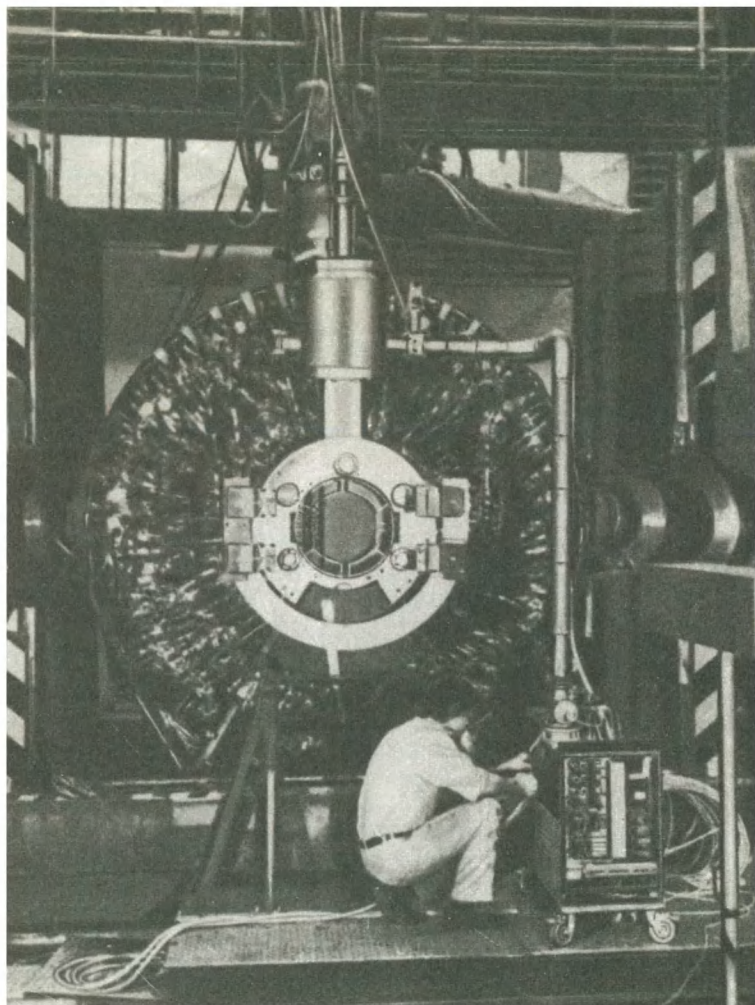


Рис. 76. Внутренний вид детектора PLUTO на накопительном кольце PETRA в Гамбурге. В середине видна вакуумная труба, в которой происходит аннигиляция электронов и позитронов

му не нужен. Каковы же свойства нового кварка? Почему он существует? Это вопросы, на которые никто еще сегодня не знает точного ответа. Ниже мы обсудим разные возможности интерпретации новой кварковой степени свободы.

Υ -мезон почти в 3 раза тяжелее J/ψ -мезона. При его распаде будут рождаться глюоны, энергия которых в среднем равна 3 ГэВ. Поэтому появляется возможность

Υ -мезон — наблюдать при распаде глюонные струи.
фабрика Но в случае Υ -мезонов оказывается трудным
глюонов непосредственно наблюдать три глюонные струи. Для этого энергия глюонов все еще слишком мала. Можно, однако, использовать следующий прием. Мы знаем, что обычно в результате электрон-позитронной аннигиляции при больших энергиях рождаются две кварковые струи. Наблюдаются две струи частиц, направленных точно в противоположные стороны.

Но что произойдет, когда мы увеличим энергию настолько, что начнет рождаться Υ -мезон? Здесь ситуация совершенно изменится, так как мы будем рождать не кварк-антикварковую пару, а три глюона. Но импульсы трех глюонов распределены по всему пространству. Поэтому нельзя ожидать появления двух струй частиц. Именно это и наблюдалось в ДЕЗИ при распаде Υ -мезонов. Как только энергия электронов и позитронов в накопительном кольце повышалась так, что начинали рождаться Υ -мезоны, обнаруживалось, что ясно наблюдавшаяся до этого двухструйная структура исчезала. Это есть четкое указание на то, что тяжелая кварк-антикварковая пара аннигилирует в более чем два объекта, например в три глюона.

Другая возможность получить указания на трехструйную структуру конечных адронных состояний заключается в следующем. Направления импульсов, возникающих при распаде глюонов, не произвольно распределены в пространстве. При аннигиляции электрона и позитрона Υ -мезон рождается в состоянии покоя; его импульс равен нулю. На основании закона сохранения импульса импульсы глюонов должны поэтому в сумме давать нуль. Но три вектора в пространстве, сумма которых равна нулю, обладают тем свойством, что они лежат в одной плоскости. С хорошей точностью это должно выполняться и для импульсов частиц конечного адронного состояния. Поэтому мы ожидаем, что импульсы

**Импульсы
частиц лежат
в плоскости**

родившихся частиц лежат в одной плоскости. Эта плоскость, конечно, от случая к случаю меняется и должна поэтому заново определяться для каждого распада (рис. 77).

Физики в ДЕЗИ внимательно проанализировали распады Υ -частиц и обнаружили, что импульсы действительно лежат в одной плоскости. Тем самым было получено прямое указание

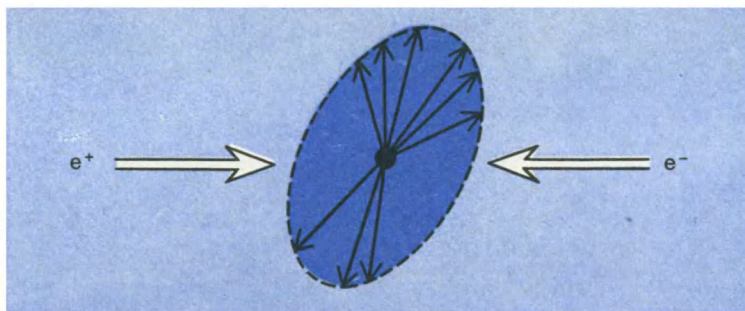


Рис. 77. При распаде J/ψ -резонанса возникают частицы, импульсы которых с хорошей точностью лежат в некоторой плоскости. Для каждого события распада следует заново определять эту плоскость. Структура (яйцевидная) адронных конечных состояний является прямым указанием на то, что при аннигиляции тяжелого b -кварка и его антикварка рождаются три глюона

на то, что при распаде J излучаются три глюона. К сожалению, масса J -частицы слишком мала для того, чтобы ясно видеть трехструйную структуру конечного адронного состояния. Для этой цели требуется кваркониевое состояние, еще более тяжелое, чем J -резонанс. Иными словами, нужен еще один кварк, более тяжелый, чем b -кварк.

В 1979 г. накопительное кольцо PETRA в ДЕЗИ было переведено в режим, при котором можно было исследовать область энергий от 10 почти до 40 ГэВ. К началу лета 1981 г. не было найдено никаких указаний на существование нового кварка в этой области. Если следующий кварк существует, он должен быть тяжелее 18 ГэВ. Ниже подробнее рассмотрены разные гипотезы, связанные с возможным существованием следующего кварка.

Осенью 1979 г. в мировой прессе появилось сообщение, которое обратило на себя внимание не только физиков: в ДЕЗИ открыт глюон. Что же случилось? Речь идет о первых результатах, полученных на новом гамбургском накопительном кольце PETRA.

В ДЕЗИ

находят глюон

В этой машине электроны и позитроны ускоряются до энергий, почти равных 20 ГэВ, т. е. до энергий, соответствующих более чем двадцати протонным массам. В результате аннигиляции электрон-позитронных пар рождаются кварк-антикварковые пары. Мы знаем, что кварки не являются свободными частицами, а постоянно находятся во взаимодействии с глюонами. В частности, один из родившихся при электрон-позитронной аннигиляции кварков должен иногда излучать

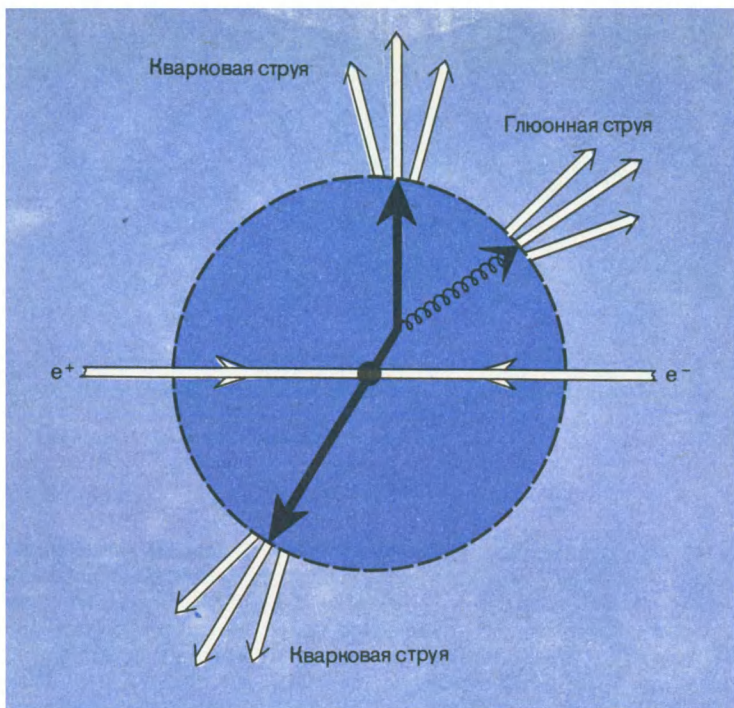


Рис. 78. Образование глюонов при аннигиляции электрона и позитрона. Иногда один из образованных при аннигиляции кварков испускает глюон. При этом кварк меняет свой импульс (а следовательно, и направление движения). Конечное адронное состояние — три струи, одна из них — глюонная

глюон, теряя при этом энергию. Физики придумали для такого процесса образное название. Они называют его тормозным излучением (рис. 78). Что можно ожидать, когда при электрон-позитронной аннигиляции происходит такой процесс тормозного излучения? Сразу же после аннигиляции теперь имеются не два, а три объекта: кварк, антикварк и глюон. Результатом такого процесса вновь будет трехструйная структура.

Как только приступили к анализу первых результатов по электрон-позитронной аннигиляции на установке PETRA, действительно обнаружили, что время от времени видны не две струи частиц, а три. Одно из таких событий показано на рис. 79. Оно получено на детекторе частиц TASSO. Таким образом,

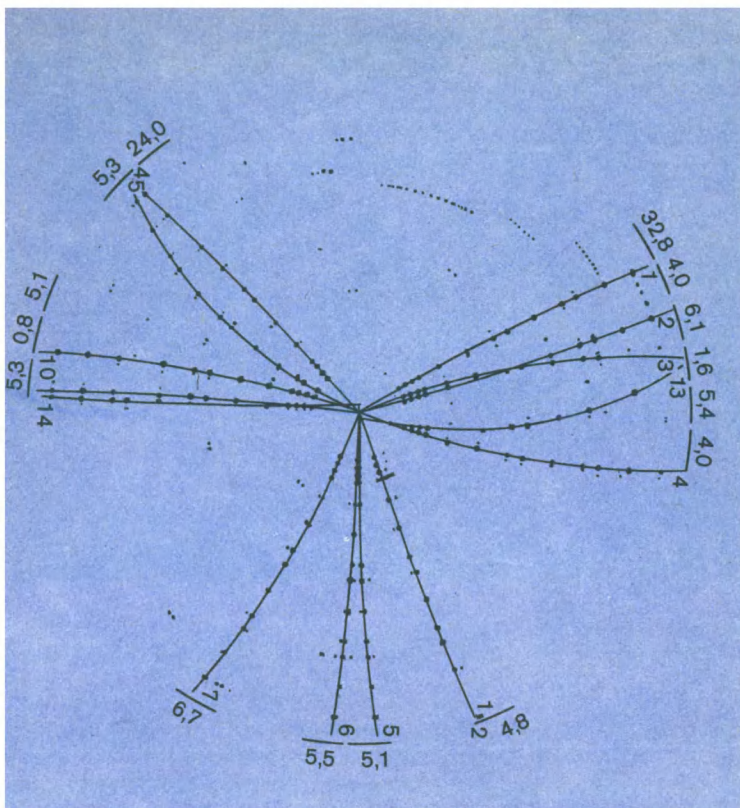


Рис. 79. Одно из трехструйных событий в процессе электрон-позитронной аннигиляции, зарегистрированное на детекторе TASSO в 1980 г. Отчетливо видны три струи частиц

Кварки и глюоны на PETRA

две из указанных струй являются кварковыми струями, а третья — глюонной струей. К сожалению, нельзя установить, какая из струй порождена глюоном. Для подобного анализа требуется детальная информация о частицах в каждой струе. Однако при современном состоянии экспериментального искусства это невозможно.

Ожидается, что с помощью детекторов на накопительном кольце PETRA (рис. 80), а также на вступающем вскоре в строй накопительном кольце PEP в Калифорнии в течение 80-х

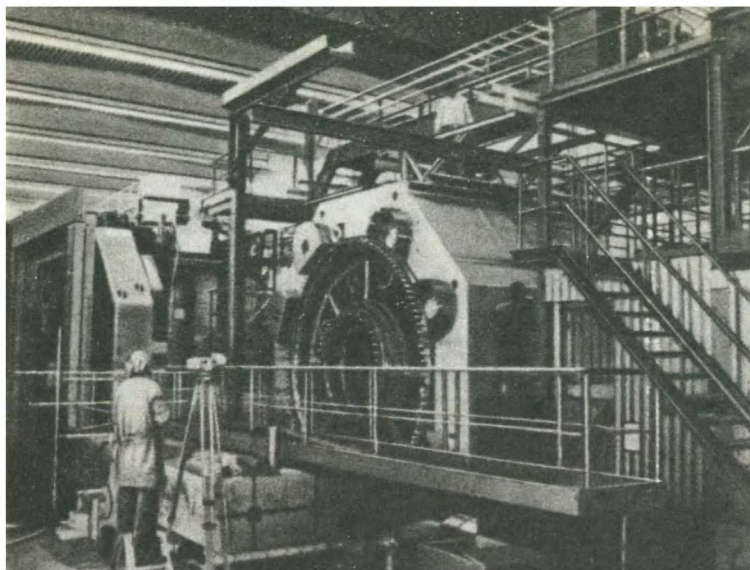


Рис. 80. Детектор CELLO на накопительном кольце PETRA. Этот детектор сконструирован совместно немецкими и французскими учеными

годов будет получена очень точная картина того, что происходит в процессе электрон-позитронной аннигиляции при больших энергиях. В частности, важно детальнее изучить обсуждавшийся выше процесс глюонного тормозного излучения. В хромодинамике удастся точно вычислить, сколь часто должен происходить процесс тормозного излучения. Полученные физиками ДЕЗИ результаты безусловно согласуются с теоретическими предсказаниями. Обнаруженные трехструйные события можно, в частности, использовать для того, чтобы установить величину хромодинамического аналога постоянной тонкой структуры. Получается значение, согласующееся с теми, которые найдены другими способами: $\alpha_s \approx 0,20$. Таким образом, еще раз подтверждается, что хромодинамика способна очень хорошо описывать экспериментальные результаты в физике частиц.

СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕПТОНОВ И КВАРКОВ

Проведенным в конце предыдущей главы обсуждением хромодинамического процесса тормозного излучения мы должны завершить наше рассмотрение КХД. Сегодня нельзя еще утверждать с абсолютной достоверностью, что хромодинамика действительно является правильной теорией адронов и сильного взаимодействия. Однако все имеющиеся экспериментальные данные согласуются с теоретическими предсказаниями КХД. К тому же, не существует никакой другой теории сильного взаимодействия, которая могла бы хоть как-то соперничать с хромодинамикой. Таким образом, есть неплохие шансы на то, что найдена правильная теория для описания ядерных сил и тем самым всех явлений сильного взаимодействия.

Хромодинамика кварков и глюонов является примером калибровочной теории, в которой группа "цвета" $SU(3)$ играет роль калибровочной группы. Поэтому можно ожидать, что калибровочные теории поля на самом деле играют фундаментальную роль в описании природы. Действительно, за прошедшие 10 лет выяснилось, что слабые и электромагнитные взаимодействия также можно описать калибровочной теорией поля. Ниже подробнее обсуждается эта теория.

Прежде всего нужно еще раз перечислить основные свойства наблюдаемых в природе процессов слабого взаимодействия. Все такие процессы можно разделить на процессы, в которых электрический заряд меняется на одну единицу, например β -распад нейтрона $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ (так называемые реакции с участием заряженных токов), и процессы, в которых не происходит изменения электрических зарядов (так называемые реакции с участием нейтральных токов), например рассеяние нейтрино $\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p$.

Но в одном все процессы слабого взаимодействия одинаковы. Во взаимодействии принимают участие четыре фермиона. Иногда один фермион превращается в три других (примером является β -распад), иногда два фермиона реагируют друг с другом, образуя два других фермиона, как в реакции $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$.

Общим для всех реакций с заряженными токами является то, что эти процессы можно описать одной общей для всех константой, определяющей интенсивность соответствующего взаимодействия. Эта константа, названная фермиевской константой по имени итальянского физика Энрико Ферми, точно опре-

**Универсальная
фермиевская
константа**

делена из опыта. Она очень мала; ее точное значение равно $1,16 \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}$ (фермиевская константа не является безразмерным числом, как постоянная тонкой структуры

α , а имеет размерность, обратно пропорциональную квадрату энергии). Малость фермиевской константы является причиной того, что слабое взаимодействие очень слабо — во много раз слабее электромагнитного взаимодействия.

Тот факт, что для описания слабого взаимодействия требуется размерная константа — фермиевская константа, крайне

**Теоретические
трудности
в описании
слабого
взаимодействия**

неутешителен для физика-теоретика. Именно поэтому невозможно развить самосогласованную теорию. Следующие соображения позволяют понять, почему это так. Как мы знаем, квантовая электродинамика очень хорошо описывает наблюдаемые электромагнитные явления. С помощью этой теории

можно рассчитать и такие события, которые никогда не смогут наблюдаться, например рассеяние двух электронов при энергии 1 млрд. ГэВ. Правда, мы не знаем, применима ли теория при столь больших энергиях. Но в рамках самой теории ничто не указывает на то, что может случиться что-то нехорошее.

Причина этого в том, что элементарное взаимодействие между электронами и фотонами в электродинамике описывается безразмерным числом, постоянной тонкой структуры α . То же верно и в КХД. В этой теории элементарное взаимодействие между кварками и глюонами описывается безразмерным числом, которое мы обозначили выше α_s .

Для слабого взаимодействия ситуация иная. Дело в том, что в фермиевской константе уже запрятана некоторая энергия. Приведенное выше значение фермиевской константы можно записать следующим образом:

$$1,16 \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2} = (294 \text{ ГэВ})^{-2}.$$

Поэтому в слабом взаимодействии появляется характеристическая энергия, равная 294 ГэВ, которая, вообще говоря, очень велика. Отсюда следует, что при энергиях, больших примерно 300 ГэВ, знакомая нам картина слабого взаимодействия должна разрушиться. В этой области должно проявиться что-то новое.

Чтобы разобраться в том, как изменится при больших энергиях знакомая нам картина слабого взаимодействия, рассмотрим сначала электромагнитное взаимодействие. Как мы знаем, элементарное взаимодействие в электродинамике описывается реакцией между электроном и фотоном. Реакция с участием двух фермионов, например рассеяние двух электронов, описывается как результат обмена виртуальным фотоном. Но при рассеянии двух электронов мы имеем дело с процессом, в

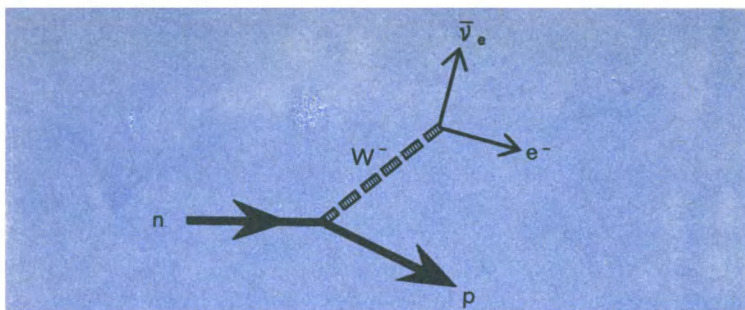


Рис. 81. Возможное описание β -распада. Начальный нейтрон испускает виртуальный W^- -бозон и превращается в протон. W^- -бозон распадается затем на электрон и антинейтрино

котором участвуют четыре фермиона. Два электрона влетают в область взаимодействия и два электрона после рассеяния вылетают из нее, что совершенно аналогично ситуации в слабом взаимодействии. Можно теперь представить себе, что слабое взаимодействие между четырьмя фермионами порождается таким же образом, как и электромагнитное взаимодействие между электронами, т. е. путем обмена виртуальной частицей.

Для примера снова рассмотрим процесс β -распада (рис. 81). Нейтрон переходит в протон, и при этом испускается виртуальная частица, называемая W^- . Затем эта частица порождает электрон и антинейтрино. Процесс аналогичен электромагнитному взаимодействию между двумя электронами, обусловленному обменом виртуальным фотоном. Нужно все-

Возник W -бозон го лишь заменить виртуальный фотон на виртуальную W^- -частицу (называемую промежуточным W -бозоном). Заметим при этом, что W -бозон электрически заряжен, в то время как фотон электрически нейтрален.

Можно аналогичным образом описать и процессы с нейтральными токами. В этом случае требуется новая нейтральная частица, называемая Z -бозоном, которой обмениваются рассматриваемые фермионы. Пример процесса с нейтральными токами представлен на рис. 82.

Описание слабых взаимодействий как результата обмена виртуальными бозонами чрезвычайно упрощает ситуацию. Элементарным взаимодействием является теперь уже не взаимодействие между четырьмя фермионами, а взаимодействие между фермионами и одним из бозонов; это означает, что слабое взаимодействие становится аналогичным электромагнитно-

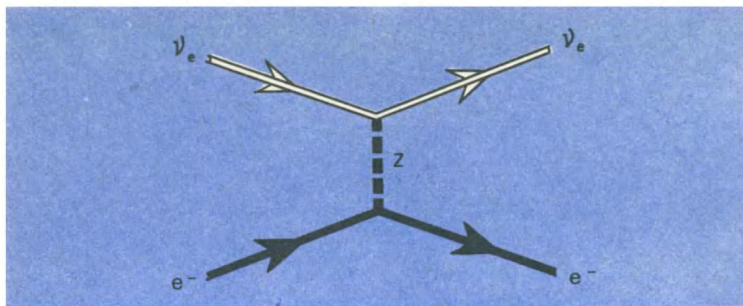


Рис. 82. Схематическое изображение процесса с нейтральными токами. Начальное электронное нейтрино испускает виртуальный Z -бозон, который в свою очередь взаимодействует с электроном

му. Интенсивность взаимодействия может быть теперь также описана простым числом (безразмерным). Обсуждавшиеся выше трудности при больших энергиях не возникают.

Как можно интерпретировать значение фермиевской константы в рамках описанной выше теории? Оказывается, что

необходимо потребовать, чтобы W - и Z -бозоны имели массу. В частности, масса W -бозона связана с фермиевской константой.

Обсуждавшаяся выше критическая энергия, равная 294 ГэВ, есть не что иное, как масса W -бозона, деленная на константу взаимодействия фермионов с W -бозоном. Если последняя сравнительно мала, то ей соответствует и сравнительно малая масса W -бозона. Таким образом, возникает вопрос о массе W - и Z -бозонов. В процессах слабого взаимодействия, в частности в процессах рассеяния нейтрино, проводились

поиски эффектов, связанных с массой W - и Z -бозонов, но пока что безуспешно. Постепенно в этих экспериментах была установлена довольно высокая граница на массу этих бозонов. Они должны быть тяжелее 40 ГэВ, т. е. в 45 раз тяжелее протонов.

Идея о том, что W - и Z -бозоны являются по существу переносчиками слабого взаимодействия, позаимствована нами из электродинамики. W - и Z -бозоны ведут себя так же,

как фотоны в КЭД. Поэтому возникает вопрос: является ли эта аналогия между электромагнитным и слабым взаимодействиями лишь формальной или она обусловлена глубокой внутренней связью между этими взаимодействиями?

Уже давно физики-теоретики мечтали о том, чтобы найти такую связь. На самом деле, между слабым и электромагнитным взаимодействиями много общего. Например, оба взаимодействия переносятся при известных условиях бозонами (точнее говоря, векторными бозонами). Кроме того, оба взаимодействия описываются универсальными константами: электромагнитное взаимодействие — постоянной тонкой структуры α , слабое взаимодействие — фермиевской константой.

В то же время между обоими взаимодействиями имеются и явные различия. Во-первых, фотон не имеет массы. Бозоны слабого взаимодействия, напротив, массивны. Во-вторых, слабое взаимодействие намного слабее электромагнитного.

На самом деле не имеет большого смысла сравнивать наблюдаемые эффективные интенсивности различных взаимодей-

**Насколько
слабо слабое
взаимо-
действие?**

ствий. Существенными являются элементарные взаимодействия, т. е. в случае слабого взаимодействия связь между W -бозонами и фермионами. Может быть так, что слабое взаимодействие в действительности не слабо,

а лишь проявляется как слабое при относительно низких энергиях, в то время как массы W - и Z -бозонов очень велики. Мы уже отмечали, что эффективная интенсивность слабого взаимодействия, которую можно, например, измерить в β -распаде, уменьшается с ростом массы W -бозона, если при этом элементарную константу связи между фермионами и W -бозоном оставить неизменной. В частности, может быть так, что последняя столь же велика, как и электромагнитная константа связи. Например, можно принять, что элементарная константа связи между фермионами и W -бозоном в точности равна электромагнитной константе связи. В этом случае можно определить массу W -бозона; она оказывается равной 37 ГэВ.

Рассуждения такого рода были проведены в 50-е годы. Правда, в то время лишь немногие физики-теоретики верили, что

**Объединение
электрических
и слабых сил?**

описанным способом удастся добиться объединения слабых и электромагнитных взаимодействий. Одной из главных проблем при этом была чудовищно большая по тогдашним представлениям масса W - и Z -бозонов.

Однако с течением времени ситуация полностью изменилась. Физики-теоретики построили теорию, успешно описывающую все известные явления слабых и электромагнитных взаимодействий. В рамках этой книги невозможно детально описать современную теорию слабого и электромагнитного взаимодействий. Я попытаюсь, однако, разъяснить основные положения этой теории.

Мы уже обсуждали наиболее важное свойство слабого взаимодействия — его универсальность. Интенсивность всех слабых

процессов характеризуется фермиевской константой. Напомним аналогичную ситуацию в электродинамике. Электромагнитное взаимодействие элементарных частиц описывается универсальной константой — постоянной тонкой структуры α . Это возможно потому, что все имеющиеся в природе электрические заряды являются кратными элементарному электрическому заряду, обозначаемому e . Численно элементарный электрический заряд равен электрическому заряду позитрона.

Аналогично можно ввести заряд слабого взаимодействия, который мы кратко будем называть слабым зарядом. Электрический заряд частицы описывает, насколько

Слабый заряд сильно эта частица взаимодействует с фотоном — носителем электромагнитной силы. Соответственно слабый заряд описывает, насколько сильно взаимодействует частица с носителем слабой силы — W -бозоном. Пока что мы исключим из рассмотрения Z -бозон.

