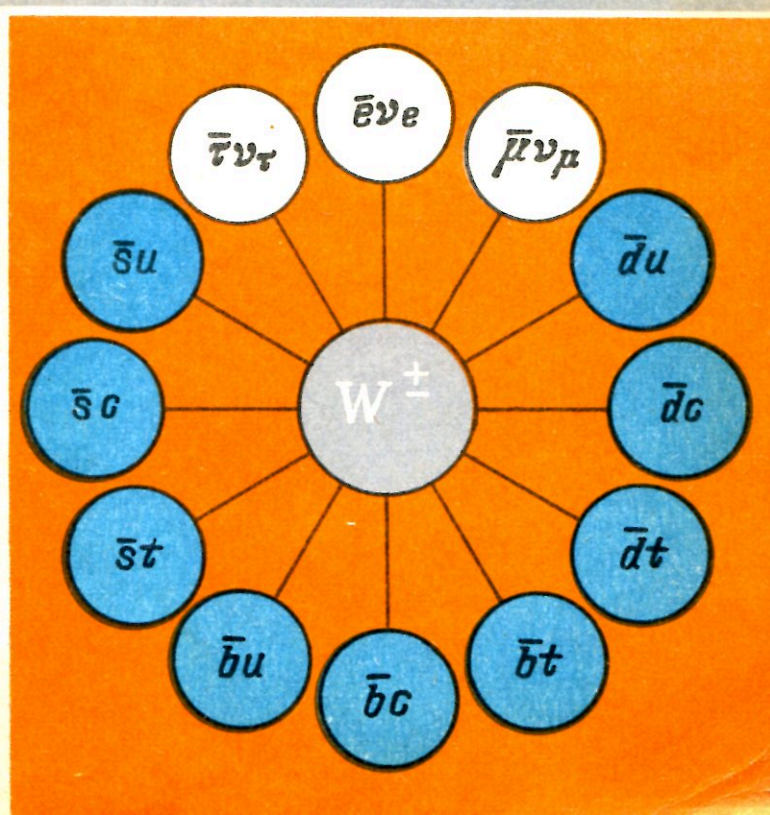


АНТН

А.И. АХИЕЗЕР
М.П. РЕКАЛО

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ



ПРОБЛЕМЫ НАУКИ
И ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

А. И. АХИЕЗЕР
М. П. РЕКАЛО

Ладис

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1986

ББК 22.382

A95

УДК 539.12

Ахиезер А. И., Рекало М. П.

A 95 Элементарные частицы. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — (Проблемы науки и технического прогресса). — 256 с.

Излагается история открытия различных элементарных частиц, рассматриваются свойства фундаментальных взаимодействий, которым подвержены элементарные частицы, — электромагнитного, сильного и слабого, а также выясняется взаимосвязь между симметриями и фундаментальными взаимодействиями. Книга завершается обсуждением единой схемы фундаментальных взаимодействий и возможной нестабильности протона.

Рассчитана на широкий круг читателей: физиков, работающих в области физики твердого тела, плазмы и радиофизики, математиков, естественников, интересующихся проблемами современной физики, преподавателей вузов и техникумов, студентов физических факультетов.

Табл. 6. Ил. 49.

A 1704020000 — 043 175-85
053(02)-86

ББК 22.382
539.12

Рецензенты:

член-корреспондент АН СССР Л. Б. Окунь,
член-корреспондент АН СССР С. С. Герштейн,
доктор физико-математических наук, профессор В. А. Матвеев

Александр Ильич Ахиезер, Михаил Петрович Рекало

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Редактор Л. П. Русакова
Художественный редактор Т. И. Кольченко
Технический редактор И. Ш. Аксельрод
Корректоры Г. В. Подвольская, О. М. Березина

ИБ № 12041

Сдано в набор 14.06.85. Подписано к печати 27.01.86. Т-03373.
Формат 84×108¹/₂. Бумага тип. № 3. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 13,44. Усл. кр.-отт. 13,86.
Уч.-изд. л. 14,15. Тираж 17 000 экз. Заказ № 790. Цена 85 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва В-71, Ленинский проспект, 15

4-я типография издательства «Наука»
630077 Новосибирск, 77, Станиславского, 25

© Издательство «Наука»,
Главная редакция
физико-математической литературы, 1986

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	7
Глава I. Открытие элементарных частиц	11
Электрон, протон и фотон	11
Открытие нейтрона	14
Гипотеза нейтрино	18
Ядерные силы	22
Открытие пиона и мюона	24
Изотопическая инвариантность. Резонансы	27
Позитрон	30
Антипротон и антибарионы	34
Открытие странных частиц	37
Предсказание и открытие Ω^- -гиперона	42
«Очарованный» кварк и чармоний	45
Тяжелый лептон и ψ -мезоны	51
Открытие W- и Z-бозонов	55
Глава II. Электромагнитное взаимодействие электронов и фотонов	67
Фотон	67
Квантовая механика электрона	69
Теория Дирака	75
Матрица рассеяния и язык диаграмм Фейнмана	75
Перенормировка массы и заряда электрона	81
Экспериментальная проверка квантовой электродинамики	90
Глава III. Сильное взаимодействие	102
Барионное число и изотопический спин	102
Странность	111
Резонансное рассеяние адронов	114
Дифракционное рассеяние адронов	117
Кварки и $SU(3)$ -симметрия	120
Унитарные мультиплеты	128
Чарм и очарованный кварк	132
Цветные кварки и глюоны	139
Глава IV. Слабое взаимодействие	149
Место слабого взаимодействия в физике	149
Взаимодействие слабых токов	152
Нейтрино и антинейтрино	160
Классификация слабых процессов	168
Несохранение пространственной четности	179

Нейтральные каоны	186
Взаимопревращения нейтральных каонов	193
Нейтринные осцилляции	198
Нарушение CP -инвариантности	202
Симметрии и взаимодействия	208
Точные и приближенные внутренние симметрии	208
Глобальные и локальные симметрии	219
Асимптотическая свобода	228
Единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия	235
Великое объединение	248
Нестабильный протон	254

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Прежде чем вы начинаете чтение, вы вправе ожидать ответа на некоторые простые вопросы. С какой целью написана эта книга? Кто тот воображаемый читатель, для которого она предназначается?»

Трудно начать с ясного и последовательного ответа на эти вопросы. Гораздо легче ответить на них в конце книги, хотя это было бы совершенно лишним. Мы находим, что проще сказать, чем эта книга не стремится быть. Мы не писали учебника по физике. Здесь нет систематического изложения элементарных физических фактов и теорий. Скорее наше стремление состояло в том, чтобы широкими линиями обрисовать попытки человеческого разума найти связь между миром идей и миром явлений».

Эти слова А. Эйнштейна и Л. Инфельда из их «Эволюции физики» в той или иной степени относятся и к нашей небольшой книге, посвященной элементарным частицам.

Физика элементарных частиц за последние несколько десятилетий достигла огромных успехов — как в области эксперимента, так и в области теории. С помощью специально построенных машин — ускорителей заряженных частиц — были получены частицы гигантских энергий порядка десятков и сотен ГэВ и был открыт новый мир элементарных частиц, подверженных удивительным взаимодействиям и взаимопревращениям.

В теории возникли такие шедевры, как квантовая хромодинамика и единая теория слабого и электромагнитного взаимодействий, и ситуация сейчас такова, что физика находится накануне создания единой теории всех фундаментальных взаимодействий.

Можно смело сказать — достижения в физике элементарных частиц столь значительны, и в общезначимом и в общезначимом плане, что сейчас не может быть физика или математика и вообще естествознания, в

каких бы областях науки они ни работали, которые не знали бы, что происходит в мире элементарных частиц. Так же, как необходимым элементом общего физическо-го образования является знакомство с основными идеями квантовой механики и теории относительности, так и основные сведения об элементарных частицах и их фундаментальных взаимодействиях должны стать общим достоянием всех естествоиспытателей.

Цель этой книги заключается в том, чтобы довести новейшие идеи и результаты физики элементарных частиц до широкой аудитории физиков, работающих в таких областях, как физика конденсированного состояния, физика плазмы, радиофизика, ядерная физика низких и средних энергий и т. п., а также математиков, преподавателей физики вузов, техникумов и старших классов средних школ и студентов — физиков и математиков.

Мы начинаем изложение с экскурса в историю открытия элементарных частиц и освещаем «биографию» таких частиц, как электрон, протон, фотон, нейтрон и нейтрино, позитрон и пион, антипротон и странные частицы. История «завершается» открытием очарованных частиц, тяжелого лептона и ψ -мезонов.

Следующие разделы книги посвящены рассмотрению свойств фундаментальных взаимодействий элементарных частиц — электромагнитного, сильного и слабого. В последнем разделе разъясняется связь фундаментальных взаимодействий с внутренними симметриями элементарных частиц. Здесь излагается единая теория слабого и электромагнитного взаимодействий, кварк-глюонная теория адронов и описываются идеи возможного объединения слабого, сильного и электромагнитного взаимодействий в единое фундаментальное взаимодействие и вытекающая из такого объединения нестабильность протона.

Мы хотели бы выразить глубокую благодарность Л. Б. Окуню за его критические замечания и ценные советы, которые он сделал при ознакомлении с рукописью. Его великолепная книга «Лептоны и кварки» также со-служила нам большую службу. Мы благодарны С. С. Герштейну и В. А. Матвееву за их ценные критические замечания.

ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько десятилетий в физику «вошел» новый материальный мир — мир элементарных частиц. Некоторые из них были открыты в космических лучах, но большинство было «создано» искусственно, с помощью мощных ускорителей заряженных частиц — главного экспериментального орудия физики элементарных частиц.

«Создание» новых частиц в процессах столкновений между известными «старыми» частицами доказало возможность существования новых форм материи. Открытие таких форм материи и всевозможных процессов взаимопревращаемости различных форм материи — электромагнитного поля, электронов и позитронов и новых форм материи — является одним из величайших достижений науки, значение которого трудно переоценить.

В настоящее время насчитывается несколько сотен элементарных частиц. Число их значительно больше, чем число химических элементов в таблице Менделеева (число естественных и искусственных элементов составляет вместе 107). Но «элементарность» элементарных частиц не означает, что они являются последними и подлинными «кирпичиками» мироздания. Напротив, сейчас известно, что многие из них сами имеют сложную структуру, например, протон и нейтрон — составные частицы атомного ядра — построены сами из «более элементарных» частиц — кварков. Каждая из этих и других «элементарных» частиц существует всегда как нечто цельное и в процессах рождения и уничтожения частиц возникает и исчезает вся целиком.

Важнейшим достижением явилось установление замечательной иерархии взаимодействий, управляющих различными формами материи. Оказалось, что существует всего несколько четко очерченных типов фундаментальных взаимодействий, которым подвержены элементарные частицы: сильное, электромагнитное, слабое и гравита-

дионное взаимодействия. Они прежде всего резко отличаются интенсивностью, но для них различны также и радиусы действия, и присущие им внутренние симметрии.

Самым интенсивным и наиболее симметричным является сильное взаимодействие. Оно лежит в основе ядерных сил, действующих между частицами, входящими в состав атомных ядер, — протонами и нейтронами. Именно оно обуславливает структуру ядра. Нуклоны, т. е. частицы, входящие в состав ядра, подвержены сильному взаимодействию. Другие элементарные частицы — электрон, позитрон, мюон, тяжелые лептоны, нейтрино, фотон — «не чувствуют» сильного взаимодействия. Частицы, подверженные сильному взаимодействию, получили общее название адронов*). Испытывают это взаимодействие адроны только в том случае, если расстояние между ними очень мало — меньше или порядка 10^{-13} см; на больших расстояниях сильное взаимодействие не проявляется.

Группа адронов объединяет подавляющее число элементарных частиц. К этой группе относятся, в частности, протон и нейтрон, а также большие совокупности мезонов, гиперонов и резонансов.

В сильном взаимодействии не участвуют лептоны — группа частиц со спином $\frac{1}{2}$: электрон (e), мюон (μ), тау-лептон (τ) и соответствующие нейтрино ν_e , ν_μ и ν_τ .

Что касается электрического заряда, то адрон может его иметь или не иметь. Для сильного взаимодействия это неважно. Электрический заряд определяет следующее по интенсивности за сильным электромагнитное взаимодействие. Ему подвержены все электрически заряженные частицы и фотон, который не имеет электрического заряда. Кроме того, электромагнитное взаимодействие существует и между нейтральными частицами, обладающими магнитными моментами, например, между двумя нейтронами. Электрический заряд удивительным образом по неизвестным до сих пор причинам с точностью до знака одинаков у всех заряженных элементарных частиц.

Хотя электромагнитное взаимодействие играет роль и в ядерных силах, но главной его сферой являются атомы и молекулы, структура которых полностью определяется этим взаимодействием. Структура твердых тел также оп-

*) Слово «адрон» происходит от греческого $\alpha\delta\rho\alpha\zeta$ (по-английски hadron, что означает «крупный, массивный»),

ределяется этим взаимодействием, вся химия основывается на электромагнитном взаимодействии. По интенсивности оно в сто раз уступает сильному взаимодействию, но зато радиус его действия не ограничен, как радиус сильного взаимодействия.

Еще меньше интенсивность слабого взаимодействия — примерно на десять порядков меньше интенсивности сильного взаимодействия. (Это значит, что эффективные сечения или вероятности слабых процессов, т. е. процессов, которые обусловлены слабым взаимодействием, примерно на десять порядков меньше сечений сильных процессов, обусловленных сильным взаимодействием.) Радиус действия слабого взаимодействия существенно меньше радиуса действия сильного взаимодействия.

Все элементарные частицы, за исключением фотона, т. е. адроны и лептоны, подвержены слабому взаимодействию. Но должны быть особые условия, чтобы слабое взаимодействие проявлялось на фоне сильного и электромагнитного взаимодействий. Оно наблюдается в распадах ряда элементарных частиц, являющихся нестабильными. Например, нестабилен свободный нейтрон, который за счет слабого взаимодействия распадается за время порядка 15 минут на протон, электрон и антинейтрино.

Слабое взаимодействие ответственно за β -распад ядер. Оно обуславливает также рассеяние нейтрино различными элементарными частицами.

Наименее интенсивным является гравитационное взаимодействие. Зато ему подвержена вся материя в целом — в этом состоит закон всемирного тяготения Ньютона. Радиус его действия бесконечен. Проявляется гравитационное взаимодействие главным образом между макроскопическими телами. Оно определяет движение планет и звезд. Структура Вселенной в целом определяется этим взаимодействием. В мире элементарных частиц гравитационное взаимодействие непосредственно не проявляется из-за сравнительно малой массы частиц. Например, сила гравитационного взаимодействия между двумя электронами меньше электрической силы между ними на том же расстоянии в 10^{43} раз. Не исключено, что гравитационному взаимодействию предназначена какая-то особая, существенная, но пока еще не известная роль и в мире элементарных частиц.

Чтобы сравнить интенсивности взаимодействий элементарных частиц, возьмем два протона, находящиеся на расстоянии $r \approx \hbar/m_p c$ (\hbar — постоянная Планка, c — ско-

рость света, m_p — масса протона). Тогда энергия их гравитационного взаимодействия будет порядка $10^{-38}m_p c^2$, энергия электромагнитного взаимодействия — порядка $10^{-2}m_p c^2$ и энергия слабого взаимодействия — порядка $10^{-5}m_p c^2$, в то время как энергия сильного взаимодействия — порядка $m_p c^2$.

Чтобы лучше войти в круг понятий и идей, с которыми имеет дело физика элементарных частиц, полезно предварительно сделать краткий экскурс в историю открытий элементарных частиц. С этого мы и начнем.

Глава I

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Электрон, протон и фотон

Самые «старые» элементарные частицы — это электрон, протон и фотон.

Электрон — в идейном плане — «вошел» в физику в 1881 г., когда Герман Гельмгольц в своей речи в честь Майкла Фарадея указал, что атомная структура вещества вместе с законами электролиза Фарадея неизбежно приводит к мысли, что электрический заряд всегда должен быть кратен некоторому элементарному заряду, т. е. к выводу о квантовании электрического заряда.

Сам Фарадей был гораздо осторожнее. «Возможно,— писал он,— не следует высказываться по этому вопросу, не оговорив предварительно, что представленные факты будут обоснованы, но нельзя также и, может быть, даже бестактно не обсуждать его вообще. Хотя нам ничего не известно о структуре атома, все же трудно удержаться от искушения сформулировать некую идею о маленькой частице, в виде которой мы мысленно представляем его; и хотя в равной, если не в большей, степени мы не сведущи в электричестве, так как не можем сказать, является ли оно особым веществом или веществами, некой силой третьего рода или просто каким-то видом движения обычных материальных частиц, существует огромное множество фактов, оправдывающих наше предположение о том, что атомы в той или иной мере связаны с электрическими силами; именно этим силам они обязаны своими наиболее поразительными свойствами, — в частности, взаимным химическим сходством...»¹⁾.

¹⁾ Андерсон Д. Открытие электрона.— М.: Атомиздат, 1968, с. 19.

