
А. И. АХИЕЗЕР
М. П. РЕКАЛО

БИОГРАФИЯ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ЧАСТИЦ

КИЕВ «НАУКОВА ДУМКА» 1979

В популярной и доступной широкому читателю форме в книге изложена история открытия элементарных частиц, начиная с таких «привычных», как электрон, протон и фотон, и кончая открытием странных и очарованных частиц. Подавляющее число известных в настоящее время элементарных частиц создано искусственно на ускорителях. Они образуют удивительный мир, в котором живут очень короткое время. Поиск таких частиц и изучение их свойств требует уникальной специальной аппаратуры. В книге освещено содержание и развитие глубочайших идей и представлений физики элементарных частиц. Излагается история становления квантовой электродинамики — наиболее последовательной теории взаимодействия электронов и фотонов, количественные предсказания которой согласуются с опытом в очень широком интервале энергий. Большое внимание уделено в книге развитию теоретических представлений о свойствах пространства — времени, о нарушении в слабом взаимодействии элементарных частиц инвариантности относительно зеркального отражения и инвариантности относительно замены частиц соответствующими античастицами. В книге изложены современные взгляды на структуру протона, нейтрона и других сильновзаимодействующих частиц, а также представления о кварках и партонах. Авторы касаются вопросов прогнозирования в физике и излагают различные точки зрения относительно интересной проблемы: закончится ли физическая наука.

Ответственный редактор *П. И. Фомин*

А $\frac{20408-253}{M221(04-79)}$ 510-79 1704070000

© Издательство «Наукова думка», 1979

За последние десятилетия «возник» целый новый мир элементарных частиц — более 500. Естественно, появилась новая наука — физика элементарных частиц. Большинство из них 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, неизвестных на Земле. Открытие таких форм материи (общее название — субъядерная материя) и всевозможных процессов взаимопревращаемости различных форм материи — электромагнитного поля, электронов и позитронов, ядерной и субъядерной материи — является одним из величайших достижений науки, значение которого трудно переоценить.

Важнейшим достижением теории явилось также установление замечательной иерархии взаимодействий, управляющих различными формами материи. Оказалось, что существует всего несколько четко очерченных типов фундаментальных взаимодействий, которым подвержены элементарные частицы. Это — сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное взаимодействия. Они прежде всего резко отличаются интенсивностью, но для них различны также и радиусы действия, и присутствующие им внутренние симметрии.

Самым интенсивным, наиболее симметричным и обладающим минимальным радиусом действия 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. Но не только нуклоны, т. е. частицы, входящие в состав ядра, подвержены сильному взаимодействию. Еще две группы элементарных частиц — барионы и мезоны — подвержены сильному взаимодействию. Другие элементарные частицы — электрон, позитрон, мюоны, 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.

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 определяется этим взаимодействием, вся хи-

мия основывается на электромагнитном взаимодействии. По интенсивности оно в сто раз уступает сильному взаимодействию, но зато радиус его действия не ограничен, как радиус сильного взаимодействия. По этим причинам размеры атома значительно больше размеров атомного ядра (примерно на пять порядков).

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) подвержены слабому взаимодействию, т. е. адроны и лептоны (электрон, позитрон, мюоны и нейтрино имеют общее название — лептоны). Но должны быть особые условия, чтобы слабое взаимодействие проявлялось на фоне сильного и электромагнитного взаимодействий. Оно проявляется 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 движе-

ние 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 (при том же расстоянии) в 10^{39} раз. Не исключено, что гравитационному взаимодействию предназначена какая-то особая, существенная, но пока еще не известная роль и в мире элементарных частиц.

Фундаментальные взаимодействия, как геометрические фигуры или материальные тела, например молекулы, обладают определенными свойствами внутренней симметрии, которые, как и свойства симметрии материальных тел, могут отличаться от свойств симметрии пространства — времени, где проявляются взаимодействия. Например, для слабого взаимодействия не эквивалентны два прямо противоположные пространственные направления — правое и левое.

Со свойствами симметрии всегда связаны законы сохранения. Так, однородность пространства связана с законом сохранения импульса, изотропия пространства — с законом сохранения момента количества движения, однородность времени — с законом сохранения энергии. Аналогичным образом и более «хитрые» свойства симметрии фундаментальных взаимодействий связаны с законами сохранения.

С законами сохранения всегда связаны некоторые важные физические величины. Эти величины, называемые квантовыми числами, используются для классификации элементарных частиц и их состояний.

О том, как были выяснены эти и другие свойства субъядерной материи и тех фундаментальных взаимодействий, которым она подвержена, говорится в первой части книги, посвященной решающим открытиям в физике элементарных частиц.

История науки всегда интересна. Тем более физики элементарных частиц. Мы живем в эпоху великого творческого процесса познания самых глубоких свойств материи и пространства — времени. Знание истории физики элементарных частиц может помочь лучше понять современный этап этого процесса.

На пути развития физики элементарных частиц всегда стояли колоссальные трудности. Это и трудности, связанные с сооружением мощных ускорителей заряженных частиц и изобретением приборов для регистраций дотоле неизвестных вновь «рожденных» новых частиц, и трудности, связанные с осмысливанием и пониманием того, что, собственно, наблюдается и открыто — истинная ли частица, истинное ли явление, или это просто «грязь» — экспериментальная и теоретическая. Но если частица действительно существует, а явление действительно имеет место, и они не «укладываются» в старые схемы, то нужны новые концепции и идеи. Введение таковых всегда связано с трудностями из-за определенного консерватизма в науке, т. е. стремления к минимуму основных гипотез. Нужно всегда понять: необходимы ли новые концепции, не противоречат ли они старым принципам, т. е. в каком они соотношении со старыми идеями, не говоря уже о «психологической» трудности принятия новых идей. История свидетельствует, что почти никогда не было случая, чтобы сразу все было правильно понято. Напротив. Почти всегда допускались ошибки и заблуждения, как будто специально не упускались возможности пойти по неправильному, ложному пути. «Хотя законы, которые мы стремимся открыть, быть может, и совершенны,— писал известный астрофизик Шварцшильд,— но человеческий разум далек от совершенства: предоставленный самому себе, он склонен заблуждаться, чему мы видим печальное подтверждение среди бесчисленных примеров прошлого. Действительно, мы очень редко упускали возможность впасть в заблуж-

дение; только новые, полученные из наблюдений данные, с трудом отвоеванные у природы, возвращали нас на правильный путь»¹.

Разбор ошибок и заблуждений многое разъясняет и многому учит. Мы увидим, что, несмотря на все заблуждения, сложный и тернистый путь физики элементарных частиц тем не менее всегда приводил к блестящим открытиям.

Физика элементарных частиц непрерывно развивалась и развивается, и практически каждый год приносил и приносит новые открытия в этой области науки. Поэтому естественен вопрос о дальнейших ее путях. Вопрос — сложный, ибо прогнозирование в области фундаментальных знаний вообще очень сложно. В третьей части книги рассматривается эта проблема. Здесь также разъясняется ошибочность мнения о том, что физика элементарных частиц будто бы «законченная» наука, что все существенное и крупное в этой области физики уже открыто.

Наконец, рассмотрев ряд важных и еще не решенных задач физики элементарных частиц, мы останавливаемся на несколько щепетильном вопросе: закончится ли вообще фундаментальная физика?

¹ Шварцшильд К. Структура и эволюция звезд.— М.: ИЛ, 1961, с. 17.

Электрон, протон и фотон

Электрон, протон, фотон... Самые «старые» элементарные частицы...

Электрон (в идейном плане) вошел в физику в 1881 г., когда Гельмгольц в своей речи, произнесенной в честь Фарадея, указал, что атомная структура вещества вместе с законами электролиза Фарадея с неизбежностью приводит к выводу о том, что электрический заряд всегда должен быть кратен некоторому элементарному заряду, т. е. к выводу о квантовании электрического заряда. «Если мы принимаем существование атомов элементов, то мы не можем избежать и дальнейшего следствия, — что и электричество, как положительное, так и отрицательное, разделено на определенные элементарные количества, которые ведут себя, как атомы электричества»².

Носителем отрицательного элементарного заряда, как мы теперь знаем, и является электрон.

Сам Фарадей был гораздо осторожнее в своих высказываниях: «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 неизвестно о структуре атома, все же трудно удержаться от искушения сформулировать некую идею о маленькой частице,

² Шпольский Э. Атомная физика. Т. 1.— М.: Наука, 1974, с. 11.

в виде которой мы мысленно представляем его; и хотя в равной, если не в большей, степени мы не сведуци в электричестве (так как не можем сказать, является ли оно особым веществом или веществами, некоей 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...»³.

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 отпадет необходимость в этих временных теориях»⁴.

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

³ Андерсен Д. Открытие электрона.— М.: Атомиздат, 1968, с. 19.

⁴ Там же, с. 25.

обозначения величины заряда «корпускулы». И только со временем электроном стали называть саму частицу.

Однако идея об электроне не сразу получила признание среди ученых. Так, некоторые коллеги первооткрывателя электрона Дж. Дж. Томсона искренне считали, что он мистифицирует их, когда на лекции в Королевском обществе высказал предположение о том, что частицы катодных лучей следует рассматривать как возможные компоненты атома. Сам Планк признавался в 1925 г. что не верил тогда (в 1900 г.) до конца в гипотезу об электроне. Характерны и слова известного физика Вихерта, прославившегося своими исследованиями в области электромагнетизма, сказанные им в 1897 г.: «Электричество есть нечто воображаемое, существующее реально только в мыслях».⁵

Можно сказать, что только после опытов Милликена, измерившего в 1911 г. заряды индивидуальных электронов, электрон — первая элементарная частица — получил право на существование.

Открытие протона связано с открытием атомного ядра. Оно было сделано Резерфордом в 1919 г. в результате бомбардировки атомов азота высокоэнергетичными α -частицами. Резерфорд заключил, что «ядро атома азота распадается вследствие громадных сил, развивающихся 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. Крукс высказал предположение о том, что все атомы состоят из некоей первичной субстанции, названной им «*protyle*». Еще ранее, в 1815 г., Прютт выдвинул предположение, что все атомы состоят из атомов водорода, их он считал первоматери-

⁵Андерсен Д. Открытие электрона.— М.: Атомиздат, 1968, с. 88.

ей, из которой построена вся остальная материя. Впоследствии сотрудник Резерфорд Марсден рассказывал что при выборе названия «протон» Резерфорд преследовал цель, чтобы новое название ядра водорода напоминало людям о Пруте.

Были и другие предложения о названии. Например, ядра водорода хотели назвать баронами (барос по гречески означает «тяжесть»). Этим подчеркивалась, однако, только одна особенность ядра водорода, его масса. Термин «протон» был существенно глубже и содержательнее, отражая фундаментальность протона, ибо протон — это простейшее ядро — ядро самого легкого изотопа водорода. Несомненно, что это один из наиболее удачных терминов в физике элементарных частиц.

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

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

Кванты света были введены Планком в 1901 г. для того, чтобы объяснить законы черного излучения. Но они были только минимально возможными «порциями» энергии света той или иной частоты. Хотя предположение Планка о квантовании энергии света абсолютно противоречило всей классической теории, самим Планком это было понято не сразу. Планк писал, что он «... пытался как-то ввести величину h в рамки классической теории. Однако вопреки всем таким попыткам эта величина оказалась весьма строптивой»⁶. Впослед-

⁶ Планк М. Сборник к столетию со дня рождения.— М.: Изд-во АН СССР, 1958, с. 27.

ствии эта величина получила название постоянной Планка ($h=6,10^{-27} \frac{\text{эрг}\cdot\text{с}}{c}$).

После введения постоянной Планка ситуация не стала более ясной. «Мои тщетные попытки,— резюмирует Планк,— как-то ввести квант действия в классическую теорию продолжались в течение ряда лет и стоили мне немалых трудов. Некоторые из моих коллег усматривали в этом своего рода трагедию. Но я был другого мнения об этом, потому что польза, которую я извлекал из этого углубленного анализа, была весьма значительной. Ведь теперь я точно знал, что квант действия играет в физике гораздо большую роль, чем я вначале был склонен считать»⁷.

«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 о фотоне, электроне и протоне 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 датируют обычно не 1895 годом, когда был открыт электрон, и не 1901 годом, когда был открыт фотон, а «отсчитывают» ее с 1932 г., когда Чедвик открыл четвертую элементарную частицу — нейтрон. Это второй, наряду с протоном, кирпичик, из которого строится атомное ядро.

⁷ Планк М. Сборник к столетию со дня рождения.— М.: Изд-во АН СССР, 1958, с. 27.

Открытие нейтрона

Впервые гипотеза о существовании нейтрона была высказана Резерфордом еще в 1920 г. в Бейкериянской 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»⁸.

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

Предпринятые после этого экспериментальные поиски нейтрона не увенчались успехом. Как вспоминал впоследствии Чедвик, 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 мно-

⁸ Резерфорд Э. Ядерное строение атома. Бейкериянская лекция.— Кн.: Нейтрон. Предыстория, открытие, последствия.— М.: Наука, 1975, с. 139.

гое 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 Бейкериянской 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 нейтрона в момент ли его образования, или в момент его испускания из ядра атома»⁹.

История открытия нейтрона полна драматизма. Нейтрон не «давался» физикам и «ускользал» от них. В 1932 г. Боте и Бекер наблюдали излучение нейтронов при облучении бериллия α -частицами, но отождествили это явление с испусканием γ -лучей. Год спустя Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри наблюдали выбивание протонов из веществ под действием нейтронов, но снова интерпретировали это выбивание как результат взаимодействия с высокоэнергетическими γ -квантами, т. е. неправильно.

В день появления сообщения Ирэн и Фредерика Жолио-Кюри Чедвик рассказал Резерфорду об этой новости: «Я заметил,— вспоминает Чедвик,— на его лице растущее удивление; наконец он воскликнул: «Я не верю этому!» Подобная вспыльчивость была не свойственна ему, и за все время моего продолжительного союза с ним я не припомню другого подобного случая. Я говорю об этом, чтобы подчеркнуть, насколько электризующим было воздействие сообщения Кюри Жолио. Конечно, Резерфорд был согласен, что наблюдениям надо верить; совсем другое дело — объяснение»¹⁰.

⁹ Чедвик Дж. Воспоминания о поисках нейтрона.— Кн.: Нейтрон. Предыстория, открытие, последствия.— М.: Наука, 1975, с. 5.

¹⁰ Там же, с. 8.

Сразу же после появления сообщения Кюри, как вспоминает Чедвик, он «...приступил к работе, хотя мысли мои были, естественно, сосредоточены на нейтроне. 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»¹¹.

Интересны в этой связи воспоминания Чедвика, касающиеся тех мучительных трудностей и заблуждений, которые неизбежны при всяком открытии принципиально новых явлений и особенно при их истолковании: «...Я не могу избавиться от чувства, что должен был бы добиться цели быстрее. Я мог бы выдвинуть в свое оправдание ряд извиняющих обстоятельств: нехватку оборудования и т. д. Но, несмотря на все это, я должен признать, хотя бы для себя, что не смог достаточно глубоко продумать свойства нейтрона, особенно те из них, которые наиболее ясно свидетельствуют о его существовании»¹².

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, поэтому все фактически базировалось на единственном предположении о том, что силы, действующие между электронами и ядрами,

¹¹ Чедвик Дж. Воспоминания о поисках нейтрона.— Кн.: Нейтрон. Предыстория, открытие, последствия.— М.: Наука, 1975, с. 9.

¹² Там же.

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 кирпичами ядра, т. е. считать, что ядро состоит из протонов и электронов, между которыми действуют электрические силы. Этим 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 в самой своей сущности квантовой механике. Это разъяснил в 1926 г. Гейзенберг, который показал, что электрон не может «жить» в столь малом объеме пространства, которое 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 энергии электрона ch/R . Эта величина должна быть, естественно, меньше, чем энергия связи ядра, приходящаяся на одну ядерную частицу. Но энергия связи составляет 8 МэВ, а неопределенность в энергии электрона при $R=10^{-13}$ см составляет 200 МэВ. Таким образом, неопределенность в энергии больше энергии связи, и, следовательно, электрон не может находиться в ядре.

Однако противоречие возникало не только с таким общим принципом, как принцип неопределенности; имелись и более прямые противоречия между гипотезой о протонно-электронной структуре ядра и экспериментальными фактами. К числу их 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 они 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 электронной модели.

Протонно-электронной 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 $e\hbar/2Mc$ (M — масса протона), который в тысячу раз меньше электронного магнитного момента.

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

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

Гипотеза нейтрино

При β -распаде ядер, кроме электронов, вылетает еще нейтрино. Мы приходим к пятой элементарной частице — нейтрино. Частица эта сперва была «введена» в науку теоретически. Именно существование ее было постулировано Паули в 1929 г., за много лет до экспериментального открытия нейтрино в 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 β -распад ядра ${}_{83}^{210}\text{RaE}$, в котором впер- вые были убедительно продемонстрированы трудности

с законом сохранения энергии. При распаде ${}_{83}^{210}\text{RaE} \rightarrow {}_{84}^{210}\text{RaE} + e^-$ наблюдался целый спектр электронов, энергия которых начиналась от нулевой энергии 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. 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.

Комментируя эти факты, Нильс Бор пророчески заметил: «Следовало бы быть готовым к дальнейшим сюрпризам β -распада».

Но необходимо отметить, что и в 1932 г. 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 классиче-

ского идеала причинности, еще не вскрытые особенности стабильности атомов, ответственные за существование и свойства атомных ядер, могут заставить нас отказаться от самой идеи сохранения энергии»¹³. Гипотезу о не-сохранении энергии в атомных процессах Бор высказывал еще в 1924 г., однако опыты Комптона по рассеянию фотонов электронами отвергли ее.

Первоначально Паули назвал гипотетическую нейтральную частицу, образующуюся при β -распаде ядер, нейтроном (это было до открытия Чедвика) и предполагал, что она входит в состав ядра. Но уже через полгода он не считал эти частицы составными частями ядер и «... потому не назвал их там нейтронами, однако не дал им особого названия! Дело мне казалось еще очень сомнительным,— говорил Паули,— и я решил не печатать свой доклад».

«После открытия нейтрона,— продолжает 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»¹⁴.

Ученик Ферми итальянский физик 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*) —

¹³ Бор Н. Химия и квантовая теория строения атома. Избранные труды. Т. 2.— М.: Наука, 1971, с. 109.

¹⁴ Паули В. Физические очерки.— М.: Наука, 1975, с. 110—111.

нечто маленькое, нейтральное. Термин был вскоре подхвачен в Римском университете, а оттуда распространился по всему физическому миру¹⁵.

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

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

Статью Ферми о теории β -распада постигла несколько странная судьба. «Ферми полностью сознавал, — пишет Сегре, — сколь важного успеха он добился, и сказал, что это лучшая его работа, и, как он думает, о нем будут помнить по этой работе. Он написал письмо, уведомляющее об этой теории, в редакцию английского журнала «Природа», но та отклонила статью, сочтя содержание слишком далеким от физической реальности. Статья «К теории β -лучей» была опубликована сперва на итальянском языке, а затем в центральном немецком физическом журнале».¹⁶

Успехи теории β -распада, развитой Ферми, побудили 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 сей-

¹⁵ Сегре Э. Энрико Ферми — физик. — М.: Мир, 1973, с. 98.

¹⁶ Там же, с. 101.

час 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»¹⁷.

Паули следующим образом 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»¹⁸.

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

«Судьбу» нейтрино можно сравнить с «судьбой» электрона. Обе частицы были сперва гипотетическими — электрон был введен, чтобы привести в соответствие атомную структуру вещества с законами электролиза, а нейтрино — для спасения закона сохранения энергии в процессе β -распада, и только значительно позже они были открыты как реально существующие частицы.

Ядерные силы

Протонно-нейтринная модель ядра поставила перед физикой новую проблему первостепенной важности — проблему ядерных сил. Дело в том, что нейтрон

¹⁷ Бор Н. Законы сохранения в квантовой теории. Избранные научные труды. Т. 2.— М.: Наука, 1971, с. 203.

¹⁸ Паули В. Физические очерки.— М.: Наука, 1975, с. 114.

является электрически нейтральной частицей, т. е. не обладает электрическим зарядом. Но он 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, потому что электрический заряд нейтрона равен нулю. Что же это за силы?

Квантовая механика выяснила природу химических сил, действующих между нейтральными атомами. Если взять, например, молекулу водорода, то потенциальной энергией молекулы, 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.

Еще проще ситуация с ионом молекулы водорода H_2^+ : здесь связь H и H^+ осуществляется в результате обмена между H и H^+ только одним электроном.

Переходя теперь 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. Поэтому 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 был введен Гейзенбергом в 1933 г. и назван им изотопическим спином. Можно считать, например, что проекция изотопического спина протона равна $1/2$, а нейтрона — $1/2$. Заметим, что если прибавить к проекции изотопического спина $1/2$, то мы получим заряд частицы (в единицах протонного заряда). В дальнейшем изотопический спин пришлось 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, как и химические, можно считать имеющими обменное происхождение?

Впервые мысль об обменном характере взаимодействия протона с нейтроном высказал Гейзенберг в своей первой статье, посвященной протонно-нейтронной модели ядра (1933 г.). В этой статье он писал: «При сближении нейтрона и протона на расстояние, сравнимое с ядерным, происходит по аналогии с ионом H_2^+ перемена места отрицательного заряда... Это изменение места можно сделать наглядным с помощью представления об электроны, не обладающем спином и подчиняющемся статистике Бозе»¹⁹.

Таким образом, здесь как бы содержится неявное допущение о существовании мезона, обмен которым обуславливает взаимодействие между протоном и нейтроном — ведь гипотетическим бесспиновым «электроном» Гейзенберга и оказался псевдоскалярный π -мезон, открытый спустя 15 лет после опубликования статьи Гейзенберга.

Но слава открытия этой частицы связана не с именем Гейзенберга, а с именем Юкавы, который в 1934 г. предложил мезонную теорию ядерных сил. Согласно

¹⁹ Гейзенберг В. О строении атомных ядер.— Кн.: Нейтрон. Предыстория, открытие, последствия.— М.: Наука, 1975, с. 147—148.

этой теории взаимодействие протона с нейтроном является результатом обмена между ними некоторыми заряженными частицами. Юкава предсказал величину массы этих частиц, которые можно интерпретировать как кванты ядерного поля. Он исходил из того, что радиус действия сил обратно пропорционален массе обмениваемых частиц и может быть оценен по формуле $R = h/mc$ (m — масса частицы). Если подставить сюда вместо R размеры ядра ($R = 10^{-13}$ см), то для массы частицы получится величина, превышающая массу электрона примерно в 200 раз.

Существование такой частицы и предсказал Юкава. Но так как в то время такой частицы не было известно, то в конце своей статьи Юкава писал: «Так как квант с такой большой массой в эксперименте никогда не наблюдался, то вышеизложенная теория, кажется, находится на ложном пути»²⁰.

Между тем, в серии экспериментов, выполненных в 1936—1938 гг. Андерсеном и Неддермайером, было показано, что в составе космических лучей присутствуют положительные и отрицательные частицы, масса которых заключена в интервале между массами электрона и протона. Естественно было отождествить эти частицы с предсказанными Юкавой квантами ядерного поля. Эти частицы сперва называли мезотронами, а потом — мезонами.

«С момента открытия,— рассказывает Гамов,— название этой частицы претерпевало различные изменения. Ее называли то «тяжелым электроном», то «легким протоном», пока, наконец, кто-то не предложил название «мезотрон», происходящее от греческого слова мезос — «средний». Отец Вернера Гейзенберга, который был профессором классических языков, опротестовал, однако,

²⁰ *Yukawa H.* Collected papers from Osaka University, v. II, p. 52 (1935).

буквы «тр» в этом названии. Действительно, название «электрон» происходит от греческого слова *electron* (янтарь), а греческое слово *mesos* не содержит в себе «тр». Таким образом, несмотря на протесты французских физиков, которые опасались, что название новой частицы можно будет спутать с французским словом «*maison*» (дом), частицу Юкавы окончательно назвали «мезоном»²¹.

Кеммер рассказывает несколько другую версию возникновения термина «мезон». Сначала теоретики назвали частицу Юкавы «юконом», нейтральный мезон назвали «нейтретто», но эти названия не прижились. «Решение использовать слово «мезон», — рассказывает Кеммер, — было принято в одном частном доме в Кембридже Морисом Прайсом, Хоми Баба и мною. Мы решили назвать эту частицу мезоном. Американские теоретики и экспериментаторы продолжали называть ее мезотроном, однако спустя некоторое время проблема решилась довольно просто. Дело в том, что Прайс переехал в Бристоль, в котором работал Пауэлл, и когда Пауэлл открыл пион, он назвал его мезоном, а название «мезотрон» медленно отмерло²².

Возникали трудности и с названием других частиц. Известен спор между Резерфордом и Юри по поводу названия дейтрона. Резерфорд назвал эту частицу «диплоном», Юри — «дейтоном». Сообщения о свойствах одного и того же объекта были одновременно опубликованы, но под разными названиями. Только после некоторого обсуждения было принято «компромиссное» наименование дейтерон. «Берклиевская группа ион дейтерия назвала «дейтон», — вспоминал много лет спустя

²¹ *Gamov G. Biography of physics. Harper-Row, Publisher, New-York, 1961.*

²² *Kemmer W. Hadronic interaction of electrons and protons, edited by J. Cumming and Osborn. Academic Press. London and New-York, 1971.*

Олифант — сотрудник Резерфорда и соавтор открытия дейтрона.— Резерфорду ужасно это название не нравилось, он считал его чересчур похожим на нейтрон и «ублюдочным словом». Он консультировался со своими коллегами — классиками из Тринити-колледж по поводу какого-то другого названия и, насколько я знаю, писал об этом ряду лиц. В результате он предложил для тяжелого изотопа водорода название «диплоген», а для его ядра — «диплон». Мы опубликовали несколько работ, в которых применяли эти названия, но попытка изменить американскую терминологию оказалась безуспешной. Единственная уступка, сделанная в результате его кампании,— это понимание возможной путаницы дейтона с нейтроном, и в результате получалось — дейтрон. В конце концов Резерфорд, который ввел в науку названия частиц и излучения, испускаемые радиоактивными веществами, и создал слово «протон», согласился с этим решением. Он к этому вопросу не возвращался»²³.

Причина всех терминологических трудностей связана с огромными усилиями, которые приходится затрачивать при открытии новых частиц и выяснении их свойств. «Обычно частицу,— поясняет Янг,— впервые открывают при весьма сложных обстоятельствах, и информация о ней бывает очень скудной. Хотя название дают частицам для их классификации, иногда несколько частиц, позже оказавшихся различными, называли сначала одинаково, а одну и ту же частицу называли различно, потому что в разных экспериментах она проявлялась в различных формах. Значительное количество работ по изучению элементарных частиц было посвящено поискам, подразделению, обозначению и, если можно так выразиться, их каталогизированию»²⁴.

²³ Олифант М. Дни Кембриджа.— Кн.: Резерфорд — ученый и учитель.— М.: Наука, 1973, с. 144.

²⁴ Янг Ч. Элементарные частицы.— М.: Госатомиздат, 1963, с. 34.

Открытие пиона и мюона

Возвратимся, однако, к мезону Юкавы. Среди физиков открытие Андерсена и Неддермайера вызвало сенсацию. В частности, Бор писал в те годы Милликену: «История открытия этих частиц в высшей степени замечательна, и неосторожность, с которой я выразил свое мнение в незабываемые дни позапрошлой весны в Пасадене, диктовалась только признанием огромного значения работы Андерсена, если свидетельства существования новых частиц действительно убедительны. Временами я даже не знаю, что заслуживают ли большего восхищения изобретательность и дар предвидения Юкавы или упорство, с которым группа сотрудников Вашего института занималась поисками проявлений новых эффектов»²⁵.

Между тем дальнейшие исследования свойств частиц, открытых Андерсеном, показали, что отождествление их с мезонами Юкавы было несколько преждевременным. Дело в том, что в 1947 г. итальянские физики Конверси, Панчини и 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 факта Ферми, Теллер и Вайскопф сделали вывод, что частицы, столь слабо взаимодействующие с ядрами, не могут служить для передачи мощных ядерных сил. Поэтому Саката и Иноэ, а также Бете и Маршак, выдвинули предположение, что наблюдаемые частицы не являются частицами Юкавы, а представляют собой только продукты их распада.

В 1947 г. Пауэлл наблюдал в фотоэмульсиях следы заряженных частиц, которые были интерпретированы

²⁵ *Millikan R. Electrons, Protons, Neutrons, Mesotrons and Cosmic Rays. University Chicago Press, 1947.*

как мезоны Юкавы и названы π -мезонами или пионами. Продукты распада заряженных пионов, представляющие собой так же 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, то отсюда следовало, что при переходе $\pi \rightarrow \mu$ должна образовываться еще одна нейтральная частица (масса которой 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. Она до того, как была наблюдаена, получила наименование нейтрино (и стала обозначаться ν). Поэтому теперь нейтральная частица, появляющаяся в результате распада π -мезона, была отождествлена с нейтрино. (Далее мы расскажем о том, как было непосредственно доказано на опыте существование нейтрино).

Итак, был открыт заряженный мезон Юкавы, распадающийся 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 $\pi \rightarrow \mu + \nu$). Потом 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 энер-

гии, то был сделан вывод, что наряду с электроном при распаде мюона образуются два нейтрино, $\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$. Вывод оказался правильным.