Роль слабых зарядов можно понять следующим образом. В теории имеются два W -бозона W^+ и W^- . Электрон может, например, превратиться в электронное нейтрино, испустив при этом виртуальный W^- -бозон. Наоборот, электронное нейтрино может превратиться в электрон, испустив виртуальный W^+ -бозон. Можно заметить, что в этих процессах электрический заряд до реакции и после нее одинаков; электрический заряд строго сохраняется. Поскольку взаимодействие W -бозонов с электроном или нейтрино описывается слабыми зарядами, можно сказать, что слабый заряд электрона превращается в слабый заряд нейтрино и наоборот. Аналогичным образом происходит и с кварками. Кварк u может превратиться в d -кварк, испустив при этом виртуальный W^+ -бозон. В то же время d -кварк превращается в u -кварк при испускании виртуального W^- -бозона (рис. 83). Запишем лептоны и кварки в виде следующих двухкомпонентных столбцов:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

Теперь можно просто понять роль слабых зарядов. Они преобразуют верхние компоненты в нижние и наоборот. Напомним

Слабые заряды и изоспины в этой связи свойства изоспиновых зарядов. Они могут переводить u -кварк в d -кварк и наоборот. В определенном смысле слабые заряды должны быть, таким образом, связаны с изоспином.

Правда, мы до сих пор не обращали внимания на важное свойство слабого взаимодействия. Электромагнитное взаимодействие инвариантно относительно симметрии, связанной

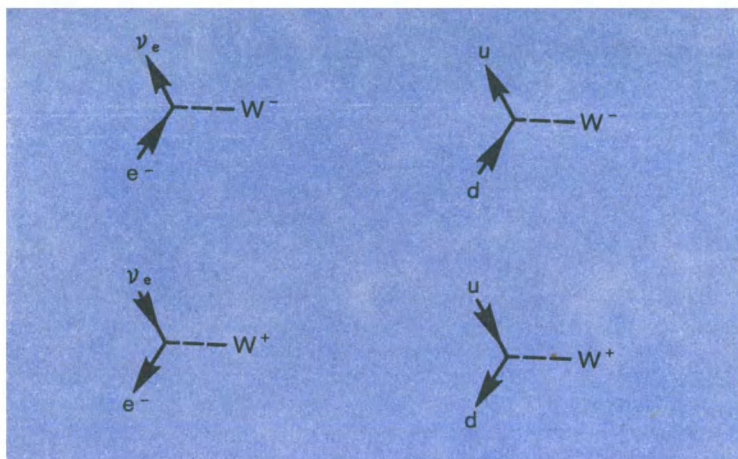


Рис. 83. Элементарные взаимодействия W -бозонов с лептонами и кварками. Электрон превращается в нейтрино с испусканием виртуального W -бозона. Аналогично u - и d -кварки могут превращаться друг в друга, испуская или поглощая W -бозон

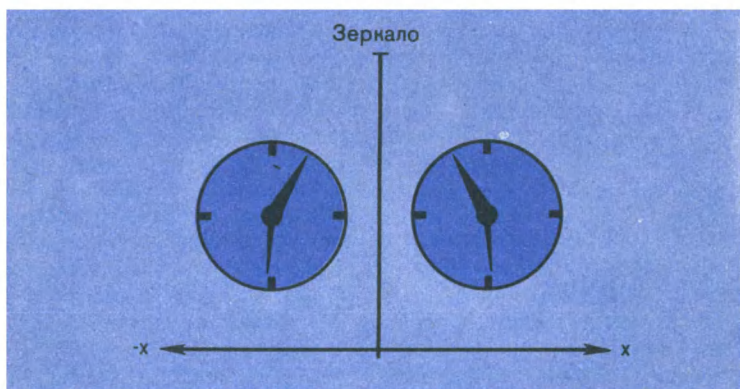


Рис. 84. Зеркальное отражение приводит к инверсии пространственных координат, причем тех, которые перпендикулярны зеркалу (в данном случае указана ось x). Можно заметить разницу в показаниях часов. В то время как на правых часах без пяти шесть, на левых — пять минут седьмого

с зеркальным отражением, и называемой *четностью*. Рассмотрим, например, рассеяние двух электронов. Этот процесс можно наблюдать как непосредственно, так и с помощью зеркала. Во втором случае мы видим процесс, отличающийся от первого изменением знака одной из пространственных координат (рис. 84). Вопрос, который мы ставим, заключается в следующем: является ли наблюдаемый нами в зеркале процесс одним из мыслимых физических процессов? Может ли этот процесс быть действительно реализован в природе? Если дело обстоит именно так, то говорят, что четность сохраняется.

Не только электродинамика, но и классическая механика инвариантна относительно преобразования четности. Механические процессы, отличающиеся лишь отражением в зеркале, протекают одинаково. Так, например, автомобиль, изготовленный на заводе и предназначенный для немецкого рынка, отличается только отражением в зеркале от автомобиля того же типа, поставляемого на английский рынок. В первом автомобиле рулевое колесо находится слева, а во втором — справа. В остальном оба автомобиля одинаковы. Они одинаково быстро ускоряются, имеют одинаковую максимальную скорость и т. п. То, что это так, основано на инвариантности законов механики по отношению к преобразованиям четности.

Поверхностный наблюдатель может полагать, что инвариантность законов природы по отношению к преобразованиям четности есть нечто само собой разумеющееся. Это, однако, неверно. Не все в природе симметрично по отношению к отражению в зеркале. Так, например, подавляющее большинство людей имеют сердце с левой стороны. Но

если мы будем наблюдать человека в зеркале, сердце окажется с правой стороны тела. Мы можем представить себе людей, у которых все поменялось сторонами. В принципе мы можем создать человека, точно совпадающего с зеркальным отражением существующего человека. Все процессы механического, электрического и химического типов, протекающие внутри человеческого тела, симметричны по отношению к отражению в зеркале. На этом основании можно ожи-

дать, что отраженный в зеркале человек не будет отличаться от нормального. Температура его тела будет равна температуре тела нормального человека, точно так же, как пульс, высшая нервная деятельность. Мы смогли бы узнать такого человека только потому, что он для приветствия подавал бы левую руку. И все

же природа не использует возможность существования отраженных в зеркале людей. Все люди имеют сердце с левой стороны (за исключением аномальных случаев).

С чем-то похожим сталкиваемся мы и при изучении белковых молекул. Оказывается, что большинство протеинов состоит из молекул в форме винта. Но неожиданность заключается в том, что построенные живыми организмами белковые молекулы выглядят как левые винты. (Большинство используемых в технике винтов являются правыми, т. е. винтами, для завинчивания которых надо вращать их направо. Левый винт получается из правого с помощью отражения в зеркале.) Это правило выполняется и для белков, созданных бактерией, и для белков, образующихся в человеческом теле. Соответствующие "правовращающие" белковые молекулы не встречаются в мире живых существ. Но это не дает никаких оснований для предположения, что подобные белки вообще не могут существовать. На самом деле, вполне возможно создать в химических лабораториях, т. е. без непосредственного участия живых организмов, простые белковые молекулы.

Результат этих опытов: образуется равное число левовращающих и правовращающих белковых молекул. Это есть следствие того, что протекающие при создании белка химические процессы инвариантны по отношению к отражению в зеркале. Иногда правовращающие белки можно при определенных условиях использовать вместо левовращающих. Ими можно даже без особых затруднений накормить подопытное животное.

В теле животного "неправильные" белковые молекулы разлагаются на свои составные части и в конце концов вновь собираются в белковые молекулы, на этот раз уже левовращающие. После окончания процесса пищеварения в теле животного обнаруживаются только левовращающие молекулы.

Откуда же знают живые существа, что они должны образовывать только левовращающие белковые молекулы? Несомненно, что во всех живых организмах белковые молекулы образуются по определенной программе, сравнимой с программой компьютера, в которую заложено указание строить только левовращающие белки. Эта программа передается потомству благодаря наследственности.

Но почему вообще существует такая программа? Не было ли проще природе допустить как левовращающие, так и правовращающие белки? В процессе развития жизни на Земле должно было что-то произойти, что и определило левое направление вращения молекул. До сего дня это явление не удается объяснить. Оно выглядит как потеря

**Природа
закручивает
налево**

**Почему нет
правовращаю-
щих белков?**

зеркальной симметрии — природа использует только "левовращающие" белковые молекулы.

В начале 50-х годов некоторые физики-ядерщики поставили вопрос: действительно ли четность сохраняется в слабом взаимодействии? Американские теоретики Т. Ли и Ч. Янг предложили, в частности, несколько экспериментов для того, чтобы ответить на этот вопрос. Через очень короткое время появился и ответ: слабые взаимодействия не сохраняют четность. Таково было заключение, которое можно было сделать из результатов опытов, выполненных профессором Ц. Ву и ее сотрудниками. (Эксперимент был выполнен в 1956 г. в Колумбийском университете в Нью-Йорке.) Чтобы измерить эффект нарушения четности в слабом взаимодействии, изучался слабый распад кобальта, точнее говоря, изотопа кобальта ^{60}Co , на никель. Атомное ядро ^{60}Co превращалось в ядро никеля, испуская при этом электрон и антинейтрино:



Этот процесс происходит тогда, когда один из нейтронов внутри ядра кобальта распадается по знакомой нам схеме β -распада на протон, электрон и антинейтрино.

Чтобы установить возможное нарушение четности, используется следующий прием. Ядра атома кобальта обладают моментом импульса; это означает, что они вращаются вокруг собственной оси. С помощью магнитного поля можно ориентировать моменты импульсов кобальтовых ядер таким образом, чтобы все имеющиеся ядра вращались в одну сторону — либо направо, либо налево. Допустим, что мы расположили распадающиеся атомы кобальта в одной плоскости (рис. 85); все ядра кобальта вращаются направо. Сделаем теперь зеркальное отражение в плоскости, образованной атомами кобальта. Вращающиеся направо ядра кобальта превратятся во вращающиеся налево. Будем наблюдать теперь за испускаемыми при распаде электронами. Они могут вылетать вверх или вниз по отношению к образованной атомами кобальта плоскости. Если в слабом взаимодействии четность сохраняется, мы должны ожидать, что вверх будет лететь столько же электронов, сколько и вниз. Именно в этом заключается симметрия относительно зеркального отражения в плоскости, образованной атомами кобальта.

Проделанный г-жей Ву эксперимент показал, что электроны предпочитают испускаться вниз, точнее говоря, в направлении, противоположном тому, которое задается моментом импульса ядра. Было найдено, что вниз испускается на 30% больше электронов, чем вверх. Следовательно, слабое взаимодействие нарушает четность.

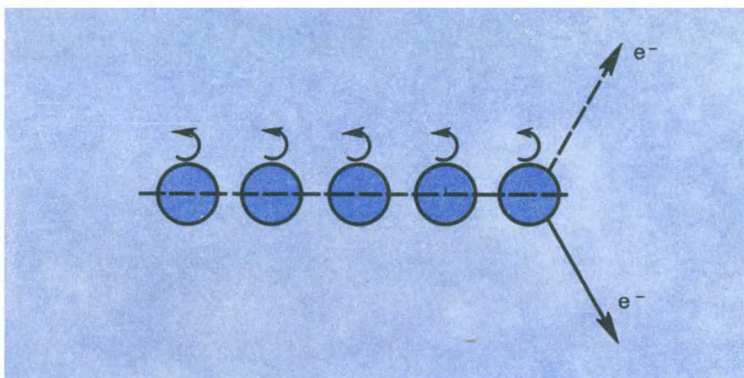


Рис. 85. Некоторое количество вращающихся слева направо ядер кобальта (если смотреть снизу) расположены на плоскости (указана пунктиром). Если в процессе распада четность сохраняется, то следует ожидать, что вверх и вниз по отношению к плоскости будет вылетать равное число электронов. Экспериментально обнаружено, что электроны преимущественно летят вниз

Эксперимент г-жи Ву не объяснял, конечно, того, как нарушается четность в слабом взаимодействии. Является ли, например, нарушение четности разным для мюонов и для кварков? Как обстоит дело с распадами странных частиц? Чтобы ответить на эти вопросы, требовались детальные исследования.

Было установлено, что наблюдаемое в природе нарушение четности имеет очень простую структуру. Рассмотрим фермион, например электрон или кварк. Фермион состоит из левого и правого фермионов. Например, правый электрон является частицей, спин которой направлен по импульсу. Он вращается относительно импульса в виде правого

Левые и правые фермионы винта (рис. 86). Левый электрон образует аналогичным образом частицу, спин которой противоположен направлению импульса. Поскольку при зеркальном отражении правый винт переходит в левый, правый электрон превращается в левый и наоборот. Таким образом, можно изучать нарушение четности в слабом взаимодействии, специально исследуя реакции с левыми и правыми фермионами.

Мы знаем, что электромагнитное взаимодействие сохраняет четность. Отсюда вытекает, что взаимодействие фотона с левым электроном идентично соответствующему взаимодействию с правым электроном. Иными словами, фотон "демократично" вообще не замечает разницы между левым и правым электронами.

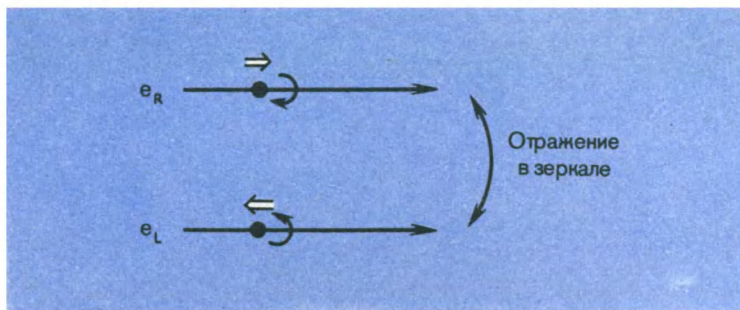


Рис. 86. Спин правого электрона e_R направлен по импульсу. Электрон при этом вращается как правый винт. Спин левого электрона e_L направлен в сторону, противоположную импульсу. При отражении в зеркале правый электрон переходит в левый

Положение в слабом взаимодействии совершенно иное. Оказывается, что в слабом взаимодействии заряженных токов принимают участие только левые фермионы. **W -бозоны выбирают левое** Правые лептоны и кварки игнорируются. По этой причине W -бозоны тоже взаимодействуют только с левыми фермионами, но не с правыми. В этом взаимодействии W -бозонов отличается от взаимодействия фотонов.

Почему в природе слабое взаимодействие предпочитает левые фермионы, мы не знаем; нам следует принять это как данное. Однако очень примечательно, что "тяга к левому" обнаруживается не только в слабых взаимодействиях электрона и u - и d -кварков, но и у "тяжелых" лептонов μ и τ , так же как и у тяжелых кварков s и c . Таким образом, оказывается, что слабое взаимодействие обладает особым рода универсальностью. Взаимодействие W -бозонов с лептонами и кварками является универсальным. Ниже показано, что эту универсальность можно понять в рамках единой теории электромагнитных и слабых процессов.

ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СЛАБЫХ ПРОЦЕССОВ

Мы указывали выше, что W -бозоны могут превращать электроны в нейтрино и наоборот. Это обстоятельство напоминает аналогичную ситуацию в хромодинамике. Как мы видели, там глюоны обладают способностью превращать друг в друга кварки разного "цвета". Например, глюон, взаимодействуя с кварком, может превратить красный кварк в зеленый. Это происходит потому, что глюоны сами преобразуются по отношению к "цветовым" преобразованиям как заряды "цветовой" группы $SU(3)$. В слабом взаимодействии ситуация аналогична. W -бозоны ведут себя как слабые заряды. Поэтому можно попытаться понять и слабые взаимодействия в рамках калибровочной теории. Какой должна быть соответствующая калибровочная группа? В сильном взаимодействии мы обнаружили группу $SU(3)$ "цветовых" преобразований, установив, что должны существовать три разных "цвета" у кварка. Похожим образом можно определить группу для слабого взаимодействия. По отношению к слабому взаимодействию лептоны и кварки выступают всегда как дублеты:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \text{и т. д. (L означает левый)}.$$

Поэтому соответствующая группа симметрии есть совокупность всех преобразований внутри дублетов. Мы уже познакомились выше с такой симметрией при изучении сильных взаимодействий. Там мы обнаружили, что группа $SU(2)$ является (изоспиновой) группой симметрии, описывающей все преобразования дублета $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$. Таким образом, искомая калибровочная группа слабого взаимодействия должна быть группой $SU(2)$. Правда, эта симметрия непосредственно не связана с изоспиновой симметрией. Иногда симметрию слабого взаимодействия называют *слабым изоспином*.

Изучение изоспиновой симметрии в сильном взаимодействии показало, что группа $SU(2)$ обладает тремя различными зарядами. Два из них можно легко связать с введенными выше слабыми зарядами, т. е. с зарядами, переводящими верхние компоненты слабых дублетов в нижние и наоборот, например $u_L \rightarrow d_L$ и $\nu_e \rightarrow e$ и наоборот. Эти заряды изменяют электрический заряд на единицу. Однако третий заряд электрически нейтрален. Как следует интерпретировать этот третий слабый заряд? Не является ли он тем слабым зарядом, который нужен для описания взаимодействия нейтральных токов, или ситуация сложнее?

Прежде, чем мы попытаемся ответить на этот вопрос, необходимо обсудить еще одну проблему, на которую до сих пор мы не обращали внимания. Мы собираемся развить калибровочную теорию слабого взаимодействия. Нашей целью является интерпретация W - и Z -бозонов как калибровочных бозонов в теории, т. е. как аналогов глюонов в хромодина-

W - и Z -бозоны как калибровочные бозоны

ответствующих калибровочных бозонов. Во всяком случае, теоретики не знают, как сделать это без того, чтобы теория не приводила к бессмысленным результатам, например при расчете процессов рассеяния.

Но существует возможность породить массы калибровочных бозонов, не вводя их явно в теорию. На эту возможность указали некоторые теоретики в 1965 г. Способ заключается в том, чтобы наряду с калибровочными бозонами ввести дополнительные объекты, а именно скалярные бозоны. Взаимодействие этих скалярных объектов с калибровочными

Массы порождаются путем спонтанного нарушения симметрии

бозонами строится таким образом, чтобы калибровочные бозоны эффективно приобрели некоторую массу. Такой способ порождения масс называют *спонтанным нарушением симметрии*, так как одновременно разрушается соответствующая калибровочная симметрия. Мы не будем подробнее обсуждать механизм спонтанного нарушения симметрии, так как иначе нам пришлось бы слишком погрузиться в математические подробности.

Подчеркнем лишь, что с помощью спонтанного нарушения симметрии можно ввести массы калибровочных бозонов слабого взаимодействия таким образом, что теория не приводит при больших энергиях к бессмысленным результатам. Это было показано в 1971 г. Герардом т'Хофтом. В то время т'Хофт был аспирантом в исследовательской группе Мартина Вельмана в Утрехте (Голландия). Работы т'Хофта и Вельмана внесли большой вклад в развитие калибровочной теории слабых и электромагнитных взаимодействий.

Простейшая возможность построить калибровочную теорию слабого взаимодействия заключается в следующем. Используем в качестве калибровочной группы описанную выше группу слабого изоспина $SU(2)$. Левые кварки и лептоны являются дублетами по отношению к слабому изоспину. Поскольку правые фермионы не участвуют в слабом взаимодействии, их можно рассматривать как синглеты по отношению к группе $SU(2)$. При этом мы приходим к уже обсуждавшейся ситуации. Возникают три калибровочных бозона, интерпретируемые нами как два W -бозона и Z -бозон.

Подчеркнем, что в эту схему не включено электромагнитное взаимодействие. Получилась калибровочная теория одного слабого взаимодействия. Может ли такая теория правильно описывать слабое взаимодействие? Из описанной выше теории вытекает простое предсказание. Все три слабых заряда

Нейтральный ток и правые фермионы

одинаковым образом взаимодействуют с фермионами, что обусловлено симметрией по отношению к слабому изоспину. Но мы знаем, что W -бозоны вступают во взаимодействие только с левыми фермионами. Это же должно, следовательно, выполняться и для взаимодействия нейтральных токов. Отсюда возникает простое предска-



Рис. 87. Теоретики Шелдон Глешоу (слева) и Стивен Вайнберг во время пресс-конференции в Гарвардском университете по случаю присуждения им Нобелевской премии по физике 1979 г.

ние, которое можно проверить экспериментально: только левые кварки и лептоны должны взаимодействовать с Z -бозоном, т. е. нейтральный ток включает, как и заряженный, только левые фермионы.

Вплоть до 1977 г. эксперименты были недостаточно точны для того, чтобы проверить, принимают ли правые фермионы участие во взаимодействии нейтральных токов. Лишь летом 1977 г. удалось однозначно установить, что во взаимодействии с Z -бозоном принимают участие как левые, так и правые фермионы. Окончательно ясность в этот вопрос внесли нейтринные эксперименты в ЦЕРН. Таким образом, наше простейшее предположение относительно калибровочной теории слабого взаимодействия рухнуло и надо было искать другую теорию.

Мы уже знаем, что электромагнитное взаимодействие включает как левые, так и правые фермионы. Нечто похожее происходит, как показывает опыт, и со взаимодействием нейтральных токов. Отсюда следует,



Рис. 88. Пакистанский физик Абдус Салам, получивший совместно с Глешоу и Вайнбергом Нобелевскую премию по физике 1979 г. В течение многих лет Салам является профессором теоретической физики в Королевском колледже в Лондоне и одновременно директором Международного исследовательского центра теоретической физики в Триесте

что нужно попытаться построить не отдельную теорию слабого взаимодействия, а единую теорию слабого и электромагнитного взаимодействий. Теории подобного рода изучались довольно давно, в частности Шелдоном Глешоу в 1962 г., Абдусом Саламом и Джоном Уордом в 1964 г. и, наконец, Стивеном Вайнбергом в 1967 г. и опять же Саламом в 1968 г. Все существующие на сегодняшний день экспериментальные данные согласуются с простейшей версией подобных теорий и имеются неплохие шансы на то, что эта теория по крайней мере очень близка к "истинной" теории слабого взаимодействия. За создание такой теории Глешоу, Салам и Вайнберг получили Нобелевскую премию по физике 1979 г. (рис. 87 и 88).

В единой теории электромагнитного и слабого взаимодействий (или, как теперь по-новому говорят, электрослабого взаимодействия) нужно совместно "переработать" четыре калибровочных бозона: два W -бозона, Z -бозон и фотон. По этой причине необходимо расширить калибровочную группу. Простейшая возможность заключается в том, чтобы ввести дополнительно группу $U(1)$. [Группе $U(1)$ соответствует один-единственный заряд.] В результате получается калибровочная группа $SU(2) \times U(1)$, т. е. группа, состоящая из произведения двух групп.

Представим себе, что мы используем такую группу и порождаем массы калибровочных бозонов с помощью механизма спонтанного нарушения симметрии. Возникает весьма примечательное явление. Оба W -бозона приобретают определенную массу, которую сначала можно выбрать произвольно. Два других калибровочных бозона — они электрически нейтральны — дают следующий массовый спектр. Нейтральный калибровочный бозон приобретает массу, которая несколько больше массы W -бозона, а второй нейтральный бозон остается безмассовым. Отсюда

**Фотон и Z -бозон
— коллеги**

ясна интерпретация этих бозонов. Безмассовый бозон идентифицируется с фотоном, а массивный нейтральный бозон интерпретируется как Z -бозон. Мы получаем теорию, объединяющую электромагнитное и слабое взаимодействия. В частности, в такой теории фотон и Z -бозон тесно связаны друг с другом. Ни один не может существовать без другого.

В этой теории интенсивность взаимодействия W - Z -бозонов с фермионами по существу задается электромагнитным взаимодействием. Форма взаимодействия нейтрального тока однозначно фиксирована. Так как электромагнитное взаимодействие тесно связано с взаимодействием нейтрального тока, отсюда следует, что Z -бозон взаимодействует как с левыми, так и с правыми фермионами.

Правда, невозможно точно предсказать интенсивность взаимодействия нейтрального тока, поскольку она зависит еще от одного параметра, не определяющегося в рамках теории, а требующего экспериментального определения. Принято характеризовать этот параметр некоторым углом,

обозначаемым θ_W (так называемый слабый угол или, как иногда говорят, угол Вайнберга). Этот угол определяет, насколько сильно связаны друг с другом электромагнитное и слабое взаимодействия. В частном случае $\theta_W = 0$ такая связь вообще отсутствует. Мы тогда приходим к обсуждавшейся выше ситуации, отвергаемой экспериментом. В конце 70-х годов удалось с большой точностью установить значение этого угла. Экспериментальное значение θ_W составляет $27-30^\circ$.

Из $SU(2) \times U(1)$ -теории электрослабого взаимодействия следует важное предсказание. Массы W - и Z -бозонов оказываются фиксированными, если известен параметр θ_W . Отсюда получается, что массы W -бозонов должны составлять примерно 80 ГэВ, а масса Z -бозона — 90 ГэВ. В январе 1983 г. физики, работающие на уже упоми-

Массы W - и Z -бозонов

навшемся коллайдере в ЦЕРН, добились триумфального успеха. С помощью двух разных детекторов частиц (см. также рис. 72) удалось наблюдать W -бозоны. Они рождались при соударениях кварков и антикварков высоких энергий и затем быстро распадались, например на электрон или позитрон и нейтрино. Это и наблюдалось; масса W -бозонов оказалась равной 81 ГэВ, что согласуется с предсказанием теории¹.

До сих пор мы обсуждали только слабые взаимодействия u - и d -кварков, электронов и электронных нейтрино. А как обстоит дело с другими лептонами и кварками? Мы можем без труда включить их в нашу схему, если добавим новые дублеты по отношению к слабому изоспину. В случае лептонов можно записать три дублета:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L.$$

¹ В январе 1983 г. появилось первое сообщение о том, что обнаружено примерно пять событий рождения W с массой около 80 ГэВ. К осени 1983 г. стали известны уже десятки событий рождения W и, кроме того, примерно десять событий рождения Z -бозона с массой 90 ГэВ. Таким образом, считается несомненным, что предсказываемые теорией калибровочные бозоны открыты. — *Прим. пер.*

Правые лептоны интерпретируются как $SU(2)$ -синглеты. Для кварков мы строим аналогичные дублеты. Чтобы "включить в игру" s - и c -кварк, запишем дублеты

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L.$$

Правда, здесь возникает одно усложнение. Кварки d и s , входящие в дублеты, являются на самом деле суперпозициями d - и s -кварков. W -бозон превращает u -кварк не всегда в d -кварк, а иногда превращает u -кварк в s -кварк (с вероятностью 5%). Аналогично W -бозон не всегда переводит c -кварк в s -кварк, а иногда и в d -кварк (также с вероятностью 5%).

Это обстоятельство называют смешиванием d и s . Мы отметили его, поставив штрихи у символов d' и s' . До сих пор не известно, почему существует такое смешивание. Однако оно очень важно. Если бы d - s -смешивание отсутствовало, некоторые "странные" частицы были бы стабильны, т. е. жили бы практически бесконечно долго, как протон. На самом же деле все эти частицы живут около 10^{-10} с.

Очевидно, читатель может задать вопрос о слабом взаимодействии нового b -кварка. Об этом до сего дня очень мало известно. Одним из следствий существования нового b -кварка является то, что должны существовать новые мезоны, состоящие из одного b -кварка и одного легкого кварка, в частности мезоны, имеющие состав $\bar{u}b$ (называемые B^-) и $\bar{d}b$ (называемые B^0). Ожидается, что масса этих мезонов равна примерно 5 ГэВ. Чтобы исследовать слабое взаимодействие b -кварка, нужно обнаружить на опыте эти мезоны и изучить их слабые распады. Летом 1980 г. физикам на накопительном кольце Корнеллского университета в США удалось получить косвенные указания на существование B -мезонов. Оказалось возможным установить и их массу. Она лежит в интервале между 5,2 и 5,3 ГэВ, что согласуется с теоретическими предсказаниями.

Открытие B -мезонов

Как представляют себе физики слабое взаимодействие b -кварка? Рассмотрим еще раз нашу схему лептонов и кварков. У нас есть три лептонных дублета, но всего лишь два кварковых дублета. Для соблюдения симметрии между лептонами и кварками необходимо ввести еще один дублет для кварков. Следовательно, необходимо наряду с b -кварком ввести еще один тяжелый кварк, обладающий электрическим зарядом $2/3$. Этот кварк обозначают t (названия t и b происходят от английских слов *top* — верхний и *bottom* — нижний; иногда эти названия кварков связывают со словами *truth* — истина и *beauty* — красота). Таким образом, возникают три дублета

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}.$$

Что можно сказать о гипотетическом t -кварке? На накопительном кольце PETRA в Гамбурге проводился поиск эффектов, вызванных возможным существованием t -кварка, в частности поиск мезонов со структурой $\bar{t}t$. До сих пор не получено никаких указаний на это. Отсюда

следует, что масса t -кварка должна быть больше 18 ГэВ; это означает, что t -кварк по крайней мере в 3 раза тяжелее b -кварка. При этих обстоятельствах могут пройти многие годы, прежде чем мы узнаем, существует ли t -кварк и какова его масса.