И даже великий Максвелл, создавший фундаментальную теорию электрических и магнитных явлений и использовавший существенным образом экспериментальные результаты Фарадея, не принимал гипотезы атомарного электричества. В своем «Трактате об электричестве и магнетизме» он писал: «Эта теория молекулярного заряда служит методом, с помощью которого можно объяснить довольно большое число фактов об электролизе. Чрезвычайно невероятно, что, придя к пониманию действительной природы электролиза, мы сохраним в какой-либо форме теорию молекулярных зарядов, ибо тогда мы получим надежную основу для корректного описания поведения электрических токов, в результате чего отпадает необходимость в этих временных теориях»¹⁾).

Между тем «временная» теория о существовании электрона была подтверждена в 1895 г. в экспериментах Дж. Дж. Томсона, в которых он отождествил так называемые катодные лучи с электронами и измерил заряд и массу электрона. Частицы катодных лучей Томсон называл «корпускулами» или изначальными атомами. Слово «электрон» первоначально использовалось для обозначения величины заряда «корпускулы». И только со временем электроном стали называть саму частицу.

Однако идея об электроне не сразу получила признание. Когда на лекции в Королевском обществе Дж. Дж. Томсон — первооткрыватель электрона — высказал предположение, что частицы катодных лучей следует рассматривать как возможные компоненты атома, некоторые его коллеги искренне считали, что он мистифицирует их. Сам Планк признавался в 1925 г., что не верил тогда (в 1900 г.) в гипотезу об элементарной частице — электроне.

Можно сказать, что только после опытов Р. Милликена, измерившего в 1911 г. заряды индивидуальных электронов, эта первая элементарная частица получила право на существование.

Открытие протона связано с открытием атомного ядра. Оно было сделано Э. Резерфордом в 1919 г. в результате бомбардировки атомов азота высокоэнергетичными α -частицами. Резерфорд заключил, что «ядро атома азота распадается вследствие громадных сил, развивающихся

¹⁾ Андерсон Д. Открытие электрона.— М.: Атомиздат, 1968, с. 25.

при столкновении с быстрой α -частицей, и что освобождающийся водородный атом образует составную часть ядра азота». В 1920 г. ядра атома водорода были названы Резерфордом протонами (протон по-гречески означает простейший, первичный).

Заметим, что еще в 1886 г. У. Крукс предположил, что все атомы состоят из некоей первичной субстанции, названной им *protyle*. Еще ранее, в 1815 г. У. Проут выдвинул предположение, что все атомы состоят из атомов водорода — он считал их первоматерией, из которой построена вся остальная материя. Впоследствии сотрудник Резерфорда Э. Марсден рассказывал, что при выборе нового названия ядра водорода Резерфорд преследовал цель, чтобы оно напоминало людям о Проуте.

Фотон — в некотором смысле особая частица. Дело в том, что масса его покоя, в отличие от других частиц, кроме нейтрино, равна нулю. Поэтому его стали считать частицей не сразу: вначале полагали, что наличие конечной и отличной от нуля массы покоя — обязательная черта элементарной частицы.

Фотон — это «оживленный» планковский квант света, т. е. квант света, несущий импульс.

Кванты света ввел М. Планк в 1901 г. для того, чтобы объяснить законы «черного» излучения. Но они были не частицами, а только минимально возможными «порциями» энергии света той или иной частоты.

«Живыми» фотоны, или кванты, сделала теория относительности Эйнштейна, который в 1905 г. показал, что кванты должны иметь не только энергию, но и импульс, и что они являются в полном смысле частицами, только особенными, так как масса покоя их равна нулю и движутся они со скоростью света.

Представления об электроны, протоне и фотоне буквально пронизывают весь «организм» современной физики.

Они являются достоянием всей физики, а не только физики элементарных частиц. К этим «старым» частицам настолько привыкли, что их даже не считают специфическими объектами физики элементарных частиц. Более того, «начало» физики элементарных частиц обычно датируют не 1895-м годом, когда был открыт электрон, и не 1901-м — годом открытия фотона — его «отсчитывают» с 1932 г., когда Дж. Чэдвик нашел четвертую элементарную частицу — нейтрон. Это, наряду с протоном, «кирпичик», из которого строится атомное ядро.

Открытие нейтрона

Гипотеза о существовании нейтрона была впервые высказана Э. Резерфордом еще в 1920 г. в Бейкерманской лекции «Ядерное строение атома». Тогда Резерфорд сказал: «Предполагается возможность существования атома с массой 1 и нулевым зарядом ядра. Подобная атомная структура представляется вполне возможной... Такой атом обладал бы весьма своеобразными свойствами. Его внешнее поле было бы практически равно нулю повсюду, за исключением области, прилегающей непосредственно к ядру, благодаря чему он мог бы проходить свободно через вещество. Существование таких атомов, вероятно, трудно было бы обнаружить с помощью спектроскопа, и их невозможно было бы сохранять в герметически закрытом сосуде. С другой стороны, они должны легко проникать в недра атома и могут либо соединяться с ядром, либо распадаться под действием интенсивного поля ядра, результатом чего будет, вероятно, испускание Н-атома или электрона или же обоих вместе»¹⁾.

Резерфорд предполагал, что нейтрон, названный им нейтральным атомом, представляет собой сильносвязанное состояние электрона и протона (Н-ядра, по его терминологии).

Предпринятые после этого экспериментальные поиски нейтрона не увенчались успехом. Как вспоминал впоследствии Чэдвик, Резерфорд «...указывал на трудность понять строение ядра, полагая единственными существующими элементарными частицами протон и электрон, и на необходимость в связи с этим прибегнуть к помощи нейтрона. Резерфорд охотно допускал, что многое в этом было лишь чистым домыслом, и, будучи чуждым спекуляциям, не основанным на эксперименте, редко, за исключением частных бесед, говорил об этом. Кажется, только один раз после Бейкерманской лекции он снова публично высказал свои взгляды на роль нейтрона. Однако он не отказался от своей идеи и заразил ею меня. В течение последующих лет, время от времени, иногда вместе, порой я один, мы продолжали проводить эксперименты в надежде найти признаки существования нейтро-

¹⁾ Резерфорд Э. Ядерное строение атома: Бейкерманская лекция.— В кн.: Нейтрон: Предыстория, открытие, последствия.— М.: Наука, 1975, с. 139.

на в момент ли его образования, или в момент его испускания из ядра атома»¹⁾).

История открытия нейтрона полна драматизма. Нейтрон не «давался» физикам, «ускользал» от них. В 1930 г. В. Боте и Г. Бекер наблюдали излучение нейтронов при облучении бериллия α -частицами, но отождествили это явление с испусканием γ -лучей. Год спустя супруги Жолио-Кюри наблюдали выбивание протонов из веществ под действием нейтронов, но интерпретировали это выбивание как результат взаимодействия с высокоэнергетическими γ -квантами.

Сразу же после появления сообщения Кюри Чэдвик приступил к работе. Он вспоминает: «Мне было ясно, что наблюдения Кюри-Жолио нельзя приписать эффекту Комптона, с которым мне не раз приходилось сталкиваться. Я был уверен, что здесь нечто новое и незнакомое. Несколько дней напряженной работы оказалось достаточно, чтобы показать, что эти странные эффекты обязаны своим происхождением нейтральной частице; мне удалось также измерить ее массу. Нейтрон, существование которого предположил Резерфорд в 1920 г., наконец обнаружил себя»²⁾).

Донейтронная физика знала в мире атомов и молекул только электромагнитные силы и сводила или пыталась свести все, что происходит в этом мире, к электромагнитному взаимодействию. Дело в том, что квантовая механика достигла грандиозных успехов в понимании структуры атомов и молекул, при этом все фактически базировалось на единственном предположении о том, что силы, действующие между электронами и ядрами, имеют электростатическое происхождение и подчиняются закону Кулона.

Успех был настолько велик, что даже атомное ядро захотели «втиснуть» в электромагнитную картину мира. Так как единственными частицами с отличной от нуля массой покоя были протон и электрон, то возникло желание считать их структурными «кирпичиками» ядра, т. е. полагать, что ядро состоит из протонов и электронов, между которыми действуют электрические силы. Этим

¹⁾ Чэдвик Дж. Воспоминания о поисках нейтрона.— Там же, с. 5.

²⁾ Чэдвик Дж. Воспоминания о поисках нейтрона.— Там же, с. 9.

отдавалась дань старой гипотезе Проута о том, что все атомы в конечном счете состоят из атомов водорода.

Но гипотеза о протонно-электронной структуре атомного ядра была не столько физической, сколько метафизической, ибо она противоречила самой своей сущностью квантовой механике. Это разъяснил в 1926 г. В. Гейзенберг, который показал, что электрон не может «жить» в столь малом объеме пространства, какое занимает ядро. Дело в том, что если R — линейные размеры ядра, то, согласно принципу неопределенности Гейзенберга, неопределенность в импульсе ядерного электрона будет порядка \hbar/R (\hbar — квантовая постоянная). Умножив эту величину на скорость электрона в ядре, равную по порядку величины скорости света c , мы найдем неопределенность в кинетической энергии электрона $c\hbar/R$. Эта величина должна быть, естественно, меньше, чем энергия связи ядра, приходящаяся на одну ядерную частицу. Но энергия связи составляет примерно 8 МэВ, а неопределенность в кинетической энергии электрона при $R \approx 10^{-13}$ см составляет 200 МэВ. Таким образом, неопределенность в кинетической энергии больше энергии связи и, следовательно, электрон не может находиться в ядре.

Противоречие возникало не только с таким общим принципом, как принцип неопределенности, — были и более прямые противоречия между гипотезой о протонно-электронной структуре ядра и экспериментальными фактами. К их числу относится так называемая азотная катастрофа. Она заключается в следующем. В протонно-электронной модели ядро атома азота ^{14}N состоит из 14 протонов и 7 электронов (заряд ядра ^{14}N равен 7 протонным зарядам). Таким образом, всего в ядро ^{14}N входит 21 частица, а так как спин каждой из них равен $1/2$, то суммарный спин ядра будет полуцелым. Но существует фундаментальная теорема Паули о связи между спином и статистикой: если одинаковые частицы имеют полуцелый спин, то они подчиняются статистике Ферми — Дирака; если же они имеют целый спин, то подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна. Поэтому, если справедлива протонно-электронная модель ядра, то ядра азота должны подчиняться статистике Ферми — Дирака. Это легко проверить, изучая полосатый спектр молекулярного азота, связанный с колебаниями ядер азота. Колебательный спектр ^{14}N обусловлен переходами молекулы из одного колебательного состояния в другое. Если ядро обладает целым спином, то более интенсивными будут переходы

между состояниями с четными значениями момента количества движения; если же спин ядра — полуцелый, то более интенсивными будут переходы между состояниями с нечетными значениями момента. Для молекул азота более интенсивны линии, соответствующие переходам между состояниями с четными значениями момента. Это показывает, что спин ядра ^{14}N — целый, а не полуцелый, как должно было быть в протонно-электронной модели. Этой модели ядра противоречат также и значения магнитных моментов ядер. Если бы в состав ядра входили электроны, то магнитный момент ядра был бы порядка магнитного момента электрона, т. е. порядка боровского магнетона $e\hbar/2m_e c$ (m_e — масса электрона). Между тем магнитный момент ядер порядка протонного, или, как говорят, ядерного, магнетона $e\hbar/2m_p c$ (m_p — масса протона), который в тысячу раз меньше электронного магнитного момента.

Таковы противоречия донейтронной физики, но все они были устранены после открытия нейтрона. Для этого оказалось достаточным предположения, что в состав ядра входят наряду с протонами не электроны, а нейтроны. Гипотеза эта была высказана Д. Д. Иваненко и В. Гейзенбергом спустя несколько месяцев после открытия Дж. Чэдвика.

Важно подчеркнуть, что именно Иваненко первым высказал важное допущение о том, что нейтрон является элементарной частицей, как и протон обладающей спином $1/2$. В небольшой заметке, направленной 21 апреля 1932 г. в английский журнал *Nature*, он писал: «Наибольший интерес представляет вопрос, насколько нейтроны можно рассматривать как элементарные частицы (чем-то подобными протонам или электронам). Нетрудно подсчитать число α -частиц, протонов и нейтронов, имеющих в каждом ядре, и получить таким образом представление об угловом моменте ядра (полагая угловой момент нейтрона равным $1/2$)»¹⁾.

Таким образом, здесь содержатся три важных момента: 1) ядра состоят из α -частиц, протонов и нейтронов, 2) нейтрон является элементарной частицей, 3) спин нейтрона равен $1/2$ (в единицах \hbar).

Гипотеза об элементарности нейтрона имела принципиальное значение, ибо после его открытия и Резерфорд,

¹⁾ *Ivanenko D. The neutron hypothesis.— Nature, 1932, v. 129, p. 798.*

и Чэдвик, и Гейзенберг считали, что нейтрон представляет собой связанное состояние электрона и протона.

Интересно, что еще до опытов Чэдвика к правильной интерпретации результатов экспериментов В. Боте и Ф. Жолио-Кюри пришел итальянский теоретик Э. Майорана. «Майорана стал развивать модель ядра,— пишет Э. Сегре,— построенного только из протонов и „нейтральных протонов“ (т. е. нейтронов.— *Авт.*), и весьма далеко продвинулся в описании сил, действующих между этими частицами. Он рассказал Ферми и некоторым своим друзьям об этой работе. Ферми сразу же осознал ее важность и стал торопить Майорану с публикацией, но тот колебался, считая, что достигнутые им к тому времени результаты являются слишком неполными. Он сказал, что пока не хотел бы писать статью по этому поводу. Ферми попросил у Майораны разрешения сообщить (конечно, ссылаясь на него) результаты на Парижской конференции».

Нейтрон в отличие от протона и электрона нестабилен. Теперь мы знаем, что свободный нейтрон «живет» всего около 15 мин и распадается на электрон, протон и нейтрино — точнее, антинейтрино. Что касается нейтрона в ядре, то из-за его связи он, как правило, не может распасться. Поэтому большинство ядер стабильно относительно β -распада, т. е. излучения электронов. Но в некоторых случаях нейтрон может распадаться и в связанном состоянии. Это бывает при определенном соотношении между массами начального и конечного ядра, которое образуется в результате β -распада; именно масса начального ядра должна превышать массу конечного хотя бы на $0,5 \text{ МэВ}/c^2$ — массу электрона (c — скорость света).

Гипотеза нейтрино

При β -распаде ядер, как мы уже говорили, кроме электронов образуется еще нейтрино. Так мы приходим к пятой элементарной частице. Частица эта сначала была введена в физику теоретически. Именно существование нейтрино было постулировано В. Паули в 1929 г., за много лет до его экспериментального открытия (1956 г.). Нейтрино — нейтральная частица с нулевой (или ничтожно малой) массой — понадобилось Паули для того, чтобы «спасти» закон сохранения энергии в процессе β -распада атомных ядер.

Чтобы разъяснить сложившуюся к 1929 г. ситуацию, рассмотрим, например, β -распад ядра ${}_{83}^{210}\text{Ra}$, в котором впервые были убедительно продемонстрированы трудности с законом сохранения энергии. При β -распаде ${}_{83}^{210}\text{RaE} \rightarrow {}_{84}^{210}\text{RaF} + e^-$ наблюдался целый спектр электронов, энергия которых начиналась от нулевой и кончалась некоторой максимальной энергией, определяемой разностью масс ΔM начального и конечного ядер. Между тем из закона сохранения энергии следовало, что в этом распаде должны образовываться монохроматические электроны с энергией ΔMc^2 . Более того, как впервые заметил Паули, в этом распаде не сохраняется также и спин. Действительно, спины ядер RaE и RaF равны единице и нулю соответственно. Поэтому при переходе $\text{RaE} \rightarrow \text{RaF}$ угловой момент должен измениться на целое число. Если считать, что в β -распаде образуется только один электрон, спин которого равен $1/2$, то угловой момент в этом распаде не сохраняется.

В 1932 г. Н. Бор склонялся к мысли о том, что в β -распаде не сохраняется энергия: «...на современном этапе развития атомной теории мы можем сказать, что не существует эмпирических или теоретических аргументов для подтверждения закона сохранения энергии в случае β -распада, и попытки сделать это даже приводят к осложнениям и трудностям. Конечно, радикальный отход от этого закона заключал в себе странные следствия в случае, если бы такой процесс мог быть обращен. В самом деле, если бы в некотором процессе столкновения электрон мог бы поглотиться ядром с потерей его механической индивидуальности и, следовательно, мог быть воссоздан, как β -частица, мы нашли бы, что энергия этой β -частицы вообще отличалась бы от энергии исходного электрона. Точно так же, как учет таких аспектов строения атома существен для объяснения обычных физических и химических свойств материи и означает отказ от классического идеала причинности, еще не вскрытые особенности стабильности атомов, ответственные за существование и свойства атомных ядер, могут заставить нас отказаться от самой идеи сохранения энергии»¹⁾).