Гелл-Ман и Розенбаум следующим образом комментируют открытие мюона: «Здесь мы столкнулись с изысканным коварством природы. Она подкинула нам частицу, у которой с точки зрения теоретической физики не было никаких прав и которую использовать разумным способом не представлялось возможным. Мюон явился подкидышем, найденным на пороге дома. Ситуация еще более осложнилась, благодаря неудачному историческому стечению обстоятельств, которые в течение долгого времени сделали невозможной даже классификацию мюона. Мюон был обнаружен раньше пиона, и все считали, что это и есть тот самый мезон, который предсказал Юкава. Но этой роли его свойства совсем не соответствовали. Совершенно явно он не испытывал сильного взаимодействия с нуклонами и поэтому не мог быть носителем поля ядерных сил. Таким образом, до открытия пиона мюон имел еще меньше смысла, чем он имеет сегодня»²⁶.

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

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

²⁶ Гелл-Ман М., Розенбаум Е. Элементарные частицы. УФН, 1958, 64, с. 391.

Эта ошибка основывалась на том, что не была учтена изотопическая структура ядерных сил, хотя в одной из своих статей Кеммер анализировал эту проблему. На эти ошибки указал Паули: «Еще в 1938 г. можно было предсказать, что пионы должны быть псевдоскалярными частицами».

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

Изотопическая инвариантность

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

Принцип зарядовой независимости ядерных сил был сформулирован в 1936 г. Брейтом и сотрудниками. Они основывались на имевшихся в то время весьма скудных экспериментальных данных о взаимодействии протонов с протонами и нейтронов с протонами в синглетном s -состоянии. Согласно этому принципу, ядерные силы между любой парой нуклонов одинаковы, если нуклоны находятся в состоянии с одинаковыми значениями спина и углового момента (а также пространственной четности).

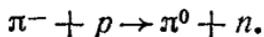
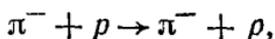
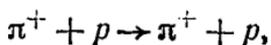
В 1936 г. Кассен и Кондон на основе формализма изотопического спина и принципа зарядовой независимости ядерных сил упростили теорию строения ядер. Роль электрического заряда нуклонов сводилась теперь только к классификации возможных состояний системы нуклонов.

В 1938 г. Фрелих, Гайтлер и Кеммер, развивая идеи Юкавы, показали, что принцип зарядовой независимости ядерных сил требует введения трех мезонов — положительного, отрицательного и нейтрального — переносчиков сильного взаимодействия между нуклонами.

Так как π -мезон сильно взаимодействует с нуклонами, то при рассеянии протонов достаточно больших энергий на ядрах должны интенсивно рождаться пионы. 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 рождение начинается с некоторой энергии протонов — пороговой энергии. Рожденные пионы за время своей жизни успевают пройти расстояния 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. Означает это следующее: 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 более общую формулировку принципа зарядовой независимости ядерных сил. Этот закон позволил объяснить наблюдаемые на опыте соотношения между дифференциальными сечениями процессов рассеяния π -

мезонов на протонах,



Оказалось, что вероятность π^+p -рассеяния почти в десять раз превышает вероятность π^-p -рассеяния в интервале энергий π -мезонов 100—200 МэВ.

«Сечение для положительных пионов,— вспоминает в этой связи сотрудник Ферми по этим опытам Андерсен,— оказалось гораздо выше, чем максимальное значение, найденное для отрицательных пионов. Сначала это казалось особенно удивительным, так как для положительных пионов возможно только упругое рассеяние. Бракнеровское объяснение предвосхитило этот результат буквально на несколько дней. Ферми прочитал препринт статьи Бракнера именно в тот самый день, когда была найдена большая величина сечения. Бракнер проникся идеей о существенной роли изотопического спина в пион-нуклонном взаимодействии. Предположив, что доминирующее состояние обладает полным моментом импульса $3/2$ и изотопическим спином $3/2$, можно было сразу же объяснить все особенности экспериментов. Едва взглянув на статью Бракнера, Ферми схватил ее суть. Он покинул экспериментальный зал, чтобы в своем кабинете самому разработать эту идею, и через 20 минут появился с радостным заключением: «Сечения должны относиться как 9 : 2 : 1». Ферми имел в виду отношение сечений процессов упругого рассеяния π^+ , зарядовообменного рассеяния π^- и упругого рассеяния π^- .

Несколькими месяцами позже, когда Ферми выступал в Нью-Йорке на собрании Американского физического общества, ему было что сказать. В его распоряже-

нии были и факты, и объяснения, и заложенный в них важный принцип: в сильных взаимодействиях между пионом и нуклоном изотопический спин сохраняется. Таким образом, старая идея, до тех пор несколько подзабытая, вновь приобрела важное значение»²⁷.

Наблюдаемое на опыте отношение дифференциальных сечений рассеяния π -мезонов протонами можно было объяснить, если предположить, что в исследованной Ферми области энергий π -мезоны взаимодействуют с нуклонами особенно сильно в том состоянии, которое имеет полный изотопический спин, равный $3/2$. Но состояние нуклона и π -мезона характеризуется не только величиной полного изотопического спина, но и величинами полного углового момента и пространственной четности. При этом рассеяние π -мезона на нуклонах в состоянии с определенными значениями этих квантовых чисел характеризуется так называемой фазой рассеяния. Фаза рассеяния зависит от энергии взаимодействующих частиц, а также от их полного изотопического спина, полного углового момента, пространственной четности. Случай нулевой фазы рассеяния соответствует отсутствию взаимодействия, а случай, когда фаза равна 90° (фаза рассеяния измеряется в градусах), соответствует максимально 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

²⁷ Андерсен Г. Вводные замечания.— Э. Ферми. Научные труды. Т. 2.— М.: Наука, 1972, с. 507.

правильно, мы смогли бы далее заключить, что сила очень велика для состояний с изотопическим спином $3/2$ и моментом $3/2$ »²⁸.

Резонансы

Сильное взаимодействие π -мезона и нуклона в состоянии с полным изотопическим спином $3/2$ и моментом $3/2$ приводит к тому, что у нуклона появляется возбужденное состояние. Это состояние в течение очень короткого времени (порядка 10^{-23} с) распадается на нуклон и π -мезон. Так как это состояние имеет вполне определенные квантовые числа, как и стабильные элементарные частицы, то естественно было назвать его частицей. Чтобы подчеркнуть очень малое время жизни этого состояния, его и другие подобные короткоживущие состояния стали называть резонансами.

Нуклонный резонанс, открытый Ферми в 1952 г., позже стали называть Δ -изобарой (чтобы выделить тот факт, что изотопический спин Δ -изобары равен $3/2$). Так как время жизни резонансов незначительное, их нельзя наблюдать непосредственно, аналогично тому, 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 в настоящее время элементарных частиц относится именно к группе резонансов.

Открытие Δ -резонанса имело важнейшее значение: «когда в 1952 г. Ферми открыл резонанс пион-нуклонного взаимодействия в состоянии с изотопическим спином $3/2$ и полным моментом $3/2$, — замечает Понтекорво, — это была не только революция в физике высоких энер-

²⁸ Ферми Э. Научные труды. Т. 2.— М.: Наука, 1972, с. 562.

гий того времени: главнейший раздел современной физики элементарных частиц — физика резонансов — родился именно тогда. Но это, вероятно, не было ясно и самому Ферми»²⁹.

Возбужденные состояния или резонансы не являются абсолютно новыми объектами в физике. Ранее такие состояния были известны в атомной и ядерной физике. Существование таких состояний в атомной и ядерной физике связано с составной природой атома (образованного из ядра и электронов) и ядра (образованного из нейтронов и протонов). Что касается свойств атомных состояний, то они определяются только электромагнитным взаимодействием. Малые вероятности их распада связаны с малостью константы электромагнитного взаимодействия.

«Причина появления резонансов в сильных взаимодействиях непонятна,— пишет Фейнман,— сначала теоретики и не предполагали, что в теории поля с большой константой взаимодействия существуют резонансы. Позднее они осознали, что если константа взаимодействия достаточно велика, то возникают изобарные состояния. Однако истинное значение факта существования резонансов для фундаментальной теории остается неясным»³⁰.

Изобарные состояния, о которых говорит Фейнман, это — нуклонные резонансы. Возбужденные состояния существуют не только у нуклона, но и у π -мезона (в этом случае говорят о мезонных резонансах).

Происхождение звездной энергии

Успехи, достигнутые ядерной физикой, позволили решить проблему происхождения солнечной и звезд-

²⁹ Ферми Э. Научные труды. Т. 2.— М.: Наука, 1972, с. 506.

³⁰ Фейнман Р. Взаимодействие фотонов с адронами.— М.: Мир, 1975, с. 49.

ной энергий. Эта проблема стояла давно. Около ста лет тому назад Гельмгольц выдвинул предположение, что гравитационная энергия Солнца является источником его тепловой энергии. Внешние слои Солнца «падают» в центр, и запасенная в них потенциальная энергия превращается в кинетическую энергию, часть которой затем излучается. Расчеты Гельмгольца показали, что такой механизм мог бы обеспечить необходимое излучение в течение примерно 30 млн. лет. Это огромный срок по сравнению, например, с продолжительностью того периода человечества, который зафиксирован в документах. Но уже во времена Гельмгольца стало ясно, что предложенный им механизм недостаточен. Дело в том, что теория эволюции жизни, развитая в эти же годы Дарвиным, требовала гораздо большего периода времени, чем 30 млн. лет. После открытия радиоактивности было выяснено, что время существования солнечной системы достигает нескольких миллиардов лет — порядка 5 млрд. Все это показывает, что источником солнечной энергии не может быть гравитационная потенциальная энергия. Ее запаса явно недостаточно для столь большого срока.

В начале XX века Джинс выдвинул гипотезу, согласно которой в звездах происходит аннигиляция электронов и протонов, которые должны притягиваться друг к другу силами электромагнитного притяжения. «В 1904 г. я впервые обратил внимание на те огромные количества энергии, которые могут освобождаться при уничтожении вещества,— писал Джинс,— когда положительные и отрицательные электрические заряды обрушиваются друг на друга и, взаимно уничтожаясь, выбрасывают свою освободившуюся энергию в пространство»³¹.

³¹ Джинс Дж. Вселенная вокруг нас.— Л.— М.: Гостехиздат, 1932. с. 226.

Интересно, что эта гипотеза была выдвинута за год до появления специальной теории относительности Эйнштейна, в которой показано, что масса частиц может переходить в энергию. Знаменитое соотношение $E=mc^2$, связывающее энергию и массу, еще не было известно. Больше того, в это время не был известен даже протон. Этот аннигиляционный механизм мог обеспечить излучение Солнца в течение 150 млрд. лет, что было заведомо достаточно и для эволюции жизни, и для объяснения времени существования Земли.

Однако появление квантовой механики нанесло сокрушительный удар по гипотезе Джинса: атомные электроны, согласно квантовой механике, не могут приблизиться сколь угодно близко к атомному ядру, так как существует «минимальная» атомная орбита, радиус которой по порядку величины равен 10^{-8} см для атома водорода, как показывает опыт в земных условиях, атом водорода в основном состоянии, как, впрочем, и любой другой атом, является абсолютно устойчивым и стабильным.

«Но теперь по астрономическим данным,— тем не менее заявлял Джинс в 1930 г.,— оказывается возможным, что и запрещение электрону приближаться к ядру на расстояние, меньшее, чем $0,53 \times 10^{-8}$ см, тоже может не быть абсолютным. Быть может, прождав очень долгое время на орбите, ближайший к ядру электрон получает разрешение — или оказывается вынужденным — двигаться глубже: он сливается с ядром. И взблеск излучения рождается в звезде. Этим достигается простейший механизм уничтожения электронов и протонов, требуемый, по-видимому, астрономическими данными»³².

Между тем, как теперь известно, реакция $e^- + p \rightarrow 2\gamma$ оказывается дважды запрещенной: законами сохране-

³² Джинс Дж. Вселенная вокруг нас.— Л.— М.: Гостехтеоретиздат, 1932, с. 232.

ния барионного и лептонного зарядов. Согласно современным экспериментальным данным, время жизни атома водорода в низшем, т. е. основном состоянии, превышает 10^{30} лет (величина совершенно фантастическая даже по сравнению со временем существования Вселенной — 10^{10} лет).

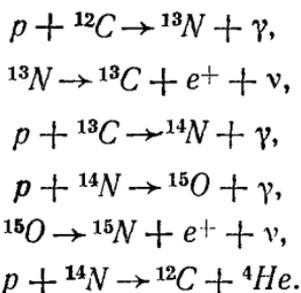
В 30-х годах нашего столетия физики все больше начали склоняться к мысли, что солнечная и звездная энергии должны возникать за счет ядерных реакций. Еще в 1929 г. Аткинсон и Хоутерманс высказали предположение, что при высоких температурах, характерных для внутренних областей звезд, могут происходить ядерные реакции с выделением энергии. Экспериментальное изучение этих ядерных реакций в земных условиях начато в 1933 г., когда были созданы первые ускорители заряженных частиц.

Важнейший теоретический шаг в описании этих реакций был сделан Г. Гамовым, предсказавшим туннельный эффект. Г. Гамов показал, что заряженные частицы (речь идет о ядрах с положительным зарядом) согласно законам квантовой механики могут преодолевать силы электростатического отталкивания или, как принято говорить, могут проникать через потенциальный барьер. Возможность такого проникновения и приводит к ядерным реакциям при тех температурах, которые ожидалось для недр звезд.

В 1938 г. Бете указал ту последовательность ядерных реакций, которая приводит к объединению четырех ядер водорода, т. е. четырех протонов, в ядро He^4 . Дело в том, что при таком слиянии должна выделяться большая энергия, так как в ядре He^4 нуклоны очень сильно «упакованы». «Я занялся рассмотрением реакций между протонами и другими ядрами,— рассказывал в 1967 г. Бете в своем нобелевском докладе,— поднимаясь все выше и выше по периодической системе. Реакции между H и He^4 ни к чему не вели: нет устойчивого ядра

с массой 5. Реакции Н с Li, Be и B, а также с дейтронами при температурах, господствующих в центре Солнца, происходили чрезвычайно быстро, и столь быстрый темп реакции приводил к исчезновению этих ядер: партнер водорода по реакции очень быстро расходовался в таких процессах. Фактически именно по этой причине все перечисленные элементы от дейтерия до бора чрезвычайно редко встречаются на Земле и в звездах и поэтому не могут являться существенным источником энергии»³³.

И только ядра углерода ^{12}C оказались подходящим партнером для взаимодействия с водородом, являясь по существу катализатором превращения водорода в гелий. Так был открыт знаменитый углеродно-азотный цикл ядерных реакций, который состоит из следующей последовательности ядерных превращений:



В результате этих превращений ядро ^{12}C , необходимое для начала цепочки превращений четырех атомов водорода в ядро ${}^4\text{He}$, снова воспроизводится в конце цикла, т. е. число ядер при этом не изменяется. Иначе говоря, углерод не выгорает, а энергия выделяется.

Выделение энергии происходит на каждом этапе углеродного цикла. Так, уже на первом этапе — захвате ядром ^{12}C протона с образованием изотопа ^{13}N , образующийся фотон уносит энергию, равную 1,95 МэВ.

³³ Бете Х. Источники энергии звезд. УФН, 1968, 96, с. 393.

Этот фотон, сталкиваясь с электронами, передает им свою энергию, поддерживая тем самым температуру, необходимую для излучения соответствующей энергии. Так как образующийся изотоп ^{13}N является неустойчивым, то он быстро (в течение 7 мин) распадается с образованием позитрона и нейтрино. Нейтрино в среднем уносит энергию, равную 0,72 МэВ. Из-за слабого взаимодействия нейтрино с веществом эта энергия не превращается в энергию теплового движения, а беспрепятственно уносится из звезды. Позитрон быстро аннигилирует с электроном с образованием двух фотонов. В результате при β -распаде изотопа ^{13}N выделяется энергия в 2,22 МэВ.

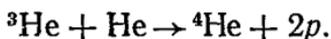
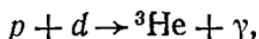
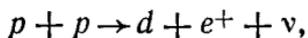
Образующийся при β -распаде изотоп ^{13}C уже довольно устойчив и может захватить протон с образованием устойчивого изотопа азота ^{14}N . При этом образуется фотон с энергией 6,54 МэВ. В свою очередь, ядро ^{14}N также может захватить протон (третий по счету с начала углеродного цикла); при этом образуется фотон с энергией, равной 7,35 МэВ.

Изотоп кислорода ^{15}O неустойчив. В течение 82 с он распадается на нейтрино, позитрон и изотоп азота ^{15}N . Нейтрино беспрепятственно уносит в среднем энергию 0,98 МэВ; позитрон, сталкиваясь с электроном, снова быстро аннигилирует, так что при β -распаде кислорода ^{15}O выделяется энергия в 2,71 МэВ. И на последнем этапе ядро ^{15}N захватывает четвертый протон, в результате чего образуется ядро ^4He и воспроизводится ядро ^{12}C с выделением энергии кинетического движения этих ядер, равной 4,96 МэВ. На этом цикл заканчивается. Четыре протона объединились в ядро ^4He , а ядро ^{12}C , индуцировавшее это объединение, снова готово для нового цикла ядерных превращений.

Суммарный выход энергии в результате всей последовательности ядерных превращений углеродно-азотного цикла составляет 25,03 МэВ, или $4 \cdot 10^{-5}$ эрг.

«Сделав разумные предположения о силе реакций,— резюмирует Бете,— на основе общих принципов ядерной физики, я обнаружил в 1938 г., что углеродно-азотный цикл может обеспечить необходимое выделение энергии на Солнце... Углеродно-азотный цикл был обнаружен независимо также Вейцкером, который понял, что этот цикл расходует лишь самый распространенный элемент — водород. Однако Вейцкер не исследовал ни скорость выделения энергии, ни температурную зависимость реакции»³⁴.

Наряду с углеродно-азотным циклом Бете, Критчфилд и (независимо) Вейцкер предложили другой, так называемый протон-протонный цикл, в котором без какого-либо катализатора образуется дейтрон, а затем ядра ${}^4\text{He}$. Этот цикл состоит из следующих реакций:



В первой реакции, обусловленной слабым взаимодействием, образовавшееся нейтрино уносит 0,26 МэВ энергии из общего ее количества 1,44 МэВ, которая выделяется в этой реакции (с учетом энергии, которая освобождается при аннигиляции позитрона).

Образовавшийся дейтрон взаимодействует с протоном, что приводит к синтезу изотопа гелия ${}^3\text{He}$ и излучения фотона с энергией, равной 5,49 МэВ. Наконец два ядра ${}^3\text{He}$, сталкиваясь, порождают ядро ${}^4\text{He}$; при этом два протона возвращаются для последующих ядерных реакций. При слиянии ядер ${}^3\text{He}$ выделяется большая энергия, равная 12,85 МэВ.

Энергия, выделяемая при протон-протонном цикле, несколько больше энергии, выделяемой при углеродном цикле, и равна 26,2 МэВ, или $4,2 \times 10^{-5}$ эрг.

³⁴ Бете Х. Источники энергии звезд. УФН, 1968, 96, с. 393.

Так как вероятности всех перечисленных процессов (как углеродно-азотного, так и протон-протонного циклов) сильно зависят от температуры звезды, то и полный выход энергии за счет ядерных реакций также сильно зависит от температуры звезды. При температурах порядка 15—20 млн. градусов оба цикла, т. е. и углеродно-азотный, и протон-протонный, приводят к одинаковому выделению энергии. При более низких температурах основную роль играет протон-протонный цикл, а при более высоких температурах — углеродно-азотный цикл.

Наряду с этими двумя последовательностями ядерных реакций можно указать и другие циклы, которые в принципе могут реализоваться на Солнце и в звездах.

Заметим, что превращение протонов в ядра ${}^4\text{He}$ (независимо от цикла) сопровождается образованием нейтрино, $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu$. Интенсивность потока нейтрино может быть определена по известной энергии, испускаемой Солнцем в виде электромагнитного излучения, а именно: по известной светимости Солнца, равной $3,9 \times 10^{33}$ эрг/с. Зная энергию связи протонов и нейтронов в ядре ${}^4\text{He}$, можно показать, что такая светимость приводит к потоку нейтрино у поверхности Земли, заключенному в интервале от $6,5 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, до $8,9 \times 10^{10}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$. Нижняя граница соответствует предельному случаю, когда вся энергия генерируется на Солнце за счет протон-протонного цикла, верхняя оценка отвечает случаю, когда нейтрино уносит максимально большую энергию. Такие нейтрино возникают при β -распаде ядер бора ${}^8\text{B}$, ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu$ с образованием нестабильного изотопа ядра бериллия ${}^8\text{Be}$. Нейтрино при этом распаде могут иметь энергию до 14,06 МэВ.

Для регистрации нейтрино, идущих от Солнца, была использована реакция $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$, предложенная в 1946 г. Понтекорво.

Детектор нейтрино, созданный Дэвисом, представлял собой цилиндрический бак, заполненный жидкостью тетрахлорэтилена (390 000 л или 610 т), химическая формула которой есть C_2Cl_4 . Детектор был помещен в шахту на глубину, равную 4400 м водного эквивалента. Теоретические расчеты показывали, что наибольшее число взаимодействий с атомами хлора должны вызывать нейтрино с максимально возможной энергией, т. е. нейтрино от распада ядра бора. Ожидалось, что в течение 10 суток во всем баке должно образоваться 11,5 атомов аргона, причем нейтрино от β -распада бора должны приводить к образованию 9 атомов аргона.

Результат эксперимента оказался довольно неожиданным: не было зарегистрировано ни одного нейтринного события. Оказалось, что в экспериментальной установке атомов аргона образуется на порядок меньше теоретически ожидаемого значения. Этот результат прежде всего показал, что углеродно-азотный цикл не является основным источником энергии Солнца, так как в противном случае нейтрино должны были бы быть зафиксированы в установке Дэвиса. Больше того, приходится практически полностью исключить углеродно-азотный цикл из числа наиболее вероятных источников солнечной энергии.

Отрицательный результат опыта Дэвиса привел не только к пересмотру существующих моделей Солнца, но даже к таким радикальным предположениям, как нестабильность нейтрино. Нестабильные нейтрино должны распадаться при движении от Солнца к Земле, так что действительный поток их у поверхности Земли должен быть меньше предполагаемого. Однако такая гипотеза может быть проверена в земных условиях. Оказалось, что ее нужно отвергнуть.

В заключение отметим, что ситуация с солнечным нейтрино остается в настоящее время неясной. «Стоит подчеркнуть,— резюмирует сложившееся положение из-

вестный астрофизик Ривс,— что если Дэвис получит положительный результат, т. е. если действительно будут обнаружены солнечные нейтрино, то впервые у нас будет прямое доказательство протекания ядерных реакций в звездах. Тогда вполне определенно решится давняя проблема: каким образом Солнце и звезды выделяют энергию с такой мощностью и в течение столь длительного времени. В настоящее время общепризнано, что генерация энергии имеет ядерную природу. Сначала пришли к такому выводу просто потому, что ничего другого придумать не могли. Затем по мере более глубокого изучения внутреннего строения звезд, исходя из законов физики, становилось все очевиднее, что в их недрах должны протекать ядерные реакции. Это с необходимостью вытекает из существующих физических представлений. Однако пока имеются лишь косвенные доказательства. Щелчки в контейнере Дэвиса положили бы конец всем нашим сомнениям. Кроме того, они рассказали бы нам еще больше о природе звездных недр»³⁵.

Позитрон

В 1928 г. 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: одни с положительной, другие — с отрицательной энергией. Состояния с отрицательной энергией, казалось бы, не отвечают реальным состояниям частицы, поэтому вначале было желание их отбросить. Однако это сделать невозможно в силу основных принципов квантовой механики. После этого Дирак ввел бес-

³⁵ Ривс Х. Источники энергии звезд.— Кн.: Внутреннее строение звезд.— М.: Мир, 1970, с. 56.

конечный фон состояний с отрицательной энергией и постулировал, что этот фон ненаблюдаем, наблюдаемы же только дырки в нем, которые обладают положительной энергией. Дырки следует, как выяснилось позже, интерпретировать как позитроны, т. е. частицы, отличающиеся от электронов только знаком своего заряда.

Теоретически Дираком было показано, что при столкновении позитрона с электроном может произойти аннигиляция обеих частиц — они исчезнут, а взамен появятся фотоны. На этом основании позитрон был назван антиэлектроном.

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

Для заряженной частицы античастица только знаком электрического заряда отличается от частицы; что же касается нейтральных частиц, то здесь ситуация несколько сложнее: античастица отличается от соответствующей ей частицы либо знаком магнитного момента (если он имеется), либо знаками таких квантовых чисел, как барионный и лептонный заряды или странность. Так, например, нейтрино и антинейтрино отличаются друг от друга знаком лептонного заряда: нейтрино имеет лептонный заряд $+1$, антинейтрино — лептонный заряд -1 . Эти заряды — лептонный и барионный — вводятся для того, чтобы объяснить закономерности превращений элементарных частиц. При этом важно подчеркнуть, что они являются абсолютно сохраняющимися квантовыми числами.

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

Любопытно отметить, что Дирак вначале считал, что античастицей электрона является протон, хотя из уравнения Дирака следовало, что массы частицы и античастицы одинаковы. В 1930 г. Дирак писал: «Мы поэтому вынуждены предположить, что дырками в распределении электронов, обладающих отрицательной энергией, являются протоны. Когда электрон с положительной энергией падает в дырку и заполняет ее, мы должны наблюдать одновременно исчезновение электрона и протона, сопровождающегося испусканием излучения»³⁶.

Между тем, как мы уже говорили в предыдущем разделе, процесс $e^- + p \rightarrow 2\gamma$ является дважды запрещенным, благодаря законам сохранения барионного и лептонного зарядов.

Позитрон, как реально существующая частица, был открыт в космических лучах Андерсеном в 1933 г.

Интересно отметить, что теория Дирака не оказала никакого влияния на работу Андерсена. «Открытие позитрона,— писал Андерсен,— 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 энергетического спектра вторичных электронов, образующихся в атмосфере и других материалах, благодаря приходящему из космоса излучению»³⁷.

После открытия позитрона в космических лучах позитрон был «создан» на Земле. Это произошло в 1933 г., когда Чедвик, Блеккет и Оккиалини в Англии, Ирен и Фредерик Жолио-Кюри во Франции наблюдали фотообразование электронно-позитронной пары в кулоновском

³⁶ Dirac P. A. M. A Theory of electrons and protons Proc. Roy. Soc. A128, 1930.

³⁷ Anderson C. D. Am. J. Phys. 29, 825, 1961.

поле ядра, т. е. процесс образования электрона и позитрона при рассеянии высокоэнергетических фотонов ядрами. В этом же году Фредерик Жолио-Кюри и Тибо экспериментально доказали, что позитрон, сталкиваясь с электроном, аннигилирует, и образуются фотоны.

В 1934 г. Бете и 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. Необходимо, однако, отметить, что 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 толщины вещества. Эти противоречия считались столь серьезными, что Бете и Гайтлер 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, двигаются дальше и излучают новые фотоны, которые, в свою очередь, снова рождают пары и т. д. Теория эта нашла блестящее подтверждение на опыте.

«Бете и Гайтлер, Дж. Карлсон и Оппенгеймер в США,— пишет Росси,— практически одновременно объ-

яснили 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 Х. Снайдера, Р. Сербера, В. Х. Фарри, индийских ученых Х. Бабу и С. Чакрабарта»³⁸.

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 был открыт Дейчем в 1951 г. Такой 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, ортопозитроний с параллельными спинами электрона и позитрона — распадается на три фотона, причем время жизни парапозитрония на два порядка меньше времени жизни ортопозитрония. (Времена жизни орто- и парапозитрония равны соответственно $1,4 \cdot 10^{-7}$ с и 10^{-10} с). Теория позитрония была предложена в работах Ландау и Берестецкого.

Заканчивая «историю» позитрона, интересно привести выдержки из лекции Резерфорда, о которой упоминает Д. Данин. В лекции разъяснялось, почему положительное ядро водорода было названо протоном, а не просто положительным электроном. «Следовало принять априори,— писал Резерфорд,— что позитивный электрон должен был бы быть двойником отрицательного электро-

³⁸ Росси Б. Космические лучи.— М.: Атомиздат, 1966, с. 90—92.

на и иметь ту же самую малую массу. Не было, однако, ни малейших намеков на существование такого двойника. Но поскольку можно было возразить, что носитель положительного электричества с массой гораздо меньшей, чем у ядра водорода, быть может, будет еще открыт, казалось нежелательным ставить под сомнение эту возможность присвоением имени позитивного электрона водородному ядру»³⁹.

Удивительные слова, если учесть, что произнесены они были в 1922 г., т. е. за 8 лет до теории Дирака, и за 12 лет до экспериментального открытия позитрона!

Как и предвидел Резерфорд, позитрон и электрон обладают одинаковой массой, равной приблизительно 0,5 МэВ. Поэтому, чтобы «родить» электронно-позитронную пару, фотон должен иметь энергию, превосходящую 1 МэВ.

Радиационное смещение атомных уровней и аномальный магнитный момент электрона

Со времени возникновения дираковской теории электрона было известно, что два уровня атома водорода $2S_{1/2}$ и $2P_{1/2}$, характеризующиеся главным квантовым числом n , равным 2, орбитальными моментами, равными нулю (S -состояние) и единице (P -состояние) и полным угловым моментом $1/2$, должны обладать одинаковыми энергиями. Но в 1947 г. Лемб и Ризерфорд решили проверить этот результат, используя совершенно новый метод радиочастотной спектроскопии. Возможность привлечения методов радиофизики к атомной физике, где обычно использовались методы оптики, основывалась на том, что переходам между уровнями

³⁹ Данин Д. Эрнст Резерфорд.— М.: Молодая гвардия, 1966, с. 543.

атома водорода с $n=2$ соответствовали частоты из радиодиапазона. Например, при переходе между уровнями $2P_{1/2}$ и $2P_{3/2}$ испускается «радиофотон» с частотой 10 950 МГц, что соответствует длине волны $\lambda=2,7$ см.