В случае, если b -кварк вместе с t -кварком образует дублет относительно слабого изоспина, считается, что и он участвует в описанном выше явлении смешивания. По этой причине кварки d' и s' содержат с малой вероятностью и b -кварк.

По ряду теоретических оснований считается, что b -кварк относительно сильно смешивается с s -кварком и слабее — с d -кварком. Поэтому

b -кварки распадаются на "очарованные"

b -кварк должен в основном распадаться, превращаясь в результате испускания виртуального W -бозона в c -кварк. Следовательно, при распаде B -мезонов должно быть видно особенно много "очарованных" частиц. Полученные физиками в Корнелле результаты хорошо согласуются с этой гипотезой.

Очевидно, что в течение 80-х годов станет возможным детально исследовать слабые распады B -мезонов. Если удастся установить, что b -кварк на самом деле распадается в результате слабого смешивания с s -кварком, то это будет серьезным указанием на то, что должен существовать t -кварк. Правда, из этих исследований мы ничего не узнаем о массе t -кварка. Поиск t -кварка остается задачей экспериментаторов¹.

Где t -кварк?

19

КОНЧИТСЯ ЛИ ФИЗИКА?

Создание конкретных теорий электрослабого взаимодействия [$SU(2) \times U(1)$ -теория] и сильного взаимодействия (хромодинамика) явилось замечательным рывком вперед в современной физике. В рамках этих теорий стали понятными все явления в мире элементарных частиц, охватывающие область слабого, электромагнитного и сильного взаимодействий. Тем не менее внутри самих теорий существует трудная проблема.

Загадочные электрические заряды

Не объяснено, почему электрические заряды лептонов и кварков квантованы, т. е. почему в природе встречаются только совершенно определенные заряды, кратные электрическому заряду электрона.

Электрические заряды электронов и мюонов равны —1. В то же время электрические заряды кварков равны либо $2/3$, либо $-1/3$. Все выглядит так, будто существует скрытый закон, заставляющий разные частицы иметь совершенно определенные электрические заряды.

О каком законе может идти речь? В $SU(2) \times U(1)$ -теории имеются два заряда: заряд нейтрального слабого изоспина и другой заряд, обсуждавшийся выше. В рамках $SU(2) \times U(1)$ -теории электрический заряд является определенной комбинацией этих двух зарядов, зависящей, правда, от одного свободного параметра, а именно слабого угла смешивания θ_W . Отсюда вытекает, что электрические заряды не обязаны быть

¹ В 1984 г. получены первые экспериментальные указания на существование t -кварка с массой 40 ГэВ. — Прим. пер.

квантованными, а могут быть совершенно произвольными. Например, нетрудно сделать так, чтобы электрические заряды кварков равнялись не $2/3$, а $2/\pi$. Чтобы окончательно понять наблюдаемую квантованность электрического заряда, мы должны попытаться установить значение слабого угла смешивания θ_W . Из опыта известно, что этот угол равен приблизительно 30° . Что же следует сделать, чтобы этот угол перестал быть свободным параметром, а был бы фиксированным? Ниже мы опишем одну из возможностей добиться этого. Но прежде, чем мы перейдем к обсуждению такой возможности, необходимо упомянуть еще об одной проблеме. В рамках $SU(2) \times U(1)$ -теории удается связать вместе электромагнитное и слабое взаимодействия. Но наряду с этими взаимодействиями существует и сильное взаимодействие, так что мы вправе поставить вопрос, возможно ли построить такую теорию, которая объединяла бы сильное, электромагнитное и слабое взаимодействия.

Объединение всех взаимодействий

В рамках подобной теории должно быть нетрудно не только понять наблюдаемую структуру сильного взаимодействия, т. е. хромодинамические силы, но и интенсивность сильного взаимодействия. Мы уже упоминали, что константа связи сильного взаимодействия довольно велика по сравнению с константами связи электромагнитного и слабого взаимодействий. Измеренное значение хромодинамической постоянной тонкой структуры, ответственной за явления сильного взаимодействия в области энергий порядка нескольких гигаэлектрон-вольт, равно 0,2. Сравнивая это значение со значением электромагнитной постоянной тонкой структуры, равной $1/137$, видим, что сильное взаимодействие много сильнее электромагнитного. В рамках единой теории всех взаимодействий должно быть возможным понять это обстоятельство. Но как построить такую единую теорию?

Рассмотрим вновь различные калибровочные группы в хромодинамике и теории электромагнитного и слабого взаимодействий. Объединяя их, получаем произведение трех разных групп

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1).$$

Единую теорию всех взаимодействий можно построить в том случае, если удастся уложить эти различные группы в одну большую группу. Для математика здесь не возникает никаких проблем. Нетрудно найти группу, содержащую в качестве подгрупп три упомянутые группы. Но главная проблема заключается в построении фермионов. Когда мы вводим большую группу, мы должны позаботиться, чтобы фермионы совершенно определенным образом преобразовывались по отношению к этой группе. Таким образом, в отношении фермионов у нас нет свободы выбора. Они являются либо "цветовыми" синглетами, как лептоны, либо "цветовыми" триплетами, как кварки. Оказывается, что лишь

Кварки и лептоны нужно поженить

очень немногие группы обладают тем свойством, что содержат внутри себя хромодинамическую группу $SU(3)$ и электрослабую группу $SU(2) \times U(1)$ и при этом правильно воспроизводят фермионы. Наименьшая группа, содержащая как $SU(3)$, так и $SU(2) \times U(1)$, — это группа $SU(5)$. В рамках этой группы достигается к тому же правильное описание фермионов. Чтобы увидеть это, рассмотрим сначала только легчайшие фермионы, т. е. электрон и

его нейтрино, а также u - и d -кварки. Эти фермионы можно записать следующим образом, включив соответствующие античастицы и учтя три "цвета":

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, e^+, \begin{pmatrix} u & u & u \\ d & d & d \end{pmatrix}, (\bar{u}\bar{u}\bar{u}), (\bar{d}\bar{d}\bar{d}).$$

Как видно, возникает всего 15 фермионов (с учетом трех "цветов" кварков). Разделим эти 15 фермионов на две системы:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{vmatrix} \bar{d}\bar{d}\bar{d} \end{vmatrix}, \begin{pmatrix} u & u & u \\ d & d & d \end{pmatrix} \begin{vmatrix} \bar{u}\bar{u}\bar{u} \end{vmatrix}, e^+.$$

Первая система содержит всего 5, а вторая — 10 фермионов. Но теперь оказывается, что обе эти фермионные системы образуют, как говорят математики, различные представления группы $SU(5)$. Весьма впечатляет то, что в эти представления вошли именно те лептоны и кварки, которые нужны. Теперь уже электрические заряды различных фермионов не произвольны, а строго фиксированы. Чтобы убедиться в этом, достаточно рассмотреть первую систему фермионов. Она состоит из электрона, его нейтрино и трех анти- d -кварков. По отношению к группе $SU(5)$ эти фермионы преобразуются по так называемому пятимерному представлению.

Группа $SU(5)$ содержит всего 24 различных заряда. [Чем больше группа, тем больше зарядов она содержит. Группа $SU(2)$, знакомая нам по обсуждению изоспина, имеет три заряда. Группа $SU(3)$ хромодинамического взаимодействия обладает восемью различными зарядами.] Так как нам надо добиться квантованности электрического заряда, нужно идентифицировать электрический заряд с одним из 24 зарядов группы $SU(5)$.

Но заряды какой-то группы всегда обладают тем свойством, что в сумме должен получаться нуль, если сложить заряды отдельных элементов какого-то представления. По этой причине электрические заряды пяти фермионов, которые мы объединили вместе, должны в сумме давать нуль. Так как электрический заряд электронного нейтрино

**Соотношение
между зарядами
кварка
и электрона**

равен нулю, мы получаем соотношение между электрическим зарядом электрона и \bar{d} -кварка: $Q(e^-) = -Q(\bar{d})/3$. Таким образом, мы получаем как раз те заряды, которые наблюдаются в природе. Аналогично, рассматривая вторую группу фермионов, можно вывести электрический заряд u -кварка.

Получается, что он должен равняться $2/3$. Таким образом, в рамках $SU(5)$ -теории электрические заряды оказываются квантованными. Найденные заряды соответствуют наблюдаемым зарядам кварков.

Помимо этого удастся вычислить угол смешивания θ_W в теории $SU(2) \times U(1)$, а также хромодинамическую постоянную тонкой структуры. Получаются следующие значения:

$$\theta_W \approx 38^\circ, \quad \alpha_s = 8\alpha/3 \approx 1/50.$$

Оба эти значения, определенные с помощью теории групп, вовсе не согласуются с экспериментальными значениями. Хромодинамическая

постоянная тонкой структуры, определенная из различных экспериментов, примерно в 17 раз больше приведенного выше значения. Слабый угол смешивания θ_W также равен не 38° , а лишь 27° . Все это представляет серьезную трудность для $SU(5)$ -теории.

Однако существует и еще одна проблема. Как мы видели, различные представления фермионов содержат как лептоны, так и кварки.

Кварки превращаются в лептоны

Если теперь рассмотреть группу $SU(5)$ как калибровочную, то возникнет столько же калибровочных бозонов, сколько имеется зарядов, т. е. 24. Эти 24 калибровочных бозона включают 8 уже известных глюонов хромодинамической теории, оба W -бозона, Z -бозон и фотон. Остающиеся 12 бозонов являются новыми, определяющими новые типы взаимодействий. Такие взаимодействия в высшей степени примечательны. Дело в том, что они могут превращать лептон в кварк и наоборот. Оказывается, что как следствие существования

Нестабильный протон

этих новых взаимодействий протон не должен быть стабильным, а может распадаться. Например, протон может распасться на позитрон и нейтральный π -мезон (см. также рис. 10). Очевидно, что это представляет серьезнейшую проблему для теории, поскольку мы знаем, что протон чрезвычайно стабилен. Измеренное время жизни протона больше 10^{29} лет (см. также обсуждение этого вопроса в гл. 4).

В $SU(5)$ -теории время жизни протона зависит от масс 12 новых калибровочных бозонов, о которых мы выше говорили. Основываясь на наблюдаемой стабильности протона, можно установить границу на массы этих калибровочных бозонов. Эта масса оказывается чудовищно большой: новые калибровочные бозоны должны быть тяжелее 10^{15} ГэВ. Если теория верна, это означает, что объединение сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий становится реальностью лишь при энергиях свыше 10^{15} ГэВ. Отсюда в физике появляется новая шкала масс, связанная с массами новых бозонов.

Возникновение подобной новой энергетической или массовой шкалы приводит к интересному эффекту. Рассмотрим вновь различные констан-

Большое объединение при энергии 10^{15} ГэВ

ты связи известных нам взаимодействий. В случае справедливости $SU(5)$ -теории все эти константы взаимодействия должны быть при энергиях свыше 10^{15} ГэВ приблизительно равны, поскольку различные взаимодействия являются не чем иным, как различными проявлениями одного и того же единого взаимодействия. По этой причине следует ожидать, что при таких больших энергиях $SU(2) \times U(1)$ -угол смешивания на самом деле равен 38° , как получено выше. Кроме того, хромодинамическая постоянная тонкой структуры действительно равна в этом случае $8\alpha/3$. С другой стороны, наблюдаемые значения констант связи сильного и слабого взаимодействий получены из опытов, проведенных при относительно низких энергиях, во всяком случае, при энергиях, очень малых по сравнению с той энергией, при которой происходит объединение всех взаимодействий. Нет никаких оснований приравнивать измеренные при относительно низких энергиях константы связи тем константам, которые ожидаются при энергии свыше 10^{15} ГэВ. Однако есть возможность сделать определенные предсказания относительно констант связи при низких энергиях, если рассуждать следующим образом. Когда мы на-

Что различает лептоны и кварки?

блюдаем явления при энергии порядка 10^{15} ГэВ, при которой происходит объединение различных взаимодействий, то становится невозможным отличить эти взаимодействия друг от друга. Существует одно единое взаимодействие. Исчезает само различие между лептоном и кварком. Лептоны и кварки оказываются не чем иным, как различными проявлениями одного и того же типа фермионов. Однако если мы будем спускаться по шкале энергий и опустимся ниже критической энергии, при которой происходит объединение, то различные взаимодействия заживут собственной жизнью. При этом становится возможным

Единство кварков и лептонов

различить их, а также лептоны и кварки. В частности, можно наблюдать разные константы связи. Для сильного взаимодействия такая константа связи станет меняться в соответствии с законами хромодинамики, а аналогичные константы слабого и электромагнитного взаимодействий будут меняться по законам $SU(2) \times U(1)$ -теории. Таким образом, можно установить зависимость константы связи хромодинамики от той энергии, при которой происходит объединение всех взаимодействий.

Но рассуждать можно и по-другому. Поскольку хромодинамическая константа связи известна на основании различных экспериментов, можно вычислить значение той энергии, при которой наступает объединение взаимодействий. Получающийся результат очень неожиданен. Вычисления дают значение 10^{15} ГэВ, т. е. ту же самую энергию, которая получается из рассмотрения распада протона. Введение колоссальной энергии, равной

Связь между распадом протона и хромодинамикой

10^{15} ГэВ, позволяет одновременно разрешить обе упомянутые проблемы (распад протона и значение константы связи в КХД). До сих пор не известно, является это простым совпадением или действительно различные взаимодействия могут быть описаны единой теорией вроде $SU(5)$ -теории. Допустим, что последнее верно. Тогда можно ожидать, что протон нестабилен и его время жизни лишь ненамного превышает ту границу, которая установлена прошлыми экспериментами. В настоящее время в разных странах мира, в частности в США, делают попытки либо повысить границу для времени жизни протона, либо наблюдать его распад¹.