Первоначально Паули назвал гипотетическую нейтральную частицу, образующуюся при β -распаде ядер,

¹⁾ Бор Н. Химия и квантовая теория строения атома.— Избр. тр.— М.: Наука, 1974, т. 2, с. 109.

нейтроном (это было до открытия Чэдви́ка) и предположил, что она входит в состав ядра.

Насколько трудно было прийти к гипотезе нейтрино, образующихся в самом акте распада нейтрона, видно хотя бы из того, что всего за год до появления своей фундаментальной статьи о свойствах слабого взаимодействия Ферми, выступая с докладом о современном состоянии физики атомного ядра на V Международной конференции по электричеству в июле 1932 г., использовал термин «нейтрон» для обозначения двух частиц, которые называются сейчас нейтроном и нейтрино. «Например, согласно предложению Паули,— говорит Ферми,— было бы возможно вообразить, что внутри атомного ядра находятся нейтроны, которые испускались бы одновременно с β -частицами. Эти нейтроны могли бы проходить через большие толщи вещества, практически не теряя своей энергии, и поэтому были бы практически ненаблюдаемы. Существование нейтрона, несомненно, могло бы просто объяснить некоторые пока непонятные вопросы, такие, как статистика атомных ядер, аномальные собственные моменты некоторых ядер, а также, быть может, природу проникающего излучения»¹).

«После открытия нейтрона,— говорил Паули,— на семинарах в Риме мою новую частицу, испускаемую при β -распаде, Ферми стал называть „нейтрино“, чтобы отличить ее от тяжелого нейтрона. Это итальянское название стало общепринятым»²).

Э. Сегре так описывает возникновение названия «нейтрино»: «Вообще-то термин „нейтрино“ был введен в физику именно на Римской конференции. До этого времени была некоторая путаница между гипотетическим нейтроном, который еще не был открыт, и частицей, обеспечивающей сохранение энергии и импульса при бета-распаде. Слово «нейтрино» предложил Ферми в неофициальных разговорах; это слово — пример употребления увеличительного и уменьшительного окончаний *one* и *ino* в итальянском языке. Итальянское слово нейтрон (*neutrone*) означает нечто большое, нейтральное, а нейтрино (*neutrino*) — нечто маленькое, нейтральное. Термин был вскоре подхвачен в Римском университете, а оттуда распространился по всему физическому миру»³).

1) Ферми Э. Научные труды.— М.: Наука, т. 1, с. 468.

2) Паули В. Физические очерки.— М.: Наука, 1975, с. 110—111.

3) Сегре Э. Энрико Ферми — физик.— М.: Мир, 1975, с. 98.

И только в 1933 г. в докладах Сольвеевского конгресса, посвященного физике атомного ядра, было опубликовано выступление В. Паули о нейтрино и его свойствах.

Последующему «утверждению» нейтрино способствовал новый подход в теории β -распада, развитый Ферми в гениальной работе «К теории β -лучей», появившейся в 1933 г. После нее β -распад стали рассматривать не как результат освобождения электрона, первоначально находящегося в нейтроне, а как следствие квантового перехода, иными словами — аналогично процессу излучения фотона атомом (фотон не находится в недрах атома, а появляется в результате квантового перехода).

Успехи теории β -распада, развитой Ферми, побудили Н. Бора окончательно отказаться от гипотезы о несохранении энергии в атомных и ядерных процессах. «...Нужно отметить,— писал Бор в 1936 г.,— что основания для серьезных сомнений в строгой справедливости законов сохранения при испускании β -лучей атомным ядром сейчас в основном устранены благодаря многообещающему согласию между быстро увеличивающимися экспериментальными данными по явлениям β -излучения и следствиями нейтринной гипотезы Паули, столь блестяще развитой в теории Ферми»¹).

Паули так описывает эволюцию взглядов Бора на проблему нейтрино: «Возражения Бора по сравнению с его фарадеевской лекцией стали заметно слабее. Проявив большую осторожность в вопросе о нарушении закона сохранения энергии, он ограничился более общим утверждением: никто, дескать, не знает, какие сюрпризы в этой области еще могут нам встретиться в будущем. Впрочем, справедливость закона сохранения энергии и существование нейтрино он признал полностью только в 1937 г., когда уже была с успехом развита теория Ферми»²).

В 30-е годы теория Ферми была обобщена на позитронный распад (Дж. Вик, 1934 г.) и на переходы с изменением углового момента ядра (Дж. Гамов и Э. Теллер, 1937 г.).

«Судьбу» нейтрино можно сравнить с «судьбой» электрона. Обе частицы были вначале гипотетическими —

¹) Бор Н. Законы сохранения в квантовой теории.— Избр. научн. тр.— М.: Наука, 1971, т. 2, с. 203.

²) Паули В. Физические очерки.— М.: Наука, 1971, с. 114.

электрон был введен, чтобы привести атомную структуру вещества в соответствие с законами электролиза, а нейтринно — для спасения закона сохранения энергии в процессе β -распада. И только значительно позже они были открыты как реально существующие.

Ядерные силы

Протонно-нейтронная модель ядра поставила перед физикой новую проблему первостепенной важности — проблему ядерных сил. Дело в том, что нейтрон является электрически нейтральной частицей, т. е. не обладает электрическим зарядом. Но нейтрон может находиться в ядре, следовательно, он притягивается к протонам и нейтронам, из которых составлены ядра. Иными словами, между нейтроном и протоном, а также между двумя нейтронами действуют силы явно не электрического происхождения, так как электрический заряд нейтрона равен нулю. Что же это за сила?

Квантовая механика выяснила природу химических сил, действующих между нейтральными атомами. Например, потенциальной энергией молекулы водорода, точнее, ее ядер, будет полная энергия обоих электронов, зависящая от расстояния между ядрами как параметра. Эта энергия существенно определяется симметрией электронной волновой функции, которая, в свою очередь, зависит от взаимной ориентации спинов электронов. При нулевом суммарном спине энергия имеет минимум как функция расстояния между ядрами. Этот минимум соответствует связанному состоянию молекулы. Электроны при этом коллективизированы, т. е. принадлежат обоим ядрам. Наглядно дело происходит так, как если бы ядра «обменивались» электронами. На этом основании говорят об обменном характере химических сил.

Переходя к ядру, хотелось бы прежде всего рассматривать протон и нейтрон не как две различные частицы, а как два электрона в молекуле H_2 , которые отличаются там только тем, что ориентации их спинов различны. Так возникла идея — она принадлежала Гейзенбергу — рассматривать протон и нейтрон как два состояния единой частицы — нуклона, — различающиеся проекцией некоторого вектора. Этот вектор должен иметь только две проекции, т. е. должен вести себя как спин. Он введен Гейзенбергом в 1933 г. и назван позже изотопическим спином,

Можно считать, например, что проекция изотопического спина протона равна $1/2$, а нейтрона — минус $1/2$. Заметим, что если прибавить к проекции изотопического спина $1/2$, то мы получим заряд частицы в единицах протонного заряда. В дальнейшем изотопический спин оказался необходимым приписать и другим элементарным частицам — адронам, и понятие изотопического спина приобрело фундаментальное значение.

Но если хоть в какой-то мере возможно проводить аналогию между ядром и молекулой, то, может быть, и ядерные силы, так же как и химические, можно считать имеющими обменное происхождение?

Впервые мысль об обменном характере взаимодействия протона и нейтрона высказал Гейзенберг в своей первой статье, посвященной протонно-нейтронной модели ядра (1933). Он писал: «При сближении нейтрона и протона на расстояние, сравнимое с ядерным, происходит по аналогии с ионом H^+ перемена места отрицательного заряда... Это изменение места можно сделать наглядным с помощью представления об электро-не, не обладающем спином и подчиняющемся статистике Бозе»¹⁾.

Здесь как бы содержится неявное допущение о существовании некоторой частицы, обмен которой обуславливает взаимодействие между протоном и нейтроном, — ведь гипотетическим бесспиновым «электроном» Гейзенберга и оказался псевдоскалярный π -мезон, открытый спустя 15 лет после опубликования статьи Гейзенберга и лежащий в основе ядерных сил.

Но слава открытия этой частицы связана не с именем Гейзенберга, а с именем Х. Юкавы, который в 1934 г. предложил мезонную теорию ядерных сил. Согласно этой теории взаимодействие протона и нейтрона является результатом обмена между ними некоторыми заряженными частицами. Юкава предсказал значение массы этих частиц, которые можно интерпретировать как кванты ядерного поля. Он исходил при этом из фундаментального предположения, что радиус действия сил должен быть обратно пропорционален массе обмениваемых частиц и может быть оценен по формуле $R = \hbar/mc$ (m — масса частицы). Если подставить сюда вместо R размеры ядра $R \approx 10^{-13}$ см, то для массы частицы получится значение, превышающее массу электрона примерно в 200 раз.

¹⁾ Гейзенберг В. О строении атомных ядер. — В кн.: Нейтрон: Предыстория, открытие, последствия. — М.: Наука, 1975, с. 147—148.

Существование такой частицы и предсказал Юкава. Но в то время она не была известна, и Юкава писал: «Так как квант с такой большой массой в эксперименте никогда не наблюдался, то вышеизложенная теория, кажется, находится на ложном пути»¹⁾.

Первым, кто пытался реализовать в количественном плане идею Гейзенберга об обменном характере ядерных сил, был И. Е. Тамм. Он предположил, что обмен электроном и нейтрино между нейтроном и протоном является источником их сильного притяжения. «Уже в первом сообщении (1934 г.) И. Е. Тамм привел полученную им формулу для потенциала взаимодействия, возникающего между нуклонами, и показал, что это взаимодействие очень мало по сравнению с реально существующими ядерными силами. Следовательно, хотя эти β -силы, конечно, существуют, не они обеспечивают устойчивость ядер. Однако, отбрасывая от этой работы, Юкава вскоре показал, что ядерные силы могут обуславливаться обменом частицами, если эти частицы гораздо тяжелее электрона. Так были предсказаны, а затем обнаружены «ядерные» сильновзаимодействующие мезоны. Работа И. Е. Тамма послужила прообразом и основой как этой мезонной теории ядерных сил, так и других подобных исследований, которые все строились в общем по той же теоретической схеме, что и теория β -сил, созданная Игорем Евгеньевичем»²⁾.

Между тем в серии экспериментов, выполненных в 1936—1938 гг., К. Андерсон и С. Неддермайер показали, что в составе космических лучей присутствуют положительные и отрицательные частицы, масса которых заключена в интервале между массой электрона и протона. Естественно было отождествить эти частицы с предсказанными Юкавой квантами ядерного поля. Вначале эти частицы называли мезотронами, а потом — мезонами.

Открытие пиона и мюона

Между тем дальнейшие исследования свойств частиц, открытых К. Андерсоном, показали, что отождествление их с мезонами Юкавы было несколько преждевременным. Дело в том, что в 1947 г. М. Конверси, Э. Панчини и

¹⁾ Yukawa H.— Collected papers from Osaka University, 1935, v. 2, p. 52.

²⁾ Тамм И. Е. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1975, т. 1, с. 12.

О. Пиччиони, изучая взаимодействие мезонов космических лучей с атомными ядрами, обнаружили, что отрицательные частицы не захватываются ядрами, как это следовало из теории Юкавы, а распадаются с испусканием электронов. Из этого Э. Ферми, Э. Теллер и В. Вайскопф сделали вывод, что частицы, столь слабо взаимодействующие с ядрами, не могут служить для передачи мощных ядерных сил. Поэтому С. Саката, а также Х. Бете и Р. Маршак выдвинули предположение, что наблюдаемые частицы не являются частицами Юкавы, а представляют собой только продукты их распада.

В 1947 г. С. Пауэлл наблюдал в фотоэмульсиях следы заряженных частиц, которые были интерпретированы как мезоны Юкавы и названы π -мезонами или пионами. Продукты распада заряженных пионов, представляющие собой также заряженные частицы, были названы μ -мезонами или мюонами. Именно отрицательные мюоны и наблюдались в опытах Конверси: в отличие от пионов мюоны, как и электроны, не взаимодействуют сильно с атомными ядрами.

Так как при распаде остановившихся пионов всегда образовывались мюоны строго определенной энергии, отсюда следовало, что при переходе $\pi \rightarrow \mu$ должна образовываться еще одна нейтральная частица (масса ее оказалась очень близкой к нулю). С другой стороны, эта частица практически не взаимодействует с веществом, поэтому был сделан вывод, что она не может быть фотоном. Таким образом, физики столкнулись с новой нейтральной частицей, масса которой равна нулю.

Несколько ранее, как мы уже знаем, Паули высказал предположение о существовании такой частицы. Еще до того, как она была обнаружена, частица получила наименование нейтрино (и стала обозначаться ν). Поэтому теперь нейтральная частица, появляющаяся в результате распада π -мезона, была отождествлена с нейтрино.

Итак, был открыт заряженный мезон Юкавы, распадавшийся на мюон и нейтрино, $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$. Время жизни π -мезона относительно этого распада оказалось равным $2 \cdot 10^{-8}$ с. (Нестабильность кванта ядерного взаимодействия была предсказана в свое время Юкавой.) Частица должна была распадаться на электрон и нейтрино, однако этот распад оказался сильно подавленным по сравнению с распадом $\pi \rightarrow \mu + \nu$. Выяснилось, что и мюон не стабилен, что в результате его распада образуется электрон. Время жизни мюона оказалось порядка

10^{-6} с. Так как электрон, образующийся при распаде мюона, не имеет строго определенной энергии, то был сделан вывод, что наряду с электроном при распаде мюона образуются два нейтрино, $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$: электронное (ν_e) и мюонное (ν_μ). Вывод оказался правильным.

Нестабильность мюона установлена в опытах с космическими лучами еще до того, как было понято отличие пиона от мюона. Так, в 1938 г. было замечено, что при прохождении в атмосфере космические лучи поглощаются сильнее, чем в воде (при таком же количестве вещества). Это аномальное поглощение Куленкампф интерпретировал как результат нестабильности частиц космических лучей (чтобы иметь в атмосфере такое же количество вещества, как и в более плотной воде, частицы должны пройти существенно большее расстояние). Но нестабильные частицы при прохождении большего расстояния будут иметь большую вероятность распасться! На основании анализа аномального поглощения было определено время жизни мюона — около 10^{-6} с — это подтвердилось более точными поздними измерениями. Эта величина характеризует время жизни покоящегося мюона. Но в специальной теории относительности скорость распада движущихся мюонов должна замедляться тем больше, чем ближе скорость мюона к скорости света. Подобное замедление и было обнаружено Б. Росси в 1939 г.

«Стоит упомянуть о довольно пелепом случае, — рассказывает в этой связи Гейзенберг, — когда мюоны помогли решению весьма фундаментального вопроса. Здесь, в Германии, перед самой войной правительство не одобряло теории относительности, в особенности релятивистское замедление времени в движущихся телах, о котором было сказано, что это абсурдная, чисто теоретическая спекуляция. Дело дошло даже до судебных разбирательств по поводу допустимости преподавания теории относительности в университетах. При одном из таких разбирательств я имел возможность высказаться о том, что время распада мюона должно зависеть от его скорости: мюоны, которые движутся почти со скоростью света, должны распадаться медленнее тех мюонов, которые движутся с меньшими скоростями, — согласно предсказанию теории относительности. Экспериментальные результаты подтвердили такое предсказание: замедление времени могло наблюдаться на опыте непосредственно, и этот факт

открыл двери для теории относительности в Германии. Поэтому я всегда чувствую признательность мюонам»¹⁾).

По своим свойствам мюон оказался подобным электрону, эти две частицы отличаются только массой. Такие фундаментальные величины, как спин, электрический заряд, магнитный момент, а также свойства взаимодействия электрона и мюона с другими частицами оказались полностью тождественными. Причина такого совпадения до сих пор не выяснена. Возможно, это отражение каких-то неизвестных пока свойств симметрии в мире элементарных частиц, которые смогут быть поняты только после создания единой теории всех взаимодействий.

Изучение взаимодействия заряженных пионов с нуклонами позволило установить, что пионы являются псевдоскалярными частицами, т. е. имеют нулевой спин и отрицательную пространственную четность.

Интересно, что гипотеза о псевдоскалярной природе пиона обсуждалась Н. Кеммером еще в 1938 г., но была отвергнута им. Как он сам отмечает, он допустил две ошибки. Во-первых, игнорировал так называемые тензорные ядерные силы, во-вторых, сделал вывод, что обмен псевдоскалярным мезоном приводит якобы к дейтрону со спином нуль, а не единица, как следовало из опыта.

В 1950 г. на ускорителе в Беркли и одновременно при изучении космических лучей были получены указания о существовании нейтрального пиона π^0 -мезона. Затем было установлено, что π^0 -мезон нестабилен, что основным способом его распада является распад на два фотона со временем жизни порядка $2 \cdot 10^{-16}$ с.

Изотопическая инвариантность. Резонансы

Открытие нейтрального пиона имело решающее значение для ядерной физики, так как оно подтвердило мезонную теорию зарядовой независимости ядерных сил.