После тщательных измерений Лэмб и Ризерфорд пришли к выводу, что состояниям $2P_{1/2}$ и $2S_{1/2}$ соответствуют не одинаковые, а разные энергии — такая разность соответствует частоте около 1000 МГц — причем уровень $2S_{1/2}$ лежит выше уровня $2P_{1/2}$. Эта разность получила название лэмбовского сдвига.

Полученный результат нельзя было отнести за счет экспериментальной ошибки. Налицо было явное расхождение между опытом и старой, казалось бы, незыблемой теорией — квантовой электродинамикой.

Квантовая электродинамика, как синтез уравнений Максвелла и квантовой механики, была создана в фундаментальных работах Гейзенберга, Паули, Дирака, Ферми в 30-е годы XX столетия.

«Новая теория, — характеризует квантовую электродинамику Дайсон в период ее становления, — великолепно описала все обычные процессы, относящиеся к атомной физике: испускание и поглощение света, Раман-эффект и эффект Комптона, фотоэлектрический эффект, рождение электронно-позитронных пар, а также существование фотонов как частиц, подчиняющихся статистике Бозе—Эйнштейна. Однако в конце тридцатых годов эта теория начала испытывать трудности, связанные с возникновением расходимостей. При попытке вычислить тонкую структуру атомных спектров, вызванную влиянием излучения на движение электронов в атоме, теория приводила к бесконечным и, следовательно, не имеющим смысла результатам. Эти трудности тормозили дальнейший прогресс с 1936 по 1946 г.»⁴⁰

⁴⁰ Дайсон Ф. Старые и новые течения в теории поля. УФН, 1965, 87, с. 569.

В дальнейшем было выяснено, что появление бесконечностей в квантовой электродинамике связано с влиянием так называемого вакуума поля. Считалось ранее, что такое влияние имеет лишь формальный, а не реальный смысл. Дело в том, что вакуум, т. е. нулевые колебания поля, вызывает смещение электрона. Поэтому и изменяется его потенциальная энергия в электростатическом поле ядра. Ясно, что благодаря этому изменяются и значения энергии электрона в различных состояниях, характеризующихся квантовыми числами n и l .

Основная трудность теории состояла в том, что вычисления этих изменений приводили к бесконечностям. Подобные трудности появлялись также и в других местах. Поэтому возникала парадоксальная ситуация: все вычисления энергий и сечений квантово-электродинамических процессов в низшем порядке по константе электромагнитного взаимодействия приводили к результатам, которые в большинстве случаев хорошо согласовывались с опытом, но вычисление поправок немедленно приводило к бесконечностям.

Путь к преодолению этих трудностей в проблеме лэмбовского сдвига атомных уровней впервые наметил Бете, который в 1947 г. вычислил теоретически значение сдвига. Оно хорошо согласовывалось с измеренным на опыте значением.

«Проф. Бете,— рассказал в своем нобелевском докладе Фейнман,— с которым я тогда работал в Корнельском университете, это такой человек: если имеется какое-то хорошее экспериментальное число, он непременно должен получить его из теории. И он буквально выжал из квантовой электродинамики того времени результат, дававший ему нужное значение расстояния между этими двумя уровнями. При этом он указал на то, что поскольку собственная энергия самого электрона бесконечна, бесконечной должна получаться и энергия связанного электрона. Но когда вы вычисляете расцеп-

ление двух энергетических уровней, пользуясь вместо обычного значения массы ее эмпирическим значением, теория должна, как полагал Бете, давать сходящийся конечный ответ. Пользуясь таким методом, он прикинул величину сдвига между этими уровнями и обнаружил, что она расходится. Он объяснил это тем, что пользовался нерелятивистской теорией. Предполагая, что с учетом релятивистских эффектов все будет сходиться, он произвел необходимые вычисления и получил для лэмбовского сдвига величину порядка тысячи МГц, совершив, таким образом, наиболее важное открытие за всю историю квантовой электродинамики. Все это он сделал в поезде по дороге из города Итаки, штат Нью-Йорк, в город Скенектуди, откуда он взволнованно позвонил мне, чтобы рассказать о своем результате, который я тогда, кажется, не оценил по достоинству»⁴¹.

По существу Бете воспользовался процедурой, которая теперь называется перенормировка массы электрона. Именно в результате открытия Бете утвердилась концепция перенормировки массы и заряда электрона: благодаря взаимодействию электрона с вакуумом поля, масса и заряд электрона претерпевают изменения, и значения этих величин для «голого» электрона, т. е. частицы, изолированной от всего мира, отличаются от значений массы и заряда для реального электрона, которые только и имеют смысл.

Интересно отметить, что впервые такой подход был предложен Данковым еще в 1939 г., но при вычислениях им была совершена ошибка. «Идея перенормировки не нова,— пишет Томонага.— Многие явно или неявно использовали эту идею. Слово «перенормировка» можно найти уже в статье Данкова. В его расчетах, вследствие допущенной ошибки, оказалось, что расходимости в рас-

⁴¹ Фейнман Р. Характер физических законов.— М.: Мир, 1968, с. 218—219.

сеянии оставались даже после перенормировки массы электрона. Эта ошибка была поистине злополучной. Если бы он провел вычисления правильно, то история теории перенормировок была бы совершенно другой»⁴².

Включение понятия перенормировки в арсенал физики привело к бурному развитию не только квантовой электродинамики, но и квантовой теории поля в более широком смысле.

Новейшая квантовая электродинамика была создана к 1949 г. усилиями Томонаги, Швингера и Фейнмана, которым в 1965 г. была присуждена Нобелевская премия. Вклад каждого из этих теоретиков в развитие квантовой электродинамики Дайсон — также один из творцов новой квантовой электродинамики — характеризует следующим образом: «Тот факт, что у истоков теории стоял не один, а сразу три исследователя, оказался чрезвычайно плодотворным для ее дальнейшего развития. Каждый из троих внес в создание современной квантовой электродинамики и индивидуальность своего образа мышления, и свой стиль работы, отчего теория выиграла как глубиной изложения, так и широтой ее обобщения. Томонагу более всего интересовали основные физические принципы; его язык прост, ясен и свободен от тщательной разработки деталей. Швингер был занят построением законченных основополагающих математических формулировок; его научные статьи были образцами искусства формального построения. Один сердитый физик как-то сказал: «Некоторые печатают свои произведения для того, чтобы показать всем, как это делается, а Юлиан Швингер публикует свои работы, чтобы показать всем, что только он один и может это сделать». Швингер был первым из тех, кто расчистил себе дорогу в математических джунглях, добившись

⁴² Томонага С. Развитие квантовой электродинамики. УФН, 1967, 91, с. 61.

успеха в определении точного численного значения магнитного момента электрона.

Подход Фейнмана к решению проблемы был самым оригинальным: он не пожелал воспользоваться готовыми рецептами, а потому был вынужден реконструировать все здание квантовой механики и электродинамики по своим чертежам. Он вывел простые правила для непосредственного подсчета физически наблюдаемых величин. Изобретение «фейнмановских диаграмм» и «фейнмановских интегралов» сделало возможным применение теории к решению конкретных проблем. Фейнмановская расчетная методика стала стандартным приемом в теоретических анализах, причем не только в квантовой электродинамике, но и во всей физике высоких энергий. Настойчивость Фейнмана на обсуждении непосредственно регистрируемых численных значений физических величин привела к более широкому употреблению «*S*-матрицы», которая теперь доминирует в теории элементарных частиц и их взаимодействий»⁴³.

Наряду с объяснением лэмбовского сдвига в квантовой электродинамике был предсказан целый ряд новых эффектов. К их числу относится прежде всего существование аномального магнитного момента электрона (также обусловленного взаимодействием электрона с вакуумом поля).

Существование у электрона внутреннего магнитного момента постулировано Гаудсмитом и Уленбеком в 1925 г. в той же работе, в которой было введено понятие спина. Согласно гипотезе Гаудсмита и Уленбека магнитный момент электрона μ_e должен быть равен борновскому магнетону $e\hbar/2m_e c$, (m_e — масса электрона). Магнитный момент также можно характеризовать величиной гиромагнитного отношения g , которое равно отно-

⁴³ Дайсон Ф. Томонага, Швингер и Фейнман — лауреаты Нобелевской премии по физике. УФН, 1967, 91, с. 71.

шению магнитного момента в боровских магнетонах к спине электрона в единицах \hbar . Согласно гипотезе Гаудсмита и Уленбека для электрона g равно 2. Эта величина прочно вошла в теорию после того, как Дирак предложил свою релятивистскую теорию электрона. «Наиболее сильную поддержку,— пишет в этой связи Крейн,— вера в точность значения 2 для g -фактора электрона получила в конце двадцатых годов, когда П. А. М. Дирак дал новую формулировку квантовой механики. В своих работах Дирак не вводил «извне» g -фактор, равный 2, в качестве требования какой-либо модели электрона. Он использовал только основные физические законы (включая и принцип относительности) в сочетании с простым набором дополнительных условий и таким способом естественно получил величину g -фактора»⁴⁴.

Между тем существование взаимодействия электрона с собственным электромагнитным полем должно изменить величину гиромагнитного отношения g . Отличие магнитного момента электрона от величины $e\hbar/2m_e c$ определяет аномальный магнитный момент электрона. Другими словами, наличие аномального магнитного момента у электрона приведет к тому, что g не будет теперь равно 2. Отличие g от 2 мало, но тем не менее аномальный магнитный момент электрона был обнаружен в 1948 г. на опыте Кушем, работавшим в Калифорнийском университете. За эти опыты ему в 1955 г. была присуждена Нобелевская премия.

Несколько позднее Крейн очень точно измерил аномальный магнитный момент свободного электрона, точнее говоря, в этом опыте измерялось отличие g от 2 (поэтому этот опыт получил название g минус 2 эксперимента).

⁴⁴ Крейн Г. g -фактор электрона. УФН, 1968, 96, с. 153.

Авторам этого эксперимента удалось рассеять укоренившееся заблуждение о том, что магнитный момент свободного электрона вообще не измерим на опыте. «Сомнения в том,— рассказывает Крейн,— что наш эксперимент удастся осуществить, базировались на некоторых соображениях, высказанных Бором в его лекции в 1930 г. В то время считалось, что в принципе возможны только два эксперимента, с помощью которых можно было пытаться обнаружить магнитный момент свободного электрона. Один из них состоял в детектировании магнитного поля электрона непосредственно с помощью чувствительного магнетометра. В другом эксперименте надо было рассортировать электроны соответственно ориентациям их магнитных моментов, пропуская электронный пучок через неоднородное магнитное поле. Бор показал, что обе эти возможности неосуществимы практически, если учесть принцип неопределенности Гейзенберга, суть которого состоит в том, что имеется естественное ограничение на ту точность, с которой одновременно могут быть известны координаты и импульс частицы. Оказалось, что в обоих случаях для того, чтобы измерить магнитный момент электрона, надо было измерять координату и импульс частицы с точностью большей, нежели принципиально допустимая.

Вычисления Бора могли бы уместиться на обратной стороне конверта, настолько они были просты и недвусмысленны. Ошибка заключалась не в тех доказательствах, которые приводил Бор, а в тех чересчур решительных обобщениях, которые были позднее сделаны другими физиками из этих доказательств. Суть этих обобщений состояла в том, что вследствие принципа неопределенности ни один эксперимент по непосредственному измерению магнитного момента свободного электрона не мог рассчитывать на успех. Это утверждение вошло в учебники и, можно сказать, стало своего рода религиозным убеждением. Когда же, более чем через

два десятилетия, мы предложили эксперимент по измерению прецессии свободного электрона, для осуществления которого не требовалось одновременно знать положение и импульс с точностью, нарушающей пределы, налагаемые соотношением неопределенности, мы столкнулись именно с этим старым убеждением, что ни одному эксперименту в этой области не может сопутствовать удача»⁴⁵.

Тем не менее аномальный магнитный момент электрона был измерен, и полученное значение находится в удивительном согласии с расчетами квантовой электродинамики. Согласно этим измерениям $\mu_e = 1,001\,159\,6567\,e\hbar/2m_e c$.

Так как квантовая электродинамика описывает также и взаимодействие мюонов, то аномальный магнитный момент должен возникать и у мюона. Измерение его — несравненно более сложная задача, так как мюоны — нестабильные частицы, живущие 10^{-6} с и распадающиеся на электрон и два нейтрино. Идея опыта по измерению аномального магнитного момента была такая же, как и в случае измерения g -фактора электрона.

«Легко говорить о принципе эксперимента, — пишет об этом опыте Пенман. — Другое дело — его физическая реализация. Провести электронный g минус 2 эксперимент было трудно. С мюонным g минус 2 экспериментом дело обстояло гораздо тяжелее. Многие физики полагали даже, что он вообще неосуществим. По сравнению с электронами мюонов в нашем распоряжении слишком мало, а время их жизни чрезвычайно мало. Кроме того, относительно большая масса мюона требует сильных магнитных полей. Чем больше оборотов заставить совершать мюон, тем больше будет прецессионное отклонение от направления его полета, тем больше будет точность измерения. Поле в упомянутом экспери-

⁴⁵ Крейн Г. g -фактор электрона. УФИИ, 1968, 96, с. 133.

менте составляло 16 000 Ге, а мюоны тратили на движение в поле от двух до шести миллионных долей секунды»⁴⁶.

Трудности подобного опыта были успешно преодолены. Полученное значение аномального магнитного момента мюона также находится в прекрасной согласии с расчетами квантовой электродинамики.

Позднее были выполнены другие опыты по изучению различных квантовоэлектродинамических процессов при высоких энергиях взаимодействующих частиц. Их результаты подтверждают справедливость квантовой электродинамики.

Дайсон следующим образом характеризует новейший этап в развитии квантовой электродинамики: «Томонага, Швингер и Фейнман обошлись без фундаментальных нововведений. В этом смысле их победа — это победа консерватизма. Они полностью сохранили физические основы теории, заложенные Дираком, изменив только математическую надстройку. Доведя до совершенства формальный математический аппарат, они сумели показать, что теория предсказывает разумные результаты для всех регистрируемых величин. Расходящиеся и абсурдные выражения тем не менее присутствуют в теории, но они проявляются таким образом, что автоматически устраняются из любых непосредственно наблюдаемых величин. Точное соответствие между предсказанными теорией и полученными экспериментальным путем величинами и составляет основное достоинство теории»⁴⁷.

Необходимо, однако, отметить, что, несмотря на все успехи квантовой электродинамики, она содержит фун-

⁴⁶ Пенман Ш. Мюон.— Кн.: Над чем думают физики. Элементарные частицы.— М.: Наука, 1965, с. 46.

⁴⁷ Дайсон Ф. Томонага, Швингер и Фейнман — лауреаты Нобелевской премии по физике. УФН, 1967, 91, с. 71.

даментальные трудности. Одна из них заключается в том, что физический заряд электрона при формальном использовании уравнений обращается в нуль. Этот вывод, полученный Ландау, Померанчуком и Фрадкиным, связан с тем, что на малых расстояниях от электрона возникает столь сильная поляризация вакуума, что заряд электрона оказывается полностью заэкранированным на любом конечном расстоянии. Это явление, которое называется нуль-зарядом, показывает, что уравнения квантовой электродинамики, несмотря на все ее успехи, не образуют замкнутой физической теории.

Антипротон и антибарионы

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

С вводом в строй мощных ускорителей существенно усилился 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 Сегре и 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 в магнитном поле. Так как наряду с антипротонами в протон-ядерных столкновениях

рождается большое число отрицательных пионов, то для идентификации антипротона необходимо было достоверно различать антипротоны и отрицательные пионы. Для этого сравнивались скорости антипротона и π^- -мезона, обладающие одинаковым импульсом. Так как масса антипротона почти в 7 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, а именно: $\bar{p} + p \rightarrow \bar{n} + n$.

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

В настоящее время можно считать экспериментально доказанным, что у каждой частицы есть соответствующая античастица. «В результате теперь стало привычным,— замечает в этой связи Альварец,— считать открытие антипротона тривиальным студенческим упражнением. (Если подойти с этими «новыми мерками» к классическим работам Чедвика и Андерсена, 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 общепри-

нятую точку зрения, что каждой частице соответствует античастица»⁴⁸.

Фриш и Торндайк, первыми наблюдавшие странные частицы на ускорителе, подтверждают нетривиальность открытия антипротона следующими словами: «... 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 нуклоны, 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»⁴⁹.

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 Чедвику за открытие нейтрона (1935 г.) и Андерсену — за открытие позитрона (1936 г.).

50-е годы завершаются открытием антигиперонов; в 1958 г. был открыт анти- Λ -гиперон (Бальдо-Чеолин, Праус), в 1960 г. — анти- Σ^0 -гиперон (Батмон и др.), анти- Σ^+ -гиперон (Амальди и др.), анти- Σ^- -гиперон (Векслер с сотрудниками) в 1962 г. — анти- Ξ^- -гиперон (Барди, Кулович, Фаулер и др.) и, наконец, в 1963 г. — анти- Ξ^0 -гиперон (Белти, Сендвайс и др.).

⁴⁸ Альварес Л. Современное состояние физики элементарных частиц. УФН, 1970, 100, с. 93.

⁴⁹ Фриш Д., Торндайк А. Элементарные частицы. — М.: Атомиздат, 1966, с. 85.

В 1965 г. группой Ледермана был открыт антидейтрон. В 1966 г. на ускорителе в Брукхейвене «родились» ядра антитрития. В 1970 г. на ускорителе в Серпухове Прокошкиным с сотрудниками был открыт антигелий.

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

Открытие странных частиц

В 1947 г. Батлер и Рочестер в камере Вильсона наблюдали две частицы, названные V -частицами. Такое название было связано с тем, что наблюдалось два трека, как бы образующие латинскую букву V . Образование двух треков свидетельствовало о том, что эти частицы нестабильны и распадаются на другие, более легкие частицы. Одна из V -частиц, наблюденных Батлером и Рочестером, 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 из V -частиц была заряженной и распадалась на другую заряженную частицу с меньшей массой и нейтральную частицу. Позже эта частица была отождествлена с заряженным K^+ -мезоном, который распадается на заряженный и нейтральный пионы.

Необходимо отметить, что V -частицы допускают, на первый взгляд, и другую интерпретацию: их появление можно было бы интерпретировать не как распад частиц, а как процесс рассеяния. Действительно, процессы рассеяния заряженной частицы на ядре с образованием в конечном состоянии одной заряженной частицы, а также неупругого рассеяния нейтральной частицы на ядре с образованием двух заряженных частиц будут выглядеть в камере Вильсона так же, как и распад V -частиц. Но такая возможность легко исключалась на том осно-

вании, что процессы рассеяния более вероятны в более плотных средах. А V -события наблюдались не в свинце, который присутствовал в камере Вильсона, а непосредственно в самой камере, которая заполнена газом с меньшей плотностью (по сравнению с плотностью свинца).

Необходимо подчеркнуть, 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 субъядерной материи.

Открытие V -частиц и определение их самых «элементарных» характеристик растянулось более чем на десять лет. Так, после первого наблюдения этих частиц в 1947 г. Рочестер и Батлер продолжили свои опыты еще два года, но им не удалось наблюдать ни одной частицы. И только после того, как аппаратура была поднята высоко в горы, были снова наблюдаемы V -частицы, а также и открыты новые частицы.

Вот как выглядит краткая «хронология» этих замечательных открытий. В 1949 г. группа физиков из Бристолья обнаружила с помощью ядерных эмульсий тяжелый мезон, названный τ -мезоном и распадающийся на три пиона, $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$. Масса τ -мезона оказалась равной $966 m_e$ (m_e — масса электрона). Бристольская группа открыла затем κ^+ -мезон, распадающийся на μ^+ -мезон и нейтральные частицы. Так как образующийся мюон не имел строго фиксированной энергии, что должно наблюдаться для двухчастичного распада покоящейся частицы, то был сделан вывод, что κ^+ -мезон распадается по крайней мере на три частицы — μ -мезон и две нейтральные частицы.

В 1953 г. Томсон с сотрудниками наблюдал распад тяжелого нейтрального мезона, названного θ^0 -мезоном, на положительный и отрицательный пионы, $\theta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. Масса θ -мезона оказалась близкой к массе τ -мезона.

В 1954 г. Круссард, Кэллон, Кларманн и Нуи обнаружили тяжелый мезон, в распаде которого заряженный пион не имеет строго фиксированной энергии.

В том же году с помощью камер Вильсона были обнаружены распады тяжелых мезонов на мюон и нейтральную частицу, а также распады на положительный пион и нейтральную частицу.

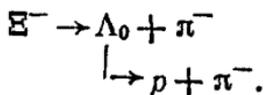
Как выяснилось позднее, все эти наблюдения оказались наблюдениями различных распадов одной и той же частицы — K -мезона (заряженного или нейтрального). Однако в начале 50-х годов K -мезоны регистрировались поодиночке в разных лабораториях, поэтому необходимо было приложить много усилий, чтобы разобраться во всех этих явлениях.

В космических лучах были обнаружены также частицы, масса которых превышает массу протона.

В 1951 г. Манчестерская группа обнаружила с помощью камеры Вильсона в космических лучах Λ -частицу по характерному распаду $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$.

В 1953 г. Миланская группа наблюдала распады Σ^+ и Σ^- -гиперонов, $\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$, $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$, $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$.

В 1953 г. 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 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.

Подводя итоги, можно сказать, что к 1953 г. с помощью изучения космических лучей были открыты θ - τ -мезоны, Λ , Σ^+ , Σ^- и Ξ^- -гипероны. (Позже выяснилось, что θ - и τ -мезоны связаны с различными распадами одной и той же частицы — K -мезона). Были измерены массы этих частиц и времена их жизни. Оказалось, что частицы эти живут примерно 10^{-10} с. Выяснилось, что они довольно интенсивно рождаются в космических лучах, а именно: 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 их рождении и последующем распаде привело к тому, что их стали называть «странными» частицами.

«Стремясь преодолеть указанную трудность,— пишет один из пионеров исследования странных частиц Нишиджима, работы которого позволили существенно продвинуться в понимании свойств странных частиц,— 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 рас-

пад, 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 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,— рассказывает в этой связи Альварес,— 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 правильно 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 обу-

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

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»³.

Гипотеза ассоциативного образования странных частиц, несмотря на ее экспериментальное подтверждение, тем не менее 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 распад должен был бы быть быстрым, т. е. протекать за время порядка 10^{-23} с. Между тем скорость распада $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$ 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 K -мезонов образовывалось 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 соударениях, чем в нуклон-нуклонных.

Ответ на все эти вопросы найден после введения нового квантового числа элементарных частиц, названного странностью. «Гелл-Ман (и независимо Нишиджима) внес первый из своих значительных вкладов,— пишет Альварес,— в физику элементарных частиц, верно угадав законы, по которым происходит рождение и распад всех странных частиц. Я употребил слово «угадав» с

³ Гелл-Ман М., Розенбаум Е. Элементарные частицы. УФН. 1958, 64, с. 391.

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-Мана и Нишиджимы. Причем многие из них впервые. Мы до сих пор не перестаем восхищаться их лаконичной элегантностью»⁴.

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

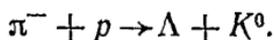
Чтобы запретить сильный распад $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$, достаточно приписать Ξ и Λ различные значения странности, а именно: странность Ξ была выбрана равной -2 , а странность Λ — гиперона — равной -1 .

Если положительным K -мезонам приписать странность, равную $+1$, то 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 ниже порогов реакций с образованием K^- -мезонов. Различие в порогах реакций приводит к за-

⁴ Альварес Л. Современное состояние физики элементарных частиц. УФН, 1970, 100, с. 93.

метному различию их сечений в области энергий порядка несколько ГэВ. Наименьший энергетический порог имеет реакция $\pi + N \rightarrow \Lambda + K$, равный 0,76 ГэВ, 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 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 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 образования $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^0 + K^0$ из-за быстрого распада $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$ выглядит как процесс образования Λ -частицы:



Эти процессы можно различить только в том случае, если выполнить тщательные измерения 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.

Пузырьковая камера

Существенный прогресс в исследовании свойств странных частиц (а также в открытии резонансов) был достигнут после изобретения в 1952 г. Глезером пузырьковой камеры. Принцип действия камеры основан на том, что жидкость, находящаяся в перегретом состоянии, закипает по следу движения заряженной частицы. Рождающиеся пузырьки образуют непрерывную цепочку, которая фотографируется. Если камеру, заполненную, например, жидким водородом, поместить в сильное магнитное поле, то след частицы искривляется, причем характер искривления позволяет судить о величине импульса частицы и знаке ее электрического заряда. Водород в камере играет двойную роль: во-первых, он является мишенью, так как пучок частиц, входящих в камеру, взаимодействует с протонами — ядрами атома водорода; во-вторых, жидкий водород служит детектором образующихся заряженных частиц.

Изобретение пузырьковой камеры было очень своевременным, потому что использовавшиеся ранее камеры Вильсона и ядерные эмульсии страдали целым рядом недостатков. «Ядерные эмульсии, которые с таким поразительным успехом использовались группой Пауэлла, — разъясняет Альварес, — требовали непрерывности видимых последовательных треков, возникающих при рождении и распаде частиц. Присутствие нейтральных и, следовательно, не производящих ионизации частиц в промежуточном состоянии между начальными и конечными заряженными частицами, наряду с отсутствием хотя бы минимального разрешения по времени, совершенно исключало всякую попытку использовать ядерные эмульсии в этой новой области. Выяснилось, что попытка использовать два известных типа камер Вильсона также сталкивается с одинаково непреодолимыми трудностями. Обычная камера Вильсона страдала двумя недос-

татками, которые делали ее непригодной для наших целей, если работать при атмосферном давлении, то продолжительность цикла камеры измеряется минутами; если же давление в ней увеличить, чтобы уменьшить средний пробег до ядерного взаимодействия, то продолжительность цикла растет по меньшей мере так же быстро, как и давление. Таким образом, число ежедневно наблюдаемых событий оказывалось невероятно малым. Из всего этого мы сделали вывод, что физикам-экспериментаторам, изучающим элементарные частицы, нужен трековый прибор с жидким или твердым рабочим веществом (чтобы увеличить скорость счета на два порядка), с одинаковой чувствительностью по всему объему (чтобы избежать проблем, связанных с чувствительным слоем, как, например, в случае диффузионной камеры) и с короткой продолжительностью цикла (чтобы избежать недостатков камеры Вильсона)»⁵.

Таким прибором оказалась пузырьковая камера, заполненная водородом. Исключительная эффективность водородной камеры была продемонстрирована при наблюдении нейтрального каскадного Ξ^0 -гиперона, предсказанного Гелл-Маном и Нишиджимой, в реакции $K^- + p \rightarrow \Xi^0 + K^0$. Это очень трудная для наблюдения реакция, так как в конечном состоянии возникают две нейтральные частицы, не оставляющие следов в водородной камере. Положение усугубляется тем, что Ξ^0 -частица, в свою очередь, распадается на две нейтральные частицы, $\Xi^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0$. Ситуация, казалось бы, полностью похожа на историю, рассказанную Альваресом: «Виктор Вайскопф, выступивший на вечернем заседании во время одной из конференций, вызвал в аудитории взрыв громового смеха, показав абсолютно чистую фотографию, сделанную в камере Вильсона, и сказав, что она явля-

⁵ *Альварес Л.* Современное состояние физики элементарных частиц. УФН, 1970, 100, с. 93.

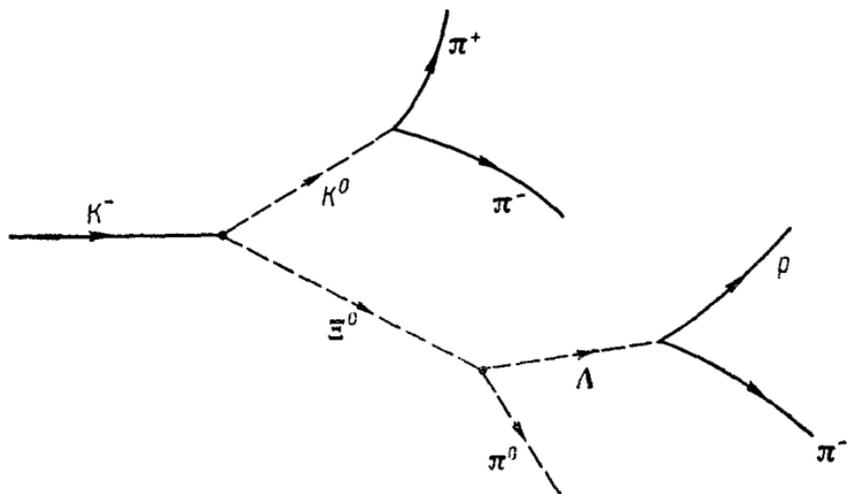


Рис. 1. Схема рождения и распада Ξ^0 -гиперона.

стся доказательством распада новой нейтральной частицы на две другие, тоже нейтральные частицы!»⁶.

И тем не менее Ξ^0 -частица была зарегистрирована. Фотография следов частиц в реакции $K^- + p \rightarrow \Xi^0 + K^0$ представлена на рис. 1. Необходимо, однако, помнить, что на фотографии видны только следы заряженных частиц без указания их электрического заряда и типа. Идентификация была выполнена следующим образом. Сначала по заряженным пионам, которые образовались при распаде нейтрального K^0 -мезона, были определены энергия и направление вылета K^0 -мезона. Используя законы сохранения энергии и импульса, а также зная энергию налетающего K^- -мезона, можно было вычислить массу Ξ -гиперона, направление и величину его импульса. Аналогично измерение кинематических характеристик протона и отрицательного пиона позволило вос-

⁶ Альварес Л. Современное состояние физики элементарных частиц. УФН, 1970, 100, с. 93.