¹ К осени 1983 г. стали известны результаты первых опытов по поиску распада протона. Они осуществлены в Индии, во Франции и США. Хотя были сообщения о наблюдении нескольких случаев, похожих на распад протона, эти данные не считаются надежными. Во всяком случае, удалось существенно повысить границу времени жизни протона. Теперь она составляет $6 \cdot 10^{31}$ лет. Такая цифра находится в серьезном противоречии с предсказаниями простейшей модели объединения всех взаимодействий — $SU(5)$ -теории. По-видимому, следует признать, что эта модель неверна. В то же время существует несколько других моделей "большого объединения" всех взаимодействий, в рамках которых нет таких жестких ограничений на время жизни протона, как в $SU(5)$ -теории. Таким образом, сама идея "большого объединения" живет и развивается. Одновременно проводятся дальнейшие опыты по поиску распада протона. — *Прим. пер.*

В одном из этих экспериментов предусматривается разместить в бывших соляных коях под Кливлендом (США, штат Огайо) около 10 тыс. т воды и в течение года проводить наблюдения с помощью соответствующей электронной аппаратуры. (Такой эксперимент необходимо проводить глубоко под землей, чтобы избавиться от помех, связанных с космическим излучением.) Другой эксперимент должен проводиться в туннеле под Монбланом.

Открытие нестабильности протона безусловно явилось бы важным событием. В отношении эксперимента ведется настоящая конкурент-

Умирают ли протоны?

Айленде сказал по этому поводу: "Мы все выражаем надежду и молимся за то, чтобы протон оказался стабильным. Но если ему все же суждено умереть, я желал бы, по крайней мере, чтобы он умер у меня на руках".

Трудно даже правильно предугадать важность явления распада протона для будущего развития физики и человеческой культуры. Если будет обнаружено, что вся материя, включая нас самих, в конце концов распадается, это станет поистине важным открытием (а для многих, вероятно, и большим потрясением). Однако нет никаких причин проявлять

Вещество превращается в энергию

по этому поводу беспокойство. Даже в случае, если протон действительно распадается за время 10^{33} лет, то для всех практических целей он является стабильным. Например, Земля за счет протонного распада теряла бы лишь один миллиграмм вещества за год. Вероятность того, что один из нуклонов в человеческом теле распадется за время жизни человека, составляет один процент.

Поскольку протон распадается в конце концов на лептоны и фотоны, это означает, что барионное число точно не сохраняется. Это может разрешить одну из загадок, с которой мы сталкиваемся в наши дни. Мы знаем, что наш мир заполнен материей, состоящей в основном из нуклонов, т. е. из кварков. Похоже на то, что антинуклоны, встречаются в нашем мире очень редко. Если бы барионное число сохранялось, это означало бы, что число барионов в мире постоянно. Число барионов при зарождении Вселенной было бы в точности таким же, как и сегодня. Никто не может объяснить, почему так должно быть, тем более что барионное число во Вселенной довольно велико. Было бы значительно естественнее, если бы при зарождении Вселенной это число равнялось нулю; таким образом, в самом начале было бы ровно столько же антибарионов, сколько барионов¹.

Но если барионное число не сохраняется, то вся история выглядит иначе. Как мы видели, нарушение закона сохранения барионного числа, например в $SU(5)$ -теории, обусловлено новыми взаимодействиями.

¹ Рассуждая о ранней Вселенной, автор подразумевает, что справедлив общепринятый сценарий рождения Вселенной в результате "большого взрыва" примерно $2 \cdot 10^{10}$ лет тому назад. См. по этому поводу литературу в конце книги. — *Прим. пер.*

При низких энергиях этими взаимодействиями можно по существу пренебречь, если не считать распада протона. Однако в начале развития нашей Вселенной энергии элементарных частиц были очень велики — много больше 10^{15} ГэВ. В этом случае новые взаимодействия имеют ту же силу, что и хромодинамическое или электромагнитное взаимодействие. Не может ли быть так, что новые взаимодействия ответственны за образование барионов во Вселенной? Некоторые теоретики занимались расчетами в этом направлении и нашли, что действительно наблюдаемое число барионов, т. е. нуклонов, во Вселенной можно понять в рамках единой теории всех взаимодействий. Точное их число зависит, вообще говоря, от неизвестных параметров. Тем не менее полученные результаты очень интересны. Будущие исследования покажут, идем ли мы здесь по верному пути.

Выше мы указывали, что единые теории, например $SU(5)$ -теория, предсказывают значение $SU(2) \times U(1)$ -угла смешивания, не согласующееся с тем, которое найдено из опыта. Но то, что мы выше говорили о сильном взаимодействии, верно и для электрослабого взаимодействия. Предсказания единых теорий справедливы лишь при энергиях выше 10^{15} ГэВ. Чтобы сделать какие-то предсказания в области энергий порядка нескольких гигаэлектрон-вольт, нужно экстраполировать поведение константы связи электрослабого взаимодействия от значения при энергии 10^{15} ГэВ до значения при нескольких гигаэлектрон-вольтах. В рамках $SU(2) \times U(1)$ -теории это удастся просто сделать. Оказывается, что значение слабого угла смешивания при нескольких гигаэлектрон-вольтах много меньше обсуждавшихся выше 38° . В результате вычислений получается значение 26° с точностью порядка 1° . Полученное значение угла смешивания очень хорошо согласуется с наблюдаемым θ_W . Это является еще одним указанием на то, что единая теория всех взаимодействий действительно существует и что подобная теория применима только при очень больших энергиях — порядка 10^{15} ГэВ.

Мы рассмотрели $SU(5)$ -теорию лишь как пример единой полевой теории взаимодействий. Это не должно означать, что мы отдаем ей особое предпочтение. За прошедшие годы разные

$SO(10)$ как калибровочная группа?

физики обсуждали и другие теории, которые можно считать не менее подходящими. Например, одна из таких теорий базируется на группе $SO(10)$. Эта группа несколько больше группы $SU(5)$. В качестве возможных калибровочных групп единых теорий обсуждались и еще большие группы.

До сих пор мы говорили только о единых полевых теориях, объединяющих сильное и электрослабое взаимодействия. Но кроме этих взаимодействий существует и тяготение (гравитационное взаимодействие). Возникает вопрос, как с ним быть. Альберт Эйнштейн потратил много лет своей жизни на то, чтобы единым образом описать гравитационное

Возрождение программы Эйнштейна

взаимодействие и максвелловскую электродинамику. Однако эта программа Эйнштейна не увенчалась успехом. Причина здесь главным образом в том, что во времена Эйнштейна слишком мало было известно о сильных и слабых взаимодействиях. Сегодня у нас есть конкретные теории этих взаимодействий. Кроме того, стало понятно, что эти взаимодействия можно описать с помощью калибровочных теорий, т. е. теорий, очень похожих на максвелловскую

электродинамику. Поэтому можно пытаться возродить к новой жизни старую программу Эйнштейна. Только при этом нужно попытаться найти единую схему гравитационного, сильного и электрослабого взаимодействия.

Хотя к настоящему времени в этом направлении проведено много исследований, никто еще не построил такую теорию гравитации и всех других взаимодействий. Задача представляется чрезвычайно трудной, тем более что гравитационное взаимодействие существенно отличается от всех других. Гравитационное взаимодействие таково, что оно имеет свой внутренний масштаб, определяющийся ньютоновской постоянной тяготения. Эта постоянная описывает интенсивность гравитационного взаимодействия, например ту силу, с которой притягивается к Земле падающее с дерева яблоко. В физике элементарных частиц полезно перевести ньютоновскую постоянную в энергетические единицы. Получается энергия порядка 10^{19} ГэВ — так называемая планковская энергия (ей соответствует характеристическая длина порядка 10^{-33} см). Примечательно то, что планковская энергия лишь немногим больше, чем найденная в рамках единых теорий энергия, имеющая порядок величины 10^{15} ГэВ.

Таким образом, может оказаться, что масштаб энергий, при котором объединяются сильное и электрослабое взаимодействия, тесно связан с планковской энергией. Построение подобной теории — вызов физикам-теоретикам нашего времени. Будущее покажет, каким образом гравитационное взаимодействие укладывается в общую схему сил, действующих между элементарными частицами.

Обсуждая объединение всех взаимодействий, мы не касались до сих пор специальной проблемы истинного числа лептонов и кварков.

Сколько лептонов и кварков?

Имеющиеся теории не говорят нам, сколько существует в природе лептонов и кварков. До сих пор мы по существу имели дело с 15 легкими фермионами, включающими электрон, его нейтрино, а также u - и d -кварки. Назовем эти фермионы

первым лептон-кварковым поколением.

Как обстоит дело с другими фермионами? Не видно никакой другой возможности, кроме как ввести следующие подобные поколения. Второе лептон-кварковое поколение состоит из мюона,

Второе поколение

его нейтрино, c - и s -кварка. С учетом различных "цветов" кварков и античастиц оно опять содержит 15 частиц. Поэтому второе лептон-кварковое поколение есть просто копия первого. Единствен-

ная разница между ними состоит в больших значениях масс фермионов второго поколения:

$$\begin{array}{cc} \text{I поколение} & \text{II поколение} \\ \left(\begin{array}{cc} \nu_e & : \quad u \quad \bar{u} \\ e^- & e^+ \quad : \quad d \quad \bar{d} \end{array} \right), & \left(\begin{array}{cc} \nu_\mu & : \quad c \quad \bar{c} \\ \mu^- & \mu^+ \quad : \quad s \quad \bar{s} \end{array} \right). \end{array}$$

Третье поколение полностью еще не собрано. Мы до сих пор знаем только T -лептон, его нейтрино и b -кварк. Чтобы заполнить поколение, требуется еще один кварк с зарядом $2/3$ — t -кварк. Как

Кварк t — недостающее звено в цепочке

существует, ожидается, что третье лептон-кварковое поколение выглядит так:

неоднократно отмечалось выше, до сих пор нет никаких указаний на существование t -кварка. Из экспериментов следует, что масса t -кварка должна быть больше 18 ГэВ. Но если t -кварк

$$\left(\begin{array}{cc} \nu_{\tau} & : & t \quad \bar{t} \\ \tau^{-} & \tau^{+} & : & b \quad \bar{b} \end{array} \right).$$

Но сколько всего лептон-кварковых поколений? Почему вообще существует больше, чем одно, поколение? Наш мир не слишком сильно изменился бы, если бы мы убрали из него все лептон-кварковые поколения, за исключением первого. Окружающий нас мир (галактики, звезды, Земля, мы сами) состоит из фермионов первого поколения. Фермионы других поколений можно породить только в лабораториях физики высоких энергий; относительно быстро они распадаются в результате слабого взаимодействия на фермионы первого поколения. Остается загадкой, зачем все же в мире существует более одного лептон-кваркового поколения. Будущая теория всех взаимодействий должна найти ответ на вопрос о числе лептон-кварковых поколений. В данный момент мы можем представить себе только две следующие возможности.

Зачем нужны другие лептон- кварковые поколения?

Лептоны и кварки как элементарные объекты?

1. Различные кварки и лептоны являются частью большой алгебраической системы, описываемой калибровочной теорией поля. В этом случае кварки и лептоны являются элементарными объектами, а именно элементарными фермионами соответствующей лежащей в основе единой полевой теории. Такую возможность мы уже обсуждали и рассматривали выше более подробно.

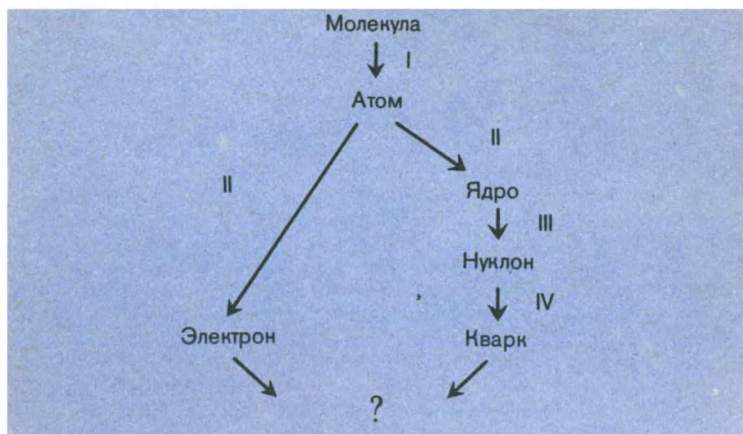
2. Мир атома или ядерных частиц обладает очень богатой структурой. Имеется очень много, фактически бесконечно много различных атомарных или ядерных состояний. Это есть просто следствие существования отдельных составляющих (электроны и ядра в атомной физике, нуклоны в ядерной физике) и взаимодействия между ними. Таким образом, можно понять, основываясь на отдельных составляющих, очень большое число различных состояний. Развитие физики элементарных частиц с 1960 г. показало, что тот же принцип выполняется и в мире наблюдаемых адронов. Сегодня мы способны понять богатейший спектр наблюдаемых адронов в рамках кварковой модели. С помощью отдельных кварков удастся построить все наблюдаемые адронные состояния.

Сегодня нельзя исключить того, что существует еще одна ступень в субструктуре материи. Возможно, лептоны и кварки также являются связанными системами, как атомы, атомные ядра и нуклоны, со-

Новая субструктура материи?

стоящие из неведомых до сих пор составляющих. Для этих составляющих придуман уже целый ряд названий: субкварки, преоны, стра-
тоны, ришоны, гаплоны и т. п.

До сих пор физики обнаружили четыре различных типа субструктуры материи. Они изображены на следующей диаграмме:



Но не исключено, что есть еще одна ступень в субструктуре. Однако идея о том, что лептоны и кварки построены из еще меньших объектов, сталкивается с различными трудностями. Во-первых, очень детально исследовались эффекты, которые могли бы свидетельствовать о субструктуре электрона и мюона. Известно, например, что электроны и мюоны ведут себя как точечные объекты, т. е. как объекты без внутренней структуры, вплоть до расстояний порядка 10^{-17} см. Таким образом, лептоны должны быть меньше 10^{-17} см, и это означает, что размер электрона не превышает десятичной доли размера протона.