Так как π -мезон сильно взаимодействует с нуклонами, то при рассеянии протонов достаточно больших энергий на ядрах должны интенсивно рождаться пионы. Подобно тому как фотоны, являющиеся квантами электромагнитного взаимодействия, рождаются при рассеянии заряженных частиц, так и пионы, являющиеся квантами ядерного взаимодействия, рождаются при рассеянии протонов. Правда, из-за не равной нулю массы пионов это

¹⁾ Гейзенберг В. Космическое излучение и фундаментальные проблемы физики.— УФН, 1972, т. 121, с. 671.

рождение начинается с некоторой энергии протонов — пороговой энергии. Пионы за время своей жизни успевают пройти расстояние порядка нескольких метров от точки рождения. Этого расстояния достаточно, чтобы сформировать пучки заряженных пионов и изучить их взаимодействие с нуклонами. Поэтому уже в 1951—1952 гг. такие пучки были получены в лаборатории на протонном ускорителе. В эти же годы под руководством Ферми были выполнены замечательные эксперименты по исследованию рассеяния π -мезонов на нуклонах. Важным итогом этих исследований явилось доказательство изотопической инвариантности сильного взаимодействия, т. е. взаимодействия между нуклонами и пионами. Именно, было показано, что если нуклонам приписать изотопический спин $1/2$, а π -мезонам — изотопический спин 1, то во всех процессах взаимодействия π -мезонов с нуклонами изотопический спин будет сохраняться.

Закон сохранения изотопического спина представляет собой общую формулировку принципа зарядовой независимости ядерных сил. Этот закон позволил объяснить наблюдаемые на опыте соотношения между дифференциальными сечениями процессов рассеяния π -мезонов на протонах,

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

На опыте оказалось, что вероятность (π^+, p) -рассеяния почти в десять раз превышает вероятность (π^-, p) -рассеяния в интервале энергий π -мезонов 100—200 МэВ.

Это отношение дифференциальных сечений рассеяния π -мезонов протонами было объяснено Ферми, предположившим, что в исследованной области энергий π -мезоны взаимодействуют с нуклонами особенно сильно в том состоянии, которое имеет полный изотопический спин, равный $3/2$.

Состояние нуклона и π -мезона характеризуется не только величиной полного изотопического спина, но и величинами полного углового момента и пространственной четности. Рассеяние π -мезона на нуклонах в состоянии с определенными значениями этих квантовых чисел характеризуется так называемой фазой рассеяния. Последняя зависит от энергии взаимодействующих частиц, а также от их полного изотопического спина, полного углового момента и пространственной четности. Случай нулевой фазы рассеяния соответствует отсутствию взаимодействия, а случай, когда фаза равна $\pi/2$, — макси-

мально сильному взаимодействию. Таким образом, знание фаз рассеяния исключительно важно для понимания механизма взаимодействия π -мезонов с нуклонами.

«Можно попытаться,— писал Ферми,— феноменологически интерпретировать рассеяние как обусловленное силой, действующей между нуклоном и пионом. Беглый взгляд на полученные фазовые сдвиги сразу обнаруживает, что эта сила должна быть различной в различных состояниях. Предполагая вновь, что первое решение правильно, мы смогли бы далее заключить, что сила очень велика для состояний с изотопическим спином $3/2$ и моментом $3/2$ »¹⁾).

Сильное взаимодействие π -мезона и нуклона в состоянии с полным изотопическим спином $3/2$ и моментом $3/2$ приводит к появлению у нуклона возбужденного состояния, которое в течение очень короткого времени порядка 10^{-23} с «распадается» на нуклон и π -мезон. Поскольку это состояние имеет вполне определенные квантовые числа, как и стабильные элементарные частицы, естественно считать его частицей. Чтобы подчеркнуть очень малое время жизни этого состояния, его и подобные ему другие короткоживущие состояния стали называть *резонансами*.

Нуклонный резонанс, открытый Э. Ферми в 1952 г., стали называть *Δ -изобарой* (чтобы выделить тот факт, что изотопический спин Δ -изобары равен $3/2$). Открытие Δ -резонанса имело важнейшее значение для физики элементарных частиц. Так как время жизни резонансов незначительно, их нельзя наблюдать непосредственно, как наблюдают «обычные» протон, π -мезоны или мюоны (по их следам в трековых приборах). Резонансы обнаруживают по характерному поведению сечений рассеяния частиц, а также изучая свойства продуктов их распада. Большинство известных элементарных частиц относится именно к группе резонансов.

Заметим, что возбужденные состояния (или резонансы) являются известными объектами в физике. Так, они были известны в атомной и ядерной физике, где их существование связано с составной природой атома и ядра. Свойства атомных состояний определяются электромагнитным взаимодействием и малые вероятности их распада связаны с малостью константы электромагнитного взаимодействия.

¹⁾ Ферми Э. Научные труды.— М.: Наука, 1972, т. 2, с. 562.

Возбужденные состояния существуют не только у нуклона — в этом случае говорят о его изобарных состояниях, но и у μ -мезона и других мезонов — в этом случае говорят о мезонных резонансах.

Позитрон

В 1928 г. П. Дирак создал релятивистскую квантовую механику электрона, сформулировав уравнение, играющее для релятивистского электрона такую же роль, как уравнение Шредингера для нерелятивистской частицы. Из этого уравнения, носящего имя Дирака, следовало, что для свободного электрона возможны два типа состояний: один — с положительной, а другой — с отрицательной энергией. Состояния с отрицательной энергией, казалось бы, не отвечают реальным состояниям частицы, и поэтому вначале было желание их просто отбросить. Однако это сделать невозможно в силу основных принципов квантовой механики — в этом случае совокупность решений уравнений Дирака была бы неполной. Чтобы устранить эту трудность, Дирак изменил понятие вакуума: физический вакуум — это не пустота, а бесконечное множество электронов в состояниях с отрицательными значениями энергии. Это множество само по себе не наблюдается, но если в нем образуется «дырка» (т. е. электрон из вакуума уходит в состояние с положительной энергией), то дырка будет вести себя как положительно заряженная частица с положительной энергией. Это будет частица, называемая позитроном. Таким образом, становится возможен процесс рождения электронно-позитронной пары, например, фотоном. Если же электрон уходит в дырку, то будет наблюдаться аннигиляция пары и превращение ее в фотоны.

«На первый взгляд это предположение (о свойствах вакуума — *Авт.*), — писал Л. Купер, — вызывает больше вопросов, чем дает ответов. Совершенно неожиданно вакуум превратился из пустоты Демокрита, Гассенди и Ньютона в нечто, напоминающее скорее *plenum* Аристотеля или Декарта. Теперь нельзя уже сказать, что вакуум ничего не содержит. Это очень сложная система, содержащая в некотором смысле половину всего сущего, система, все отрицательные уровни энергии которой заполнены электронами. (Со временем представление о вакууме несколько изменилось, так как явная асимметрия между заполненными и пустыми уровнями исчезла, одна-

ко динамика современного вакуума и его сложность тесно связана с тем вакуумом, который был предложен Дираком.) Сразу же возникает несколько очевидных вопросов. Прежде всего каждый электрон обладает зарядом e , так что бесчисленное количество электронов имело бы бесконечный заряд. Таким образом, предложенный Дираком вакуум, в котором заполнены все уровни с отрицательной энергией, должен обладать бесконечным зарядом. Дирак не отрицает этого. Однако, говорит он, мы воспринимаем этот бесконечный заряд как нормальное состояние вещей. Ощущаем же мы лишь отклонения от этого состояния. Помимо заряда вакуум должен обладать бесконечной массой и бесконечной энергией. Все это, по мнению Дирака, нормальное состояние вещей; воспринимаются лишь отклонения от этого состояния»¹⁾.

Таким образом, теоретически было предсказано существование античастиц — вначале антиэлектрона — позитрона, а в дальнейшем и других античастиц.

Для каждой частицы существует своя античастица, но могут быть случаи, когда античастица совпадает с частицей. Тогда говорят об истинно нейтральных частицах. Все заряды — электрический, барионный, лептонный — для истинно нейтральной частицы строго равны нулю. Примером истинно нейтральной частицы является фотон.

Позитрон как реально существующая частица был открыт в космических лучах К. Андерсоном в 1932 г.

В этих экспериментах использовалась камера Вильсона, помещенная в сильное магнитное поле, в которой по кривизне оставляемого следа (трека) можно было определить импульс заряженной частицы, а также установить знак ее электрического заряда. Впервые заряженные частицы в космических лучах обнаружил в 1927 г. Д. В. Скобельцын, который первым применил камеру Вильсона в магнитном поле для анализа свойств космических лучей.

Однако теория Дирака не оказала никакого влияния на работу Андерсона. «Открытие позитрона,— писал К. Андерсон,— было совершенно случайным, хотя релятивистская теория электрона Дирака предсказывала также и существование позитрона и это было хорошо известно почти всем физикам; в открытии позитрона теория не сыграла существенной роли. Цель эксперимента, который привел к открытию, состояла просто в измерении

¹⁾ Купер Л. Физика для всех.— М.: Мир, 1974, т. 2, с. 263—264.

энергетического спектра вторичных электронов, образующихся в атмосфере и других материалах, благодаря приходящему из космоса излучению»¹⁾).

После открытия позитрона в космических лучах позитрон был «создан» на Земле. Это произошло в 1933 г., когда Дж. Чэдвик, П. Блэккет и Дж. Оккиалини в Англии, Ирен и Фредерик Жолио-Кюри во Франции наблюдали фоторождение электронно-позитронной пары в кулоновском поле ядра, т. е. процесс образования электрона и позитрона при взаимодействии высокоэнергетических фотонов с ядрами. В том же году Ф. Жолио-Кюри и Тибо экспериментально доказали, что позитрон, сталкиваясь с электроном, аннигилирует, и образуются фотоны.

В 1934 г. Х. Бете и В. Гайтлер на основе теории Дирака создали теорию процессов образования электронно-позитронных пар при взаимодействии фотонов с ядрами.

Эта теория явилась ключом к пониманию явлений взаимодействия фотонов и электронов больших энергий с веществом. Но вначале возникли серьезные противоречия между теорией и экспериментом. На основе расчетов Бете и Гайтлера сначала невозможно было понять, почему электроны больших энергий порождают большое число вторичных электронов и позитронов — ливни космических лучей, а также почему электроны проникают через большие толщи вещества. Эти противоречия считались столь серьезными, что Бете и Гайтлер даже пришли к выводу о том, что «квантовая теория явно несправедлива для электронов таких высоких энергий».

Однако такое заключение оказалось преждевременным. Простая идея о возникновении каскадного процесса помогла доказать, что теория Бете и Гайтлера вопреки мнению самих авторов полностью объясняет взаимодействие электронов и фотонов больших энергий с веществом.

Каскадная теория электронно-позитронных и фотонных ливней основывается на том, что фотон, попадая в слой вещества и пройдя небольшое расстояние, рождает электронно-позитронную пару, компоненты которой, поделив между собой энергию фотона, движутся дальше и излучают новые фотоны, которые, в свою очередь, снова рождают пары и т. д. Теория эта нашла блестящее подтверждение на опыте.

¹⁾ *Anderson C. D.*— *Amer. J. Phys.*, 1961, v, 29, p. 825—830.

«Бете и Гайтлер, Дж. Карлсон и Оппенгеймер в США,— пишет Б. Росси,— практически одновременно объяснили природу ливней космических лучей. Создание подробной теории каскадного процесса, объясняющей развитие ливня за счет рождения пар фотонами и излучение фотонов электронами при торможении в поле ядер, было связано с большими математическими трудностями. Среди многих ученых, которые внесли вклад в решение этой проблемы, следует упомянуть советских физиков Л. Д. Ландау, И. Е. Тамма и С. З. Беленького, американских физиков Х. Снайдера, Р. Сербера, В. Х. Фарри, индийских ученых Х. Бабу и С. Чакрабарта»¹⁾.

Медленный позитрон, сталкиваясь с электроном, не сразу аннигилирует. Электрон и позитрон могут образовать своеобразную атомную систему — позитроний, в которой роль положительного ядра играет позитрон. Экспериментально позитроний открыл М. Дейч в 1951 г. Атом оказался нестабильным. Он распадается на два или три фотона в зависимости от взаимной ориентации спинов электрона и позитрона. Парапозитроний с антипараллельными спинами электрона и позитрона распадается на два фотона, а ортопозитроний с параллельными спинами электрона и позитрона — на три фотона, причем время жизни парапозитрония на три порядка меньше времени жизни ортопозитрония. Время жизни орто- и парапозитрония равны соответственно $1,4 \cdot 10^{-7}$ и 10^{-10} с. Теория позитрония была развита Л. Д. Ландау и В. Б. Берестецким.

Интересно заметить, что существование позитрона было предсказано Эйнштейном за несколько лет до Дирака — в 1928 г. Эйнштейн при этом исходил из инвариантности уравнений, описывающих электрон, относительно обращения времени и пришел к выводу, что «если существует решение, которое соответствует отрицательному электрону с массой μ и зарядом $-e$, то существует также и решение, которому соответствует электрон с массой μ и зарядом $+e$ »²⁾. Но электрон с другим знаком электрического заряда и тем же значением массы и является позитроном. Между тем Эйнштейн рассматривал предсказание позитрона как недостаток своей теории: «Наши поиски удовлетворительного выхода из этой трудности были безуспешны»³⁾.

¹⁾ Росси Б. Космические лучи.— М.: Атомиздат, 1966, с. 90—92.

²⁾ Эйнштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966, т. 2, с. 168.

³⁾ Там же, с. 168.

Предсказание позитрона имело принципиальное значение для самых основ физики, а также для философии естествознания. Открытие явлений рождения электрона и позитрона фотоном больших энергий, а также аннигиляции электронно-позитронной пары в фотоны положило конец «статичности», царившей до этого в физике со времени античных философов. «До этого открытия физики придерживались, пусть более или менее неосознанно, философии греческого мыслителя Демокрита. Всякая попытка раздробить материю на все более и более мелкие части, полагали они, в итоге должна приводить к самым малым частям материи, далее не подверженным делению и поэтому называемым атомами. Атомы эти считались неделимыми, неизменными единицами материи, как бы строительными блоками, из которых строится вся материя вообще, а сами атомы, говоря по-современному — элементарные частицы, должны определять видимые свойства различных видов материи соответственно своим размещениям в пространстве и движении. Вся эта картина, как бы ни казалась она правдоподобной, была полностью разрушена теорией Дирака и следствиями из этой теории, начиная с открытия позитрона. При этом существенным было отнюдь не открытие еще одной, до того неизвестной, частицы — было открыто еще множество частиц без сколько-нибудь серьезных последствий для оснований физики; существенным было открытие новой симметрии, сопряженности частиц — античастиц, тесно связанной с лоренцевой группой специальной теории относительности, а также с превращением кинетической энергии сталкивающихся частиц в массу покоя новых частиц и обратно»¹).

Антипротон и антибарионы

Массы других частиц значительно больше массы электрона. Поэтому, чтобы создать искусственно другие античастицы, нужны большие энергии. Чтобы получить их, нужно соорудить мощные ускорители заряженных частиц. Решение этой задачи приобрело широкий размах с 1955 г., когда был введен в строй бэватрон, ускоряющий протоны до энергии 6 ГэВ ($1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$).

¹) Гейзенберг В. Космическое излучение и фундаментальные проблемы. — УФН, 1977, т. 121, с. 669.

С вводом в строй мощных ускорителей существенно увеличился темп исследований в области физики элементарных частиц. В частности, на новой базе стала экспериментально решаться проблема «создания» античастиц. Первым крупнейшим достижением в этой области было «создание» антипротона. Это сделали Э. Сегре и С. Чемберлен с сотрудниками в 1955 г. Опыт сводился к идентификации антипротона, рожденного при взаимодействии пучка ускоренных протонов с ядрами.

Согласно теории Дирака антипротон должен иметь массу, равную массе протона, но отличаться от него знаком электрического заряда. Знак заряда в опыте Сегре определялся по отклонению частиц в магнитном поле. Так как наряду с антипротонами в протонно-ядерных столкновениях рождается большее число отрицательных пионов, то для идентификации антипротона необходимо было достоверно различать антипротоны и отрицательные пионы. Для этого сравнивались скорости антипротона и мезона, обладающие одинаковым импульсом. Так как масса антипротона почти в семь раз превышает массу π^- -мезона, то антипротон при том же импульсе, что и π^- -мезон, должен иметь меньшую скорость по сравнению со скоростью π^- -мезона. В опыте были проведены и другие ухищрения с целью отличать антипротоны от π^- -мезонов. В результате антипротон был надежно идентифицирован.

В 1956 г. был открыт антинейтрон. Для этого использовалась реакция перезарядки при рассеянии антипротонов протонами: $\bar{p} + p \rightarrow \bar{n} + n$.

После открытия антипротона и антинейтрона были обнаружены античастицы и у более тяжелых барионов, получивших название *гиперонов*.