становить импульс и энергию ненаблюдаемой Λ -частицы. Оказалось, что Λ -гиперон не вылетает из той точки, в которой столкнулся начальный K^- -мезон с покоящимся протоном. Это означает, что Λ -частица образовалась не в момент K^-p -взаимодействия, а является продуктом распада Ξ^0 -гиперона: траектории невидимых Λ и Ξ^0 -частиц пересекались. По углу пересечения можно было еще раз определить массу Ξ^0 -гиперона, чем подтверждается исходная интерпретация, и убедиться в том, что в Ξ^0 -распаде образуется также и нейтральный π^0 -мезон. Таким образом, для надежной идентификации Ξ^0 -гиперона оказалось достаточным получить только одну фотографию. Несколькими годами спустя аналогичные соображения были положены в основу идентификации Ω^- -гиперона.

Пространственная четность

Энергия электрического взаимодействия двух частиц не изменяется, если поменять местами частицы. Иными словами, электрическое взаимодействие не изменяется при замене каждого пространственного направления на обратное, т. е. обладает симметрией по отношению к замене правого левым. Этим свойством, которое называется P -инвариантностью, обладает не только электрическое, но и более общее электромагнитное взаимодействие, а также и ядерное, и вообще сильное взаимодействие.

Хотя симметрия между правым и левым имеет место как в классической, так и в квантовой физике, особое значение эта симметрия приобрела только в квантовой механике. Причина такого различия между классической и квантовой физикой заключается в том, что переход от правого к левому путем зеркального отражения является дискретной операцией. В классической физике дискретные преобразования не приводят к зако-

нам сохранения, к ним приводят только непрерывные преобразования. Так, например, однородность пространства относительно непрерывных пространственных сдвигов приводит к закону сохранения импульса. В квантовой же физике одинаково важны и непрерывные, и дискретные преобразования. Поэтому в квантовой механике симметрия между правым и левым приводит к сохранению особой квантовой величины — так называемой пространственной четности.

Симметрия между правым и левым означает, что «...каждый процесс, происходящий в природе, может протекать таким образом, каким он виден отраженным в зеркале. Это значит, что природа зеркально симметрична. Зеркальное изображение любого объекта есть также возможный объект природы; движение любого объекта, рассматриваемое в зеркале, есть также движение, разрешаемое законами природы. Любой выполненный в лаборатории опыт может быть выполнен таким образом, каким он кажется в зеркале, и любой полученный при этом эффект должен быть зеркальным изображением действительного эффекта. Выражаясь кратко, законы природы инвариантны относительно отражения»⁷.

Открытие закона сохранения четности связывают с именем Лапорта, который в 1924 г. сформулировал правило (названное правилом Лапорта), касающееся свойств энергетических переходов в сложных атомах. Лапорт показал, что все атомные энергетические уровни можно разбить на два класса: на «штрихованные» и «нештрихованные». При испускании фотона атомом, что на «штрихованном» уровне, наблюдался переход его на «нештрихованный» уровень; в свою очередь, «нештрихованный» уровень, испуская фотон, переходил в «штрихованный».

⁷ Вайскопф В., Родберг Л. Несохранение четности. УФН, 1958, 64, с. 435.

Это явление объяснил в 1927 г. Вигнер. Он доказал, что правило Лапорта однозначно вытекает из инвариантности электромагнитного взаимодействия относительно изменения пространственных направлений на противоположные, т. е. при замене правого левым. Введенная Лапортом «штрихованность» была отождествлена с четностью атомных уровней. Четные, т. е. «штрихованные» уровни можно характеризовать четностью, равной $+1$, а нечетные, т. е. «нштрихованные» уровни четностью, равной -1 . Правило Лапорта тогда можно сформулировать как закон сохранения пространственной четности в атомных переходах: четность начального атомного состояния совпадает с полной четностью конечного состояния. Четность конечного состояния определяется как произведение четности испущенного фотона и четности образующегося атомного состояния. Но так как в атомных переходах наиболее вероятным оказывается испускание фотона с четностью -1 , то четность атомных состояний должна изменяться при атомных переходах (в согласии с правилом Лапорта).

«Эта фундаментальная идея,— говорит Янг о сохранении пространственной четности в атомной физике,— быстро вошла в плоть и кровь физики. Так как и в других взаимодействиях наличие симметрии между правым и левым не вызывало сомнения, то эта идея была распространена на другие области физики: на ядерные реакции, β -распад, взаимодействие мезонов и взаимодействие странных частиц. К идее ядерной четности привыкли в такой же степени, как и к идее четности атомных уровней; обсуждалась и измерялась внутренняя четность мезонов. При этом всюду понятие четности и закон сохранения четности оказались крайне плодотворными. Этот успех в свою очередь служил указанием на справедливость симметрии между правым и левым»⁸.

⁸ Янг Ч. Закон сохранения четности и другие законы симметрий. УФН, 1958, 66, с. 79.

Но P -инвариантность не является необходимым свойством каждого взаимодействия. Оно не имеет места для слабого взаимодействия, обуславливающего, в частности, β -распад ядер. Теоретически это было предсказано в 1956 г. Ли и Янгом.

θ - τ -парадокс

Стимулом для пересмотра закона сохранения четности в слабом взаимодействии послужил так называемый θ - τ -парадокс.

Ранее мы отмечали, что в экспериментах с космическими лучами с помощью ускорителей было обнаружено большое число различных распадов тяжелых мезонов. Один из них распадается на два пиона (θ -мезон), другой — на три пиона (τ -мезон). Возник естественный вопрос, являются ли эти распады различными распадами одной и той же частицы, или же на опыте наблюдались распады различных тяжелых мезонов. Эти мезоны могли бы различаться массами или временами жизни. На первом этапе экспериментальных исследований свойств тяжелых мезонов, при наблюдении малого числа распадов и недостаточной точности измерений, нельзя было исключить возможность того, что имеется несколько тяжелых мезонов с близкими, но различающимися массами.

С увеличением точности измерений выяснилось, что массы и времена жизни всех тяжелых мезонов совпадают в пределах ошибок экспериментальных измерений. Поэтому возникла мысль, что θ и τ — это разные распады одной частицы, а именно K -мезона. Наиболее убедительным аргументом в пользу существования только одного мезона было то обстоятельство, что относительные вероятности распадов θ и τ -мезонов практически не меняются при изменении условий эксперимента. В частности, относительные вероятности не изменялись при

изменении энергии распадающихся тяжелых частиц. Они также были одинаковыми до и после ядерных столкновений тяжелых мезонов. Такое поведение относительных вероятностей означало бы в случае существования нескольких тяжелых мезонов удивительную «синхронность» их поведения: сечения их образования должны были бы быть в строго одинаковых отношениях при любых энергиях, а сечения их взаимодействия с ядрами вообще должны были бы совпадать.

Другими словами, эти мезоны ведут себя одинаково в процессах взаимодействия. Но если вспомнить также совпадение их масс и времен жизни, то наиболее естественным является предположение, что мы имеем здесь дело с одним сортом частиц, для которых возможны различные распады.

Оставалось, однако, одно свойство тяжелых (θ и τ) мезонов, которое противоречило этому предположению. Дело в том, что θ -мезон, распадающийся на два пиона, $\theta \rightarrow \pi + \pi$, и τ -мезон, распадающийся на три пиона, $\tau \rightarrow \pi + \pi + \pi$, имели одинаковую массу и одинаковый спин, но различались своей пространственной четностью. Из закона сохранения пространственной четности в распаде $\theta \rightarrow \pi + \pi$ вытекало, что пространственная четность θ -мезона положительна, т. е. θ -мезон — скалярная частица. Из распада $\tau \rightarrow \pi + \pi + \pi$ можно было заключить, что пространственная четность τ -мезона отрицательна, т. е. τ -мезон — псевдоскалярная частица.

Различие пространственных четностей θ и τ -мезонов при совпадении всех их других характеристик и получило название θ - τ -парадокса.

Гипотеза о несохранении пространственной четности в слабых распадах тяжелых мезонов разрешила этот парадокс. Действительно, если пространственная четность не сохраняется при распадах тяжелых мезонов, то четности θ и τ -частиц нельзя определить, изучая их распады. Поэтому можно предположить, что θ и τ -мезо-

ны представляют собой одну и ту же частицу, а именно: K -мезон с определенной пространственной четностью. Существование же ее распадов на два и три пиона свидетельствует о том, что в одном из этих распадов четность не сохраняется, а в другом — сохраняется.

Если K -мезонам, так же как пионам, присписать отрицательную пространственную четность, то в распаде $K \rightarrow \pi + \pi$ четность не сохраняется, а в распаде $K \rightarrow \pi + \pi + \pi$ сохраняется.

Необходимо отметить, что на Рочестерской международной конференции по физике высоких энергий в 1956 г. обсуждалось большое число различных способов объяснения θ - τ -парадокса. Казалось, что еще остается много возможностей, не отвергнутых экспериментом, решения этой проблемы. Но только радикальное допущение Ли и Янга о несохранности пространственной четности в слабых процессах оказалось правильным.

«Чтобы провести до конца основанную на этой возможности программу,— пишет Нишиджима,— они проанализировали доступный в то время экспериментальный материал, пытаясь выяснить, имеются ли какие-либо данные, указывающие на сохранение четности в слабых взаимодействиях. В результате этого анализа Ли и Янг пришли к выводу, что в сильных и электромагнитных взаимодействиях четность сохраняется с высокой степенью точности, однако предположение о сохранении четности в слабых взаимодействиях представляет собой неоправданное обобщение. Они указали также некоторые осуществимые эксперименты, которые позволили бы проверить сохранение четности в слабых взаимодействиях»⁹.

⁹ Нишиджима К. Фундаментальные частицы.— М.: «Мир», 1965, с. 342.

Несохранение пространственной четности

Один из таких экспериментов был поставлен Ву с сотрудниками в 1957 г. после предположения Ли и Янга относительно несохранения пространственной четности. В этом эксперименте наблюдался β -распад поляризованных ядер ^{60}Co , т. е. ядер, спины которых выстроены в некотором направлении. Исследовалась корреляция между направлением спина ядер ^{60}Co и углом вылета образующихся при β -распаде электронов, т. е. исследовалось угловое распределение β -электронов. Если бы пространственная четность сохранялась, то число электронов, вылетающих по направлению спина ядра, в точности равнялось бы числу электронов, вылетающих в противоположном направлении. Опыт же показал, что электроны вылетают преимущественно против направления спина распадающегося ядра, откуда и следовало, что в слабом взаимодействии не сохраняется пространственная четность.

Интересно отметить, что до появления этих экспериментальных данных Паули не верил в возможность несохранения пространственной четности. По поводу высказанной Ли и Янгом гипотезы он писал Вайскопфу: «Я не верю, что бог является левшой в управлении слабыми взаимодействиями, и готов побиться об заклад на очень большую сумму, что эксперимент даст симметричный результат». После эксперимента Ву Паули писал: «Я поражен. Не столько тем, что бог — левша, сколько тем, что его руки оказываются симметричными в том случае, когда он проявляет свою силу»¹⁰.

Таким образом, после опытов Ву стало ясно, что в слабом взаимодействии пространственная четность не сохраняется, т. е. слабое взаимодействие не инвариант-

¹⁰ *Pauli W. Lett. to Prof. V. F. Weiskopf. January 17, 1957.*

но относительно замены правого левым. Но слабое взаимодействие не инвариантно также относительно замены частицы соответствующей античастицей. Этой инвариантностью, которая называется *C*-инвариантностью, обладает сильное и электромагнитное взаимодействие, но не слабое.

Чтобы убедиться в нарушении *C*-инвариантности в слабом взаимодействии, необходимо было проделать эксперимент, аналогичный эксперименту Ву, но не с ядрами кобальта-60, а с ядрами антикобальта-60. Естественно, что такой эксперимент нельзя поставить. Тем не менее результаты эксперимента Ву с ^{60}Co позволили сделать вывод о том, что в слабом взаимодействии имеет место нарушение *C*-инвариантности. Это вытекает из фундаментальной теоремы Паули—Людерса. Теорема, доказанная в 1955 г., связывает между собой *C*, *P*-преобразования, а также преобразование обращения времени, которое называется *T*-преобразованием. Согласно теореме, любая физическая теория, обладающая свойством релятивистской инвариантности, а также свойством локальности (частицы взаимодействуют в одной точке), обязательно будет инвариантна относительно произведения всех трех преобразований *C*, *P* и *T*, т. е. инвариантна относительно *CPT*-преобразования. Эта инвариантность носит название *CPT*-инвариантности.

Используя теорему Паули—Людерса, из результатов опыта Ву можно было сделать заключение, что в слабом взаимодействии нарушается *C*-инвариантность.

Но к выводу о нарушении *C*-инвариантности в слабом взаимодействии можно прийти и не обращаясь к *CPT*-теореме. Для этого нужно сравнить слабые распады частиц и античастиц. Опыты по изучению слабых распадов заряженных пионов показали, что цепочки распадов $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ и $\pi^- \rightarrow \mu^- \rightarrow e^-$ отличаются друг от друга, что свидетельствует о нарушении *C*-инвариант-

ности. Эти цепочки распадов были бы одинаковыми, если бы наблюдалась C -инвариантность.

Когда опыты показали, что ни C , ни P -инвариантность не свойственны слабому взаимодействию, это было большой неожиданностью для физиков. Паули по этому поводу писал: «К большому удивлению физиков, в том числе и моему, при первом же выполнении некоторых из предложенных опытов был получен опубликованный в январе 1957 г. результат, что при β -распаде, а также при рождении и распаде μ -мезонов симметрия относительно каждой из операций C и P по отдельности не сохраняется»¹¹.

Колоссальное принципиальное значение открытия несохранения пространственной четности было отмечено присуждением Нобелевской премии Ли и Янгу в том же 1957 г.

Комбинированная четность

Слабое взаимодействие не обладает ни C , ни P -инвариантностью. Но может быть оно остается неизменным, если одновременно произвести обе операции, т. е. заменить частицы античастицами и изменить на обратное каждое пространственное направление? Такая гипотеза была независимо высказана в 1956 г. Ландау, Саламом, Ли и Янгом.

«На первый взгляд кажется — писал Ландау в своей статье — что несохранение четности означает асимметрию пространства по отношению к инверсии. Такая асимметрия, учитывая полную изотропию пространства (сохранение момента), представляется более чем странной, и, на мой взгляд, простой отказ от сохранения четности поставил бы теоретическую физику в тяжелое положение. Я хотел бы обратить внимание на то, что из

¹¹ Паули В. Физические очерки.— М.: Наука, 1975, с. 126.

этого положения существует выход, заключающийся в следующем. Как мы знаем, в сильных взаимодействиях несомненно имеют место как закон сохранения четности, так и инвариантность относительно зарядового сопряжения. Предположим, что при слабых взаимодействиях оба эти закона сохранения не имеют места в отдельности. Однако имеет место инвариантность относительно совокупности обеих операций, которую мы назовем комбинированной инверсией. При комбинированной инверсии происходит одновременно пространственная инверсия и переход частиц в античастицы.

Инвариантность всех взаимодействий относительно комбинированной инверсии,— резюмирует Ландау,— оставляет, как легко видеть, пространство полностью симметричным, асимметричными же оказываются электрические заряды. Эта асимметрия в такой же мере не затрагивает симметрии пространства, как ее не затрагивает существование химической стереоизометрии»¹².

Интересно также отметить, что еще в 1952 г., до того, как возникла θ - τ -проблема, Вигнер, Вик и Вайтман высказывали предположение, что строгой является только CP -инвариантность, а C и P -инвариантности могут быть нарушены. «Вполне возможно (и эту возможность нельзя упускать из виду),— писали они,— что и C и P в природе встречаются как приближенные свойства симметрии, и лишь инвариантность относительно CP выполняется точно. В этом случае электрическое поле следовало бы считать аксиальным вектором. Справедливости ради заметим, что такая возможность в настоящее время представляется не слишком реалистической»¹³.

В 1952 г. еще слишком мало было экспериментальных данных, чтобы всерьез обсуждать такую возможность!

¹² Ландау Л. Д. Собрание трудов.— М.: Наука, 1969, с. 350.

¹³ Вигнер Ю. Этюды о симметрии.— М.: Мир, 1971, с. 312.

Паули, скептически относившийся к гипотезе несохранения пространственной четности, приветствовал гипотезу относительно CP -инвариантности: «В связи с несохранением симметрии при каждой отдельной операции C или P я хотел бы напомнить предостережение Бора относительно того, что в области слабых взаимодействий (как их называют теперь) «мы должны быть готовы к новым сюрпризам». Конечно, это не было бы сюрпризом, если бы все законы природы обладали такой уменьшенной симметрией: CP или T »¹⁴.

И она действительно оправдывается для очень многих процессов, обусловленных слабым взаимодействием. Но не для всех.

Чтобы проиллюстрировать CP -симметрию, Фейнман придумал следующую ситуацию. Представим себе гипотетический мир, который получится, если отразить в зеркале наш реальный мир и заменить все частицы реального мира соответствующими античастицами. Если имеется CP -симметрия, то все законы природы будут одинаковыми в двух мирах — реальном и гипотетическом мире — CP -мире. Там будут, в частности, жить разумные существа — CP -люди, только сердце у них будет справа, и все они будут (за малым исключением) левшами. Мы сможем общаться с ними с помощью радиосвязи, но таким путем не сможем узнать, что CP -люди «сделаны» из антивещества. «Если наш приятель из космоса — замечает Фейнман,— сделан из антивещества, и мы даем ему указания, как сделать нашу «правостороннюю модель», то он, разумеется, сделает все наоборот. Что бы произошло, если бы после долгих переговоров мы научились друг у друга строить космические корабли и договорились бы о встрече где-то в космическом пространстве, на полпути между ними и нами? Разумеется, мы бы предварительно рассказали друг

¹⁴ Паули В. Физические очерки.— М. : Наука, 1975, с. 126.

другу о своих обычаях и прочем, и вот, наконец, вы спешите навстречу, чтобы пожать ему руку. Но будьте внимательны. Если он протянет вам левую руку — берегитесь!¹⁵ Ведь в результате возникнет аннигиляция человека и *СР*-человека!

Двухкомпонентное нейтрино

Пространственная четность сохраняется в сильном и электромагнитном взаимодействиях и не сохраняется в слабом взаимодействии. Поэтому возникает вопрос о причине такой выделенности слабого взаимодействия. Так как в слабых процессах участвует нейтрино, которое не участвует в сильном и электромагнитном взаимодействиях, то естественно попытаться связать нарушение *P*-инвариантности со свойствами нейтрино. Но если предположить, что асимметрия между правым и левым вносится нейтрино, то каким должно быть «несимметрично» нейтрино?

Теория несимметричного нейтрино была предложена Вейлем еще в 1929 г. «Она была, однако, отвергнута в прошлом,— пишет Янг,— так как из нее не следовало сохранение симметрии лево—право. Так как нейтрино участвует только в слабых взаимодействиях, обнаружение несохранения симметрии лево—право в слабых взаимодействиях лишило основания эту причину отказа от идеи Вейля. Многие эксперименты, выполненные для выяснения природы нейтрино в 1957 г., подтвердили его предсказания. Уместно подчеркнуть, что предложения Вейля были основаны на требовании математической простоты и изящества. Едва ли может быть случайностью, что природа и в этом случае, как во многих дру-

¹⁵ Фейнман Р. Характер физических законов.— М.: Мир, 1968, с. 112.

гих, выдавала свою склонность к красоте математических обоснований»¹⁶.

Теория несимметричного или, как еще говорят, двухкомпонентного нейтрино появилась вторично в работах Ли и Янга, Ландау и Салама в 1957 г. В этой теории спин нейтрино всегда направлен противоположно импульсу нейтрино. Так как при пространственном отражении импульс изменяет свое направление на противоположное, а вектор спина не изменяет, то при пространственном отражении возникает нефизическое состояние — «нейтрино», у которого спин и импульс параллельны. Так возникает несимметрия между правым и левым в процессах с участием нейтрино.

Масса двухкомпонентного нейтрино должна быть в точности равна нулю. В противном случае скорость нейтрино была бы меньше скорости света. Для покоящегося наблюдателя спин нейтрино направлен антипараллельно его скорости. Но совершенно другая картина возникает для движущегося наблюдателя, скорость которого превышает скорость нейтрино. Для него импульс нейтрино будет направлен в другую сторону, т. е. он увидит «нейтрино», спин и импульс которого параллельны. Но такого «нейтрино» не существует, если нейтрино двухкомпонентно. Чтобы устранить это противоречие, необходимо считать, что масса нейтрино в точности равна нулю. Такое нейтрино всегда движется со скоростью света. Его не обгонишь!

Заметим, что именно Паули в свое время возражал против теории Вейля: «Для частиц с нулевой массой покоя эта двухкомпонентная теория была впервые предложена Вейлем. Она подвергается критическому обсуждению в моей статье»¹⁷. И даже после эксперименталь-

¹⁶ Янг Ч. Закон сохранения четности и другие законы симметрии. УФН, 1958, 66, с. 79.

¹⁷ Паули В. Физические очерки.— М.: Наука, 1975, с. 127.

ного подтверждения несохранения четности Паули замечает, что он «...некоторое время относился к этой модели с известным скептицизмом, так как в ней слишком сильно подчеркивается особое положение нейтрино»¹⁸.

Однако, как показали дальнейшие исследования, несохранение пространственной четности не обязательно связывать с присутствием нейтрино. Так, например, при распаде $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ также наблюдались эффекты нарушения P -инвариантности, хотя в этой реакции нейтрино не участвует. На эксперименте наблюдались распады Λ -частицы, рожденной в реакции $\tau + p \rightarrow \Lambda + K^0$. Если в распаде $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ пространственная четность сохраняется, то число протонов, которые вылетают вверх относительно плоскости реакции (т. е. плоскости, образованной импульсами π -мезона и Λ -гиперона), должно в точности совпадать с числом протонов, которые вылетают вниз относительно плоскости реакции. На опыте была обнаружена отличная от нуля асимметрия распадов Λ -гиперона, т. е. числа протонов оказались различными, что свидетельствует о несохранении пространственной четности в распаде $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$.

Несохранение пространственной четности было обнаружено в распадах

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu,$$

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

а также в большом числе других процессов как с участием, так и без участия нейтрино.

Возникает вопрос: можно ли наблюдать макроскопические проявления эффектов нарушения закона сохранения пространственной четности, обусловленных слабым взаимодействием? Оказывается, что в принципе

¹⁸ Там же, с. 128.

такие эффекты можно наблюдать не только с элементарными частицами или отдельными ядрами, но и с макроскопическими телами. Так, алюминиевый диск, покрытый сверху слоем кобальта-60 и подвешенный в центре на тонкой нити, начнет вращаться, даже если предпринять все мыслимые меры для первоначального уравнивания диска. Дело в том, что ядра кобальта-60, как уже говорилось, распадаются за счет слабого взаимодействия с испусканием электронов. Так как ядра кобальта, нанесенные на поверхность диска в этом мысленном эксперименте, неполяризованы, то электроны будут вылетать изотропно. При этом электроны, вылетающие вверх, беспрепятственно покинут диск, а электроны, вылетающие вниз, поглотятся в алюминиевом диске. Из-за несохранения четности спин β -распадных электронов ориентирован против направления движения электронов. Поэтому «застаревающие» в диске электроны передадут ему свой спин, т. е. свое вращение, и, следовательно, диск начнет вращаться. При повторении опыта вращение должно происходить всегда в одну и ту же сторону. Если радиоактивный кобальт-60 нанести на нижнюю поверхность диска, то он будет вращаться в другую сторону. Несмотря на то что эти опыты, по всей видимости, нельзя будет выполнить практически (из-за ничтожно малого вращения, которое передается электронами диску), сама принципиальная возможность их постановки демонстрирует нетривиальность следствий, которые вытекают из нарушения закона сохранения пространственной четности.

Необходимо отметить, что симметрия относительно зеркального отражения не кажется бесспорно очевидной даже в тех случаях, когда мы не имеем дела с проявлениями слабого взаимодействия. «Конечно,— замечает по этому поводу Янг,— в повседневной жизни левое и правое совершенно различны. Наше сердце, например, всегда с левой стороны. В языке, употребляемом наро-

дами Востока и Запада, «правое» одновременно означает «хорошо», а «левое» — «плохо»¹⁹.

Биология дает нам целый ряд примеров, демонстрирующих отсутствие симметрии между левым и правым. Так, плоскость поляризации света, пропущенного через раствор сахара, поворачивается только в одну сторону, что свидетельствует о том, что молекулы сахара несимметричны относительно зеркального отражения. Между тем, в искусственно полученном сахаре присутствуют в одинаковом количестве молекулы двух типов — одна молекула является зеркальным отражением другой молекулы. Раствор искусственного сахара не поворачивает плоскость поляризации света. Несмотря на то что все химические свойства молекул обоого типа абсолютно идентичны, бактерии, помещенные в сахар, будут поедать молекулы одного типа и не тронут молекул другого типа. Вот еще один пример асимметрии в живой природе.

Известно также, что белковые молекулы живых организмов всегда закручены в одну сторону. Можно продолжить примеры подобной асимметрии, имеющей место, вопреки тому, что законы физики, управляющие этими явлениями, симметричны относительно зеркального отражения. Нет ли здесь противоречия? Оказывается, что нет! «Можно думать, — разъясняет Фейнман, — что объяснение таково: когда жизнь только зарождалась, случайным образом возникла одна молекула, которая стала затем размножаться самовоспроизведением и т. д. до тех пор, пока много лет спустя не появились эти забавные бурдюки с разветвляющимися на концах отростками, которые могут стоять и без конца очень быстро говорить что-то друг другу. Но ведь мы всего лишь потомки этих первых нескольких молекул, и чисто слу-

¹⁹ Янг Ч. Закон сохранения четности и другие законы симметрии. УФН, 1958, 66, с. 79.

чайно оказалось, что у этих первых молекул одна ориентация, а не другая. Эти молекулы могли быть либо одного типа, либо другого, либо с левой, либо с правой ориентацией, а затем они начали воспроизводиться и размножаться и усложнялись все дальше и дальше»²⁰.

Нарушение комбинированной инвариантности

Как уже отмечалось, гипотеза Ландау, Салама, Ли и Янга о CP -инвариантности слабого взаимодействия оправдывается не всегда. Именно, как было установлено в 1964 г. Кристенсенем, Крониным, Фитцем и Тюрлеем, CP -инвариантность нарушается при распаде нейтральных K^0 -мезонов.

Чтобы разъяснить эту проблему, заметим, что существуют два нейтральных каона K^0 и \bar{K}^0 , отличающихся значениями странности и проекции изотопического спина: странность K^0 -мезона равна $+1$, странность \bar{K}^0 -мезона равна -1 , а проекции изотопического спина K^0 и \bar{K}^0 равны соответственно $+1/2$ и $-1/2$. Так как в сильном и электромагнитном взаимодействиях странность сохраняется, то K^0 и \bar{K}^0 -мезоны должны интенсивно рождаться в различных реакциях, например, $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$, $\gamma + p \rightarrow \Sigma^+ + K^0$, $\gamma + p \rightarrow p + K^0 + \bar{K}^0$, $K^- + p \rightarrow \bar{K}^0 + n$. K^0 и \bar{K}^0 -мезоны являются нейтральными частицами, поэтому наблюдать их непосредственно на опыте нельзя, можно наблюдать лишь продукты их распада, например $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. Это означает, что на эксперименте мы измеряем не квантовые числа нейтрального каона, а квантовые числа состояния системы $\pi^+ + \pi^-$, образовавшейся при распаде K^0 -мезона. Но распады K -мезонов

²⁰ Фейнман Р. Характер физических законов.— М.: Мир, 1968, с. 58.

происходят за счет слабого взаимодействия, в котором не сохраняется странность и проекция изотопического спина. Поэтому эти квантовые числа не могут быть измерены для распадающихся нейтральных K -мезонов.

«Обращаясь к изучению этого нового члена семейства элементарных частиц,— пишет по поводу свойств нейтральных каонов Нишиджима,— следует весьма осторожно подходить к ряду фундаментальных вопросов теории, таких, например, как вопрос о том, что характеризует элементарную частицу. Существует большое число различных квантовых чисел, с помощью которых можно отличить одну частицу от другой. Все такие квантовые числа тесно связаны с законами сохранения, действующими в теории поля, поскольку лишь интегралы движения могут служить отличительными признаками той или иной частицы... Выражаясь кратко, для характеристики частицы необходимо использовать собственные значения полного набора наблюдаемых. Иногда оказывается, что такой набор невозможно задать однозначно; тогда вопрос о подходящем выборе наблюдаемых должен решаться сообразно с теми экспериментальными условиями, в которых происходит наблюдение частицы»²¹.

Поэтому, чтобы приписать нейтральным каонам определенные квантовые числа, наблюдая распады, необходимо прежде всего установить, какие квантовые числа сохраняются в слабом взаимодействии. Мы уже отмечали, что C и P -инвариантности нарушаются в слабом взаимодействии. Если только предположить, что имеет место CP -инвариантность слабого взаимодействия, то в нем должна сохраняться CP -четность или, как говорят, комбинированная четность. Следовательно, распады K^0 -мезонов позволяют установить их комбинированную четность.

²¹ Нишиджима К. Фундаментальные частицы.— М.: Мир, 1965, с. 280—281.

Однако ни K^0 , ни \bar{K}^0 -мезоны не имеют определенной CP -четности, поскольку эти частицы распадаются на два и на три пиона. Тем не менее существуют такие состояния каонной материи, которые обладают определенной CP -четностью. Эти состояния называются K_1^0 и K_2^0 -мезонами. При этом K_1^0 -мезон преимущественно распадается на два пиона за время порядка 10^{-10} с, а K_2^0 -мезон распадается на три пиона за время порядка 10^{-8} с. K_1^0 -мезон имеет положительную CP -четность, а K_2^0 — отрицательную CP -четность.