Насколько электрон больше?

Из чего состоят нейтрино?

Во-вторых, кварки — очень своеобразные составляющие нуклонов, которые не могут свободно рождаться и постоянно находятся внутри адронов — “цветовых” синглетов. Не странно ли предполагать, что эти объекты состоят из еще меньших? Таким образом, постоянная связь кварков внутри нуклонов может быть указанием на то, что мы дошли до конца в исследовании субструктуры материи. Еще одна трудность при интерпретации лептонов и кварков как связанных систем сопряжена с нейтрино. Из опыта мы знаем, что нейтрино либо вообще не имеют массы, либо их масса чрезвычайно мала. Очень трудно представить, чтобы нейтрино состояли из еще меньших объектов. В таком случае следовало бы ожидать, что массы нейтрино столь же велики, как и массы заряженных лептонов — электрона, мюона и τ . Но это не так.

Несмотря на все эти проблемы, мы не можем, однако, исключить того, что как лептоны, так и кварки состоят из еще меньших объектов. В этом случае заведомо можно ожидать одного, а именно существования целого ряда новых лептонов и кварков. В частности, должны суще-

ствовать новые лептоны и кварки, имеющие больший спин, чем известные лептоны и кварки, спин которых равен $1/2$. Например, мы ожидаем, что существуют лептоны и кварки со спинами $3/2$, $5/2$ и т.д. Остается ждать, будут ли такие частицы открыты в последующих экспериментах.

Проблема возможной субструктуры лептонов и кварков связана с вопросом, который занимает сегодня многих физиков. Существует ли законченная теория материи или нет? В случае, если на самом деле окажется, что лептоны и кварки имеют субструктуру, то самое простое — предположить, что эта игра повторится снова, возможно, бесконечно много раз. В принципе может существовать бесконечно большое число ступеней в субструктуре. Ришоны или гаплоны в свою очередь состоят из еще меньших составляющих и т. д. В этом случае, естественно, исследование субструктуры материи не имеет конца.

В то же время, если лептоны и кварки действительно являются элементарными образованиями, мы полагаем, что можно построить законченную теорию материи. Конечно, мы не знаем когда это случится, но представим себе, что в один прекрасный день найдена законченная теория всей физики, основанная на тех идеях, которые мы обсуждали. Естественно, что подобная теория должна объяснить все, например число лептонов и кварков, их массы и все другие свойства. Это должна быть теория, зависящая лишь от одного параметра, а именно от планковской массы¹, задаваемой гравитационным взаимодействием и определяющей, так сказать, масштаб энергий и масс во Вселенной.

**Неужели
виден
конец?**

Еще 10 лет назад физик с трудом мог представить себе, что при определенных обстоятельствах можно построить законченную теорию всей материи и всей физики. Благодаря развитию физики элементарных частиц начиная с 1970 г. такая точка зрения изменилась. Некоторые физики-теоретики считают, что конец пути уже виден и главный вопрос теперь в том, как долго мы до него будем добираться.

20

LEP, HERA И ФИЗИКА БУДУЩЕГО

Мы только что упомянули, что по крайней мере некоторые физики-теоретики верят сегодня в то, что в не очень отдаленном будущем появится законченная теория всех физических процессов. Совершенно ясно, что подобные утверждения довольно рискованны и через короткое время они могут оказаться устаревшими. Уже много раз в истории физики бывали периоды, когда считалось, что физика как наука близка к за-

¹ Из фундаментальных мировых постоянных c , \hbar и G (гравитационная постоянная) можно составить величину, имеющую размерность массы $m_{\text{Планк}} = \sqrt{\hbar c / G} \approx 10^{-5} \text{ г} \approx 10^{19} \text{ ГэВ}$ и называемую планковской массой. — Прим. пер.

вершению. Так, например, молодого Макса Планка отговаривали от изучения теоретической физики, поскольку физика скоро должна закончиться и все проблемы станут ясными. Это было в конце XIX века, т. е. незадолго перед созданием квантовой теории, в котором принимали участие Макс Планк, Альберт Эйнштейн, Нильс Бор и другие.

Точно так же может оказаться, что наши современные представления о строении и динамике элементарных частиц вскоре заменятся новыми.

Новые эксперименты — новые явления?

По этой причине очень важно подтверждать наши представления новыми экспериментами при высоких энергиях. Для этого в разных частях света планируется строительство новых ускорителей, с помощью которых можно будет ускорять протоны,

антипротоны, электроны или позитроны до невиданных пока что энергий.

В США думают о постройке большого протон-антипротонного накопительного кольца, на котором можно будет наблюдать столкновения протонов и антипротонов очень высоких энергий. В СССР подготавливается строительство большого протонного ускорителя¹.

С точки зрения современных теоретических знаний особенно интересными представляются большие проекты европейских физиков. В Западной Европе обдумывается строительство двух больших ускорителей. В ЦЕРН ведется подготовка к строительству большого электрон-позитронного накопительного кольца LEP (название образовано от заглавных букв слов Large Electron — Positron, т. е. большой электронно-позитронный). Физики в ДЕЗИ намереваются построить большое накопительное кольцо, в котором будут соударяться электроны и протоны. Этот проект получил название HERA (по заглавным буквам слов Hadron — Electron — Ring — Anlage, т. е. адрон-электронная кольцевая установка).

Строительство установки LEP — весьма честолюбивый проект европейских физиков, который может быть осуществлен только объединенными усилиями всех стран Западной Европы. Физики в ЦЕРН надеются, что на этой машине можно будет ускорять электроны и позитроны до энергий, достигающих 140 ГэВ. Тогда при лобовом соударении электронов и позитронов будет достигаться максимальная энергия 280 ГэВ. Таким образом, с помощью установки LEP можно будет детально проверить теорию слабого взаимодействия. Особенно интересным качеством LEP будет то, что появится возможность рожать Z-бозон и изучать его продукты распада². Обсуждавшаяся выше теория электрослабого взаимодействия предсказывает, что масса Z-бозон равна 90 — 100 ГэВ.

Машина LEP под Женевой будет величайшей ускорительной установкой в мире. Длина окружности накопительного кольца ее составит 30 км. Образующие кольцо секции ускорителя будут размещены в тун-

¹ Строительство большого ускорителя под Серпуховом уже начато, и он должен войти в строй в начале 90-х годов. — *Прим. пер.*

² Как уже отмечалось выше, в 1983 г. обнаружен Z-бозон (на коллайдере в ЦЕРН). Его масса оказалась равной 90 ГэВ. Но, конечно, машина LEP после ввода в действие станет настоящей фабрикой Z-бозонов. — *Прим. пер.*

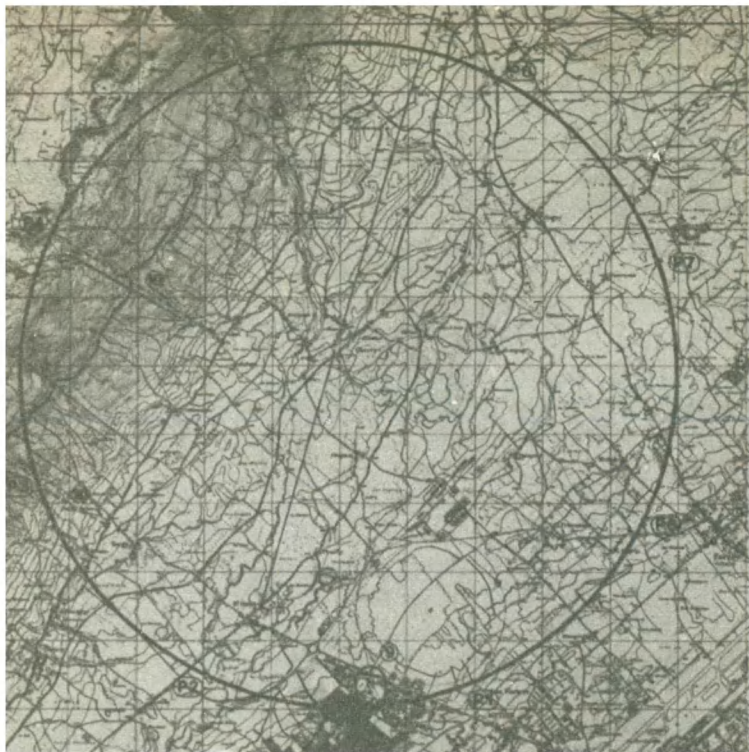


Рис. 89. Накопительное кольцо LEP к западу от Женевы. Кольцо пролегает под землей и не видно на поверхности. Планируется создание восьми подземных экспериментальных залов (обозначенных номерами $P1, \dots, P8$). Западная часть кольца проходит под горами Юры. В находящиеся там экспериментальные залы можно проникнуть только через туннель (обозначенный здесь цифрой 10). Справа внизу видны постройки Женевского аэропорта. Кольцо LEP частично проходит по территории ЦЕРН (обозначена цифрой 9)

неле, большая часть которого пройдет по французской части Женевской долины. Одна часть туннеля LEP пройдет под горами Юрского массива (рис. 89).

Пучки электронов и позитронов, ускоренных на LEP, будут приводиться в соударение в целом ряде экспериментальных залов (их, вероятно, будет восемь). Планируется, что в процессе строительства LEP энергия ускорителя будет поэтапно повышаться. В первой фазе строительства планируется достичь энергии 60 ГэВ на пучок. При этом уже станет возможным образование Z -бозонов. Чтобы достичь максимальной энергии 140 ГэВ, потребуется еще большее количество сверхпроводящих маг-

нитов. Таким образом, строительство LEP является большим вызовом инженерам и техникам, которые должны сконструировать сверхпроводящие магниты, работающие с невиданной до сих пор точностью и надежностью.

Гамбургская машина HERA выглядит как двойное накопительное кольцо, состоящее из электронного и протонного колец. Оба ускорительных кольца разместятся в одном туннеле под землей. В протонном кольце будут ускоряться протоны до энергии 800 ГэВ, в электронном кольце — электроны до энергии 30 ГэВ. Затем оба пучка будут приводиться в соударение. Это будет происходить в четырех местах; здесь строятся детекторы частиц, с тем чтобы исследовать, что происходит при соударении электронов и протонов.

Электрон-протонные соударения на установке HERA



Рис. 90. Схематический план проектируемого кольца HERA в Гамбурге. Слева внизу видна территория ДЕЗИ с кольцом PETRA. Кольцо проходит под землей вокруг гамбургского Народного парка

Само кольцо установки HERA и экспериментальные залы будут размещены под землей (рис. 90). Туннель будет иметь длину примерно 6 км; его трасса пройдет под гамбургским Народным парком. Осуществление проекта HERA предъявляет очень высокие требования к технологии. Необходимы новые достижения во многих технических областях, в особенности в области сверхпроводящих магнитов.

С помощью машины HERA можно будет очень хорошо изучить взаимодействие электронов с кварками внутри протона. Поэтому, в частности, благодаря HERA станет возможным проверить предсказания хромодинамики. Кроме того, появится возможность подтвердить, являются ли электроны и кварки действительно точечными объектами или они обладают внутренней структурой, и такую проверку можно будет провести

Соударения электронов и кварков на машине HERA

до расстояний порядка 10^{-17} см. Если лептоны и кварки состоят из еще меньших объектов, то есть шансы увидеть это в результате экспериментов на установке HERA.

Существование больших исследовательских центров, таких как ЦЕРН и ДЕЗИ, позволило Западной Европе в течение 70-х годов занять ведущее место в области фундаментальных физических исследований.

Я надеюсь, что в этой книге мне удалось дать неподготовленному читателю некоторое представление о современных идеях в физике элементарных частиц. К сожалению, у меня не было возможности обсудить косвенные последствия развития физики высоких энергий. Благодаря строительству исследовательских установок для физики элементарных частиц мы вступаем в новую область технологии как в технике низких температур, так и в технике высоких частот, вычислительной технике и т. п. Многие индустриальные предприятия в Европе строятся по настоянию физиков, занимающихся частицами. Фундаментальные физические исследования дают незатухающий импульс развитию исследований в промышленности.

В результате строительства таких машин, как LEP и HERA, и необходимого для них экспериментального оборудования физики Западной Европы получают инструменты для еще более глубокого проникновения в структуру материи. На протяжении всей истории фундаментальные физические исследования приводили к неожиданным открытиям. Можно ожидать, что и в будущем будут обнаружены новые интересные и важные явления. Только путем интенсивного исследования свойств и структуры материи в нашей Вселенной станет возможным разрешить грядущие общечеловеческие проблемы, например энергетическую. Знание фундаментальных физических законов предоставляет нам возможность по собственному усмотрению определять будущее развитие цивилизации.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Лептоны и кварки

Массы покоя лептонов и кварков указаны в гигаэлектрон-вольтах (цифры в скобках). Для нейтрино не приведено значение массы, поскольку до сих пор неизвестно, обладают эти частицы массой покоя или нет. Для кварков, не наблюдаемых как свободные частицы, приведены значения эффективных масс, которые вводятся для того, чтобы понять спектр состоящих из кварков частиц:

I поколение		
$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad (0,00051)$	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} (0,3) \\ (0,3) \end{pmatrix}$
II поколение		
$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \quad (0,106)$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} (1,5) \\ (0,45) \end{pmatrix}$
III поколение		
$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \quad (1,78)$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} (?) \\ (4,9) \end{pmatrix} \quad (\tau\text{-кварки еще не открыты})$

Переносчики различных наблюдаемых в природе взаимодействий:

сильное взаимодействие:	глюоны (безмассовые)
электромагнетизм:	фотон (безмассовый)
слабое взаимодействие:	W -бозон (80) Z -бозон (90) (предсказываемые массы)
гравитация:	гравитон (безмассовый)

Важные мезоны и их кварковая структура

Мезон	Структура	Масса, ГэВ
π^+	$\bar{d}u$	0,140
π^0	$\bar{u}u/\bar{d}d$	0,135
π^-	$\bar{u}d$	0,140
K^-	$\bar{u}s$	0,494
\bar{K}^0	$\bar{d}s$	0,498
D^0	$\bar{u}c$	1,863
D^+	$\bar{d}c$	1,868
J/ψ	$\bar{c}c$	3,097
B^-	$\bar{u}b$	5,26
B^0	$\bar{d}b$	5,26
Υ	$\bar{b}b$	9,46

Важные барионы и их кварковая структура

Барион	Структура	Масса, ГэВ
p	uud	0,938
n	udd	0,940
Λ	uds	1,116
Σ^+	uus	1,189
Σ^0	uds	1,192
Σ^-	dds	1,197
Ξ^0	uss	1,315
Ξ^-	dss	1,321
Ω^-	sss	1,672
Λ_c^+	udc	2,273

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Адрон — частица, принимающая участие в сильном взаимодействии. Все адроны являются либо барионами (полужелтый спин), либо мезонами (целый спин).