Можно считать экспериментально доказанным, что у каждой частицы есть соответствующая античастица. «В результате теперь стало привычным считать открытие антипротона тривиальным студенческим упражнением. Если подойти с этими «новыми мерками» к классическим работам Чэдваика и Андерсона, то следовало бы сказать, что они вообще ничего не открыли нового, так как нейтрон — это просто другое изоспиновое состояние протона, а андерсеновский позитрон — это просто совершенно очевидный антиэлектрон. В подтверждение нетривиальности открытия группой Сегре антипротона достаточно сказать, что один из наиболее выдающихся известных мне физиков, занимающихся высокими энергиями и не

веривших в возможность рождения антипротона, держал пари на 500 долларов со своим коллегой, который тогда отстаивал теперь уже общепринятую точку зрения, что каждой частице соответствует античастица»¹).

Д. Фриш и А. Торндайк, первыми наблюдавшие странные частицы на ускорителе, подтверждают нетривиальность открытия антипротона: «Мнения относительно того, существуют ли антипротоны вообще, резко разделились. Теоретики, как правило, склонялись к тому, что они должны быть, в то время как экспериментаторы считали, что до тех пор, пока нет положительных экспериментальных доказательств, надо проявлять скептицизм и допускать, что мюклоны, возможно, ведут себя иначе. В Брукхейвене сторонники этих двух течений Хартленд-Снайдер и Морис Гольдхабер довели дискуссию до высшей точки, поспорив на 500 долларов, безусловно, очень большую сумму по отношению к зарплате физиков. Снайдер, самоуверенный теоретик, поддерживал положительное мнение, Гольдхабер, скептик-экспериментатор, подчеркивал, что в физике надо иметь неоспоримые доказательства»²).

Признанием важности заслуг Сегре и Чемберлена в открытии антипротона явилось присуждение им за это открытие в 1959 г. Нобелевской премии, как в свое время Нобелевская премия была присуждена Чэдвику за открытие нейтрона (1935) и Андерсону — за открытие позитрона (1936).

50-е годы завершаются открытием антигиперонов: в 1958 г. был открыт анти- Λ -гиперон (М. Бальдо-Чеолин, Д. Праус), в 1960 г. — анти- Σ^0 -гиперон (Дж. Баттон), анти- Σ^+ -гиперон (Э. Амальди), анти- Σ^- -гиперон (В. И. Векслер), в 1962 г. — анти- Ξ^- -гиперон (Х. Барди, Б. Кульвик, У. Б. Фаулер) и, наконец, в 1963 г. — анти- Ξ^0 -гиперон (С. Белти, С. Сендвайс).

В 1965 г. группа Л. Ледермана получила антидейтрон. В 1970 г. на ускорителе в Серпухове Ю. Д. Прокошкин с сотрудниками получили антигелий. В 1974 г. на этом же ускорителе наблюдалось рождение ядер антитрития ($^3\bar{\text{H}}$) при взаимодействии протонов с ядрами алюминия.

¹) *Альварес Л.* Современное состояние физики элементарных частиц. — УФН, 1970, т. 100, с. 93.

²) *Фриш Д., Торндайк А.* Элементарные частицы. — М.: Атомиздат, 1966, с. 85.

Все эти опыты доказывают возможность существования антивещества в согласии с инвариантностью сильного и электромагнитного взаимодействия относительно замены частиц на античастицы, называемой *C*-инвариантностью.

Открытие странных частиц

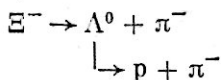
В 1947 г. К. Батлер и Дж. Рочестер в камере Вильсона наблюдали две частицы, названные *V*-частицами, — два трека, как бы образующие латинскую букву *V*. Образование двух треков свидетельствовало о том, что частицы нестабильны и распадаются на другие, более легкие. Одна из *V*-частиц была нейтральной и распадалась на две заряженные частицы с противоположными зарядами. Позже она была отождествлена с нейтральным *K*-мезоном, который распадается на положительный и отрицательный пионы. Другая была заряженной и распадалась на заряженную частицу с меньшей массой и нейтральную частицу. Позже она была отождествлена с заряженным K^+ -мезоном, который распадается на заряженный и нейтральный пионы.

Заметим, что если экспериментальное открытие π -мезона было в каком-то смысле «запрограммированным» и «ожидаемым» в связи с необходимостью объяснить природу нуклонных взаимодействий, то открытие *V*-частиц, как и открытие мюона, оказалось полной неожиданностью. В «естественной» теории строения ядер, как она представлялась в 1947 г., странные частицы были «лишними», и только значительно позже они нашли свое место в картине строения вещества.

Открытие *V*-частиц и определение их самых «элементарных» характеристик растянулось более чем на десятилетие. После первого наблюдения этих частиц в 1947 г. Рочестер и Батлер продолжали свои опыты еще два года, но им не удалось наблюдать ни одной частицы. И только после того как аппаратуру подняли высоко в горы, были снова обнаружены *V*-частицы, а также открыты и новые частицы.

В 1953 г. К. Коуэн наблюдал необычный процесс, в котором тяжелая заряженная частица, масса которой превышает массу нуклона, распадалась на нейтральную частицу и отрицательный пион, а затем нейтральная частица, в свою очередь, распадалась на отрицательный пион и протон. Этот процесс был интерпретирован как

каскадный двухступенчатый распад тяжелой частицы, названной Ξ^- -гипероном,



Из-за двухступенчатого распада Ξ -частицу называют иногда каскадным гипероном.

К 1953 г. с помощью изучения космических лучей были открыты θ - и τ -мезоны, Λ -, Σ^+ -, Σ^- - и Ξ^- -гипероны. (Позже выяснилось, что τ - и θ -мезоны связаны с различными распадами одной и той же частицы — К-мезона.) Были измерены массы этих частиц и времена их жизни. Оказалось, что живут они примерно 10^{-10} с. Выяснилось, что они довольно интенсивно рождаются в космических лучах: V-частицы образуются приблизительно в нескольких процентах от общего числа всех процессов, вызванных космическими частицами высоких энергий. Отсюда был сделан вывод, что V-частицы сильно взаимодействуют с ядрами и пионами. Но в таком случае время их жизни должно составлять 10^{-22} — 10^{-23} с, что на много порядков меньше их действительного времени жизни.

Такое «поведение» V-частиц при рождении и последующем распаде привело к тому, что их стали называть *странными*.

«Стремясь преодолеть указанную трудность, Намбу, Нишиджима и Ямагучи, а также Онеда выдвинули в 1951 г. гипотезу о парном рождении странных частиц. Аналогичное предположение в 1952 г. высказал Пайс. Во всех этих теориях предполагалось, что странные частицы рождаются парами, поэтому сильные взаимодействия включают четное число странных частиц. Ясно, что в таком случае распад странных частиц на обыкновенные частицы оказывается запрещенным, поскольку в сильных взаимодействиях число странных частиц может измениться лишь на 2, 4 и т. д. Относительно же слабых взаимодействий, вызывающих распад, предполагалось, что они могут включать нечетное число странных частиц»¹⁾).

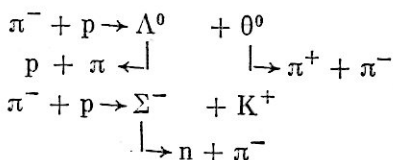
Таким образом, гипотеза совместного, или, как говорят, ассоциативного, рождения странных частиц предсказывала, что в нуклон-нуклонных или пион-нуклонных взаимодействиях странные частицы должны рождаться

¹⁾ Нишиджима К. Фундаментальные частицы.— М.: Мир, 1965, с. 260.

парами. В экспериментах с космическими лучами эта гипотеза не могла быть проверена, потому что в этих экспериментах можно было наблюдать только случаи распада отдельных странных частиц. Поэтому оказалось исключительно своевременным введение в строй двух протонных ускорителей: космотрона с энергией ускоренных протонов 3 ГэВ в Брукхейвене (1953 г.) и бэватрона с энергией ускоренных протонов 6 ГэВ в Беркли (1954 г.).

«Ирония судьбы состоит в том, что параметры бэватрона были установлены, и решение его строить принято еще тогда, когда ни один из физиков, работавших в Беркли, не верил в существование странных частиц. Однако, если вспомнить теперь тогдашние аргументы, становится очевидным, что качество данных в экспериментах с космическими лучами было хорошим, и вывод о существовании странных частиц был обоснованным. Даже если бы мы поверили в существование или, пожалуй, было бы правильное сказать, в важность этих частиц, мы все равно не знали бы, какова должна быть энергия бэватрона, необходимая для рождения: предложенный Пайсом механизм генерации странных частиц и его экспериментальное подтверждение Фаулером и др. были тогда еще делом будущего. Таким образом, то, что за небольшим числом известных исключений бэватрон внес самый значительный вклад в физику странных частиц, было обусловлено стечением ряда весьма благоприятных обстоятельств»¹⁾).

Странные частицы в лаборатории впервые были получены в 1954 г. У. Б. Фаулером, Р. Шаттом, А. Торндайком и У. Виттемором, которые, используя пучок пионов от Брукхейвенского космотрона с начальной энергией 1,5 ГэВ, наблюдали реакции ассоциативного образования странных частиц:



Важность этого эксперимента заключалась также и в том, что в нем нашло отчетливое подтверждение существование Σ^- -частиц.

¹⁾ Альварес Л. Современное состояние физики элементарных частиц.— УФН, 1970, т. 100, с. 93.

Далее возникла проблема, как интерпретировать ассоциативное рождение странных частиц. Может быть, его можно связать с какими-либо иными фундаментальными свойствами взаимодействий частиц? «Совместное рождение указывает, — писали М. Гелл-Манн и М. Розенбаум, — что сильные реакции, в которых участвует одна частица, являются запрещенными. Когда природа исключает какое-либо явление, ее предписание часто принимает форму какого-нибудь закона сохранения. То-то и то-то не может происходить, потому что что-то должно сохраняться.

Когда правило совместного рождения было установлено, естественно, возник вопрос: не скрывается ли за этим правилом какой-нибудь закон сохранения. Если бы такой закон был обнаружен, мы смогли бы узнать значительно больше о странных частицах. Принцип совместного рождения утверждает, что странные частицы образуются всегда в количестве не меньше двух одновременно. Но являются ли все сочетания странных частиц допустимыми или некоторые из них запрещены? И на этот вопрос мог бы ответить закон сохранения»¹⁾).

Гипотеза ассоциативного образования странных частиц, несмотря на экспериментальное подтверждение, встретила с рядом трудностей. Одна из них была связана с распадом каскадного гиперона $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$. В этом распаде число странных частиц не изменялось, поэтому согласно гипотезе ассоциативного рождения он должен был бы быть быстрым, т. е. протекать за время порядка 10^{-23} с. Между тем скорость этого распада оказалась такой же, как и скорость распада $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$, в котором число странных частиц изменяется на единицу.

В рамках гипотезы ассоциативного рождения нельзя было объяснить, почему в космических лучах положительных К-мезонов образовалось существенно больше, чем отрицательных. И, наконец, не были ясны причины, из-за которых при энергиях порядка 1 ГэВ странные частицы охотнее образуются в пион-нуклонных, чем в нуклон-нуклонных соударениях.

Ответ на все эти вопросы был найден после введения нового квантового числа элементарных частиц, названного *странностью*. «Гелл-Манн, и независимо Нишиджима, внес первый из своих значительных вкладов, — пишет

¹⁾ Гелл-Манн М., Розенбаум М. Элементарные частицы. — УФН, 1958, т. 64, с. 391.

Л. Альварес, — в физику элементарных частиц, верно угадав законы, по которым происходит рождение и распад всех странных частиц. Я употребил слово «угадав» с тем же благоговением, какое я испытываю, когда говорю, что Шампольон угадал значение иероглифов на Розетском камне. Работами моей группы были окончательно подтверждены все предсказания Гелл-Манна и Нишиджимы. Причем многие из них впервые. Мы до сих пор не перестаем восхищаться их лаконичной элегантностью¹⁾.

Введение сохраняющегося квантового числа странности позволило очень просто объяснить гипотезу ассоциативного рождения странных частиц. Для этого достаточно было приписать пионам и нуклонам нулевую, а странным частицам — отличную от нуля странность.

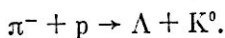
Чтобы запретить сильный распад $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$, достаточно приписать Ξ и Λ различные значения странности, а именно: странность Ξ была выбрана равной -2 , а странность Λ -гиперона — равной -1 .

Если положительным K -мезонам приписать странность, равную $+1$, сразу же объясняется их избыток в адронных столкновениях. Действительно, в силу сохранения странности образование K^+ -мезонов должно сопровождаться образованием странных барионов с отрицательной странностью, $\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^-$, $\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+$, $p + p \rightarrow K^+ + \Lambda + p$. Но K^- -мезоны, имеющие отрицательную странность, не могут рождаться вместе со странными барионами, они всегда рождаются в сопровождении K^+ -мезонов: $\pi^- + p \rightarrow K^- + K^+ + n$, $p + p \rightarrow K^- + K^+ + p + p$. Поэтому число реакций, в которых могут рождаться K^+ -мезоны, больше числа реакций, в которых могут рождаться K^- -мезоны. Более того, оказывается, что энергетические пороги реакций с образованием K^- -мезонов существенно выше порогов реакций с образованием K^+ -мезонов. Различие в порогах реакций приводит к заметному различию их сечений в области энергий порядка нескольких ГэВ. Наименьший энергетический порог ($0,76$ ГэВ) имеет реакция $\pi + N \rightarrow \Lambda + K$; близкий порог ($0,77$ ГэВ) имела бы реакция $n + n \rightarrow \Lambda + \Lambda$, разрешенная в рамках гипотезы ассоциативного рождения, но запрещенная законом сохранения странности. Наименьший энергетический порог для образования

¹⁾ Альварес Л. Современное состояние физики элементарных частиц. — УФН, 1970, т. 100, с. 93.

странных частиц в нуклон-нуклонных столкновениях имеет реакция $N + N \rightarrow N + \Lambda + K$. Этот порог равен 1,57 ГэВ, что почти в два раза превышает порог образования странных частиц в пион-нуклонных столкновениях. Именно поэтому странные частицы охотнее образуются в пион-нуклонных столкновениях.

Последующие экспериментальные исследования подтвердили справедливость гипотезы о новом сохраняющемся квантовом числе — странности. В частности, эта гипотеза предсказывала, что наряду с заряженными Σ^+ - и Σ^- -частицами должна существовать нейтральная Σ^0 -частица. Замечательным ее свойством является то, что из всех странных частиц только Σ^0 -частица очень быстро распадается на Λ -частицу и γ -квант — со скоростью 10^{-21} с, что на много порядков быстрее «обычных» распадов странных частиц. Это приводит к тому, что Σ^0 -частицу очень трудно наблюдать на опыте. Дело в том, что процесс $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^0 + K^0$ из-за быстрого распада $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$ выглядит как процесс образования Λ -частицы:



Эти процессы можно различить только при условии тщательных измерений энергии K^0 и Λ : если Λ -частица является продуктом распада Σ^0 , то суммарная энергия Λ и K^0 должна быть меньше суммарной энергии начальных частиц на величину энергии, уносимой фотоном.

Предсказание и открытие Ω^- -гиперона

Начало 60-х годов характеризуется открытием большого числа адронных резонансов — частиц, которые очень быстро, в течение 10^{-23} с, распадаются на адроны. Мы уже говорили, что первый резонанс, названный Δ -резонансом, был открыт в 1952 г. Э. Ферми. Он проявляется как максимум в сечении мезон-нуклонного рассеяния.

С развитием техники водородных пузырьковых камер возник новый метод обнаружения и исследования свойств адронных резонансов по их продуктам распада. Впервые этот метод был опробован в 1960 г.

Камера облучалась пучком отрицательных каонов, и изучалась реакция образования Λ -гиперона с парой противоположно заряженных пионов, $K^- + p \rightarrow \Lambda + \pi^+ + \pi^-$. На опыте исследовалось распределение по энергии одного из пионов. Из законов сохранения энергии и им-

пульса следует, что энергия любого из пионов в этой реакции может изменяться от минимального значения, равного массе пиона (при этом Λ -гиперон совместно с другим пионом уносит максимально большую энергию), до некоторого максимального значения, определяемого энергией налетающего K^- -мезона.

Если между образовавшимися частицами нет взаимодействия, то энергетическое распределение пионов должно характеризоваться плавной кривой. Между тем на опыте было обнаружено, что в некоторых случаях реакции $K^- + p \rightarrow \Lambda + \pi^+ + \pi^-$ пионы образуются с определенной энергией E_0 . Важно подчеркнуть, что число пионов с этой энергией явно превышает то число, которое ожидалось для плавного распределения, т. е. в распределении по энергии пиона наблюдался отчетливый пик при энергии E_0 .

Образование пиона с определенной энергией в реакции $K^- + p \rightarrow \Lambda + \pi^+ + \pi^-$, например π^+ -мезона, можно интерпретировать как рождение резонанса, названного Y^* , т. е. $K^- + p \rightarrow Y^{*-} + \pi^+$, причем Y^{*-} очень быстро распадается затем на π^- и Λ , $Y^{*-} \rightarrow \Lambda + \pi^-$. Соответственно образование π^- -мезона определенной энергии можно интерпретировать как образование положительно заряженного резонанса $K^- + p \rightarrow Y^{*+} + \pi^-$, распадающегося затем на Λ -гиперон и π^+ -мезон, $Y^{*+} \rightarrow \Lambda + \pi^+$.