Возникает вопрос, как K_1^0 и K_2^0 -мезоны связаны с K^0 и \bar{K}^0 -мезонами. Оказывается, что состояния K_1^0 и K_2^0 -мезонов можно представить как суперпозиции состояний K^0 и \bar{K}^0 -мезонов. Если K^0 и \bar{K}^0 -мезоны, также как и π -мезоны, имеют пространственную четность, равную -1 , то эта связь может быть представлена в виде: $K_1^0 = \frac{K^0 - \bar{K}^0}{\sqrt{2}}$,

$K_2^0 = \frac{K^0 + \bar{K}^0}{\sqrt{2}}$. (Под K_1^0 , K_2^0 , K^0 и \bar{K}^0 понимаются состояния соответствующих частиц). Таким образом, K_1^0 и K_2^0 -мезоны являются суперпозициями K^0 и \bar{K}^0 -мезонов. Это приводит к тому, что K_1^0 и K_2^0 -мезоны не имеют определенных значений странности и проекции изотопического спина, но имеют определенные значения комбинированной четности. В этом заключаются дуальные свойства нейтральных K -мезонов: в сильном и электромагнитном взаимодействиях, сохраняющих странность и проекцию изотопического спина, эти частицы ведут себя как K^0 и \bar{K}^0 , т. е. как частицы с определенными значениями странности и проекции изотопического спина, а в слабом взаимодействии, сохраняющем CP -четность, эти частицы ведут себя как K_1^0 и K_2^0 . Для K_1^0 и K_2^0 их античастицы совпадают с частицами, т. е.

K_1^0 и K_2^0 -мезоны являются истинно нейтральными частицами.

Связь K^0 и \bar{K}^0 с K_1^0 и K_2^0 можно записать несколько иначе: $K^0 = \frac{K_1^0 + K_2^0}{\sqrt{2}}$, $\bar{K}^0 = \frac{K_1^0 - K_2^0}{\sqrt{2}}$.

Мы видим, что рождение K^0 или \bar{K}^0 -мезона означает равновероятное рождение K_1^0 и K_2^0 -мезонов.

«Существование двух линейно независимых нейтральных K^0 -мезонных состояний, получивших название K_1^0 и K_2^0 и обладающих различными массами и временами жизни,— пишут Ли и Ву,— впервые предсказали в 1954 г. Гелл-Ман и Пайс. В этот период инвариантность относительно C , P и T -преобразований считалась несомненной, и предсказание Гель-Мана и Пайса рассматривалось как следствие точной симметрии относительно зарядового сопряжения. Затем Пайс, Пиччиони и другие показали, что из-за ожидаемой малой разности масс между K_1^0 и K_2^0 , а также из-за одновременного действия сильных и слабых взаимодействий при прохождении нейтральных K^0 -мезонов через вещество возникает сложная временная зависимость. Благодаря этим теоретическим исследованиям были предприняты поиски долгоживущих нейтральных K^0 -мезонов, т. е. K_2^0 -мезонов. Существование K_2^0 -мезонов было установлено Ланде и другими летом 1956 г. После открытия несохранения четности имели место длительные дискуссии относительно возможного нарушения CP -инвариантности и симметрии относительно обращения времени, в частности, в распадах K^0 -мезонов. В статье Сакса о K^0 -мезонах были подытожены результаты обсуждения этой проблемы. Хотя было поставлено несколько экспериментов с целью обнаружить возможные нарушения T или CP -инвариантности в слабых взаимодействиях, однако вплоть до 1964 г. ни в одном из этих экспериментов не было найдено никаких отступлений от T или CP -симмет-

рии. Отсутствие конкретных экспериментальных данных придавало всей теоретической дискуссии чисто академический характер.

В 1964 г. Кристенсен, Кронин, Фитч и Тюрлей осуществили эксперимент, который определенно установил нарушение инвариантности относительно CP -преобразования. Они обнаружили новый тип распада K_2^0 -мезона: $K_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ²².

В этом эксперименте пучок протонов с энергией 30 ГэВ сталкивался с бериллиевой мишенью. В таких столкновениях рождаются главным образом пионы и каоны (как заряженные, так и нейтральные). С помощью специальных устройств можно было выделить пучок нейтральных K -мезонов и направить его в заполненную гелием распадную камеру, которая помещалась на расстоянии 20 м от мишени. Пройдя такое расстояние, короткоживущие K_1^0 -мезоны, присутствующие в пучке K^0 -мезонов, полностью распадутся, так как на расстоянии в 20 м укладывается 600 пробегов K_1^0 -мезонов (это означает, что число K_1^0 -мезонов, рожденных в мишени, должно уменьшиться в 10^{260} раз, т. е. полностью исчезнуть). Следовательно, в пучке K^0 -мезонов должны остаться только долгоживущие K_2^0 -мезоны. Если в слабом взаимодействии имеет место CP -инвариантность, то в распадной камере должны наблюдаться распады $K_2^0 \rightarrow \pi\pi$ и не должны наблюдаться распады $K_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ (запрещенные законом сохранения комбинированной четности).

Из общего числа 22700 зарегистрированных распадов K -мезонов было найдено 45 ± 9 случаев распадов $K_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ (ошибка ± 9 характеризует неопределенность в идентификации распадов $K_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$). Существование

²² Ли Т., Ву Ц. Слабые взаимодействия.— М.: Мир, 1968, с. 182—183.

распадов $K_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ означает, что в слабом взаимодействии нейтральных K -мезонов не сохраняется комбинированная четность, причем, как показывают приведенные выше числа, нарушение CP -инвариантности мало. Его можно характеризовать величиной отношения R числа распадов $K_2^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ к общему числу распадов K_2^0 -мезонов на заряженные частицы. Оказалось, что $R = (2 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$, т. е. в отличие от нарушения C и P -инвариантностей, которое максимально большое и равно 100 %, нарушение CP -инвариантности мало и составляет только две десятых процента.

Исследование распадов K_2^0 -мезонов в вакууме, выполненное почти одновременно с экспериментом Кристенсена, подтвердило это значение.

Так как в распаде $K_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ запутаны эффекты всех трех взаимодействий — слабого, сильного и электромагнитного, то возможны различные механизмы нарушения CP -инвариантности. Окончательно этот механизм еще не выяснен.

Так как CP -четность не сохраняется в распадах нейтральных K -мезонов, то долгоживущим нейтральным каоном (K_L^0 -мезоном) является теперь не K_2^0 -мезон, как это было в случае сохранения комбинированной четности, а суперпозиция K_2^0 и K_1^0 -мезонов; $K_L^0 = K_2^0 + \varepsilon K_1^0$, где ε — малый параметр, определяющий нарушение CP -инвариантности. Аналогично, короткоживущий нейтральный каон (K_S^0 -мезон) не совпадает с K_1^0 -мезоном: $K_S^0 = K_1^0 + \varepsilon K_2^0$.

Продолжая историю с «марсианином» Фейнмана, можно утверждать, что после открытия нарушения CP -инвариантности нет нужды для установления его личности, т. е. для выяснения вопроса, из вещества или антивещества он состоит. Достаточно запросить у него знак зарядовой асимметрии лептонных распадов K^0 -мезонов!

Суммируя эти свойства слабого взаимодействия, Янг говорил в своей нобелевской лекции: «Таким образом, слабые процессы годятся для того, чтобы отличать правое от левого (если только как-то определена разница между веществом и антивеществом). Слабые процессы также могут быть использованы для того, чтобы отличить вещество от антивещества (когда определена разница между правым и левым). Если нарушается инвариантность относительно обращения времени, то слабые процессы могут служить даже для независимого разделения правого от левого и вещества от антивещества. Здесь чувствуется, что происхождение слабых взаимодействий тесно связано с вопросом о возможности отличить правое от левого и вещество от антивещества»²³.

Универсальная теория слабого взаимодействия

Сразу после открытия несохранения пространственной четности возник вопрос: как «устроено» слабое взаимодействие, в котором нарушается P -инвариантность.

Когда в 1934 г. Ферми постулировал существование слабого взаимодействия, он исходил из аналогии с квантовой электродинамикой.

Нейтрино (антинейтрино), которые возникают в процессе β -распада, не содержатся внутри ядра или нейтрона, а образуются в самом процессе распада. В этом отношении образование нейтрино аналогично испусканию фотона, который не содержится в атоме, а возникает в процессе излучения. На этом основании процесс β -распада $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ можно описывать аналогично процессу излучения в квантовой электродинамике. Но

²³ Янг Ч. Закон сохранения четности и другие законы симметрии. УФН, 1958, 66, с. 79.

процесс излучения можно описывать с помощью тока, порождаемого заряженной частицей. Поэтому естественно описывать β -распад, а также другие слабые процессы, вводя концепцию токов частиц.

Чтобы разъяснить это, заметим, что слабый процесс $\nu + n \rightarrow e^- + p$ можно трактовать аналогично процессу рассеяния электрона протоном, $e^- + p \rightarrow e^- + p$. Последний процесс обусловлен электромагнитным взаимодействием, и его можно трактовать как результат взаимодействия двух электромагнитных токов, а именно: электронного и протонного. Процесс $\nu + n \rightarrow p + e^-$ также можно трактовать как результат взаимодействия двух токов, но не электромагнитных, а слабых токов — лептонного и нуклонного. В реакции $\nu + n \rightarrow p + e^-$ лептонный ток соответствует превращению нейтрино в электрон, а слабый нуклонный ток соответствует превращению нейтрона в протон. Эти токи соответствуют таким превращениям частиц, при которых изменяется величина электрического заряда, в то время как электромагнитные токи не связаны с изменением заряда. Поэтому электромагнитные токи можно назвать нейтральными, а рассматриваемые слабые токи — заряженными токами.

Предположение о том, что нейтрино и электрон не содержатся внутри нейтрона, а образуются в результате квантового перехода, не сразу было осознано физиками. Интересны в этой связи воспоминания Вайскопфа: «Вспоминаю обсуждение в нашей группе вопроса, почему электрон и нейтрино появляются из ядра. Теперь, конечно, каждый студент знает, что образуется пара, но в те времена идея образования пары была совершенно новой, теория позитрона еще находилась в зачаточном состоянии. Я помню, что мы сидели в лейпцигском кафе, обращенном входом к плавательному бассейну; В. Гейзенберг смотрел на дверь. Мы рассуждали: как же может быть, что электрон выходит из ядра, если его до этого там не было. В. Гейзенберг сказал: «Все вы де-

лаете неправильные выводы; посмотрите на дверь. Вы видите, что каждый входящий полностью одет. И каждый выходящий тоже. Сделаете ли вы из этого вывод, что и в бассейне пловцы полностью одеты»²⁴.

Взаимодействие электромагнитных токов определяется величиной заряда электрона e -константой электромагнитного взаимодействия, а взаимодействие двух слабых заряженных токов — константой G слабого взаимодействия. Константа G в отличие от констант сильного и электромагнитного взаимодействий размерна и численно равна:

$$G = 10^{-5}/M^2,$$

где M — масса протона.

Электромагнитное взаимодействие сохраняет пространственную четность, поэтому электромагнитный ток является полярным вектором. Физически это означает, что в электродинамике никогда не складываются векторы \vec{E} и \vec{H} . Иная картина имеет место для слабого взаимодействия. Здесь слабые токи складываются из двух слагаемых, из которых одно ведет себя как полярный вектор, а другое — как аксиальный вектор, т. е. слабый ток представляет собой сумму векторного и аксиально-го слабых токов. Существенно, что векторный и аксиальный токи входят в суммарный ток с одинаковыми весами. Поэтому такая структура токов получала название $V-A$ -варианта теории слабого взаимодействия.

$V-A$ -вариант теории слабого взаимодействия был установлен после многолетних теоретических и экспериментальных усилий понять природу слабого взаимодействия. Сам Ферми, создавая свою теорию слабого взаимодействия, предполагал, что нуклонный и электронный слабые токи являются векторными. Электромагнитный ток также является векторным.

²⁴ Вайскопф В. Физика в двадцатом столетии.— М.: Атомиздат, 1977, с. 22.

«Ферми со всей ясностью указывал,— писал Раззетти,— что имеется много возможных видов гамильтониана взаимодействия, приводящих к процессу β -распада. Его выбор диктовался соображениями простоты и аналогией с электромагнитным полем. Поэтому он выбрал векторное взаимодействие. Позднее Вигнер показал, что возможные релятивистски инвариантные взаимодействия; билинейные по волновым функциям электрона и нейтрино (и не содержащие градиентов этих функций) могут быть пяти типов (или любой линейной комбинацией их)»²⁵.

Наряду с векторными токами для частиц со спином $1/2$ можно ввести также скалярные (S), псевдоскалярные (P), аксиальные (A) и тензорные (T) токи. Скалярный ток может взаимодействовать с квантами, спин которых равен нулю, а пространственная четность $+1$. Псевдоскалярный ток может взаимодействовать с псевдоскалярными квантами; аксиальный ток взаимодействует с векторной частицей, пространственная четность которой равна $+1$. И, наконец, тензорный ток взаимодействует с квантом, спин которого равен 2.

Экспериментальные данные относительно β -распада ядер, появившиеся после 1934 г., не согласовывались с векторным вариантом слабого взаимодействия; больше того, эти данные невозможно было объяснить, даже рассматривая комбинацию пяти возможных вариантов, согласующихся с требованием P и C -инвариантности.

«И даже после получения данных,— пишет Ву о реакции Ферми,— свидетельствовавших против чисто векторного взаимодействия, говорят, он сказал: «Я все же думаю, что взаимодействие является векторным». Ферми никогда не нравилась идея, что взаимодействие мо-

²⁵ Ферми Э. Научные труды. Т. I.— М.: Наука, 1971, с. 522—524.

жет быть произвольной комбинацией пяти линейных вариантов»²⁶.

Ситуация существенно осложнилась после открытия несохранения пространственной четности в слабом взаимодействии: «Когда в конце 1956 г. было открыто,— комментируют эту ситуацию Ву и Ли,— что в β -распаде не только имеет место неинвариантность относительно пространственной инверсии P и зарядового сопряжения C , но и почти максимальное возможное нарушение этих принципов симметрии, наша вера в законы сохранения вообще была сильно подорвана. Стало очевидным, что для получения наиболее общей формулировки теории β -взаимодействия не следует ограничивать себя законом сохранения лептонов, или двухкомпонентной теорией нейтрино, или предположением об инвариантности относительно обращения времени. Поскольку симметрия относительно P и C оказалась нарушенной, то же самое может иметь место и для других законов сохранения»²⁷.

В эти годы экспериментальные данные относительно β -распада ядер были довольно противоречивы. Так, данные относительно β -распада ядер ^6He отдавали предпочтение S и T -вариантам слабого взаимодействия, тогда как данные относительно других распадов согласовывались с V и A -вариантами. Решающее значение для определения вида слабого взаимодействия имели эксперименты по измерению спиральности нейтрино и по распаду поляризованных нейтронов. Спиральность нейтрино характеризует взаимную ориентацию спина и импульса: если спин и импульс антипараллельны, то говорят о левой спиральности (спиральность равна $+1$), если спин и импульс параллельны, говорят о правой спиральности (спиральность равна -1).

²⁶ Ву Ц. С., Мошковский С. А. Бета-распад.— М.: Атомиздат, 1968, с. 24.

²⁷ Ли Т., Ву Ц. Слабые взаимодействия — М.: Мир, 1968, с. 76—77.

Спиральность нейтрино оказалась равной -1 , т. е. нейтрино является левой частицей.

Так как на опыте нейтрино наблюдать непосредственно очень трудно, то спиральность нейтрино может быть измерена косвенно. При этом руководствуются законом сохранения проекции углового момента, который строго выполняется для разных взаимодействий элементарных частиц. Поэтому невидимое нейтрино должно «оставить свой след» на корреляции спинов тех частиц, которые наблюдаются на опыте.

В 1957 г. Гольдгабер, Гродзинс и Саньяр поставили следующий опыт по измерению спиральности нейтрино. Нейтрино образовывались при захвате атомных электронов ядрами ^{152}Eu , спин которых равен нулю: $e^- + ^{152}\text{Eu} \rightarrow \nu + ^{152}\text{Sm}^*$.

Нейтрино и ядро $^{152}\text{Sm}^*$ (в возбужденном состоянии), спин которого равен единице, разлетаются в противоположных направлениях. Возбужденное состояние $^{152}\text{Sm}^*$ является нестабильным, оно быстро испускает фотон и переходит в основное состояние ядра ^{152}Sm с нулевым спином: $^{152}\text{Sm}^* \rightarrow ^{152}\text{Sm} + \gamma$. На опыте регистрировалась циркулярная поляризация (или, что то же самое, проекция спина) фотонов, которые вылетали в направлении, противоположном направлению нейтрино. Из сохранения проекции спина в распаде ядер $^{152}\text{Sm}^*$ вытекает, что проекция спина фотона должна совпадать с проекцией спина ядра $^{152}\text{Sm}^*$, которая может принимать два значения, равные ± 1 . Тогда из закона сохранения проекции спина в реакции $e^- + \text{Eu} \rightarrow \nu + \text{Sm}$ следует, что спины ν и Sm должны иметь противоположные направления, например

$$e^- + \text{Eu} \rightarrow \nu + \text{Sm}$$

$$+\frac{1}{2} + 0 = -\frac{1}{2} + 1,$$

где под индексами частиц выписаны проекции их спина.

Учитывая далее, что импульсы ν и $^{152}\text{Sm}^*$ противоположны, легко видеть, что спиральности ν и Sm^* должны быть одинаковы, а следовательно, должны быть одинаковы и спиральности ν и γ . Таким образом, измерение спиральности нейтрино сводится к измерению поляризации фотона. Именно таким способом было установлено, что спиральность нейтрино равна -1 .

V-A-вариант слабого взаимодействия был предложен в 1958 г. независимо тремя группами авторов: Маршаком и Судершаном, Фейнманом и Гелл-Маном, а также Сакураи. Все эти авторы при выборе этого варианта теории слабого взаимодействия руководствовались соображениями симметрии и внутренней «красоты» теории.

«Забавно,— писали в своей статье Фейнман и Гелл-Ман,— что это взаимодействие согласуется почти со всеми принципами, которые были предложены, чтобы на основании теоретических соображений ограничить возможные варианты β -взаимодействия. Оно универсально, симметрично, приводит к двухкомпонентному нейтрино, сохраняет лептоны, обеспечивает CP и T -инвариантности и является наипростейшим возможным»²⁸.

«Эти теоретические аргументы,— резюмировали Фейнман и Гелл-Ман,— кажутся авторам достаточно строгими, так что противоречие с экспериментом относительно ^6He и с некоторыми другими, менее точными экспериментами, свидетельствует, что эти эксперименты неправильны»²⁹.

Подобная теоретическая уверенность и смелость были вознаграждены: повторный эксперимент с β -распадом ядер ^6He выявил ошибочность предыдущих экспе-

²⁸ *Feynmann R. P., Gell-Mann M. Theory of Fermi Interactions Phys. Rev. 109, 193, 1958.*

²⁹ *Feynmann R. P., Gell-Mann M. Theory of Fermi Interactions Phys. Rev. 109, 193, 1958.*

риментов и подтвердил справедливость $V-A$ -варианта теории.

Правда, было еще одно противоречие с экспериментом по поиску распада пиона на электрон и нейтрино, $\pi \rightarrow e + \nu$, в котором Фейнман и Гелл-Ман не рискнули усомниться. Дело в том, что $V-A$ -вариант теории слабого взаимодействия предсказывал, что на каждые десять тысяч распадов $\pi \rightarrow \mu + \nu$ должен приходиться один распад $\pi \rightarrow e + \nu$. Однако на опыте распадов $\pi \rightarrow e + \nu$ не видели: эксперимент утверждал, что распады $\pi \rightarrow e + \nu$ происходят реже, чем один на сто тысяч распадов $\pi \rightarrow \mu + \nu$. Такой результат находился в резком противоречии с $V-A$ -теорией слабого взаимодействия. Фейнман и Гелл-Манн надеялись найти какое-то теоретическое объяснение этому расхождению.

Ситуация оказалась проще. Опыт повторили, и распад $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu$ был найден в нужном количестве. «Тем не менее летом 1958 г. распад $\pi \rightarrow e + \nu$ был наконец найден,— писала Ву,— его вероятность явно порядка $1/10\,000$. Это устранило последнее препятствие, стоявшее на пути признания $V-A$ -теории. Конечно, этот распад мог быть открыт совершенно независимо от любых следствий несохранения четности. Однако открытие несохранения четности так стимулировало интерес ко всей области слабых взаимодействий, что оно, возможно, оказало влияние на решение странной загадки пионного распада»³⁰.

Этот пример показывает, что неправильный эксперимент может существенно затруднить становление правильной теории, сколь бы логичной и красивой она не выглядела. «Если бы распад $\pi \rightarrow e + \nu$,— пишет Ву,— открыли, когда были предприняты первые попытки его обнаружить, и он наблюдался бы в правильной пропор-

³⁰ Ву Ц. С., Мошковский С. А. Бета-распад. М.: Атомиздат, 1970, с. 38.

ции по отношению к распаду $\pi \rightarrow \mu + \nu$, допустимость ST -комбинации в ядерном β -распаде была бы в самом начале поставлена под вопрос. Действительно, в 1949 г. Рудерман и Финкельштейн указали, что если распад $\pi \rightarrow e$ не наблюдается из-за того, что эта ветвь в 10^4 раз менее вероятна по сравнению с другой ветвью распада, то из гипотезы фермиевского взаимодействия следует, что β -взаимодействие, по крайней мере частично, аксиально-векторное»³¹.

$V-A$ -вариант теории слабого взаимодействия позволил уточнить и углубить представление об универсальном фермиевском взаимодействии. Это представление, возникшее еще в 40-х годах, основывалось на приблизительном совпадении констант, которые отвечали различным слабым процессам. Так, β -распад нейтрона, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$, распад мюона, $\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$, и процесс захвата мюона протоном, $\mu + p \rightarrow n + \nu$, — все эти три разных процесса характеризуются одной константой.

«Замечательным является то обстоятельство, — говорил в 1950 г. в своих лекциях Ферми, — что численные значения этих констант, вероятно, имеют весьма близкие значения, приблизительно 10^{-49} эрг·см³. Этот факт был отмечен независимо многими исследователями и, вероятно, не является простым совпадением, хотя значение его сейчас не вполне ясно. Возможно, факт равенства постоянных может быть связан с аналогичным в некоторой степени фактом, что электрические заряды всех элементарных частиц равны между собой. Общая для всех частиц величина элементарного электрического заряда e играет роль постоянной взаимодействия различных типов элементарных частиц с электромагнитным полем»³².

³¹ Ву Ц. С., Мошковский С. А. Бета-распад. М.: Атомиздат, 1970. с. 255—256.

³² Ферми Э. Элементарные частицы. — М.: ИЛ, 1952.

В работах Гелл-Мана и Фейнмана, Маршака и Су-дершана понятие универсальности включало в себя не только равенство констант различных слабых процессов, но и совпадение структуры слабого взаимодействия, а именно: $V-A$ -вариант считался справедливым для всех слабых токов.

Установление $V-A$ -варианта слабого взаимодействия, а также различные доказательства его универсальности позволили сформулировать гипотезу о промежуточном векторном бозоне W . В модели с промежуточным W -бозоном предполагается, что наблюдаемые на опыте слабые процессы обусловлены не непосредственным взаимодействием двух слабых заряженных токов в одной точке пространства—времени (локальное взаимодействие), как это предполагается в модели Ферми. Как и в квантовой электродинамике, считается, что один слабый ток испускает W -бозон, а затем другой слабый ток его поглощает. Так как слабые токи являются заряженными, то и W -бозон, который можно считать квантом слабого взаимодействия, должен быть заряженным. Чтобы обеспечить $V-A$ -вариант слабого взаимодействия, W -бозон должен быть векторной частицей.

W -бозоны на опыте пока не обнаружены, и если они существуют, то масса их должна превышать 10 ГэВ. Согласно современным теоретическим представлениям масса W -бозона должна быть очень велика, не меньше 37,2 ГэВ.

«Хотя промежуточный бозон до сих пор не обнаружен,— резюмируют Ли и Ву — его возможное существование, по-видимому, указывает наиболее обещающий путь создания единой теории слабых взаимодействий»³³.

³³ Ли Т., Ву Ц. Слабые взаимодействия.— М.: Мир, 1968, с. 59.

Два типа нейтрино

Нейтрино является электрически нейтральной частицей с равным нулю магнитным моментом (опыт показывает, что если магнитный момент нейтрино отличен от нуля, то он должен быть ничтожно малым). Поэтому возникает вопрос: существует ли для нейтрино (ν) соответствующая ей античастица антинейтрино ($\bar{\nu}$)? И далее, чем могут отличаться нейтрино и антинейтрино, если электрический заряд и магнитный момент их равны нулю?

Опыт показал, что нейтрино и антинейтрино — это разные частицы, отличающиеся взаимной ориентацией спина и импульса: спин нейтрино противоположен направлению импульса, спин же антинейтрино направлен вдоль его импульса. Другими словами, нейтрино и антинейтрино отличаются спиральностью: спиральность нейтрино равна -1 , а спиральность антинейтрино равна $+1$, т. е. нейтрино является левовинтовой, а антинейтрино — правовинтовой частицами.

Мы говорили уже, что для безмассового нейтрино спиральность имеет абсолютный смысл во всех системах отсчета, т. е. никаким преобразованием Лоренца нельзя изменить направление спина нейтрино относительно направления его импульса, поэтому различие между нейтрино и антинейтрино, основанное на различии их спиральностей, также абсолютно.

При β -распаде нейтрона наряду с электроном и протоном образуется антинейтрино, а не нейтрино, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. Это установлено на опыте путем измерения спиральностей протона и электрона (спиральность нейтрино определяется затем, используя закон сохранения углового момента).

Аналогично было установлено, что в распаде положительного пиона на положительный мюон, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$, образуется нейтрино, т. е. частица с отрицательной спи-

ральностью, а не антинейтрино, т. е. частица с положительной спиральностью. Это означает, что распады $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ оказываются запрещенными.

Чтобы «объяснить», почему имеют место одни процессы с участием нейтрино, а другие процессы запрещены, вводится новое аддитивное квантовое число, называемое лептонным числом или лептонным зарядом, и предполагается, что лептонный заряд сохраняется во всех процессах.

Закон сохранения лептонного числа был сформулирован в 1952 г. Зельдовичем (и независимо в 1953 г. Конопинским и Махмутом).

Электрон, отрицательный мюон и нейтрино имеют лептонный заряд, равный +1, а позитрон, положительный мюон и антинейтрино — лептонный заряд, равный -1; лептонный заряд всех других элементарных частиц считается равным нулю. Поэтому частицы e^- , μ^- , ν относят к лептонам, а частицы e^+ , μ^+ , $\bar{\nu}$ — к антилептонам. Лептонный заряд системы элементарных частиц определяется алгебраической суммой лептонных зарядов каждой из частиц. Закон сохранения лептонного заряда был подтвержден в целом ряде экспериментов.

В 1955 г. Дэвис, используя пучок антинейтрино, образующихся при β -распаде нейтронов, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$, пытался зарегистрировать процесс поглощения антинейтрино ядрами хлора, $\bar{\nu} + \text{Cl}^{37} \rightarrow e^- + \text{Ar}^{37}$. Эта реакция может быть только в том случае, если имеет место нарушение закона сохранения лептонного числа. Ожидалось, что сечение процесса должно быть порядка $9,2 \cdot 10^{-45} \text{ см}^2$ (если лептонный заряд не сохраняется). На опыте не было обнаружено ни одного случая реакции $\bar{\nu} + \text{Cl}^{37} \rightarrow e^- + \text{Ar}^{37}$, что позволило получить верхнюю границу сечения $\sigma_{\text{экс}} \leq 0,25 \cdot 10^{-45} \text{ см}^2$, которая существенно меньше теоретического значения.

Заметим в этой связи, что реакция $\bar{\nu} + \text{Cl}^{37} \rightarrow e^- + \text{Ar}^{37}$

позже была использована в экспериментах по регистрации нейтрино, испускаемых Солнцем. Дело в том, что превращение ядер водорода в ядра гелия, которое является источником солнечной энергии, должно обязательно сопровождаться излучением нейтрино. Действительно, если лептонный заряд сохраняется, то имеет место процесс $4p \rightarrow \text{He}^4 + 2e^+ + 2\nu$. Солнечные нейтрино, достигающие Земли, должны вызывать реакцию $\nu + \text{Cl}^{37} \rightarrow e^- + \text{Ar}^{37}$, разрешенную законами сохранения лептонного заряда. С другой стороны, антинейтрино может взаимодействовать с протонами с сохранением лептонного заряда, $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$. Именно эту реакцию наблюдали в 1956 г. Рейнес и Коуэн с сечением $1,1 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2$ и именно в этой реакции впервые в лабораторных условиях было зарегистрировано взаимодействие нейтрино с нуклонами.

Еще один эксперимент по проверке закона сохранения лептонного заряда заключался в поиске так называемого двойного β -распада, т. е. процесса ядерного превращения ${}_Z A \rightarrow {}_{Z+2} A + 2e^- + 2\bar{\nu}$, где ${}_Z A$ и ${}_{Z+2} A$ — ядра с атомным номером A и зарядами Z и $Z + 2$.