Альфа-частицы (α -частицы) — ядра атома гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов и испускаемые определенными радиоактивными веществами (так называемое α -излучение).

Античастицы — каждая частица имеет свою античастицу, обладающую той же массой и тем же спином, что и сама частица, но имеющую противоположный по знаку заряд, барионное число и т. п. Например, позитрон является античастицей электрона. Некоторые нейтральные частицы тождественны со своими античастицами, например фотон или π^0 -мезон. Антиматерия состоит из античастиц, соответствующих нуклонам (антипротоны, антинейтроны), и позитронов.

"Аромат" — характеристика типа кварка (u, d, s, c, b)¹.

Асимптотическая свобода — ослабление сил между кварками на малых расстояниях — явление, возникающее в хромодинамике.

Барионы — класс адронов с полужелтым спином. К нему, в частности, относятся протоны и нейтроны. Барионное число какого-то объекта равно полному числу барионов минус полное число антибарионов.

Бета-распад (β -распад) — распад нейтрона на протон, электрон и электронное антинейтрино, обусловленный слабым взаимодействием.

Бозон — понятие, объединяющее все частицы с целым спином.

W-бозон — промежуточный бозон, переносящий слабое взаимодействие. **Z-бозон** — нейтральный тяжелый бозон, существование которого предсказывается в рамках теории электрослабого взаимодействия.

Взаимодействие между двумя объектами существует, если они взаимно оказывают влияние друг на друга (благодаря действию сил).

Виртуальные частицы. Если рассматривать очень маленькие пространственные расстояния и промежутки времени, то частица может иметь массу, отличающуюся от ее физической массы (масса покоя). Так, например, масса покоя фотона равна нулю. Однако фотоны могут иметь любую массу, если только рассматривать достаточно малые пространственные и временные промежутки. Частицы, масса которых не соответствует их физической массе, называются виртуальными. Они не существуют как свободные объекты, а лишь оказывают влияние на мир физических состояний в области малых пространственных и временных

¹ Включающая всю совокупность квантовых чисел — электрический заряд, странность, "очарование" и т. д. (за исключением "цвета"). — *Прим. ред.*

промежутков. Они играют важную роль в определении законов силового взаимодействия. Например, электрическое притяжение или отталкивание заряженных тел обусловлено обменом виртуальными фотонами.

Гипероны — барионы, странность которых отлична от нуля. Легчайшим гипероном является Λ -частица, странность которой равна -1 .

Глюбол — нейтральный мезон, состоящий из одних глюонов.

Глюоны — электрически нейтральные объекты, которые обуславливают в рамках хромодинамики взаимодействие между двумя кварками. Спин глюонов равен 1 .

Группа — математическая система, состоящая из некоторого числа (иногда бесконечного) элементов, внутри которой действуют совершенно определенные правила. Так, например, умножение двух элементов является хорошо определенной внутри группы операцией. В физике теория групп играет очень важную роль. С ее помощью можно, например, очень просто описать симметрии в мире частиц.

Дейтрон — частица, состоящая из протона и нейтрона. Она образует ядро атома дейтерия (тяжелого водорода).

Калибровочные теории — класс теорий поля, с помощью которых можно описать наблюдаемые слабые, электромагнитные и сильные взаимодействия. Отличительной чертой калибровочных теорий является то, что они обладают высокой степенью симметрии. Термин "калибровочная теория" восходит к математiku Герману Вейлю, исследовавшему подобные теории, начиная с 1918 г.

Квантовая механика — созданная в 20-е годы теория, с помощью которой удается понять строение атома. Существенным моментом в квантовой механике является дуализм частиц и волн, которые представляют собой два различных аспекта одной и той же физической реальности.

Квантовая электродинамика (КЭД) — квантовая теория электромагнитных явлений.

Кварки — составные части нуклонов. До сего дня установлено существование пяти различных типов кварков (u, d, s, c, b). Считается, что невозможно породить кварки в виде изолированных частиц.

Лептоны — частицы, не принимающие участия в сильных взаимодействиях и имеющие спин, равный $1/2$. К лептонам относятся, в частности, электроны и нейтрино. Лептонное число физической системы определяется разностью числа лептонов и числа антилептонов в ней.

Мезоны — сильновзаимодействующие частицы, имеющие целый спин и нулевое барионное число. К мезонам относятся, в частности, π -мезоны, K -мезоны, ρ -мезоны и т. д.

Мюон — отрицательно заряженный лептон, в 207 раз более тяжелый, чем электрон.

Накопительное кольцо — вакуумная труба кольцевой формы, окруженная специальной системой магнитов и служащая для ускорения и накопления пучков частиц. Обычно накапливают частицы двух сортов, например электроны и позитроны. Эти частицы сталкиваются внутри определенных регистрирующих устройств. При таких соударениях вся накопленная кинетическая энергия частиц может при определенных условиях полностью превратиться в массу. По этой причине эксперименты на накопительных кольцах энергетически выгоднее обычных экспериментов в физике частиц, когда движущаяся частица налетает на покоящуюся мишень.

Нейтрино (ν) — электрически нейтральные лептоны. До сих пор установлено существование трех различных типов нейтрино: электронного нейтрино (ν_e), мюонного нейтрино (ν_μ) и тау-нейтрино (ν_τ).

Нейтрон — электрически нейтральная частица, которая наряду с протоном принадлежит к составным частям атомных ядер.

Нуклон — структурная единица атомных ядер. Термин, объединяющий протон и нейтрон.

"Очарование" — число, подобное странности, характеризующее разность числа "очарованных" кварков и "очарованных" антикварков в частице. Легчайшей частицей, "очарование" которой отлично от нуля, является *D-мезон*, который почти в 2 раза тяжелее протона.

Пи-мезон (π) — легчайший адрон. Существуют три различных π -мезона: два заряженных (π^+ , π^-) и один нейтральный (π^0).

Планковская элементарная длина — нижний предел измерения длины, определяющийся в рамках квантовой теории гравитационным взаимодействием. На расстояниях, меньших планковской элементарной длины, наши обычные представления о пространстве и времени становятся неприменимыми. Численно планковская элементарная длина равна $4 \cdot 10^{-33}$ см.

Позитрон (e^+) — положительно заряженная античастица электрона.

Позитроний — связанное состояние электрона и позитрона. Различают ортопозитроний и парапозитроний. В ортопозитронии спины обеих составных частей направлены в одну сторону, в парапозитронии — в противоположные.

Поляризация вакуума — влияние окружающей частицу среды на взаимодействие этой частицы.

Постоянная Планка h — фундаментальная постоянная квантовой теории, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Постоянная тонкой структуры α — фундаментальная постоянная физики, определяющая интенсивность электромагнитного взаимодействия. Она определяется как квадрат электрического заряда электрона, деленный на произведение постоянной Планка и скорости света, $\alpha = 1/137$.

Протон — положительно заряженная частица, являющаяся одновременно ядром атома водорода. Атомные ядра состоят из протонов и нейтронов.

Пузырьковая камера — устройство для наблюдения частиц. Состоит из емкости, наполненной жидкостью, находящейся вблизи точки кипения. При внезапном понижении давления жидкость переходит в перегретое состояние. В это мгновение через пузырьковую камеру пролетают частицы, обладающие электрическим зарядом. Вдоль траекторий частиц жидкость начинает кипеть и возникают пузырьки пара, которые можно сфотографировать.

Спин — собственный момент импульса элементарной частицы, обусловленный ее вращением вокруг собственной оси. Согласно законам квантовой механики спин частицы может равняться только целому или полуцелому числу, умноженному на постоянную Планка. В физике частиц постоянную Планка принимают равной единице, так что спин определяется заданием некоторого числа. Так, например, электроны и протоны имеют спин, равный $1/2$, спин фотонов равен 1, а спин π -мезонов равен 0.

Странность — квантовое число, имеющее отношение к описанию странных частиц. Отрицательное значение странности указывает, сколько

s-кварков содержит соответствующее состояние. Например, Λ -частица содержит один *s*-кварк и ее странность равна -1 .

Струя — система частиц, летящих в одном направлении в какой-то реакции при высоких энергиях. Струи интерпретируются как фрагменты элементарных объектов типа кварков и глюонов.

Теория относительности — теория, созданная в начале нашего столетия Альбертом Эйнштейном. Эта теория позволяет понять динамику быстро движущихся тел. В рамках теории относительности пространство и время составляют единое целое. Часто различают частную и общую теорию относительности. Общая теория относительности описывает гравитационное взаимодействие.

Уравнения Максвелла — уравнения, с помощью которых описывается динамика электромагнитного поля. Они были введены в середине XIX в. Джеймсом Клерком Максвеллом.

Фейнмановские диаграммы — наглядные диаграммы, с помощью которых можно описать взаимодействие между частицами. Введены в физику Ричардом Фейнманом.

Фермиевская постоянная G — фундаментальная постоянная природы, описывающая интенсивность слабого взаимодействия. В энергетических единицах $G = (294 \text{ ГэВ})^{-2}$.

Фермион — понятие, объединяющее все частицы с полуцелым спином.

Фотон — γ -частица света.

Хромодинамика — теория взаимодействий между кварками и глюонами. Считается, что квантовая хромодинамика (КХД) является правильной теорией сильного взаимодействия.

Чармоний — система, состоящая из "очарованного" кварка и соответствующего антикварка.

Четность — число, определяющее симметрию системы по отношению к отражению в зеркале. Если система симметрична, ей приписывается значение четности $P = +1$. Если система антисимметрична, то $P = -1$. В сильных и электромагнитных взаимодействиях четность является сохраняющейся величиной, т. е. ее значение не меняется со временем. В слабом взаимодействии четность не сохраняется. Например, объект с положительной четностью может с течением времени превратиться в объект с отрицательной четностью.

Электрон — легчайшая электрически заряженная частица. Оболочка атомов состоит из электронов. Химические свойства веществ определяются электрическим взаимодействием электронов в атомных оболочках.

Электрон-вольт (эВ) — используемая в атомной физике и физике частиц единица энергии; 1 эВ соответствует той энергии, которую приобретает электрон, прошедший разность потенциалов 1 В; $1 \text{ эВ} = 1,602 \times 10^{-12} \text{ эрг}$.

Энергия — физическая величина, характеризующая вместе с импульсом состояние движения частицы. Согласно теории относительности Эйнштейна энергия покоящейся частицы пропорциональна ее массе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Luscher E.** Pipers Buch der modernen Physik. R. Piper. und Co. Verlag, München/Zurich, 1978.
2. **Lohrmann E.** Hochenergiephysik. E. G. Teubner Verlag. Stuttgart, 1981.
3. **Becher P., Bohm M., Joos H.** Eichtheorien der starken und schwachen Wechselwirkungen. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1981.
4. **Тейлор Дж.** Калибровочные теории слабых взаимодействий: Пер. с англ. М.: Мир, 1978.
5. **Клоуз Ф.** Кварки и глюоны: Пер. с англ. М.: Мир, 1982.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вайнберг С.** Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной: Пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1981.
2. **Мякишев Г. Я.** Элементарные частицы. М.: Наука, 1979.
3. **Нambu И.** Кварки: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
4. **Фундаментальная структура материи;** Под ред. Дж. Малви: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
5. **Фейнберг Дж.** Из чего сделан мир: Пер. с англ. М.: Мир, 1980.
6. **Шелест В. П.** Новый круг. М.: Атомиздат, 1978; Осколки. М.: Энергоиздат, 1981.
7. **Современная теория элементарных частиц /** Под ред. И.Ю. Кобzareва. М.: Наука, 1984.

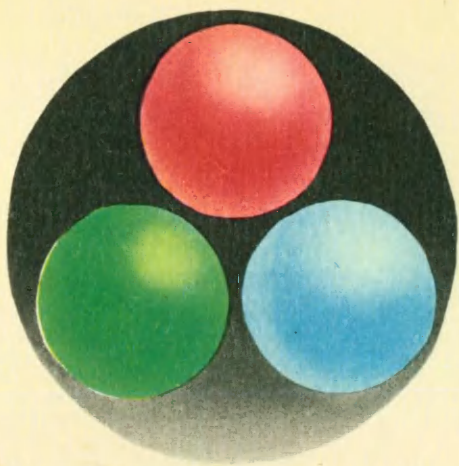
Гаральд Фритш
ОСНОВА НАШЕГО МИРА

Редактор Л. В. Белова
Художественные редакторы О. П. Тинякова,
А. С. Александров
Обложка художника В. Н. Забайрова
Технический редактор Л. В. Порхачева
Корректор Л. А. Гладкова
Оператор О. В. Канатникова
ИБ № 949

Набор выполнен в Энергоатомиздате на Композере ИБМ-82. Подписано в печать 13.08.85. Формат 84 x 108/32. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,92. Усл. кр.-отт. 24,78. Уч.-изд. л. 13,69. Тираж 20 000 экз. Заказ 4467. Цена 1 р.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114,
Шлюзовая наб., 10

Ленинградская фабрика офсетной печати № 1
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197101, Ленинград,
ул. Мира, 3



Последнее двадцатилетие знаменует собой эпоху революционных изменений в представлениях о структуре материи. В эти годы была развита и получила экспериментальное подтверждение картина строения элементарных частиц, в которой существенное место занимают фундаментальные составляющие материи — кварки, обладающие весьма необычными свойствами. Рассказу о том, как были сделаны эти поразжающие воображение открытия и каковы сегодняшние представления физиков об устройстве нашего мира, посвящена эта книга.

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