Зная энергию налетающих K^- -мезонов, а также энергию E_0 , при которой наблюдается пик в энергетическом распределении, и основываясь на законе сохранения энергии и импульса в процессе $K^- + p \rightarrow Y^{*\pm} + \pi^\mp$, можно определить массу этого резонанса. Она оказалась равной 1385 МэВ.

Пик, отвечающий Y^* (1385)-резонансу, оказался не острым, а имеющим конечную ширину порядка 40 МэВ. Это значение характеризует неопределенность в массе Y^* -резонанса. Столь большая неопределенность в массе Y^* может быть интерпретирована как следствие малого времени жизни Y^* -резонанса. Дело в том, что согласно квантово-механическому принципу неопределенности время жизни состояния обратно пропорционально неопределенности в массе этого состояния, т. е. его ширине. Если бы пик был бесконечно узким, то время жизни соответствующего состояния было бы бесконечно большим и мы имели бы стабильную частицу.

Ширина 40 МэВ для Y^* -резонанса отвечает времени жизни порядка 10^{-23} с. Такой резонанс, следовательно,

быстро распадается на π^0 и Λ -гиперон. Исследование углового распределения продуктов распада Y^* -резонанса (относительно импульса начального K^- -мезона) позволило установить спин и четность Y^* -резонанса; спин оказался равным $3/2$, а пространственная четность $+1$. Таким образом, спин и четность для Δ - и Y^* -резонансов оказались одинаковыми.

В 1962 г. таким же способом в реакции $K^- + p \rightarrow \Xi^- + \pi^+ + \pi^0$ был открыт резонанс Ξ^* с массой 1535 МэВ, спином $3/2$ и пространственной четностью $+1$. Об открытии этой частицы было доложено в 1962 г. на Международной конференции по физике высоких энергий.

Присутствовавший на этой конференции М. Гелл-Манн обратил внимание на то, что существование резонансов Δ (1236), Y^* (1385) и Ξ^* (1535) с одинаковыми значениями спина и пространственной четности подтверждает справедливость гипотезы о так называемой $SU(3)$ -симметрии взаимодействия адронов. Математические свойства этой симметрии будут объяснены ниже, в главе III. Здесь мы отметим, что в $SU(3)$ -симметрии было получено большое число различных предсказаний. Наиболее впечатляющее касается Ω -гиперона. Гелл-Манн указал, что Δ -резонанс, открытый Ферми, Y^* (1385)- и Ξ^* (1535)-резонансы, открытые группой Альвареса, должны образовывать некоторую единую группу частиц, получившую название *унитарного супермультиплета*. Этот супермультиплет должен объединять 10 адронов с одинаковым спином и пространственной четностью, но различающихся величинами странности и электрического заряда. Этот мультиплет называется *декуплетом* $SU(3)$ -симметрии (см. рис. 27).

Так как для Δ -резонанса существуют четыре зарядовых состояния (Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^-), для Y^* (1385)-резонанса — три (Y^{*+} , Y^{*0} , Y^{*-} со странностью, равной -1), для Ξ^* (1535)-резонанса — два зарядовых состояния (Ξ^{*0} , Ξ^{*-}), т. е. всего девять различных зарядовых состояний, то должна существовать еще одна, десятая, частица, названная Ω -гипероном. На основе $SU(3)$ -симметрии было предсказано, что странность Ω^- должна быть равной -3 , причем должно существовать только одно зарядовое состояние (с отрицательным единичным зарядом). По известным массам резонансов Δ , Y^* и Ξ^* была предсказана масса Ω^- -гиперона — она оказалась равной 1676 МэВ.

Барцион с такой массой, обладающий странностью -3 , не может распадаться с сохранением странности, так как

простейшие распады с сохранением странности $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + K^-$, $\Omega^- \rightarrow \Xi^- + \bar{K}^0$ запрещены законом сохранения энергии. Поэтому для Ω^- -гиперона возможны распады только с несохранением странности, например $\Omega^- \rightarrow \Xi^- + \pi^0$, $\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^-$ и т. д.

Такие распады приводят к временам жизни около 10^{-10} с, и следовательно, Ω^- -гиперон может проходить от точки рождения до точки распада расстояния порядка нескольких сантиметров.

Ω^- -гиперон был экспериментально открыт в начале 1964 г. на Брукхейвенском протонном ускорителе. В опытах использовали пучок отрицательных каонов с энергией 5 ГэВ, направляемых в водородную пузырьковую камеру. Простейшей реакцией образования Ω^- -гиперона является реакция с образованием двух каонов с положительной странностью, $K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0$. Именно в такой реакции и был рожден первый Ω^- -гиперон.

Все его свойства оказались такими, как их предсказывала $SU(3)$ -симметрия. Открытие Ω^- -гиперона явилось триумфом $SU(3)$ -симметрии.

Необходимо, однако, отметить, что за последние годы пузырьковые камеры (особенно больших размеров) уступают место электронным или гибридным методикам, способным изучать явления с эффективными сечениями, на 5—6 порядков меньшими, чем это доступно пузырьковым камерам, и притом с полной идентификацией вторичных частиц. Только такие методики позволили открыть очарованные и прелестные частицы, тяжелый τ -лептон, W - и Z -бозоны и другие. Ниже мы более подробно расскажем об этих открытиях.

«Очарованный» кварк и чармоний

В конце 1974 г. две группы экспериментаторов одновременно сделали важнейшее открытие в физике элементарных частиц: открыли новую частицу: резонанс с массой, равной 3,1 ГэВ, превышающей три массы протона.

Наиболее удивительным свойством этого резонанса оказалась его малая ширина распада — она равна всего 70 кэВ, что соответствует времени жизни порядка 10^{-20} с (время жизни других адронных резонансов составляет 10^{-24} с). Необычность открытой частицы подчеркивалась еще и тем, что время жизни всех ранее известных адронных резонансов обычно уменьшалось с увеличением их массы. Естественно было ожидать, что столь тяжелый

резонанс должен иметь ширину порядка сотен МэВ, что в тысячу раз превышает измеренное на опыте значение.

Резонанс с массой 3,1 ГэВ был открыт независимо двумя экспериментальными группами на разных ускорителях и разными методиками. Группа С. Тинга на протонном ускорителе в Брукхейвене исследовала процесс образования электронно-позитронных пар при столкновении протонов с ядрами Ве, обращая особое внимание на регистрацию пар с большими значениями инвариантной массы. «В начале лета 1974 г. мы провели ряд измерений в области масс 4—5 ГэВ. Однако анализ полученных данных дал всего несколько электронно-позитронных пар. В конце августа мы настроили магниты на область масс 2,5—4,0 ГэВ. Почти сразу мы увидели чистые электронные пары. Самым удивительным было то, что большинство e^+e^- -пар имело инвариантную массу, близкую к 3,1 ГэВ. Детальный анализ показал, что ширина составляет менее 5 МэВ!

На протяжении многолетней работы я выработал несколько приемов практической проверки данных и результатов опыта. Я остановлюсь на некоторых из них.

1. Чтобы убедиться в том, что наблюдаемый пик есть истинный эффект, а не аппаратный максимум или результат ошибочной работы компьютера, мы провели другие измерения, уменьшив ток в обмотке магнитов. При этом частицы проходят через другие части детектора. Тот факт, что пик не изменил своего положения, явился прямым свидетельством открытия новой частицы.

2. Для проверки правильности результатов анализа мы использовали два совершенно различных набора программ. Это означает, что данные независимо анализировались двумя группами физиков, каждая из которых обрабатывала исходную информацию, формировала свою ленту исходных данных, приводила расчеты эффективности методом Монте-Карло, реконструировала события, вносила поправки и, наконец, получала результаты. Эта процедура требует вдвое больше машинного времени, зато повышает надежность результатов.

Все эти, а также многие другие проверки окончательно убедили нас в том, что обнаружена новая массивная частица.

Некоторое время мы обсуждали вопрос о названии новой частицы. Кто-то обратил внимание на тот факт, что «экзотические» стабильные частицы принято обозначать латинскими буквами (в качестве примера можно

привести промежуточные векторные бозоны W, Z), в то время как «классические» частицы имеют греческие обозначения (ρ, ω и т. д.). Исходя из этого, а также из того, что все последнее десятилетие объектом нашего изучения был электромагнитный ток $j_\mu(x)$, мы решили назвать открытую частицу J -частицей».

Другая группа — группа экспериментатора Б. Рихтера — работала на установке со встречными электронно-позитронными пучками в Стэнфорде. Эта группа, измеряя энергетическую зависимость сечения образования адронов в e^+e^- -аннигиляции, обнаружила рост сечения в области 3,1—3,2 ГэВ. После увеличения точности измерения энергии встречных пучков до 0,1% группа наблюдала резонанс в сечении — более чем десятикратное возрастание сечения. А затем — после улучшения точности до 0,01% — наблюдалось 100-кратное увеличение сечения. Группа Рихтера назвала эту частицу ϕ , и с тех пор резонанс массой 3100 МэВ обозначается как J/ψ -частица. Вскоре на встречных электронно-позитронных пучках в Стэнфорде была открыта еще одна частица массой 3,7 ГэВ и шириной порядка нескольких сотен кэВ, похожая по своим свойствам на J/ψ -частицу. Она получила название ψ' -частицы. Поскольку J/ψ - и ψ' -частицы наблюдались как резонансы в системе e^+e^- , то они должны иметь целый спин, т. е. являться мезонами или бозонами.

Общепринятое объяснение природы ψ -мезонов основано на гипотезе существования наряду со «стандартными» кварками u, d и s еще четвертого кварка, названного *с-кварком*. От известных ранее кварков s -кварк отличается значением нового квантового числа, названного *чармом*. Как и странность, чарм — аддитивное квантовое число, которое сохраняется в сильном и в электромагнитном взаимодействиях, но не сохраняется в слабом. Чарм u, d - и s -кварков равен нулю, чарм s -кварка равен единице. Поэтому s -кварк получил название очарованного кварка. Все известные до открытия ψ -частиц адроны — мезоны и барионы — составлены из обычных кварков, поэтому их чарм равен нулю. Следовательно, при столкновениях обычных адронов очарованные частицы с отличным от нуля чармом должны рождаться парами.

Естественно считать, что ψ -частицы составлены из очарованного кварка и очарованного антикварка, поэтому их чарм равен нулю. Но в отличие от обычных адронов ψ -частицы являются частицами со скрытым чармом.

Система, состоящая из очарованных кварка и антикварка, получила название чармония (по аналогии с позитронием — системой, состоящей из электрона и позитрона). Масса очарованного кварка должна быть существенно больше масс обычных кварков, чтобы можно было объяснить большую массу ψ -частиц (ψ -мезонов).

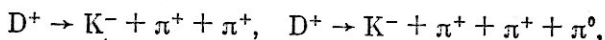
Экспериментальные данные относительно различных распадов ψ -мезонов позволили установить, что их спин равен единице, а пространственная четность отрицательна. Удалось также определить величину изотопического спина ψ -мезонов — она оказалась равной нулю. Эти квантовые числа согласуются с предположением относительно чармониевой кварковой структуры ψ -мезонов. Единичный спин и отрицательная четность означают, что система очарованных кварка и антикварка, образующих чармоний, находится в состоянии с нулевым орбитальным моментом, причем спины кварка и антикварка, равные $1/2$, направлены параллельно.

Очевидно, что у чармония могут быть и другие состояния, отличающиеся друг от друга спином, пространственной четностью и массой. Если спины кварка и антикварка антипараллельны, то суммарный спин такой системы должен быть равен нулю, а пространственная четность — отрицательной. Если орбитальный момент относительного движения кварка и антикварка равен единице, то спин такой системы может принимать значения 0, 1, 2, а четность должна быть положительной. Состояния чармония с такими квантовыми числами обнаружены на опыте.

Существование кварка с отличным от нуля чармом должно приводить к существованию — наряду с частицами со скрытым чармом — мезонов и барионов с отличным от нуля чармом. Например, из очарованных кварка и нестранных антикварков можно «составить» нейтральный и положительно заряженный мезоны, чарм которых равен единице (их обозначают через D^0 и D^+). Так как квантовое число «чарм» сохраняется в сильном и электромагнитном взаимодействиях, очарованные мезоны и барионы должны рождаться парами в этих взаимодействиях.

Наиболее подходящими для рождения очарованных мезонов являются реакции на встречных электронно-позитронных пучках, например, процесс $e^+ + e^- \rightarrow D^+ + D^-$. Так как чарм не сохраняется в слабом взаимодействии, то D -мезоны должны быть нестабильными частицами и распадаться на обычные частицы, причем при распадах

очарованных мезонов должны в подавляющем числе случаев образовываться странные частицы, например, в распадах



в которых странность не сохраняется, а распады без изменения странности должны быть подавлены.

Очарованные мезоны D^+ и D^0 , образующиеся в реакциях на встречных электронно-позитронных пучках, были наблюдаемы по их адронным распадам. Массы этих мезонов оказались одинаковыми — в пределах экспериментальных ошибок — и равными 1876 МэВ, т. е. приблизительно двум нуклонным массам.

Немного позже были получены указания о существовании очарованного бариона, т. е. бариона, составленного из одного очарованного и двух обычных кварков.

Открытие очарованных частиц восстанавливает кварк-лептонную симметрию, которая была сформулирована Маршаком в 1959 г. на Международной конференции по физике высоких энергий в г. Киеве (эту симметрию поэтому часто называют киевской). Ее можно сформулировать как соответствие трех кварков u, d, s трем лептонам e^-, μ^-, ν_e (напоминаем, что в 1959 г. было известно только одно нейтрино)*). Открытие в 1962 г. двух типов нейтрино разрушило эту симметрию. И только после открытия очарованных частиц (спустя 15 лет) снова возникает симметрия: четырем кваркам u, c, d и s соответствуют четыре лептона $\nu_e, \nu_\mu, e^-, \mu^-$. Природа этой симметрии остается пока невыясненной.

«Одной из проблем, — пишет Ш. Глэшоу, — является предполагаемая кварк-лептонная симметрия, которая ведет к гипотезе очарования. Как кварки, так и лептоны, все являющиеся элементарными частицами, могут быть подразделены на две подгруппы. В одну подгруппу можно включить u - и d -кварки и электрон с электронным нейтрино. Этих четырех частиц достаточно, чтобы построить весь мир; их достаточно для создания атомов и молекул и даже для того, чтобы заставить светиться Солнце

*) Строго говоря, «киевская» симметрия относилась первоначально не к кваркам (неизвестным в 1959 г.), а к адронам: p, n и Λ , которым отвечали три лептона: ν, e^- и μ^- . В те годы барионы p, n и Λ рассматривались как фундаментальные, из которых должны быть построены все другие адроны. После введения кварков (1964 г.) в качестве фундаментальных адронов начали рассматривать кварки.

и другие звезды. Другая подгруппа будет состоять из странного и очарованного кварков и мюона с мюонным нейтрино. Некоторые из них наблюдались в космических лучах, но главным образом они создаются в мощных ускорителях. Казалось бы, что природа могла обойтись только первой подгруппой для своих целей. Разумеется, вторая подгруппа не создана лишь для развлечения и умственных упражнений физиков, но какова цель такого дублирования? На этот вопрос у нас нет ответа¹⁾.

Существование еще одного кварка должно привести к существованию нового семейства адронов — мезонов и барионов. В этой связи интересно отметить, что в 1963 г. Дж. Чу, М. Гелл-Манн и Л. Розенфельд, заканчивая обзор следствий $SU(3)$ -симметрии, писали: «Игра симметрий для сильно взаимодействующих частиц, возможно, еще не закончена. Например, может быть, существует какое-то еще не открытое квантовое число, сохраняющееся в сильных взаимодействиях и равное нулю для всех известных сейчас частиц. До того как были открыты странные частицы, в таком положении было квантовое число странности. Эксперименты при очень высоких энергиях, выполненные с помощью нового поколения ускорителей, могут привести к подобной ситуации по отношению к какому-то совершенно новому квантовому числу»²⁾.

Эти слова оказались пророческими: новым квантовым числом явился чарм.

Сходные мысли высказал в 1964 г. А. Салам на Международной конференции по физике высоких энергий в г. Дубне: «Есть подозрение, что в природе может существовать еще более высокая симметрия, причем включающая, вероятно, $SU(3)$ в качестве лишь одного из звеньев цепи симметрий. Возможно, что существует еще одно квантовое число. Это перспектива, перед которой трепещет воображение. Но ко всему этому оптимизму примешивается чувство суеверного страха, вызванного сознанием всей глубины нашего невежества»³⁾.

Кроме самостоятельного значения, открытие очарованных частиц, так же как и открытие нейтральных сла-

¹⁾ Глэшоу Ш. Кварки с цветом и ароматом.— УФН, 1976, т. 119, с. 815.