Если бы нейтрино совпадало со своей античастицей, то мог бы происходить также безнейтринный процесс ${}_Z A \rightarrow {}_{Z+2} A + 2e^-$, который возникал бы в результате цепочки превращений:

$${}_Z A \rightarrow {}_{Z+1} A + e^- + \bar{\nu} (\equiv \nu),$$

$$\bar{\nu} + {}_{Z+1} A \rightarrow {}_{Z+2} A + e^-.$$

В нейтринном распаде ${}_Z A \rightarrow {}_{Z+2} A + 2e^- + 2\nu$ энергия электронов изменяется от нуля до некоторого максимального значения (в зависимости от энергии, уносимой парой нейтрино), в безнейтринном распаде ${}_Z A \rightarrow {}_{Z+2} A + 2e^-$ суммарная энергия электронов принимает фиксированное значение, равное разности масс ядер ${}_Z A$ и ${}_{Z+2} A$.

Теоретические вычисления показывают, что скорость безнейтринных распадов должна существенно превышать

скорость нейтринных распадов. Так, для превращения $\text{Te}^{130} \rightarrow \text{Xe}^{130}$ период безнейтринного полураспада составляет $2 \cdot 10^{16 \pm 2}$ лет, тогда как период нейтринного полураспада равен $4 \cdot 10^{22 \pm 2,5}$. На опыте было получено значение, равное 10^{21} лет. Это значение свидетельствует о том, что наблюдается нейтринный двойной β -распад, а не безнейтринный двойной β -распад.

Дальнейшие исследования, однако, показали, что закон сохранения лептонного заряда нуждается в уточнении. В самом деле, закон сохранения лептонного числа, как он был сформулирован выше, допускает следующие процессы:

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \gamma, \\ \mu^- &\rightarrow e^- + e^- + e^+, \\ \mu^- + A &\rightarrow e^- + A.\end{aligned}$$

Ни один из этих процессов не был обнаружен на опыте, причем для распадов $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ и $\mu^- \rightarrow e^- + e^- + e^+$ были получены очень малые значения возможных вероятностей: вероятность распада $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ не превышает стомиллионную долю распадов $\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$.

Чтобы запретить эти и подобные им другие процессы, возникла необходимость ввести два сохраняющихся лептонных заряда: электронный (L_e) и мюонный (L_μ) и соответственно два типа нейтрино: электронное нейтрино (ν_e) и мюонное нейтрино ν_μ (и соответствующие им антинейтрино, $\bar{\nu}_e$ и $\bar{\nu}_\mu$).

«Любой частице, — пишут Ли и Бу, — лептону или нелептону — мы можем приписать два таких числа L_e и L_μ : что

$$L_e = \begin{cases} +1 & \text{для } e^- \text{ и } \nu_e, \\ -1 & \text{для } e^+ \text{ и } \bar{\nu}_e, \\ 0 & \text{для всех других частиц;} \end{cases}$$

$$L_{\mu} = \begin{cases} +1 & \text{для } \mu^{-} \text{ и } \nu_{\mu}, \\ -1 & \text{для } \mu^{+} \text{ и } \bar{\nu}_{\mu} \\ 0 & \text{для всех других частиц.} \end{cases}$$

Законы сохранения L_e и L_{μ} утверждают, что во всех процессах алгебраические суммы L_e и L_{μ} сохраняются по-разному³⁴.

Тогда распады элементарных частиц должны выглядеть следующим образом:

$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu},$$

$$\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} + \bar{\nu}_{\mu},$$

$$\pi^{+} \rightarrow e^{+} + \nu_e,$$

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

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e \text{ и т. д.}$$

Еще в 1956 г. Рейнес и Коуэн высказывали предположение, что нейтрино могут отличаться по своим свойствам (в зависимости от того, в каких процессах образуется то или иное нейтрино). «Со времени предложения гипотезы нейтрино Паули,— писали Рейнес и Коуэн,— и успеха этой гипотезы в применении к теории β -распада Ферми участие подобных частиц было предположено в наблюдавшемся распаде некоторого числа мезонов. Возникает вопрос о тождественности этих нейтриноподобных частиц с нейтрино распада нуклонов. Следует отметить, что в ядерном β -распаде начальное и конечное ядра — оба, очевидно, взаимодействуют сильно с ядрами. Это не имеет места в $(\pi \rightarrow \mu)$ -распаде, где испускание «нейтрино» превращает взаимодействие тяжелых частиц от сильного к слабому. Далее, несмотря на ка-

³⁴ Ли Т., Ву Ц. Слабые взаимодействия.— М.: Мир, 1968, с. 18—19.

жущееся равенство матричных элементов ядерного β -распада и матричных элементов, связанных с (μ, β) -распадом, как начальные, так и конечные продукты последнего взаимодействуют с ядрами слабо»³⁵.

В 1962 г. на опыте было доказано существование двух типов нейтрино — электронного (ν_e) и мюонного (ν_μ). При этом впервые использовались пучки нейтрино высоких энергий, приготовленные «искусственным» образом на протонных ускорителях. Опыт был проведен Ледерманом, Шварцем с сотрудниками на ускорителе (30 ГэВ) протонов в Брукхейвене (США). Идея опыта вкратце сводилась к следующему. Протоны больших энергий, сталкиваясь с ядерной мишенью (из бериллия), порождают большое количество заряженных пионов. Пионы, как известно, распадаются главным образом на мюоны, $\pi \rightarrow \mu$. Следовательно, в схеме с двумя нейтрино в этих распадах должны образовываться мюонные нейтрино и не должны образовываться электронные нейтрино. (Электронные нейтрино образуются в распадах $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$, но, как уже говорилось, это очень редкие распады). После этого образующиеся нейтрино ν_μ направлялись на ядерную мишень. Если эти нейтрино отличаются от электронных нейтрино ($\nu_\mu \neq \nu_e$), то при взаимодействии ν_μ с нуклонами должны рождаться мюоны, и не должны рождаться электроны.

В первом опыте нейтринный пучок состоял из нейтрино ν_μ и антинейтрино $\bar{\nu}_\mu$, причем образующиеся мюоны не различались на опыте по знаку их электрического заряда. В этом опыте было зарегистрировано 29 мюонов, образованных нейтрино, и не было зарегистрировано ни одного электрона. Этот результат с тех пор рассматривается как доказательство того, что мюонное нейтрино отличается от электронного нейтрино, т. е. как доказательство существования двух типов нейтрино.

³⁵ Рейнес Ф., Коуэн Кл. Л. м. Нейтрино. УФН, 1957, 62, с. 391.

В нейтринных опытах, выполненных год спустя (1963 г.) в ЦЕРНе, этот результат был подтвержден и, кроме того, доказано, что мюонное нейтрино отличается от мюонного антинейтрино, $\bar{\nu}_\mu \neq \nu_\mu$. В Церновском опыте использовался пучок нейтрино, которые образуются при распаде положительных пионов, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. Эти нейтрино при взаимодействии с нуклонами должны порождать только отрицательные мюоны, $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$, и не должны образовывать положительных мюонов, $\nu_\mu + p \not\rightarrow \mu^+ + n$.

Таким образом, у каждого заряженного лептона существует свое нейтрино, как бы «тень» лептона. У электрона это электронное нейтрино, а у мюона — мюонное нейтрино.

«До последнего времени, — пишет Ледерман, — физики задавали вопрос: зачем природе понадобилось две частицы — мюон и электрон, которые сходны между собой во всем, кроме массы? Теперь надо добавить: зачем природе нужны мюонное нейтрино и электронное нейтрино, которые, как может оказаться, не отличаются даже массой? Теперь известно, что масса электронного нейтрино меньше одной тысячной массы электрона и вообще считается равной нулю. Меньше известно о массе мюонного нейтрино. Лучшие измерения показывают, что эта масса меньше семикратной массы электрона. Если бы она оказалась не равной нулю, то ей лучше всего подошло бы первоначальное название — «нейтретто»³⁶.

Заметим, что, согласно последним данным, масса ν_μ не превышает 0,95 МэВ. Наилучшая оценка для масс ν_e и ν_μ получена из астрофизических соображений: $m(\nu_e) = m(\nu_\mu) \leq 3$ эВ.

³⁶ Ледерман Л. Двухнейтринный эксперимент. — Кн.: Над чем думают физики. Элементарные частицы. — М.: Наука, 1965, с. 67.

«Загадка двух частиц,— продолжает Ледерман,— может найти решение на двух различных путях. Может оказаться, что за «мюонностью» скрывается сложная внутренняя структура, к которой эксперимент сегодняшнего дня нечувствителен. Другая возможность, указанная Ли, заключается в том, что «мюонность — электронность» аналогичны ситуации электрического—магнитного полей. В XIX ст. считалось, что эти поля подобны между собой, но не тождественны. Специальная теория относительности Альберта Эйнштейна, предложенная в 1905 г., вскрыла внутреннюю связь между этими двумя полями и объяснила, как электрическое и магнитное поля могут преобразовываться друг в друга. Теория, которая объяснит, как «мюонность» преобразуется в «электронность», сможет привести к новому глубокому прояснению физических представлений»³⁷.

В заключение этого раздела заметим, что закон сохранения лептонных чисел проверен с точностью, которая существенно уступает точности проверки закона сохранения барионного и электрического зарядов.

«Известные в настоящее время экспериментальные данные,— пишет по этому поводу Ву,— фактически не дают реальных доказательств, что законы сохранения лептонных и мюонных чисел выполняются, но ничто их не опровергает. Если эти законы в общем выполняются (что представляется весьма вероятным), то это может привести к далеко идущим выводам. Отсутствие некоторых обратных β -процессов и безнейтринного двойного β -распада также можно рассматривать как существенное подтверждение сохранения лептонов»³⁸.

³⁷ Ледерман Л. Двухнейтринный эксперимент.— Кв.: Над чем думают физики. Элементарные частицы.— М.: Наука, 1965, с. 67.

³⁸ Ву Ц. С., Мошковский С. А. Бета-распад.— М.: Атомиздат, 1970, с. 162.

Адронные резонансы

Начало шестидесятых годов характеризуется открытием большого числа адронных резонансов, т. е. частиц, которые очень быстро, в течение времени порядка 10^{-23} с, распадаются на адроны. Мы уже говорили, что первый резонанс, названный Δ -резонансом, был открыт в 1952 г. 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. на пузырьковой камере Лоуренсовской радиационной лаборатории Калифорнийского университета. 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 импульса 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 некотором числе случаев реакции $K^- + p \rightarrow \Lambda + \pi^+ + \pi^-$ π -мезоны образуются с определенной энергией E_0 . Важно подчеркнуть, что число пионов с энергией E_0 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 Λ и π , $Y^{*-} \rightarrow \Lambda + \pi^-$. Соответственно образование π^- -мезона определенной энергии можно интерпретировать как образование положительно заряженного резонанса Y^{*+} , $K^- + p \rightarrow Y^{*+} + \pi^-$, 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 сохранении энергии и импульса в процессе $K^- + p \rightarrow Y^{*\pm} + \pi^\pm$, 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. Эта величина характеризует неопределенность в массе Y^* -резонанса. Столь большая неопределенность в массе может быть интерпретирована как следствие малого времени жизни Y^* -резонанса. Дело в том, что согласно квантовомеханическому 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 пион 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 $3/2$, пространственная четность — $+1$. Таким образом, спин и четность для Y^* и Δ -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 в Рочестере (США).

***SU*₃-симметрия**

Присутствовавший на этой конференции Гелл-Ман обратил внимание на то обстоятельство, что существование резонансов Δ (1238), Y^* (1385) и Ξ^* (1535) с одинаковыми значениями спина и пространственной четности подтверждают справедливость гипотезы о так называемой *SU*₃-симметрии взаимодействия адронов.

В 1961 г. теоретики Нееман и Гелл-Ман независимо «предложили некоторую частную систему объединения симметрий и частный способ ее нарушения, который делал правдоподобным предположение о существовании супермультиплетов. Новая система симметрии стала называться «восьмеричным путем» — поскольку она оперирует восемью квантовыми числами, а также в память об известном высказывании, приписываемом Будде: «И вот, о братья, благородная истина, которая ведет к прекращению страдания, вот благородный восьмеричный путь: правильные взгляды, правильные намерения, правильная речь, правильные действия, правильная жизнь, правильные усилия, правильное расположение ума, правильное сосредоточение»³⁹.

Каждый закон сохранения связан с некоторым свойством симметрии. Точнее говоря, наличие симметрии обуславливает законы сохранения. Например, свойства однородности пространства и времени приводят к зако-

³⁹ Чу Дж., Гелл-Ман М., Розенфельд Л. Сильно взаимодействующие частицы.— Кн. : Над чем думают физики. Элементарные частицы.— М. : Наука, 1965, с. 104.

нам сохранения импульса и энергии, а свойства изотропии пространства — к закону сохранения момента.

Существенны, однако, не только свойства симметрии пространства — времени, но также и свойства симметрии взаимодействий. При этом под симметрией взаимодействия понимают совокупность преобразований, оставляющих взаимодействие неизменным. Такими преобразованиями (они образуют некоторую математическую группу) могут быть преобразования координат, времени, замены одних частиц другими, а также и другие более сложные и тонкие преобразования. Так, электромагнитное взаимодействие инвариантно относительно преобразования пространственного отражения, т. е. замены правого направления левым и наоборот. С этой инвариантностью связано сохранение в процессах, обусловленных электромагнитным взаимодействием, особой мультипликативной (а не аддитивной) величины — пространственной четности.

Электромагнитное взаимодействие инвариантно также по отношению к обращению времени (т. е. замене прошедшего будущим и наоборот).

Наконец, оно инвариантно по отношению к замене электрона позитроном, протона — антипротоном и всех других заряженных частиц — их античастицами. (Эту замену называют преобразованием зарядового сопряжения). В простейшем виде эта инвариантность связана с тем, что электромагнитное взаимодействие двух заряженных частиц определяется произведением их зарядов, и поэтому оно не изменяется при замене знаков зарядов частиц (напомним, что позитрон отличается от электрона только знаком своего заряда).

Выше мы говорили, что для сильного взаимодействия нуклонов и пионов справедлив закон сохранения изотопического спина и проекции изотопического спина. Симметрия сильного взаимодействия, приводящая к этим законам сохранения, получила название изотопи-

ческой, а соответствующая инвариантность сильного взаимодействия получила название изотопической инвариантности. Электромагнитное и слабое взаимодействия нарушают изотопическую инвариантность, нарушают ее вполне определенным образом, так что изотопический спин не сохраняется в этих взаимодействиях, но электромагнитное взаимодействие сохраняет проекцию изотопического спина. Таким образом, изотопический спин и его проекция являются примерами частично сохраняющихся квантовых чисел (они сохраняются не во всех взаимодействиях), а изотопическая инвариантность является приближенной симметрией. Эти квантовые числа отличаются от абсолютно сохраняющихся квантовых чисел, таких как, например, электрический заряд, угловой момент, которые сохраняются во всех взаимодействиях.

Аддитивное квантовое число странность, о котором мы уже говорили, является частично сохраняющимся квантовым числом: странность сохраняется в сильном и электромагнитном взаимодействиях, но не сохраняется в слабом взаимодействии.

Сохранение странности и одновременно изотопического спина приводит к симметрии сильного взаимодействия относительно группы так называемых унитарных преобразований — группы SU_3 -симметрии.

Эта симметрия является, однако, приближенной и точно выполняется только на некотором определенном уровне сильного взаимодействия, который получил название сверхсильного взаимодействия.

SU_3 -симметрия позволила классифицировать адроны, объединяя их в некоторые группы частиц, называемые супермультиплетами. Частицы данного супермультиплета имеют одинаковый спин и пространственную четность, а также одинаковые массы (на уровне сверхсильного взаимодействия), но отличаются значениями странности и изотопического спина.

Однако существует еще умеренно сильное взаимодействие, которое нарушает SU_3 -симметрию, но тем не менее сохраняет странность и изотопический спин. Оно и приводит к расщеплению масс адронов, принадлежащих к супермультиплету SU_3 -симметрии. Хотя это нарушение достаточно велико (эффекты различия масс здесь достигают 20%), знание трансформационных свойств умеренно сильного взаимодействия относительно преобразований группы SU_3 -симметрии позволяет получить соотношения между массами адронов — массовые формулы, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

«Унитарная симметрия имеет на своем счету небольшой,— писал Салам,— но впечатляющий ряд успехов, преимущественно в предсказании массовых соотношений. Эти успехи более значительны, чем мы смели когда-либо надеяться»⁴⁰.

Математической основой SU_3 -симметрии является теория непрерывных групп Ли, развитая в XIX веке норвежским математиком Софусом Ли. Группа, которая соответствует «восьмеричному пути», является группой SU_3 , т. е. группой специальных преобразований в трехмерном комплексном пространстве.

В SU_3 -симметрии было получено большое число различных предсказаний. В частности, Гелл-Манн предсказал, что Δ -резонанс, открытый Ферми, Y^* (1385) и Z^* (1535)-резонансы, открытые группой Альвареса, должны принадлежать к супермультиплету SU_3 -симметрии, который объединяет 10 адронов с одинаковым спином и пространственной четностью, но различающихся величинами странности и электрического заряда. Этот мультиплет называется декуплетом SU_3 -симметрии (рис. 2).

⁴⁰ Нишидзима К. Фундаментальные частицы.— М.: Мир, 1965, с. 438.

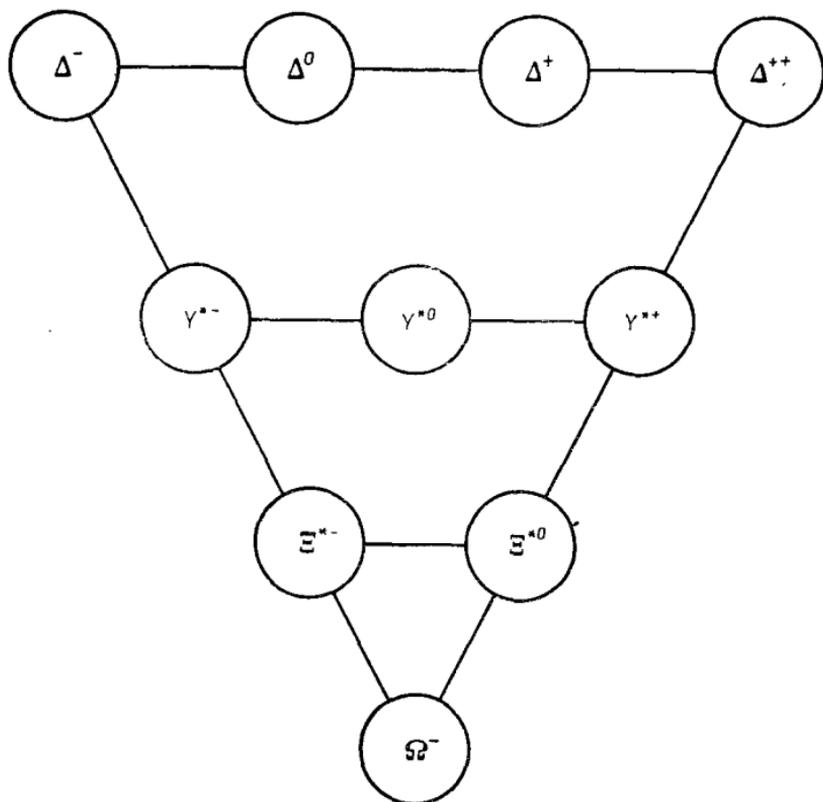


Рис. 2. Декуплет барионов.

Так как для Δ -резонанса существуют 4 зарядовых состояния, Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 и Δ^- , для Y^* (1385)-резонанса — три зарядовых состояния, Y^{*+} (1385), Y^{*0} (1385) и Y^{*-} (1385) (со странностью, равной -1), для Ξ^* (1530)-резонанса — два зарядовых состояния, Ξ^{*0} и Ξ^{*-} , т. е. 9 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 отри-

цательным единичным зарядом). По известным массам резонансов Δ , Y^* и Ξ^* была предсказана масса Ω -гиперона — она оказалась равной 1676 МэВ.

Барийон с такой массой, обладающий странностью -3 , не может распадаться с сохранением странности, так как простейшие распады с сохранением странности $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + K^-$, $\Omega^- \rightarrow \Xi^- + K^0$ 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 порядка 10^{-10} с, а 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 Брукхейвском протонном ускорителе. В опыте использовался пучок отрицательных K -мезонов с энергией 5 ГэВ, направляемых в водородную пузырьковую камеру. Простейшей реакцией образования Ω^- -гиперона является реакция с образованием двух K -мезонов с положительной странностью $K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0$. Именно в такой реакции и был рожден первый Ω^- -гиперон.

На рис. 3 показано рождение Ω^- -гиперона и последующий его распад. В камере видимые следы (треки оставляют только заряженные частицы). Они изображены сплошными линиями. Нейтральные частицы не оставляют следов в водородной камере (им соответствуют пунктирные линии на рисунке).

Идентификация Ω^- -гиперона была осуществлена следующим образом. В вершине 1, очевидно, нейтральная частица распалась на протон и отрицательный пион. Измеряя импульсы и энергии этих частиц, была определена не только масса нейтральной частицы, но и направление ее движения от точки рождения до точки распада. Так как масса нейтральной частицы оказалась

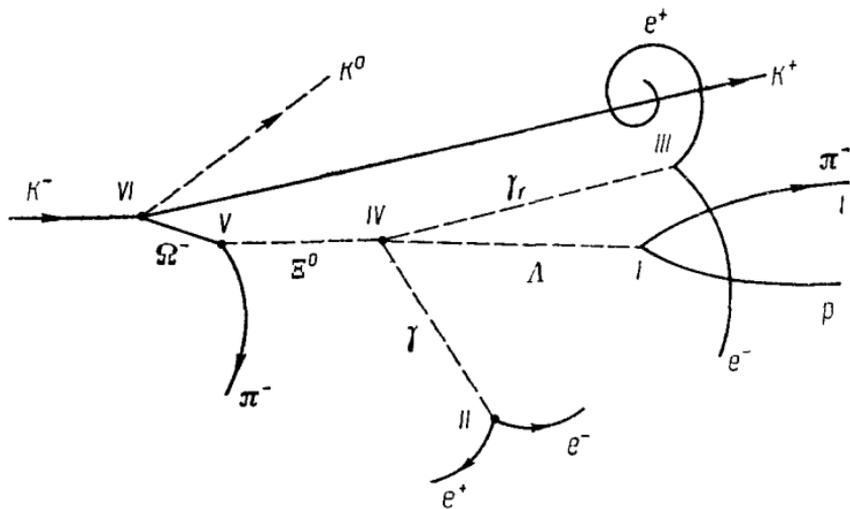


Рис. 3. Схема рождения и распада Ω^- -гиперона.

равной 1115 МэВ, то нейтральная частица была отождествлена с Λ -гипероном. Чтобы определить точку рождения Λ -гиперона, необходимо на пунктирной линии, вдоль которой движется Λ -гиперон, найти ее пересечения с направлениями движения других частиц. На полученной фотографии след Λ -гиперона не пересекал треков заряженных частиц. Дальнейший анализ показал, что к образованию Λ -гиперона имеют отношение два события, отвечающие вершинам II и III. В этих вершинах рождаются электрон-позитронные пары высокоэнергетическими фотонами, которые, будучи нейтральными, не оставляют следов в пузырьковой камере. Снова используя закон сохранения импульса в вершинах II и III, можно восстановить направления движения фотонов. Оказалось, что эти линии пересекаются в одной точке, причем точка лежит на направлении движения Λ -гиперона. Следовательно, в вершине IV некоторая нейтральная частица распалась на Λ -гиперон и

два фотона, масса этой частицы оказалась равной 1316 Мэв, т. е. равной массе Ξ^0 -гиперона. Поэтому в вершине IV имел место распад $\Xi^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0$, причем π^0 -мезон очень быстро, почти в том же месте, где он образовался, распался на два фотона.

Импульс, а следовательно, и направление Ξ^0 -гиперона можно восстановить по частицам, которые образуются при его распаде. Двигаясь по этому направлению назад, мы приходим в вершину V, из которой выходит трек отрицательного пиона. Следовательно, в этой вершине происходит распад отрицательно заряженной частицы на Ξ^0 -гиперон и π^- -мезон. Масса этой частицы оказалась заключенной в интервале между 1668 и 1686 МэВ (принимая во внимание неточность измерений), что точно совпадает с предсказанной массой Ω^- -гиперона.

Если эта интерпретация правильна, то на фотографии должен быть виден трек Ω^- -гиперона. Действительно, этот трек виден — он соединяет вершины VI, в которой рождается Ω^- -гиперон, и V, в которой Ω^- -гиперон распадается. В вершине VI K^- -мезон порождает Ω^- -гиперон и положительный K^+ -мезон. Из закона сохранения энергии и импульса в этой вершине следовало, что здесь образовалась еще одна нейтральная частица: так как масса частицы оказалась равной 498 МэВ, то естественно было отождествлять ее с нейтральным K^0 -мезоном (который не оставил следа в водородной камере).

Итак, последовательность событий, зафиксированных на этой фотографии, выглядит следующим образом: отрицательный K^- -мезон большой энергии, столкнувшись в точке VI с протоном, порождает Ω^- -гиперон совместно с K^0 и K^+ -мезонами, $K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0$. Ω^- -гиперон в точке V распадается, $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$, после чего Ξ^0 -гиперон в точке IV распадается на Λ -гиперон и π^0 -мезон; образованный при распаде π^0 -мезон в этой же точке распадается на два фотона, которые порождают

в точках II и III электрон-позитронные поры; и, наконец, Λ -гиперон в точке I распадается на протон и отрицательный пион.

По длине трека Ω^- -гиперона можно восстановить время жизни Ω^- -гиперона — оно оказалось равным 10^{-10} с.

Открытие Ω^- -гиперона, нетривиальные и необычные свойства которого были предсказаны теорией, явилось триумфом SU_3 -симметрии.

Теория SU_3 -симметрии позволила объяснить не только систематику адронов и соотношения между их массами, но и получить много интересных следствий для процессов взаимодействия адронов.

Тем не менее SU_3 -симметрия, несмотря на все ее успехи, не может рассматриваться как окончательная и всеобъемлющая теория взаимодействия адронов. «Что же не хватает этому методу? — спрашивает Дайсон и отвечает. — Теория групп вызывает неудовлетворение, оставляя без объяснения многое, что желательно было бы объяснить. Она прекрасно выделяет те аспекты природы, которые можно понять на языке одной только абстрактной симметрии. Но с ее помощью трудно надеяться получить объяснение таинственных проявлений живой материи, числовых значений времен жизни частиц, различной интенсивности их взаимодействия. Следовательно, значительная часть количественного экспериментального материала еще ждет своего объяснения. Метод теории групп означает столь сильную абстракцию, что многие существенные и конкретные особенности реального мира выпадают из рассмотрения. И вообще теория групп достигает цели только потому, что эта цель заранее ограничена: она не претендует на объяснение всего, и вряд ли из этой теории возникнет законченная или всеобъемлющая теория физического мира»⁴¹.

⁴¹ Дайсон Ф. Математика и физика. УФН, 1965, 85, с. 351.

Кварки

Дальнейший прогресс в понимании свойств внутренних симметрий взаимодействия адронов был достигнут после появления гипотезы кварков — гипотетических частиц, из которых составлены адроны.

Чтобы объяснить свойства адронов, необходимо ввести по меньшей мере три кварка: протонный, нейтронный и странный. Кварки должны иметь дробные значения электрических зарядов: протонный кварк — $(+\frac{2}{3})$, нейтронный и странный кварки — $(-\frac{1}{3})$.

Впервые гипотезу о составной природе адронов, т. е. гипотезу о том, что адроны составлены из небольшого числа фундаментальных частиц, высказали Ферми и Янг в 1949 г. В частности, они предположили, что π -мезоны не являются элементарными частицами, а составными, составленными из нуклонов и антинуклонов. Например, π^+ -мезон составлен из протона и антинейтрона. Так как масса нуклона и антинуклона существенно превышает массу π -мезона, то необходимо предположить существование очень сильного притяжения между нуклоном и антинуклоном. Эта гипотеза была выдвинута за 6 лет до экспериментального открытия антипротона и антинейтрона.

В этой модели, «...прежде всего предполагается,— писали Ферми и Янг,— существование как антипротона, так и антинейтрона, которые также взаимоотносятся к протону и нейтрону, как электрон к позитрону. Хотя это предположение выходит за пределы экспериментально установленных фактов, мы не считаем его очень революционным. Мы должны предположить далее, что между нуклоном и антинуклоном существуют заметные силы притяжения, способные связать обе частицы»⁴².

Впоследствии Янг писал: «Мы не питали никаких иллюзий насчет соответствия наших предположений

⁴² Ферми Э. Научные труды. Т. 2.— М.: Наука, 1972, с. 454.

действительности. Я вообще был склонен похоронить работу в черновиках и не публиковать ее. Ферми, однако, сказал, что решают проблемы студенты, а научные работницы ставят вопросы, и что он считает вопрос, поставленный нами, заслуживающим публикации»⁴³.

«Когда статья появилась,— пишет Понтекорво относительно реакции научной общественности на идеи, высказанные Ферми и Янгом,— ряд физиков-теоретиков, даже очень почтенных, были, мягко говоря, удивлены тем, что великий Ферми решился опубликовать такую «неудовлетворительную и бессодержательную статью»⁴⁴.

Между тем, идеи, высказанные в этой статье, послужили основой многочисленных составных моделей элементарных частиц. Наиболее известные из них — это модель Сакаты и модель кварков. В модели Сакаты все адроны составлены из трех барионов: протона, нейтрона, Λ-гиперона и трех соответствующих антибарионов.

В кварковой модели барионы составлены из трех кварков, а мезоны — из кварка и антикварка, причем, как и в модели Ферми—Янга, кварки могут быть очень тяжелыми, а взаимодействие между ними очень сильным — в этом случае из кварков могут быть составлены частицы с меньшими массами.