²⁾ Чу Дж., Гелл-Манн М., Розенфельд Л. Сильновзаимодействующие частицы.— В кн.: Над чем думают физики.— М.: Наука, 1968, с. 108.

³⁾ Салам А. Симметрия сильных взаимодействий.— В кн.: Фундаментальные частицы.— М.: Мир, 1965, с. 456.

бых токов, было очень важно для подтверждения справедливости единой теории слабого и электромагнитного взаимодействий, о которой речь будет идти ниже. Именно с помощью очарованного кварка можно устранить одну фундаментальную трудность, которая возникла в схеме с тремя кварками. Оказалось, что все попытки объединить слабое и электромагнитное взаимодействия кварков u , d и s обязательно приводят к существованию нейтрального слабого тока кварков, который изменяет странность. Этот ток, отвечающий превращению d -кварка в s -кварк, с неизбежностью приводит к процессам $K^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$, $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu}$, причем вероятность их должна быть сравнима с вероятностями обычных распадов каонов, таких, как $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$, $K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu$. Но в действительности распады $K^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu}$ протекают с гораздо меньшими вероятностями. Чтобы устранить это противоречие, необходимо было ввести очарованный кварк. В теории с четырьмя кварками нейтральный слабый ток с изменением странности отсутствует, и распады $K^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$, $K \rightarrow \pi + \nu + \bar{\nu}$ могут идти за счет слабого взаимодействия в высших порядках по константе взаимодействия.

За открытие J/ψ -частиц С. Тингу и Б. Рихтеру в 1976 г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

Тяжелый лептон и ψ -мезоны

В последнее время получены доказательства существования тяжелого заряженного лептона с массой порядка двух нуклонных масс. Он был назван τ -лептоном. Название происходит от первой буквы древнегреческого τριτων (тритон) и подчеркивает, что τ -частица является третьим заряженным лептоном после электрона и мюона. Первые доказательства существования τ -лептона были получены в опытах со встречными электронно-позитронными пучками, когда τ -лептоны рождаются при аннигиляции электрона и позитрона, $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$, аналогично тому, как образуется мюонная пара, $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$; τ -лептон — нестабильная частица, он, в частности, может распадаться на электрон (и два нейтрино) или мюон (и тоже два нейтрино). В результате в опытах на встречных e^+e^- -пучках должны наблюдаться $e\mu$ -совпадения, свидетельствуя об образовании пары τ -лептонов. Принципиально здесь то, что $e\mu$ -совпадения должны

иметь место выше определенной пороговой энергии сталкивающихся пучков (равной двум массам τ -лептона), когда могут образоваться τ -лептоны.

В результате выполненных экспериментов было изучено большое количество различных распадов τ -лептона, в том числе и распады с образованием адронов (в основном пионов). Было надежно установлено, что спин τ -лептона равен $1/2$ и что, как электрон и мюон, τ -лептон не имеет структуры, т. е. является точечной частицей. Распады τ -лептона определяются слабым взаимодействием, причем во всех распадах обязательно образуется нейтральная частица — нейтрино ν_τ . Слабое взаимодействие τ -лептона оказалось «устроенным» таким же образом, как и слабое взаимодействие e и μ . Все это дало основания утверждать, что τ -лептон вместе с электроном и мюоном образует последовательный ряд лептонов, отличающихся только массами, причем каждому лептону в этом ряду следует приписать свое сохраняющееся лептонное число. Представление о последовательном ряде лептонов позволяет надежно предсказывать все свойства τ -лептона (в согласии с экспериментом).

«Лептоны, в противоположность адронам, оказываются действительно элементарными частицами. Поэтому, изучая их свойства, мы непосредственно имеем дело с самыми простыми формами материи, которые нам сегодня известны. Кварки, возможно, также являются истинно элементарными частицами. Однако сейчас мы еще не знаем, могут ли они находиться в свободном состоянии, и пока нам приходится изучать их свойства только косвенным образом. До открытия τ -лептона можно было подозревать, что простота и истинно элементарная природа лептонов связаны с их малой массой. Масса электрона, мюона и соответствующих им нейтрино меньше, чем масса легчайшего адрона — π -мезона, которая равна $135 \text{ МэВ}/c^2$ (само название лептон идет от древнегреческого «легкий»). Однако τ -лептон оказался тяжелее многих адронов, и сам факт его существования раз и навсегда исключает связь концепции элементарности с величиной массы частицы. Эта же мысль подчеркивается и соединением противоположных понятий — «тяжелый лептон», применяемых к τ -частице»¹⁾.

¹⁾ *Перл М.* Открытие новой элементарной частицы — тяжелого τ -лептона. — УФН, 1979, т. 129, с. 672—673.

В 1977 г. были открыты более тяжелые (по сравнению с ψ -частицами) нейтральные мезоны с массами порядка 10 ГэВ, т. е. более чем в десять раз тяжелее нуклонов. Как и в случае ψ -мезонов, эти мезоны, получившие название «пси-клон»-мезонов, были наблюдаемы в реакции образования мюонных пар в протонно-ядерных столкновениях.

«Первого мая 1977 г. мы получили наши первые результаты. Нас окрыляло то, что наша усовершенствованная аппаратура теперь регистрировала в 90 раз больше мюонных пар, чем годом раньше. Поднявший мощность ускоритель работал превосходно, поставляя практически неограниченное число протонов с фантастической точностью. В первую же неделю мы зарегистрировали 3000 мюонных пар с массами свыше 5 ГэВ. Это более чем в десять раз превышало всю мировую коллекцию подобных событий, и качество наших данных было значительно выше. Мы нанесли наши результаты на график и убедились в том, что они совершенно свободны от интерференционных эффектов, связанных с адронами. Отчетливо был виден J/ψ -резонанс, что означало для нас полный успех в увеличении разрешающей способности нашей аппаратуры. Наше волнение достигло предела, когда мы увидели, что крутое падение спектра мюонных пар по мере возрастания их массы обрывается вблизи массы 10 ГэВ любопытным всплеском.

На следующей неделе мы удвоили статистику, но всплеск остался. Больше уже нельзя было списать его за счет какого-то неудачного стечения обстоятельств, но мы все еще допускали, что, быть может, этот эффект обусловлен каким-то хитрым и еще не распознанным капризом нашей аппаратуры. После ее дальнейших испытаний и накопления большей статистики мы пришли к убеждению, что обнаруженный нами резонанс отражает объективную реальность.— существование новой частицы с массой около 10 ГэВ»¹⁾.

Год спустя ψ -мезоны наблюдались в реакциях на встречных электронно-позитронных пучках. ψ -мезоны могут распадаться на электронно-позитронную или мюонную пару, а также на адроны. Поскольку вероятности всех этих распадов оказались малыми, было сделано предположение, что ψ -мезоны составлены из кварков по-

¹⁾ Ледерман Л. Пси-клон-частица.— УФН, 1979, т. 128, с. 704—705.

вого типа, названных b-кварками. Электрический заряд этих кварков должен быть равен $-1/3$ заряда протона.

Открытие еще одного кварка означает, что должны существовать мезоны и барионы разных типов, составленные из различных комбинаций пяти кварков — u, d, s, c и b. Таким образом, существенно обогащается спектроскопия мезонов и барионов по сравнению со спектроскопией адронов, основанной на трех «старых» кварках — u, d и s.

Заметим, что согласно единой теории слабого и электромагнитного взаимодействий лептонов и кварков должен существовать, как станет ясно ниже, еще один кварк — t-кварк с электрическим зарядом $+2/3e$. Поиск частиц, составленных из кварков t, интенсивно ведется.

Таким образом, сейчас известны шесть лептонов (e^- , μ^- , τ^- , ν_e , ν_μ и ν_τ), которым должны соответствовать шесть кварков (d, s, b, u, c, t), причем соответствие имеет такой характер, что сумма электрических зарядов всех лептонов (равная -3) должна компенсироваться суммой электрических зарядов всех кварков ($3 \times 3 \times (2/3 - 1/3) = 3$), где необходимо учесть так называемый цвет кварков. «Цвет» кварков обсуждается ниже.

Можно думать, что если шесть лептонов и шесть кварков вместе с их античастицами исчерпывают все истинно элементарные частицы со спином $1/2$, то возникнет ситуация, аналогичная периодической системе элементов, в которой свойства огромного числа элементов удалось объяснить посредством представления об атомах с различными комбинациями атомных электронов. Подобная ситуация имеет место и в ядерной физике, в которой все атомные ядра представляют различные комбинации протонов и нейтронов.

«Имеется и другая весьма интригующая возможность, в которой t-лептон открывает собой длинную или даже бесконечную последовательность тяжелых лептонов. При этом не исключено, что такие лептоны являются истинно элементарными частицами, какими нам сейчас представляются e, μ и τ . Здесь мы столкнемся с совершенно новой для физики ситуацией: существованием могочисленных родственных объектов, свойства которых нельзя объяснить с помощью гораздо меньшего числа фундаментальных сущностей. В этом случае наши современные теоретические подходы к пониманию природы элементарных частиц потеряют силу и нам потребуются радикально новые идеи. Конечно, пока эти рассуждения сугубо

преждевременны и для физиков-экспериментаторов имеется лишь один выбор: необходимо выяснить, является ли τ -частица единственным новым лептоном или лишь началом неизвестной пока последовательности тяжелых лептонов»¹⁾.

Открытие W^- и Z -бозонов

Гипотеза о том, что слабое взаимодействие элементарных частиц обусловлено обменом некоторой заряженной частицей, была выдвинута японским физиком Х. Юкавой еще в тридцатых годах.

Однако существенное развитие эта идея получила только в рамках единой теории слабого и электромагнитного взаимодействий элементарных частиц, предложенной в 1967 г. С. Вайнбергом и А. Саламом (подробнее о ней мы будем говорить ниже). В этой теории ранее существовавшие описания электромагнитного взаимодействия, а также слабого взаимодействия, предложенного Ферми в 1934 г., остались в основном неизменными. Новым элементом единой теории явилось предсказание существования тяжелых заряженных бозонов (W^\pm) со спином единица. Обмен именно этими бозонами (получившими название *промежуточных*) и обуславливает слабое взаимодействие. В этой схеме β -распад нейтрона $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ выглядит как двухступенчатый процесс: превращение нейтрона в протон с испусканием W^- -бозона ($n \rightarrow p + W^-$) с последующим распадом W^- -бозона на электрон и антинейтрино ($W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$). Оба эти перехода характеризуются слабыми токами, которые еще называют заряженными токами, поскольку промежуточные W^\pm -бозоны являются заряженными частицами.

Но не только W^\pm -бозоны были новым элементом в единой теории Вайнберга — Салама. В ней предсказывалось также существование нейтральных слабых токов. Эти токи обуславливают такие процессы, как рассеяние мюонного нейтрино на электронах и нуклонах: $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ и $\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p$. Больше того, процессы с нейтральными слабыми токами возникают из-за того, что должен существовать еще и нейтральный промежуточный Z^0 -бозон (также с единичным спином).

¹⁾ Перл М. Открытие новой элементарной частицы — тяжелого τ -лептона. — УФН, 1979, т. 139, с. 683.

Так как в единой теории фотон, W^\pm - и Z -бозоны являются переносчиками электромагнитного и слабого взаимодействий, то массы W - и Z -бозонов определяются известными константами этих взаимодействий, а поэтому могут быть предсказаны (подробнее см. ниже). В теории Вайнберга — Салама имеем

$$M_W \approx 84 \text{ ГэВ}, \quad M_Z \approx 94 \text{ ГэВ}.$$

Экспериментальное открытие в 1973 г. слабых нейтральных токов явилось важным подтверждением справедливости идей, положенных в основу теории Вайнберга — Салама. В ЦЕРН была зарегистрирована реакция $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + \text{«адроны»}$, в которой нейтрино не превращается в заряженный лептон, как должно быть в схеме с заряженными слабыми токами, а присутствует в конечном состоянии, так что суммарный электрический заряд образующихся адронов совпадает с зарядом начального нуклона.

«Было проанализировано около 80 000 фотографий, сделанных в пузырьковой камере с нейтринным пучком, и более 200 000 фотографий с антинейтринным пучком. Всего было найдено 100 нейтринных событий без мюонов в конечном состоянии при 428 нейтринных событиях, в которых образовались мюоны. Соответствующие числа антинейтринных событий равны 64 и 148. Другой эксперимент был поставлен в лаборатории Ферми группой физиков Гарвардского, Пенсильванского и Висконсинского университетов, а также из этой лаборатории»¹⁾.

Поиски нейтральных слабых токов предпринимались и ранее. Особенно тщательно изучались распады каонов, например $K^+ \rightarrow \pi^+ + e^+ + e^-$ или $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu}$, которые обусловлены нейтральными слабыми токами. Отличительной особенностью этих распадов является то, что странность адронов изменяется в результате распада (*распады с изменением странности*). Однако самые тщательные поиски этих распадов не увенчались успехом. А слабые распады каонов, обусловленные заряженными токами, наблюдаются на опыте, несмотря на то, что странность в них также не сохраняется. Все это сначала делало проблематичным само существование нейтральных слабых токов.

И все же нейтральные токи были открыты при взаимодействии нейтрино с нуклонами, причем вероятность

¹⁾ Клейн Д., Манн А., Руббин К. Обнаружение нейтральных слабых токов. — УФН, 1976, т. 120, с. 97.

процессов, обусловленных нейтральными слабыми токами, составляет приблизительно треть вероятности процессов, обусловленных заряженными слабыми токами. Несколько позднее было обнаружено рассеяние мюонных нейтрино и антинейтрино на электронах, $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ и $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$, которое определяется нейтральными токами. В 1976 г. Ф. Рейнес с сотрудниками зарегистрировал рассеяние электронных антинейтрино на электронах, т. е. наблюдал реакцию $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$. Пучок антинейтрино $\bar{\nu}_e$ в этом опыте получался в результате β -распада продуктов деления ядер в реакторе. Энергии антинейтрино в этом эксперименте не превышали 10 МэВ. Зарегистрировав рекордно малые сечения порядка 10^{-45} см², Рейнес показал, что процесс $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$ определяется одновременным вкладом как заряженных, так и нейтральных слабых токов.

В последнее время детально исследованы реакции упругого рассеяния нейтрино и антинейтрино протонами, которые также определяются нейтральными токами. При этом обнаружен чрезвычайно важный факт неравенства вероятностей этих процессов, что свидетельствует о несохранении пространственной четности во взаимодействиях, обусловленных нейтральными слабыми токами.

Нейтральные слабые токи должны проявляться не только при рассеянии нейтрино, но и в таких процессах, как взаимодействие электронов с нуклонами. Интерференция вклада слабого взаимодействия с вкладом стандартного электромагнитного механизма должна привести к разнообразным эффектам несохранения пространственной четности, т. е. к несимметрии правого и левого в природе. Особый интерес эти эффекты представляют в атомной физике, т. е. в области очень малых энергий взаимодействия элементарных частиц. Ожидается, что эти эффекты должны быть малыми, но чрезвычайно чувствительные методы атомной физики позволят обнаружить их присутствие. Эксперименты по поиску таких эффектов в настоящее время уже увенчались успехом.

В Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР Л. М. Барков и М. С. Золоторев выполнили эксперименты, «в которых измеряется оптическая активность паров атомарного висмута, т. е. вращение плоскости поляризации света, проходящего через эти пары. Разумеется, сама по себе оптическая активность — отнюдь

не новое явление. Хорошо известно, что она есть у раствора обычного сахара. Причина здесь в том, что молекула сахара обладает винтовой структурой, которая и определяет направление вращения плоскости поляризации. Однако какой же винт может быть в атомарном висмуте? Оказывается, что если существует слабое взаимодействие между электроном и ядром, не сохраняющее четность, то появляется винтовая структура в пространственном распределении спина по объему атома. Вполне естественно, что наличие такой структуры в атоме приводит к оптической активности паров. Однако обнаружить этот эффект необычайно трудно, поскольку речь идет о ничтожно малых углах поворота плоскости поляризации, составляющих в реальных условиях около 10^{-7} радиана. Заметим для иллюстрации, что при повороте стрелки длиной в 1 м вокруг оси, проходящей через один ее конец, на такой угол другой конец сместится на $0,1 \text{ мкм}$ ¹⁾.

И тем не менее столь малый эффект был надежно зарегистрирован! Величина его согласуется с предсказаниями единой теории слабого и электромагнитного взаимодействий элементарных частиц. Спустя несколько месяцев после опубликования результатов, полученных новосибирскими физиками, был осуществлен эксперимент по рассеянию продольно поляризованных электронов большой энергии неполяризованными дейтронами и протонами на двухмиллионном электронном ускорителе в г. Стэнфорде. Было показано, что вероятность рассеяния зависит от взаимной ориентации спина электрона и его импульса. Появление такой зависимости однозначно свидетельствует о нарушении инвариантности относительно пространственных отражений. В этих двух экспериментах было доказано существование дополнительного — наряду с традиционным электромагнитным — взаимодействия между электронами и адронами, не сохраняющего пространственную четность.