В настоящее время свободных кварков на опыте не обнаружено, хотя были проведены разнообразные эксперименты по их поиску. «Но, может быть, в действительности кварков нет? — спрашивает по этому поводу Зельдович.— Может быть, есть только (теперь уже бесспорная) симметрия свойств частиц, такая, как если бы кварки существовали? В августе 1964 г. в Дубне Гелл-Ман сказал по этому поводу: «Кто знает?». Боюсь, что нужно было бы другое перо, перо писателя, чтобы передать все, что он вложил в эти два коротких слова. Здесь

⁴³ Ферми Э. Научные труды. Т. 2.— М.: Наука, 1972, с. 452.

⁴⁴ Там же, с. 453.

звучало огромное уважение к эксперименту, который в последнем счете решает и ведет науку вперед; здесь была и присущая Гелл-Ману интеллектуальная смелость, и чувство нового, и готовность принять все, что дает природа, и создать из этого новую теорию, вызывать к жизни новые эксперименты»⁴⁵.

Между тем, кварковая модель успешно объясняет большое число явлений, подтверждая гипотезу составной природы адрона, составленного из кварков. Поэтому возникли попытки создать модели адронов, составленных из невылетающих кварков. Мы расскажем ниже, что в этой связи приобретает важное значение новая характеристика кварков, а именно их «цвет».

Если массы кварков считать одинаковыми, то такая модель эквивалентна SU_6 -симметрии.

Структура адронов

Выше мы говорили, что существование внутренней SU_3 -симметрии проще всего понять, если предположить, что адронная материя состоит из трех сущностей — трех кварков и трех соответствующих антикварков. Но эти частицы и по сей день являются гипотетическими, так как в свободном виде их не удалось обнаружить ни в опытах с самыми мощными ускорителями, ни в опытах с космическими лучами.

Тем не менее можно с уверенностью утверждать, что адроны представляют собой сложные динамические системы, обладающие внутренней структурой, причем это справедливо независимо от того, существуют ли кварки как реальные частицы или не существуют.

Это фундаментальное свойство адронов было открыто Хофстадтером в 1955 г.

⁴⁵ *Зельдович Я. Б.* Классификация элементарных частиц и кварки «в изложении для пешеходов», УФН, 1965, 86, с. 303.

Хофстадтер изучал рассеяние быстрых электронов нуклонами и обнаружил, что это рассеяние отличается от рассеяния электронов на точечных заряженных частицах, т. е. не подчиняется знаменитому закону рассеяния Резерфорда.

В свое время Резерфорд, используя закон Кулона для взаимодействия двух зарядов и законы движения Ньютона, показал, что вероятность рассеяния должна убывать с ростом угла рассеяния или с ростом переданного импульса как четвертая степень переданного импульса. На опыте же Хофстадтер убедился, что вероятность рассеяния быстрых электронов протонами убывала быстрее, чем предсказывала формула Резерфорда.

С аналогичной ситуацией мы сталкиваемся, когда рассматриваем рассеяние быстрых электронов атомами. В этом случае рассеяние также не подчиняется формуле Резерфорда, так как атом имеет сложную электромагнитную структуру — он состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов. По этой причине рассеяние быстрых электронов атомами отличается от рассеяния электронов атомными ядрами. Это различие можно описать, если ввести понятие эффективного заряда, зависящего от переданного импульса, который называется атомным формфактором.

Таким образом, опыты Хофстадтера показывают, что нуклоны не являются точечными частицами, а имеют сложную структуру. Для описания рассеяния быстрых электронов протонами необходимо ввести формфактор, точнее говоря, два формфактора протона — электрический и магнитный.

Хофстадтер показал, что электроны рассеиваются также и нейтронами, хотя электрический заряд их равен нулю; так что нейтрон, как и протон, характеризуется формфакторами — электрическим и магнитным.

Электрические формфакторы протона и нейтрона характеризуют распределение электрического заряда в

этих частицах, а магнитные формфакторы — распределение в них магнитного момента. Электрические и магнитные формфакторы протона и нейтрона оказываются зависящими от квадрата переданного импульса.

Существование формфакторов, а точнее зависимость их от переданного импульса, указывает на то, что нейтрон и протон являются пространственно протяженными объектами, а не точечными частицами. Измерения формфакторов позволило определить размеры нейтрона и протона, которые оказались порядка 10^{-13} см.

Здесь следует отметить, что еще сравнительно недавно считалось, что элементарная частица не может иметь размеров и должна обязательно быть точечной. Такой взгляд был связан с тем, что неточечная частица рассматривалась как твердый недеформируемый шарик. Но представление о таком шарике противоречит теории относительности. Например, в известном учебнике Ландау и Лифшица «Теория поля» говорится: «Очевидно, что если бы элементарная частица обладала конечными размерами, т. е. была бы протяженной, то она не могла бы деформироваться, так как понятие деформации связано с возможностью независимого движения отдельных частей тела. Но, как мы только что видели, теория относительности показывает невозможность существования абсолютно твердых тел. Таким образом, мы приходим к результату, что в классической (неквантовой) релятивистской механике частицам, которые мы рассматриваем как элементарные, нельзя приписывать конечных размеров. Другими словами, в пределах классической теории элементарные частицы должны рассматриваться как точечные»⁴⁶. Но в действительности существование размеров частицы не эквивалентно ее недеформируемости.

⁴⁶ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля.— М.: Физматгиз, 1960, с. 58—59.

За открытие и исследование структуры нуклонов Хофstadтеру в 1961 г. была присуждена Нобелевская премия.

В настоящее время исследование электромагнитной структуры нуклонов проведено вплоть до очень больших переданных импульсов, порядка 5 ГэВ. При этом оказалось, что формфакторы убывают во всей области переданных импульсов, так что сечения рассеяния очень малы: при максимальном значении переданного импульса сечение составляет всего $2 \cdot 10^{-39}$ см², т. е. из каждых 10^{18} падающих электронов только один рассеивается со столь большой передачей импульса. Убывание формфакторов показывает, что до очень малых расстояний, порядка 10^{-15} см, в нуклоне отсутствует твердая сердцевина — керн.

Нуклонные формфакторы находятся путем исследования упругого рассеяния электронов протонами или нейтронами. Но для быстрых электронов возможно также и неупругое рассеяние нуклонами, когда в результате рассеяния появляются новые адроны.

Наиболее интенсивные исследования неупругого рассеяния электронов начались в 1967 г. в Стэнфорде на линейном ускорителе электронов с энергией 20 млрд эВ (SLAC). В результате исследований было установлено существование двух энергетических областей неупругого рассеяния электронов нуклонами: область резонансов и область глубоко неупругого рассеяния. В первой из этих областей, соответствующей переданным энергиям порядка 1 ГэВ, наблюдаются в сечении рассеяния отчетливые пики (всего четыре пика). Во второй области, соответствующей большим переданным энергиям, сечение имеет плавную зависимость от переданной энергии.

Пики соответствуют образованию возбужденных состояний протон-нуклонных резонансов. Это явление аналогично возбуждению атомных уровней электронным

пучком (известный опыт Франка и Герца). Образование нуклонных резонансов также характеризуется электромагнитными формфакторами, зависимость которых от квадрата переданного импульса аналогична зависимости нуклонных формфакторов. Это означает, что размеры нуклона и нуклонных резонансов одинаковы.

В области глубоко неупругого рассеяния электронов протонами наблюдается замечательное явление масштабной инвариантности, которое заключается в том, что сечение рассеяния определяется не переданной энергией и переданным импульсом порознь, а зависит только от отношения этих величин. Если это отношение фиксировано, то сечение глубоко неупругого рассеяния электронов протонами не будет убывать с ростом переданного импульса в отличие от сечения упругого рассеяния электронов протонами, которое очень быстро убывает с ростом переданного импульса.

Таким свойством обладает сечение рассеяния электронов на точечной заряженной частице. Поэтому естественно напрашивается мысль, что протоны «состоят» из точечных заряженных образований. Такие гипотетические образования были введены Фейнманом в 1969 г. и названы им партонами (от английского слова *part*, что означает «часть»). В дальнейшем было выяснено, что в теоретическом плане партоны могут быть отождествлены с кварками.

«Модели, подобные партонной,— пишут Кендалл и Панофский,— иллюстрируют усилия теоретиков дать описание внутренней структуры нуклонов в согласии с наиболее современной информацией, полученной в экспериментах при высоких энергиях. Теоретики стремятся решить математические проблемы, которые возникают при попытках использовать модели для объяснения характерных свойств, наблюдавшихся в осуществленных до сих пор опытах. Теоретики также предлагают другие эксперименты с целью подтверждения справедливости

своих моделей. Модели терпят крах либо ввиду непреодолимости математических трудностей, либо из-за того, что их предсказания не согласуются с экспериментом. Экспериментальная проверка модели, например, ядерной модели атома, предложенной Резерфордом, может в принципе сильно расширить сферу понимания законов физики. Именно таким путем, когда первоначальное наблюдение, предсказание и последующее сравнение с опытом находятся в непрерывном взаимодействии, происходит постепенное выяснение законов природы»⁴⁷.

Партонная модель не только объяснила масштабную инвариантность глубоко неупругого рассеяния электронов протонами, но и предсказала различие сечений глубоко неупругого рассеяния электронов протонами и нейтронами. Дело в том, что хотя электрический заряд нейтрона равен нулю, в области глубоко неупругого рассеяния электронов нейтронами наблюдается масштабная инвариантность, а так как нейтрон и протон составлены из разных кварков с разными значениями электрического заряда, то сечения глубоко неупругого рассеяния электронов нейтронами и протонами, определяющегося рассеянием электронов на отдельных кварках, должны быть различными. Можно показать, что сечение глубоко неупругого рассеяния электронов нейтронами должно быть меньше соответствующего сечения рассеяния электронов протонами.

Партонная структура нуклонов проявляется не только в опытах по глубоко неупругому рассеянию электронов нуклонами, но и в других процессах. Так, при взаимодействии нейтрино высоких энергий с нуклонами наблюдается интенсивное рождение адронов, причем в области глубоко неупругого рассеяния нейтрино нуклона-

⁴⁷ Кендалл Г. В., Панофский В. К. Г. Структура протона и нейтрона.— Ки.: Над чем думают физики. Элементарные частицы.— М.: Наука, 1973, с. 33.

ми (т. е. при больших переданных энергиях и больших переданных импульсах) имеет место масштабная инвариантность. Поэтому глубоко неупругое рассеяние нейтрино нуклонами можно интерпретировать как рассеяние нейтрино на отдельных партонах — кварках, образующих нуклоны. В партонной модели сечение взаимодействия нейтрино с нуклонами должно линейно расти с увеличением энергии нейтрино.

Масштабная инвариантность наблюдалась также в реакциях образования адронов на встречных электрон-позитронных пучках.

Если справедлива гипотеза партонов, то при аннигиляции электрон-позитронной пары сначала образуется пара квар — антикварк, а затем эта пара порождает адроны. Так как кварки считаются точечными частицами, то сечение образования пар кварков, $e^+ + e^- \rightarrow q + q^-$, сравнимо с сечением образования мюонных пар, $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$, т. е. велико.

«Неожиданные результаты по рассеянию электронов,— пишут Кендалл и Панофский,— полученные на двухмильном линейном ускорителе в Стэнфорде, породили высокую волну теоретических и экспериментальных исследований. Пока еще рано утверждать, приведет ли партонная модель к пониманию структуры нуклонов или здесь потребуются совершенно новые идеи. Весьма вероятно, что полное объяснение экспериментов по рассеянию электронов прояснит не только природу структуры нуклона, а также и природу сильных взаимодействий и того семейства частиц, между которыми они наблюдаются»⁴⁸.

⁴⁸ Кендалл Г. В., Панофский В. К. Г. Структура протона и нейтрона.— Кн.: Над чем думают физики. Элементарные частицы.— М.: Наука, 1973, с. 36.

Матрица рассеяния и дисперсионные соотношения

Успешно развивалась в пятидесятые и шестидесятые годы теория сильного взаимодействия элементарных частиц. Так как константа сильного взаимодействия, характеризующая его интенсивность, велика — она порядка десяти, то здесь, в отличие от квантовой электродинамики, неприменима теория возмущений, которая основана на разложении различных наблюдаемых величин в ряды по малому параметру (пропорциональному квадрату константы электромагнитного взаимодействия). Поэтому основные достижения теории сильного взаимодействия были связаны с изучением самых общих свойств амплитуд рассеяния адронов. С этой целью Гейзенбергом в 1943 г. была введена так называемая матрица рассеяния или S -матрица (S — первая буква немецкого слова *Streunung*, что означает «рассеяние»), элементы которой представляют собой амплитуды различных процессов рассеяния и взаимопревращения частиц. Каждый такой процесс можно разбить на три этапа:

1) начальное состояние, когда частицы движутся навстречу друг другу с определенными значениями энергии и импульса, и расстояние между частицами столь велико, что взаимодействием между ними можно пренебречь; 2) промежуточное состояние, когда сталкивающиеся частицы сближаются настолько, что между ними происходит взаимодействие (если сталкиваются адроны, то сильное взаимодействие между ними начинается при расстояниях порядка 10^{-13} см); 3) конечное состояние, когда частицы разлетаются, покидая область взаимодействия, на столь большие расстояния, что их вновь можно рассматривать как невзаимодействующие частицы.

Наиболее просто выглядят, естественно, начальное и конечное состояния, в которых частицы можно рассматривать как свободные, т. е. невзаимодействующие.

Матрица рассеяния представляет собой по идее оператор, который преобразует начальное состояние невзаимодействующих частиц в конечное состояние этих же или других невзаимодействующих частиц.

«Гейзенберг высказал предположение,— пишет Нуссенцвейг, анализируя гейзенберговскую программу S -матрицы,— что взаимодействие можно описать исключительно с помощью S -матрицы, полностью опуская рассмотрение промежуточного состояния. Предполагалось, что S -матрица содержит всю информацию, необходимую для вычисления любой наблюдаемой величины, в том числе поперечные сечения всех возможных реакций и энергии связанных состояний. Эту точку зрения можно сравнить с идеей «черного ящика», используемой в теории электрических цепей или в теории ядерных реакций»⁴⁹.

Программа Гейзенберга заключалась, таким образом, в том, чтобы, исходя из общих физических принципов, изучать свойства S -матрицы. А так как элементы S -матрицы определяют амплитуды различных процессов взаимодействия частиц, то свойства S -матрицы должны проявляться как определенные соотношения между такими наблюдаемыми величинами, как сечения взаимодействия элементарных частиц и вероятности их распада. К этим общим свойствам относятся релятивистская инвариантность, унитарность и причинность.

Релятивистская инвариантность означает независимость процессов взаимодействия частиц от используемой системы отсчета. Условие унитарности S -матрицы означает, что сумма вероятностей всех возможных про-

⁴⁹ Нуссенцвейг Х. М. Причинность и дисперсионные соотношения.— М.: Мир, 1976, с. 14.

цессов рассеяния должна быть равной единице. Оба эти условия непосредственно выражаются через элементы S -матрицы. Так, из релятивистской инвариантности следует, что элементы S -матрицы не меняются при преобразованиях Лоренца.

Условие унитарности связывает между собой амплитуды разнообразных процессов. Одним из следствий условия унитарности является так называемая оптическая теорема, согласно которой мнимая часть амплитуды упругого рассеяния двух частиц пропорциональна полному сечению взаимодействия этих частиц.

Наиболее деликатным является условие причинности. «Фактически под этим названием известно несколько различных условий,—разъясняет Нуссенцвейг.—Наиболее простое и к тому же, вероятно, наиболее интуитивно установленное условие можно сформулировать следующим образом:

Простое условие причинности: следствие не может предшествовать причине. «Причина» и «следствие» должны быть в каждом случае соответствующим образом определены, чтобы это условие было приемлемым.

Хорошо известно, что в специальной теории относительности приведенное выше условие тесно связано со следующим требованием:

Релятивистское условие причинности: не существует сигналов, распространяющихся со скоростью, превышающей c , где c — скорость света в вакууме. Иногда эту формулировку называют также макроскопическим условием причинности. Важно осознать, что простое условие причинности является более общим, чем релятивистское, поскольку оно не зависит от существования предельной скорости распространения сигналов.

В квантовой теории поля вводят условие микроскопической причинности. Это условие известно также под названием локальной коммутативности. Оно выражено обращением в нуль коммутатора полевых операторов,

взятых в двух несовпадающих пространственноподобных точках. Локальная коммутативность обусловлена тем, что измерения, произведенные в двух таких точках, не приводят к интерференции. Однако условие микроскопической причинности менее основано на интуиции и более далеко от эксперимента, причем связь между двумя упомянутыми условиями еще полностью не выяснена»⁵⁰.

Условие причинности на языке S -матрицы означает, что элементы S -матрицы, зависящие от энергий и импульсов взаимодействующих частиц, должны быть аналитическими функциями своих аргументов, продолженных в комплексную область. Свойство аналитичности позволяет получить интегральные соотношения между различными матричными элементами S -матрицы для вещественных значений аргументов. Эти соотношения получили название дисперсионных соотношений.

Впервые дисперсионные соотношения появились не в физике элементарных частиц, а в задаче о распространении электромагнитных волн в среде. «В 1946 г. Крониг первым обратил внимание на то,— писали Гольдбергер и Ватсон,— что требование, запрещающее сигналам распространяться со сверхсветовыми скоростями, должно приводить к ограничениям на S -матрицу. Запреты подобного рода принято называть принципом микропричинности. На практике техническая реализация этого утверждения встречается в теории измерений значительно реже, чем этого хотелось бы. Тем не менее существует формализм, который оказывается связанным с принципом микропричинности и который имеет весьма далеко идущие следствия.

В то время, когда Крониг сделал свое замечание (которое первоначально содержало в себе немногим

⁵⁰ Нуссенцевейг Х. М. Причинность и дисперсионные соотношения.— М.: Мир, 1976, с. 14—15.

больше, чем первое предложение предыдущего абзаца), никто не представлял себе ясно, как его реализовать. Действительно, сам Крониг и Крамерс за несколько лет до этого выполнили работу, которая имела существенное отношение к указанному вопросу. Однако важность этой работы оставалась непонятой в течение двадцати лет. Предметом их исследования было распространение электромагнитного излучения в оптической среде. Она показала, что требование, запрещающее свету распространяться со скоростями, большими c (c — скорость света в вакууме), приводит к соотношению между действительными и мнимыми частями показателя преломления среды, к соотношению, давно известному из изучения специальных моделей классической электродинамики»⁵¹.

Теория дисперсионных соотношений применительно к физике элементарных частиц начала интенсивно развиваться в 50-е годы. Сначала их справедливость была доказана для процесса рассеяния фотонов нуклонами на нулевой угол — рассеяние вперед. Здесь существенно было использовано то обстоятельство, что масса фотона равна нулю. «Оказывается,— пишут Гольдбергер и Ватсон,— что получение дисперсионного соотношения для амплитуды рассеяния света вперед чрезвычайно просто и обладает весьма большой степенью общности. Если бы обнаружилось, что оно противоречит эксперименту, это вызвало бы в физике сенсацию значительно более шумную, чем с открытием несохранения четности. Подобная ситуация в существенных чертах сохраняется и для соответствующих соотношений, описывающих рассеяние мезонов на нуклонах. Получение последних соотношений несколько более сложно. Однако оно абсолютно строго в той мере, в какой может рассматриваться, как

⁵¹ Гольдбергер М., Ватсон К. Теория столкновений.— М.: Мир, 1967, с. 497—498.

мы убеждены в данный момент, всякий вывод в квантовой теории поля»⁵².

Строгое доказательство справедливости дисперсионных соотношений для процесса рассеяния π -мезонов на нуклонах было дано Н. Н. Боголюбовым в 1956 г. Он устранил недостатки ранее существовавших попыток вывода дисперсионных соотношений. «Первый вывод дисперсионных соотношений в формализме квантовой теории поля был предложен Гелл-Маном, Гольдбергером и Тиррингом, которые воспользовались теоремой Коши, установив предварительно должные аналитические свойства амплитуды рассеяния вперед. Однако их доказательство аналитичности, во всяком случае для частиц с массой покоя, отличной от нуля, не свободно от возражений, серьезность которых была признана самими авторами»⁵³.

Измеренные в 1965—1967 гг. с большой точностью полные сечения $\pi^+ + p$ и $\pi^- p$ -взаимодействий в широком интервале энергий позволили проверить справедливость дисперсионных соотношений для рассеяния π -мезонов нуклонами на нулевой угол. Так как эти соотношения связывают реальную часть амплитуды с некоторыми интегралами от полных сечений, то для их проверки необходимо также измерение действительной части амплитуды упругого рассеяния π -мезонов нуклонами на нулевой угол. Задача была решена в экспериментах, выполненных в Дубне и других лабораториях. Использовалось то обстоятельство, что при очень малых углах рассеяния существенным становится электромагнитное взаимодействие частиц. Но амплитуда этого механизма обладает двумя замечательными свойствами. Во-первых, она определяется только электрическими зарядами элементар-

⁵² Гольдбергер М., Ватсон К. Теория столкновений.— М.: Мир, 1967, с. 502.

⁵³ Боголюбов Н. Н., Медведев Б. В., Поливанов М. К. Вопросы теории дисперсионных соотношений.— М.: Физматгиз, 1958, с. 16—17.

ных частиц и поэтому известна; во-вторых, амплитуда электромагнитного взаимодействия вещественна. Поэтому эта амплитуда интерферирует с действительной частью амплитуды πp -рассеяния, которая обусловлена сильным взаимодействием. Это и позволяет определить с достаточной точностью действительную часть сильной амплитуды πp -рассеяния.

Вслед за строгим доказательством дисперсионных соотношений для пион-нуклонного рассеяния их справедливость была установлена для широкого класса других процессов, а именно: для образования пионов при взаимодействии фотонов и электронов с нуклонами, а также для образования частиц.

«Метод дисперсионных соотношений — пишут Боголюбов и Ширков, — сыграл исключительно важную роль в развитии теории сильных взаимодействий. За прошедшие годы он стал основным строгим методом теоретических исследований в физике фундаментальных взаимодействий. Помимо большого числа строгих результатов, он вошел органической составной частью в разнообразные эвристические схемы полупеноменологического характера, а также явился исходным пунктом для ряда приближенных методов исследования динамики сильных взаимодействий, основанных на строго установленных или постулированных аналитических свойствах матричных элементов»⁵⁴.

Необходимо отметить, что теория сильного взаимодействия, основанная на представлении об S -матрице, является в настоящее время существенно феноменологической теорией. Значение этого термина очень наглядно разъясняет Гейзенберг, по мнению которого «феноменологической» теорией можно назвать такую теорию, «...которая пробует увязать различные эмпирические данные

⁵⁴ Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантовых полей.— М.: Наука, 1976, с. 411.

на некоторой теоретической основе, но не пытается явно сформулировать исходный закон природы. Теории такого типа могут весьма успешно описывать наблюдаемые явления, а с течением времени они могут возникать как следствие определенного приближения, примененного в полной теории. В качестве общеизвестного исторического примера упомянем описание планетарных орбит в астрономии Птолемея с помощью циклов и эпициклов. Впоследствии циклы и эпициклы оказались возможным интерпретировать как первые члены Фурье-разложения истинных ньютоновских орбит»⁵⁵.

Современная теория сильного взаимодействия носит в основном феноменологический характер. В частности, это проявляется в том, что при проверке справедливости дисперсионных соотношений, например, для пион-нуклонного рассеяния такие величины, как массы пиона и нуклона, константа пион-нуклонного взаимодействия, а также значения полных сечений и действительной части амплитуд берутся из эксперимента, поскольку эти величины не могут быть вычислены в настоящее время.

Тем не менее в середине 60-х годов было высказано предположение, что физические характеристики адронов могут быть вычислены в рамках теории S -матрицы. Этот радикальный подход, сформулированный Чу и Фраучи, получил название бутстрапа (англ. bootstrap — «зашнуровка»). Идея бутстрапа исходит из допущения, что все сильновзаимодействующие частицы «...представляют собой динамические структуры в том смысле, что они осуществляют оптимальное равновесие сил; действительно, они обязаны своим существованием тем же самым силам, посредством которых взаимодействуют между собой. С этой точки зрения нейтрон и протон не являются фундаментальными частицами, как это счита-

⁵⁵ Гейзенберг В. Введение в единую полевую теорию элементарных частиц.— М.: Мир, 1968, с. 172.

лось прежде, а представляют собой два низко расположенных состояния сильно взаимодействующей материи, имеющими природу, не отличающуюся от природы позднее открытых барионов и мезонов, а также от атомных ядер, более тяжелых, чем ядро водорода⁵⁶.

Надежды бутстрапа связаны с тем, что в принципе не исключена ситуация, когда общие принципы теории S-матрицы приведут к такой системе нелинейных уравнений, которая имеет единственное решение. Это решение может существовать только при определенных значениях масс элементарных частиц, их констант взаимодействия, а также квантовых чисел частиц, т. е. при тех значениях, которые найдены из опыта. Такая возможность представляется довольно правдоподобной, так как адроны сильно взаимодействуют друг с другом, причем любой адрон можно считать связанным состоянием других адронов, а взаимодействие любой пары адронов, в свою очередь, определяется обменом адронами. «Согласно гипотезе бутстрапа, всякая сильно взаимодействующая частица считается связанным состоянием тех каналов, с которыми она общается, и целиком обязана своим существованием силам, вызванным обменом сильно взаимодействующими частицами, которые общаются с кроссинг-каналами. Каждая из этих последних частиц существует благодаря силам, порождаемым первой частицей. Другими словами, каждая частица участвует в порождении других частиц, которые в свою очередь порождают ее. В этой взаимной и резко нелинейной картине легко представить себе ситуацию, в которой не остается никаких произвольных или свободных параметров (кроме одного какого-либо, нужного, чтобы фиксировать масштаб энергии), а единственный самосогласо-

⁵⁶ Чу Дж., Гелл-Ман М., Розенфельд Л. Сильно взаимодействующие частицы.— Ки.: Над чем думают физики. Элементарные частицы.— М.: Наука, 1965, с. 85.

ванный набор параметров — тот, который осуществляется в природе»⁵⁷. (Две реакции называются кроссинг-каналами, если одна из них получается из другой следующей перестановкой частиц: $a + b \rightarrow c + d$ и $a + \bar{c} \rightarrow \bar{b} + d$, где a, b, c и d — некоторые частицы).

Очень привлекательной является такая концепция бутстрапа, согласно которой внутренние симметрии, имеющие место в мире адронов, такие как SU_3 и SU_6 -симметрии, также порождаются бутстрапом. Другими словами, надежда заключается в том, что единственное решение уравнений бутстрапа будет возникать только в том случае, если адронные взаимодействия подчиняются определенным внутренним симметриям. «Если система сильно взаимодействующих частиц в самом деле единственным образом определяется сама через себя с помощью обсуждавшегося динамического механизма, может оказаться, что специальные симметрии сильных взаимодействий не накладываются, так сказать, снаружи, но появляются в качестве необходимых условий самосогласованности. Очень характерно и довольно загадочно, что изотопическая симметрия, странность, а теперь и более обширные симметричные свойства восьмеричного пути никогда не соотносились с другими физическими симметриями. Что является их источником, может быть, мы поймем тогда же, когда поймем структуру масс и спинов сильно взаимодействующих частиц. И эта структура, и загадочные симметрии могут возникать из одного источника — динамики бутстрапа»⁵⁸.

Программа бутстрапа в настоящее время, однако, не реализована. Не исключена возможность, что в бутстрапный формализм может быть подключена и квантовая электродинамика. Несмотря на сложность даже

⁵⁷ Чу Дж., Гелл-Ман М., Розенфельд Л. Сильно взаимодействующие частицы.— Кн.: Над чем думают физики. Элементарные частицы.— М.: Наука, 1965, с. 111.

⁵⁸ Там же, с. 112.

постановки такой задачи, Гейзенберг допускал возможность ее решения. Но несмотря на ограниченный успех идей бутстрапа, метод дисперсионных соотношений по-прежнему остается источником ограничений общего порядка, которые накладываются на различные физические теории сильного взаимодействия. Ограничения, следующие из принципа причинности, имеют столь же общий и универсальный характер, как и ограничения, следующие из закона сохранения энергии.

Каковы же главные достижения и преимущества метода дисперсионных соотношений? «Одно из преимуществ этого метода,— разъясняет Нуссенцвейг,— заключается в рассмотрении только перенормированных величин, благодаря чему никогда не появляются бесконечные перенормировочные константы. Величины, используемые в этом методе, тесно связаны с экспериментальными данными, поэтому он является удобной формой полуфеноменологического описания экспериментальных результатов. Он также позволяет получить некоторые количественные результаты, например, для пион-нуклонного взаимодействия. Наконец, он приводит к новому методу аппроксимации, отличному от теории возмущений и более подходящему для изучения сильных взаимодействий»⁵⁹.

Интересные результаты были получены в рамках метода дисперсионных соотношений для процессов взаимодействия адронов при высоких энергиях. Дело в том, что если энергии взаимодействующих частиц превышают их массы, то в такой асимптотической области свойства взаимодействия адронов должны быть особенно простыми. Эксперимент подтверждает эти ожидания: при больших энергиях полные сечения взаимодействия адронов почти не меняются в широком энергетическом

⁵⁹ Нуссенцвейг Х. М. Причинность и дисперсионные соотношения.— М.: Мир, 1976, с. 16.

интервале и характеризуются универсальной зависимостью от энергии, т. е. возникает картина, прямо противоположная картине рассеяния при умеренно больших энергиях, когда зависимость поперечных сечений от энергии и угла рассеяния носит немонотонный характер. Универсальностью и простотой характеризуются также и дифференциальные сечения рассеяния адронов при больших энергиях.