Мы уже отмечали, что замечательным свойством единой теории слабого и электромагнитного взаимодействий явилось предсказание точных значений масс заряженных и нейтральных векторных бозонов. Масса W^\pm -бозонов должна равняться 84 ГэВ , а масса нейтрального Z -бозона — 94 ГэВ . «Вооруженные» этими числами, физики

¹⁾ Барков Л. М., Золоторев М. С., Хрипович П. Б. На пути раскрытия единства сил природы.— В кн.: Будущее науки.— М.: Знание, 1979, с. 16—17.

могли предпринять экспериментальные поиски таких частиц, основываясь на их предполагаемых свойствах.

Если W - и Z -бозоны существуют, то при некоторых условиях эти бозоны должны рождаться как свободные частицы с определенными свойствами, а уже потом распадаться на другие частицы (также вполне определенным образом).

Чтобы «породить» частицы с массами порядка 100 ГэВ (т. е. в сто раз более тяжелыми, чем протоны), необходимо также знать, в каких условиях W - и Z -бозоны могут рождаться самым эффективным способом. Другими словами, какие частицы необходимо столкнуть одну с другой, чтобы в результате образовались промежуточные бозоны. И далее, если W - и Z -бозоны удалось образовать, то как об этом узнать? На эти вопросы четко отвечает единая теория слабого и электромагнитного взаимодействий.

Согласно этой теории наиболее простыми процессами образования W - и Z -бозонов являются реакции на встречных e^+e^- -пучках, например, $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$. Но энергетический порог этой реакции исключительно высок; из законов сохранения энергии и импульса следует, что пороговая энергия совпадает с массой W -бозона. Это очень большая энергия. Самая мощная из действующих в настоящее время установок со встречными e^+e^- -пучками — PETRA (г. Гамбург) позволяет ускорить электроны и позитроны до энергии 20 ГэВ. Но этой энергии недостаточно для образования W -бозонов. Поэтому впервые W - и Z -бозоны были получены на установке со встречными протон-антипротонными пучками (ЦЕРН).

Идеология поиска W и Z -бозонов существенно основывается на гипотезе кварковой структуры адронов. Согласно этой гипотезе кварки представляют собой гипотетические частицы со спином $1/2$, имеющие дробные значения электрического заряда, причем барионный заряд каждого кварка равен $1/3$. Считают, что в состав протонов и нейтронов входят кварки двух типов, а именно так называемые u - и d -кварки (обозначаемые первыми буквами их английских названий: u р — верхний, d own — нижний). Кварки u и d различаются величиной электрического заряда, а именно, электрический заряд u -кварка равен $2/3e$, а электрический заряд d -кварка — $1/3e$ (e — заряд протона). Поскольку барионный заряд каждого кварка равен $1/3$, то и протон, и нейтрон состоят из трех кварков: протон состоит из двух u -кварков и одного d -

кварка, $p = uud$, так что суммарный электрический заряд этих трех кварков равен заряду протона. Аналогично, нейтрон должен состоять из двух d -кварков и одного u -кварка, $n = udd$. Антипротон и антинейтрон должны состоять из антикварков. Антикварк отличается от соответствующего кварка знаком электрического заряда и барионного числа: антикварк \bar{u} имеет электрический заряд $-2/3e$, а барионный заряд равен $-1/3$, так что $\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$.

Кварковая структура адронов особенно отчетливо проявляется, как выясняется, в процессах глубоко неупругого рассеяния электронов адронами, например $e^- + p \rightarrow e^- + X$; X обозначает совокупность частиц, образующихся при рассеянии электрона большой энергии. В опытах с регистрацией только рассеянного электрона выяснилось, что свойства этого рассеяния можно объяснить, предположив, что электроны взаимодействуют не с протоном как целым, а рассеиваются на его составляющих — кварках, которые проявляются как точечные заряженные частицы, т. е. неупругое рассеяние электронов адронами определяется процессом $e^- + q \rightarrow e^- + q$ (q — кварк, $q = u$ или d). Позже выяснилось, что таким же способом происходит рассеяние нейтрино адронами.

Но кварковая структура адронов проявляется не только при рассеянии лептонов (электронов и нейтрино) адронами; адрон-адронные столкновения при высоких энергиях также сводятся к кварк-кварковым соударениям. Особенно отчетливо это проявляется в процессах образования мюонных пар в адрон-адронных столкновениях, например $\bar{p} + p \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$. Считается, что пара мюонов образуется при аннигиляции антикварка (входящего в состав антипротона) с кварком (входящим в состав протона) за счет процесса $q + \bar{q} \rightarrow \mu^+ + \mu^-$.

Если протон-антипротонные столкновения сводятся к кварк-антикварковым столкновениям, то при достаточной энергии протонов и антипротонов в $q\bar{q}$ -столкновениях могут рождаться W^\pm - и Z -бозоны. Наименьший энергетический порог будут иметь реакции образования одиночных W - и Z -бозонов:

$$u + \bar{d} \rightarrow W^+, \quad d + \bar{u} \rightarrow W^-, \quad d + \bar{d} \rightarrow Z^0 \quad \text{или} \quad \bar{u} + u \rightarrow Z^0.$$

Таким образом, в протон-антипротонных столкновениях могут образоваться W -бозоны обоих знаков электрического заряда и нейтральные Z -бозоны. Но W^\pm - и Z -бозоны являются нестабильными частицами. Поэтому их можно

наблюдать по продуктам распада:

$$W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e, \quad W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e, \\ W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \quad Z_0 \rightarrow e^+ + e^-, \quad Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-.$$

Наиболее простая ситуация имеет место для Z^0 -бозона: зарегистрировав, скажем, электрон-позитронную пару от его распада, т. е. измерив энергии электрона и позитрона и угол между направлениями их импульсов, можно надежно определить массу Z -бозона и тем самым зафиксировать факт рождения Z -бозона. Детектирование W -бозонов представляет более сложную задачу, ибо нейтрино от распадов $W^- \rightarrow e^-(\mu) + \bar{\nu}_e(\bar{\nu}_\mu)$ «избегает» регистрации, и поэтому, зарегистрировав только электрон или мюон, нельзя надежно определить массу W^- -бозона. Но тем не менее о рождении нейтрино в распаде W -бозона можно узнать тем же способом, как и в случае обычного β -распада, а именно обнаружением кажущегося несохранения энергии и импульса, если в энергетическом балансе рождения и распада W -бозона учитываются только те частицы, которые оставляют след в детекторе (а такими являются все частицы, кроме нейтрино).

Итак, достаточно иметь протон-антипротонные пучки необходимой энергии, чтобы можно было «произвести» W^\pm - или Z^0 -бозоны, а затем «поймать» продукты их распада. Но каждый из этих двух этапов исключительно труден. Прежде всего нужно ответить на вопрос, какие энергии протонов (и антипротонов) необходимы для образования W^\pm - или Z^0 -бозонов? Проще ответить на вопрос, какова пороговая энергия кварка (и антикварка), чтобы мог протекать процесс $q + \bar{q} \rightarrow W$? Снова апеллируя к законам сохранения энергии и импульса, видим, что энергия кварка в $(q + \bar{q})$ -столкновениях должна быть равна половине массы W - (или Z -) бозона: $E_q \approx M/2$, где M — масса промежуточного бозона. Но какова должна быть энергия протона, чтобы кварк в нем обладал энергией E_q ? Считая кварки, входящие в состав адрона, эквивалентными, можно получить, что на каждый кварк приходится одна и та же энергия, т. е. энергия протона равномерно распределяется между его элементарными составляющими. Следовательно, $E_q = 1/3 E_p$, где E_p — энергия протона. Но при таком расчете энергия кварка превышает его действительную энергию ровно в два раза. Дело в том, что выше была дана несколько устаревшая картина кваркового «устройства» адронов. В частности,

совершенно не был затронут вопрос о природе сил, «сцепляющих» кварки в адроны. Согласно современным представлениям эти силы порождаются обменом глюонами (от английского слова glue — клей) — гипотетическими безмассовыми частицами (см. ниже). Поэтому в состав адронов входят не только кварки, но и глюоны. И вот на эти глюоны приходится половина всей энергии, переносимой протоном, а другая половина энергии приходится на три кварка: $E_q = 1/3 (1/2 E_p) = 1/6 E_p$, т. е. на каждый кварк в протоне приходится только $1/6$ часть энергии протона. Комбинируя это соотношение с формулой $E_q = M/2$, легко получить:

$$E_p \approx 3M.$$

Таким образом, энергия протонов (и антипротонов) приблизительно в три раза должна превышать массу W - или Z -бозона. Именно из этих соображений энергии протонов и антипротонов были выбраны равными 270 ГэВ. Этой энергии должно было хватить, чтобы рождалась и W^\pm , и Z^0 -бозоны.

Установка со встречными протон-антипротонными пучками была создана в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) в течение 1976—1981 гг. Строго говоря, это не новая установка — ее элементами явились два протонных ускорителя, построенные в ЦЕРН для совершенно других целей. Еще в 1959 г. в ЦЕРН был запущен протонный синхротрон, способный ускорять протоны до энергии 30 ГэВ. В 1976 г. был сооружен суперпротонный синхротрон для ускорения протонов до энергии 400 ГэВ. Но для протон-антипротонных столкновений необходимы антипротоны. Откуда их взять? На помощь приходят протоны: при столкновениях ускоренных протонов с ядрами наряду с пионами и каонами образуются и антипротоны. Это отрицательно заряженные частицы — поэтому с помощью магнитов их можно отделить от остальных «неинтересных» частиц и направить в специальное накопительное кольцо антипротонов.

Итак, сталкивая ускоренные протонные и антипротонные пучки, следует ожидать образования W - и Z -бозонов. Но эти бозоны тут же распадутся, «оставив след» в виде электронов, мюонов и нейтрино. Как выявить эти частицы, учитывая, что в протон-антипротонных столкновениях будут рождаться другие частицы, не имеющие отношения к делу? Энергия сталкивающихся частиц столь велика, что в одном акте $\bar{p}p$ -аннигиляции могут

образоваться десятки пионов, каонов, антипротонов и т. д. Как в этом море частиц выловить драгоценную каплю тех событий, которые имеют отношение к рождению и распаду W- или Z-бозонов?

Для этого усилиями большого международного коллектива физиков были созданы большие детекторы, получившие название UA1 и UA2. Впервые W-бозон удалось зарегистрировать с помощью UA1. Этот детектор имеет длину 10 м, ширину 5 м и его полная масса равна 2000 т. Подземный зал, в котором он установлен, достаточно велик для того, чтобы детектор можно было откатить обратно в «гараж», когда он не должен находиться на пути сталкивающихся частиц.

Детектор UA1 представляет собой многоцелевое устройство, предназначенное для распознавания большого числа частиц и для сбора информации в большом телесном угле вокруг точки столкновения пучков. Он измеряет энергию частиц многими способами, включая измерение кривизны их траектории в магнитном поле. Массивный дипольный магнит создает основное горизонтальное магнитное поле в объеме 85 м^3 .

«Внутри магнита, окружая трубку с пучком, находятся три „дрейфовые камеры“, в каждой из которых имеется ряд близко расположенных проволочек и газ при низком давлении. Электрически заряженные частицы, проходящие через камеру, ионизируют молекулы газа; эти ионы затем дрейфуют к проволочкам, где разряжаются. По виду картины зарядов, появляющихся на многих проволочках, может быть реконструирована траектория частицы. Проволочки в центральной дрейфовой камере расположены в вертикальных плоскостях, а в двух боковых камерах — в горизонтальных плоскостях. Сигналы от частиц, пересекающих плоскости проволочек, могут быть обработаны компьютером, чтобы дать изображение продуктов распада на экране катодной трубки.

Три дрейфовые камеры окружены другими детекторами. Расположенный непосредственно за камерами детектор представляет собой свинцовый калориметр — устройство, которое измеряет энергию, теряемую в нем заряженной частицей, такой, как электрон. В свою очередь, калориметр окружен набором железных пластин, проложенных сцинтилляционными счетчиками, чтобы измерять энергию более тяжелых частиц, таких, как пионы, по их взаимодействию с атомами железа в пластинах. Наконец, снаружи этой аппаратуры находятся несколько

больших камер для детектирования мюонов, которые проходят и сквозь свинец, и сквозь железные пластины»¹⁾.

После значительных усилий, потраченных на создание необходимых параметров установки со встречными протон-антипротонными пучками, а также на отладку детекторов, произошло «запланированное» открытие W - и Z -бозонов.

Реакция, в которой был обнаружен W -бозон, имеет вид $\bar{p} + p \rightarrow e^- + X$, где X обозначает все другие частицы, образующиеся в $\bar{p}p$ -столкновениях, причем электрон образуется с большим поперечным импульсом. В силу закона сохранения импульса в реакции $\bar{p} + p \rightarrow e^- + X$ большой поперечный импульс электрона должен быть в точности скомпенсирован суммарным импульсом совокупности частиц X , так чтобы поперечный импульс электрона и частиц равнялся нулю (поперечный импульс сталкивающихся \bar{p} , p равен нулю).

Поскольку детектор UA1 мог регистрировать самые разнообразные частицы, кроме нейтрино, то, определив энергии и углы образования частиц в совокупности X , можно было проверить закон сохранения поперечного импульса в реакции $\bar{p} + p \rightarrow e^- + X$. И вот оказалось, что во всех случаях образования одиночных электронов большой энергии (порядка нескольких десятков ГэВ) наблюдается значительный дефицит энергии и импульса даже после того, как пересчитать аккуратно все частицы X . Важно подчеркнуть, что недостающий импульс «торчит» против импульса электрона и близок к нему по абсолютной величине.

Такая ситуация могла бы возникать только в том случае, если бы наблюдаемые одиночные электроны являлись продуктами распада W -бозона, $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$. Поскольку при достигнутых энергиях $\bar{p}p$ -пучков W -бозоны должны рождаться почти покоящимися, то электрон и нейтрино, образующиеся при распаде такого W -бозона, должны разлетаться в противоположных направлениях. При этом энергии электрона и нейтрино (точнее говоря, антинейтрино) должны быть одинаковыми. Так оно и оказалось.

Трудно придумать другое, столь же естественное объяснение поведения высокоэнергетических электронов, образующихся в протон-антипротонных столкновениях. Ги-

¹⁾ Клайн Д. Б., Руббин К., ван дер Меер С.— Поиски промежуточных векторных бозонов.— УФН, 1983, т. 139, с. 148—150.

гипотеза об образовании W -бозона с последующим его распадом на электрон и антинейтрино представляется самой разумной и почти неизбежной. А поскольку альтернативные объяснения выглядят искусственными и неубедительными, то гипотеза W -бозона становится единственной, и по логике научного мышления наблюдение электронов в $\bar{p}p$ -столкновениях следует считать экспериментальным доказательством существования W -бозона.

Но самым убедительным доказательством факта наблюдения W -бозонов явилось угловое распределение электронов. Речь идет о распределении числа электронов по углу вылета электронов относительно импульса начальных протонов. Если электроны, наблюдающиеся в высокоэнергетических $\bar{p} + p$ -столкновениях, действительно являются продуктами распада W^- -бозонов, то угловое распределение электронов должно быть очень специфичным: электроны должны вылетать преимущественно по импульсу протона (доказательство этого утверждения приведено в главе V). Такое поведение частиц и наблюдалось на опыте.

Специфическое угловое распределение электронов является не только одним из сильных аргументов в пользу их W -бозонного происхождения: оно доказывает также, что спин W -бозона должен быть равен единице. Тем самым устанавливается довольно важная характеристика W -бозона — его спин — в точном согласии с теорией Вайнберга — Салама.

Повторяя подобные рассуждения, можно показать, что позитроны, образующиеся при распаде W^+ -бозонов, должны вылетать преимущественно против импульса протонов.

Наблюдение Z -бозона представляет собой более простую задачу, поскольку продуктами его распада являются две заряженные частицы: электрон-позитронная ($Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$) или мюонная ($Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$) пара. Регистрируя обе частицы (их энергии и угол разлета), можно не только установить факт рождения Z -бозона, но и надежно определить его массу:

$$M_Z = (95,6 \pm 1,4) \text{ ГэВ}/c^2.$$

Интересно, что кроме распадов $Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$ и $Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ зарегистрирован также распад $Z^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$, в котором наряду с e^+e^- -парой образуется γ -квант большой энергии. Такой распад должен неизбежно суще-

ствовать, но вероятность его в 100 раз меньше вероятности распада $Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$.

Масса W -бозона определяется аналогично, но нейтрально в распаде $W \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ регистрируется косвенным образом; для массы W -бозона получено:

$$M_W = (80,9 \pm 1,5) \text{ ГэВ}/c^2.$$

Массы W - и Z -бозонов находятся в блестящем согласии с теорией Вайнберга — Салама.

Таким образом, открытие W - и Z -бозонов завершает 50-летний этап развития физики слабого взаимодействия.

Такова история открытия элементарных частиц.

Выяснив, как вошли в физику элементарные частицы, перейдем теперь к изложению свойств их фундаментальных взаимодействий. Начнем с электромагнитного взаимодействия элементарных частиц.