В области больших энергий можно сформулировать ряд асимптотических соотношений, касающихся поведения сечений взаимодействия адронов. Важнейшим из них является теорема Померанчука. «Ни на одном этапе до 1966 года, — рассказывает Иден — развитие квантовой теории поля не было достаточным для строго построенного прочного моста к острову теорем при высоких энергиях. Этот остров был основан Померанчуком в 1956 году, когда он, используя изоспиновую инвариантность и интуитивные предположения, доказал асимптотическое равенство дифференциальных сечений частицы и античастицы. Два года спустя Померанчук на основе дисперсионных соотношений для рассеяния вперед установил аналогичный результат относительно полных сечений. Однако его доказательство было основано на дополнительном предположении о том, что амплитуды рассеяния вперед становятся чисто мнимыми при высоких энергиях. До сих пор неизвестно, справедливо ли это предположение»⁶⁰.

Выполненные в Серпухове, ЦЕРНе и Батавии эксперименты по измерению полных сечений подтвердили теорему Померанчука. Правда, после опытов в Серпухове был период, когда думали, что теорема Померанчука не выполняется, так как полные сечения $K^{\overline{p}}$ и

⁶⁰ Иден Р. Теоремы о соударениях элементарных частиц при высоких энергиях. — Кн.: Общие принципы квантовой теории поля и их следствия. — М.: Наука, 1977, с. 135.

$K+p$ -взаимодействия не равны друг другу. Несколько позже стало ясно, что в этих опытах был открыт новый экспериментальный факт, а именно рост полных адронных сечений с энергией. Ранее на основе данных по рассеянию частиц с энергией вплоть до 20 ГэВ предполагалось, что с ростом энергии сечения медленно убывают, приближаясь к постоянным асимптотическим значениям. Изучение рассеяния положительных и отрицательных пионов, каонов, протонов и антипротонов на протонах в интервале энергий 20—200 ГэВ обнаруживало минимумы в полных сечениях, вслед за которыми сечения неограниченно растут с ростом энергии. Возможность такого роста была указана в 1961 г. Фруассаром, который получил также ограничения на максимально возможный рост (граница или предел Фруассара), исходя из общих требований унитарности и аналитичности для амплитуд рассеяния адронов.

Полюса и траектории Редже

При изучении свойств взаимодействия адронов при высоких энергиях очень плодотворной оказалась концепция полюсов Редже, т. е. полюсов амплитуд рассеяния адронов (полюса названы по имени Редже, исследовавшем в 1959 г. аналитические свойства амплитуд рассеяния). Эта концепция позволила установить связь между свойствами адронов и особенностями их взаимодействия при высоких энергиях.

Согласно современным представлениям взаимодействие между частицами определяется обменом теми или иными частицами. Например, электрон взаимодействует с протоном посредством обмена фотоном. Вся физика электромагнитного взаимодействия исходит из допущения, что фотон является переносчиком этого взаимодействия и что константа взаимодействия фотона с заряженными частицами меньше единицы.

В физике сильного взаимодействия переносчиками взаимодействия могут быть по существу все адроны. В этом заключается принцип «демократии», господствующей в мире адронов; и гипотеза бутстрапа основана на этом принципе. Но при высоких энергиях идея обменного взаимодействия приводила к противоречию с экспериментом, так как обмен адроном с большим спином J должен приводить к сильному росту с энергией амплитуды рассеяния, и чем больше значение J , тем сильнее должен быть этот рост. Такое противоречие было устранено после введения полюсов Редже. Оказалось, что спин виртуального адрона, т. е. адрона, которым обмениваются взаимодействующие частицы, не совпадает со спином реальной частицы. «Редже указал, что во многих важных случаях существует математическое соотношение, связывающее значение J с массой частицы. Он показал, что некоторые из характеристик частицы могут рассматриваться как «гладкие» функции J , т. е. математические функции, непрерывно меняющиеся с изменением J . Поскольку в квантовой механике J имеет лишь целые и полуцелые значения, то функции имеют прямой физический смысл только при этих разрешенных значениях аргумента. Гладкая математическая кривая значений физической массы, отвечающих разным значениям J , называется траекторией Редже»⁶¹.

Различные адроны с определенными значениями массы, спина и других квантовых чисел отвечают точкам на траекториях Редже. Для простейших линейных траекторий должны существовать адроны со сколь угодно большими значениями масс и спинов. Естественно думать, что все частицы, принадлежащие к определенной траектории Редже и образующие семейство частиц с одним и тем же значением изотопического спина, стран-

⁶¹ Чу Дж., Гелл-Ман М., Розенфельд А. Сильно взаимодействующие частицы.— Кн.: Над чем думают физики. Элементарные частицы.— М.: Наука, 1965, с. 98.

ности и барионного числа, одинаково фундаментальны. Это предположение позволяет на одинаковых основаниях рассматривать, например, стабильный протон и нестабильный нуклонный резонанс, поскольку они принадлежат к одному семейству. «Следовательно, протон в нем ничем не выделен, за исключением того, что он обладает наименьшими значениями массы и спина во всей протонной цепочке. Точно также, как несколько столетий назад, была отброшена идея о Земле как о центре Вселенной, теперь следует пересмотреть представление о том, что протон занимает сколько-нибудь выделенное положение среди элементарных частиц»⁶².

За короткое время гипотеза полюсов Редже претерпела ряд изменений. Выводы первых исследований были довольно оптимистичными. Так была сформулирована идея о полюсе Померанчука, идея об особом полюсе с квантовыми числами вакуума. Обмен именно этим полюсом приводил к равенству сечений рассеяния частиц и античастиц, т. е. к справедливости теоремы Померанчука, и определял свойства упругого рассеяния адронов при высоких энергиях.

В рамках модели полюсов Редже было предсказано существование дифракционного конуса при упругом рассеянии адронов и указано, что этот конус должен сужаться с увеличением энергий взаимодействующих частиц (И. Я. Померанчук, В. Н. Грибов и др.). Физически сужение дифракционного конуса означает, что радиус взаимодействия адронов растет с увеличением энергии. Такое явление было экспериментально обнаружено в протон-протонном рассеянии.

«Однако этот первый период бурного расцвета теории и феноменологии был весьма кратковременным. Последующие эксперименты, выполненные в конце 1962 и

⁶² Баргер В. Д., Клайн Д. Б. Рассеяние при высоких энергиях.— Кн.: Над чем думают физики. Элементарные частицы.— М.: Наука, 1973, с. 13.

вначале 1963 г., показали, что для всех процессов, кроме $p-p$ -рассеяния, сужения дифференциальных сечений не наблюдается. Правда, имеющиеся экспериментальные данные можно было согласовать с теорией посредством введения нескольких полюсов Редже, но наличие слишком большого числа подгоночных параметров делало подобную процедуру весьма неубедительной... В результате энтузиазм по отношению ко всему направлению в целом угас примерно на два года, исключение составила лишь небольшая группа преданных ему физиков»⁶³.

В последующие годы были выполнены детальные исследования неупругих процессов взаимодействия адронов при высоких энергиях. Это образование нейтральных π^0 и η -мезонов в π^-p -столкновениях, $\pi^+p \rightarrow \pi^0 + n$ и $\pi^-+p \rightarrow \eta + n$; образование нейтрон-антинейтронных пар при аннигиляции $p+p$ -пар, $p+p \rightarrow \bar{n} + n$ и т. д. Важным свойством таких процессов является то, что амплитуды их не содержат вклада вакуумного полюса, а определяются минимальным числом так называемых вторичных полюсов Редже, которым соответствуют векторные (со спином единица) и тензорные (со спином два) мезоны). «Позднее, начиная с 1965 г., возрастающее количество экспериментальных данных, особенно по неупругим процессам при высоких энергиях, возродило интерес к феноменологии, основанной на полюсах Редже, с ее помощью удалось успешно систематизировать многие экспериментальные данные. Стало появляться больше работ и по теоретическим аспектам, касающимся комплексной J -плоскости; детальный анализ вопросов, связанных со спиновыми частицами и с рассеянием частиц разных масс, привел к введению понятий «конспирации» и «дочерей». Благодаря последним работам проясни-

⁶³ Коллинз П., Сквайрс Э. Полюса Редже в физике частиц.—М.: Мир, 1971, с. 11—12.

лась ситуация с разрезами и неподвижными полюсами, имеющимися в J -плоскости, а также проблема реджезации элементарных частиц»⁶⁴.

Гипотеза дуальности

Траектории Редже играют фундаментальную роль в теории сильного взаимодействия. С одной стороны, они описывают спектр элементарных частиц, с другой,— определяют высокоэнергетическое поведение амплитуд рассеяния адронов на адронах. Связь этих столь различных аспектов теории элементарных частиц нашла свое дальнейшее развитие в так называемой гипотезе дуальности, следствия которой интенсивно анализировались в 1967—1970 гг.

Чтобы разъяснить содержание этой гипотезы, заметим, что для процессов рассеяния адронов следует различать две энергетические области: область сравнительно небольших энергий и область больших энергий. В первой области, которая, начинаясь от порога реакций, простирается до энергий порядка нескольких ГэВ, имеет место возбуждение резонансов (поэтому она называется резонансной областью): в мезон-мезонных и барион-антибарионных столкновениях возбуждаются мезонные резонансы, в мезон-барионных взаимодействиях — барионные. В этой области амплитуды рассеяния характеризуются резонансной зависимостью от энергии. Резонансам соответствуют частицы, которые имеют разные значения спина, поэтому зависимость амплитуд рассеяния от угла быстро изменяются при переходе от одной энергии к другой.

При энергиях выше 5—10 ГэВ возбуждение резонансов при рассеянии адронов становится несущественным,

⁶⁴ Коллинз П., Сквайрс Э. Полюса Редже в физике частиц.— М.: Мир, 1971, с. 12.

и поведение амплитуд рассеяния адронов определяется обменом полюсами Редже.

Возникает вопрос: как описать процессы рассеяния адронов в промежуточной области к области высоких энергий? «Создается впечатление, что в этой области неприменима ни изобарная модель с малым числом резонансов, ни параметризация амплитуды с помощью небольшого числа реджевских членов. В этой промежуточной области экспериментальная кривая представляется слишком плавной, чтобы описывать ее, учитывая только резонансы. В это же время эта кривая выглядит там недостаточно гладкой, чтобы предположить полное отсутствие резонансных эффектов. В связи с этим напрашивается способ описания, основанный на суперпозиции двух эффектов; эффекта резонансов (медленно исчезающего с ростом энергии) и реджевского эффекта (медленно нарастающего)»⁶⁵. Такая модель получила название интерференционной. В результате детальных исследований было показано, что интерференционная модель должна быть отвергнута, а вместо нее может быть сформулирована гипотеза дуальности, которая заключается в том, что вклад полюса Редже совпадает с усредненным вкладом резонансов. «Утверждение, что все сечение определяется суммированием только резонансов, представляет собой очень сильное ограничение, которое (если оно правильно) может оказаться настолько жестким, что приведет теорию к единственному выражению, которое обладает таким свойством. Не удивительно, что этой идее уделялось много внимания»⁶⁶.

Гипотеза дуальности тесно связана с идеей бутстрапа. Действительно, согласно дуальности, обмен полюсом Редже как бы порождает совокупность резонансов, т. е.

⁶⁵ Альфаро В. де, Фубини С., Фурлан Г., Росетти К. Токи в физике адронов.— М.: Мир, 1976, с. 449.

⁶⁶ Фейнман Р. Взаимодействие фотонов с адронами.— М.: Мир, 1975, с. 101.

свойства целого семейства адронных резонансов. С другой стороны, комплекс резонансов с вполне определенными значениями спинов и масс определяет свойства полюса Редже.

Таким образом, в рамках гипотезы найдла свое естественное выражение связь областей малых и больших энергий. Эта гипотеза позволила получить много количественных результатов, и идея дуальности оказалась очень полезной для феноменологии сильного взаимодействия во всей исследованной области энергий. В частности, Шмидт обнаружил замечательное соответствие между массами и спинами нуклонных резонансов, с одной стороны, и свойствами амплитуды Редже для рассеяния π -мезонов нуклонами, с другой стороны. «Эта работа Шмидта имела большое историческое значение, хотя часть описанных совпадений явилась, быть может, случайной. Работа Шмидта навела на мысль, что в результате развития идей дуальности должна быть построена единая амплитуда, обладающая реджевским поведением и содержащая в то же время информацию о положении резонансов»⁶⁷.

Такую амплитуду в аналитическом виде удалось сконструировать Венециано в 1968 г. Амплитуда описывала рассеяние бесспиновых частиц как в области больших энергий, где она имела реджевскую форму, так и в области малых энергий. Амплитуда Венециано определяется только траекторией Редже и приводит к нужным резонансам. Поэтому такой подход получил название дуальной резонансной модели. «Дуальная резонансная модель удовлетворяет многим общим требованиям, предъявляемым к разумной теории. С помощью этой модели удалось получить выражения для амплитуды рассеяния, которые последовательно учитывают важную

⁶⁷ Альфаро В. де, Фубини С., Фурлан Г., Росетти К. Токи в физике адронов.— М.: Мир, 1976, с. 452.

физическую информацию, заключенную в правилах подстановки. В самом деле, результаты, относящиеся ко всем перекрестным каналам, удовлетворительны в равной мере. Поскольку имеется хорошее асимптотическое поведение во всех каналах, модель может применяться как к высокоэнергетическим, так и к низкоэнергетическим процессам. Окончательная цель дуальной теории — описать единым образом большой класс физических явлений, пользуясь небольшим числом теоретических параметров. К сожалению, в осуществлении этой общей программы полный успех еще не достигнут. Но вполне возможно, что существующая дуальная модель найдет применение в качестве первого приближения в будущих исследованиях, посвященных построению единой теории элементарных частиц»⁶⁸.

Подводя итоги развитию метода S -матрицы применительно к сильному взаимодействию, отметим, что общие принципы теории позволяют получить только столь же общие результаты типа дисперсионных соотношений или асимптотических теорем. Дополнительные физические соображения, такие как гипотеза бутстрапа, идея полюсов Редже или дуальность, существенно усиливают предсказательную силу метода S -матрицы.

Необходимо, однако, помнить, что основные успехи этого метода касались в основном двухчастичных процессов взаимодействия адронов. Амплитуды многочастичных процессов зависят от столь большого числа переменных, что задача исследования аналитических свойств таких амплитуд становится исключительно трудной. Это дало основания Гейзенбергу — основателю S -матричного подхода — заявить: «Возможно, что трех основных свойств S -матрицы (унитарности, инвариантности относительно фундаментальных групп и аналитиче-

⁶⁸ Альфаро В. де, Фубини С., Фурлан Г., Росетти К. Токи в физике адронов.— М.: Мир, 1976, с. 504.

ского представления причинности) в принципе достаточно для полного определения ее структуры. Тем не менее из-за математической сложности S -матрицы она едва ли может служить хорошей основой для формулировки фундаментального принципа физики элементарных частиц. Описание (пусть неполное) явлений посредством S -матрицы несомненно возможно. Но она должна быть результатом, а не исходным пунктом теории; ее нужно получать с помощью математических операций, отступающих от аксиом, формулируемых более простым способом»⁶⁹.

Таким образом, в настоящее время теория S -матрицы остается по существу феноменологической теорией, в рамках которой довольно успешно развиваются разнообразные модели, применимые к разным явлениям с той или иной мерой успеха.

Очень своеобразную и меткую характеристику этому подходу дает Дайсон: «В теории S -матрицы математический аппарат подбирается произвольно, но так, чтобы он был по возможности элементарен. Эта теория включает в себя обычную теорию аналитических функций комплексных переменных, оставшуюся, по существу, неизменной с момента своего создания французским математиком Огюстом Коши в XIX в. Теория S -матрицы компенсирует слабость своего математического аппарата интенсивным использованием опытных данных. Типичная цель теоретика, использующего метод S -матрицы, заключается в предвычислении или предсказании результата одного опыта по результатам другого. Иногда предсказания делаются, исходя из «основных принципов», без использования результатов других экспериментов. Именно на вывод из основных принципов всех нужных величин возлагаются в конечном счете все на-

⁶⁹ Гейзенберг В. Введение в единую полевую теорию элементарных частиц.— М.: Мир, 1968, с. 32.

дежды. Одной из наиболее приятных и оживляющих особенностей метода S -матрицы является то, что при его применении правила игры могут меняться по ходу вычислений. В его нынешней форме этот метод является переходным: он не столько позволяет теоретически дать ответ «да» или «нет», сколько дает возможность строить теорию явления, подгоняя ее под эксперимент методом проб и ошибок. На каждом этапе применения этого метода безжалостно устраняются идеи, не выдерживающие сравнения с опытом; этим создается свобода для поисков правильных идей.

Успех теории S -матрицы в интерпретации экспериментов и установления правильного направления экспериментальных работ был грандиозным. Мое собственное предрасположение к теории поля основано на личном вкусе, на который, как это ясно исторически, твердо полагаться нельзя. Метод S -матрицы кажется мне слишком простым, ему не хватает математической глубины, и я не могу поверить, что все на свете можно свести к S -матрице. Если окажется, что S -матрица может все объяснить, то я почувствую разочарование неизобретательностью природы. Однако я понимаю, что природа часто изобретательна как раз там, где мы совсем не ждем»⁷⁰.

Нейтральные слабые токи

В 1967 г. Вайнберг и Салам предложили теорию единого описания слабого и электромагнитного взаимодействий лептонов.

Чтобы разъяснить содержание тех физических идей, которые были положены в основу этой теории, перечислим общие черты слабого и электромагнитного взаимодействий элементарных частиц. Как мы уже говорили,

⁷⁰ Дайсон Ф. Математика и физика. УФН, 1965, 85, с. 351.

эти взаимодействия определяются токами частиц: электромагнитное взаимодействие — электромагнитным током, а слабое взаимодействие — слабым током. Наиболее близок к теории электромагнитного взаимодействия W -бозонный вариант теории слабого взаимодействия. В этом варианте переносчиком слабого взаимодействия является векторный W -бозон (со спином — единица). Соответственно переносчиком электромагнитного взаимодействия также является векторная частица — фотон.

Константа слабого взаимодействия, которая характеризует взаимодействие W -бозона со слабым током, является безразмерной величиной, так же как и константа электромагнитного взаимодействия, которая характеризует взаимодействие фотона с электромагнитным током. Больше того, если массу W -бозона выбрать достаточно большой (порядка десятков ГэВ), то константа слабого взаимодействия может сравниться по величине с константой электромагнитного взаимодействия.

Наконец оба взаимодействия имеют универсальный характер: универсальность слабого взаимодействия заключается в том, что вся совокупность разнообразных процессов рассеяний и распадов элементарных частиц, которые определяются слабым взаимодействием, характеризуется одной единственной константой слабого взаимодействия. Аналогично универсальность электромагнитного взаимодействия заключается в том, что все процессы электромагнитного взаимодействия определяются только величиной электрического заряда частиц, который играет роль константы электромагнитного взаимодействия.

Таковы общие черты слабого и электромагнитного взаимодействий. Между этими взаимодействиями существуют также и важные принципиальные различия, а именно: слабые токи являются заряженными, тогда как электромагнитный ток — нейтральный. Это различие проявляется в том, что фотон — электрически нейтраль-

ная частица, а промежуточные бозоны должны быть заряженными частицами.

Слабое взаимодействие, в отличие от электромагнитного, не инвариантно относительно пространственного отражения, что приводит к несохранению пространственной четности в процессах, обусловленных слабым взаимодействием. И, наконец, теория слабого взаимодействия является неперенормируемой, квантовая же электродинамика, которая представляет собой теорию электромагнитного взаимодействия лептонов,— перенормируема. Это обстоятельство тесно связано с различием масс фотона и W -бозона; W -бозон, в отличие от безмассового фотона, обладает отличной от нуля массой. Поэтому он характеризуется не двумя состояниями поляризации, как это имеет место в случае фотона, а тремя. В отличие от фотона, который обладает только поперечной поляризацией, W -бозон может иметь продольную. Именно обмен W -бозона с продольной поляризацией и приводит к неограниченному росту с энергией амплитуд процессов, обусловленных слабым взаимодействием, а это, в свою очередь, приводит к неперенормируемости теории слабого взаимодействия.

Глубокая физическая причина различия слабого и электромагнитного взаимодействий коренится в различии свойств симметрии этих взаимодействий. Именно электромагнитное взаимодействие обладает так называемой калибровочной симметрией, слабое же взаимодействие не обладает этой симметрией. Известно, что всякая симметрия требует, чтобы уравнения движения физической системы не изменялись, т. е. были инвариантными относительно некоторых преобразований, с которым можно сопоставить симметрии. Совокупность таких преобразований называют группой симметрии.

Например, изотопическая симметрия, как было уже разъяснено, требует инвариантности относительно преобразований поворота в некотором абстрактном изото-

лическом пространстве. Важно подчеркнуть, что величина такого поворота не зависит от координат в обычном пространстве и от момента времени. Но можно представить себе более жесткую симметрию, согласно которой уравнения движения не должны изменяться, например, при таких изотопических поворотах, которые зависят от точки в пространстве и времени. «Первый частный вид операции симметрии сравним с неким заданным и одинаковым поворотом каждого яблока в корзине от принятой ими ориентации в пространстве к другой. Второй более общий вид операции симметрии можно сопоставить с поворотом по отдельности каждого яблока в корзине к различным новым ориентациям. Инвариантность относительно операции симметрии второго типа известна как калибровочная симметрия»⁷¹.

Оказывается, что для электромагнитного взаимодействия имеет место такая калибровочная симметрия.

«С давних пор известно, что полевые уравнения электромагнетизма Максвелла подчиняются калибровочной симметрии, основанной на группе вращений в двух, а не в трех направлениях. Логика может быть и обратной: предполагая этот принцип калибровочной симметрии, можно вывести все законы электромагнетизма, включая уравнения Максвелла и тот факт, что масса фотона равна нулю. Трудно придумать какой-либо лучший пример мощи принципа симметрии в физике»⁷².

Электромагнитное поле поэтому и называется калибровочным. Общая теория калибровочных полей была предложена в 1955 г. Янгом и Миллсом, поэтому обобщенные калибровочные поля называют полями Янга—Миллса.

⁷¹ Вайнберг С. Объединенные теории взаимодействий элементарных частиц. УФН, 1976, 118, с. 505.

⁷² Там же.

Из-за калибровочной инвариантности электромагнитного взаимодействия сохраняется электромагнитный ток, что проявляется в абсолютном законе сохранения электрического заряда элементарных частиц во всех процессах их взаимодействия. В свою очередь, перенормируемость теории электромагнитного взаимодействия тесно связана с сохранением электромагнитного тока.

Возникает вопрос, нельзя ли предположить, что калибровочная симметрия существует и для слабого взаимодействия? «Наши надежды отыскать соответствие в природе слабых и электромагнитных взаимодействий приводят нас естественным образом к предположению, что может существовать какая-то более широкая калибровочная симметрия, вследствие которой фотон и промежуточный векторный бозон попадают в одно семейство. Однако чтобы это было возможным, промежуточный векторный бозон, подобно фотону, должен иметь нулевую массу, но, как мы уже видели, его масса в действительности должна быть много большей, чем у любой известной элементарной частицы. Какие родственные связи могут быть у столь разных частиц?»⁷³.

Трудность с массой W -бозона можно преодолеть, если воспользоваться важной физической идеей о спонтанном нарушении симметрии. Дело в том, что в физике известны ситуации, когда уравнения движения обладают свойствами симметрии, которые не проявляются на уровне масс и других характеристик элементарных частиц. Особенно просто это можно разъяснить примерами из физики твердого тела. Так, несмотря на центральную симметрию взаимодействия между атомами и молекулами, такая система атомов, как кристалл, не обладает центральной симметрией. Другой пример связан с явлением ферромагнетизма. «Уравнения, которым

⁷³ Вайнберг С. Объединенные теории взаимодействий элементарных частиц. УФН, 1976, 118, с. 505.

подчиняются электроны и ядра железа в данном куске железа, обладают свойством симметрии относительно вращения. Поэтому свободная энергия этого куска не меняется в зависимости от того, сделан ли данный конец куска северным полюсом или южным в результате намагничения. При высоких температурах кривая зависимости энергии от намагничения имеет простую U -образную форму, которая симметрична относительно вращения так же, как и соответствующее уравнение. Состояние равновесия — состояние с наименьшей энергией в нижней точке U -образной кривой — является состоянием с нулевой намагниченностью, которое сохраняет эту симметрию. С другой стороны, когда температура понижается, эта нижайшая точка кривой намагничения выгибается, и кривая становится похожей на W со скругленными углами. Кривая все еще сохраняет ту же самую симметрию относительно вращения, что и соответствующие уравнения, но равновесное состояние теперь имеет определенную ненулевую намагниченность, которая может быть либо северной, либо южной, и уже не обладает той же симметрией, что и уравнения. В таких случаях мы говорим, что симметрия спонтанно нарушена. Крошечный физик, живущий внутри магнита, мог бы и не знать, что уравнения системы обладают соответствующей симметрией относительно вращений, хотя мы с нашим более широким кругозором видим, что это легко заметить. Проводя аналогию, далее легко понять, что принцип симметрии мог бы таким же образом быть совершенно справедливым в фундаментальном смысле и все же вообще не проявляться в таблице масс элементарных частиц»⁷⁴.

Идея спонтанного нарушения симметрии позволила объединить теории слабого и электромагнитного взаимо-

⁷⁴ Вайнберг С. Объединенные теории взаимодействий элементарных частиц. УФН, 1976, 118, с. 505.

действия элементарных частиц таким образом, чтобы, несмотря на отличную от нуля массу промежуточного W -бозона, возникла перенормируемая теория слабого взаимодействия. При этом предполагается, что, несмотря на кажущееся нарушение калибровочной симметрии, благодаря конечной массе W -бозона, в природе на глубоком уровне тем не менее имеет место эта симметрия, но которая спонтанным образом нарушена. Калибровочные поля типа W -бозона приобретают массу в результате этого нарушения симметрии, фотон же остается безмассовым. «В 1967 г. было высказано предположение, что в слабых и электромагнитных взаимодействиях заложена группа нарушенной калибровочной симметрии. Предложенная группа содержит ненарушенную группу калибровочной симметрии электромагнетизма и, следовательно, требует равенства нулю массы фотона, другие члены семейства фотона связаны с нарушенными симметриями и получают большие массы в результате нарушения симметрии. В простейшем варианте этой теории родственниками фотона были бы заряженный промежуточный векторный бозон (издавна обозначаемый как W -частица) с массой, большей чем 39,8 массы протона, и дополнительный нейтральный векторный бозон (названный частицей Z) с массой, большей чем 79,6 массы протона. Введение таким способом масс у векторных бозонов в физике называется механизмом Хиггса, поскольку этот механизм стал впервые известен из работы 1964 г., опубликованной П. Хиггсом из Эдинбургского университета»⁷⁵.

Доказательство перенормируемости такой схемы объединенного описания слабого и электромагнитного взаимодействий явилось способом проверки внутренней непротиворечивости теории. Такая проверка была тем

⁷⁵ Вайнберг С. Объединенные теории взаимодействий элементарных частиц. УФН, 1976, 118, с. 505.

более важной, что в 1967 г. отсутствовали экспериментальные данные, которые бы подтверждали или отвергали эту теорию. Сам Вайнберг «предположил в 1967 г., что так и обстоит дело в данном случае, но перенормируемость теории не была им продемонстрирована; четыре года спустя это впервые показал Г. т'Хуфт, тогда аспирант университета в Утрехте. (После этого доказательство было выполнено более строго многими теоретиками, в частности Б. Ли, Дж. Зинн—Джостеном, М. Вельтманом и самим Г. т'Хуфтом). Оказывается, что различные многочастичные обмены, включающие фотоны, заряженные промежуточные векторные бозоны и другие частицы, суммируются таким образом, что все перенормируемые бесконечности взаимно сокращаются»⁷⁶.

Важный вклад в доказательство перенормируемости объединенных теорий слабого и электромагнитного взаимодействий внесли работы Фаддеева и Попова, которые развивали квантовую теорию калибровочных полей.

В объединенной теории слабого и электромагнитного взаимодействий ранее существовавшие описания электромагнитного взаимодействия, а также слабого взаимодействия, определяемого заряженными токами, остались неизменными. Новым элементом теории явилось предсказание нейтральных слабых токов с вполне определенной константой взаимодействия. Эти токи обуславливают такие процессы, как рассеяние мюонного нейтрино на электронах и протонах $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} + e^{-}$ и $\nu_{\mu} + p \rightarrow \nu_{\mu} + p$.

Так как в объединенных схемах фотон и W -бозон на уровне калибровочной симметрии (до ее спонтанного нарушения) входят в одно семейство, то массы W и Z -бозонов определяются константой электромагнитного

⁷⁶ Вайнберг С. Объединенные теории взаимодействий элементарных частиц. УФН, 1976, 118, с. 505.

взаимодействия. Это приводит к тому, что при больших энергиях и больших переданных импульсах интенсивности слабого и электромагнитного взаимодействий сравниваются. Поэтому при рассмотрении такого чисто электродинамического процесса, как рассеяние электронов электронами, необходимо учитывать эффекты слабого взаимодействия.

Экспериментальное открытие в 1973 г. слабых нейтральных токов явилось важным подтверждением справедливости тех идей, которые были положены в основу теории Вайнберга—Салама. В ЦЕРНе была зарегистрирована реакция $\nu_{\mu} + N \rightarrow \nu_{\mu} + \text{адроны}$, в которой нейтрино не превращается в заряженный лептон, как это имеет место 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 102 нейтринных события без мюонов в конечном состоянии при 428 нейтринных событий, 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»⁷⁷.

Открытие нейтральных слабых токов имеет очень большое значение и свидетельствует о неполноте «стандартной» теории слабого взаимодействия Маршака—Судершана, Фейнмана—Гелл-Мана, в которой нейтральным токам нет места.

Заметим, что поиски нейтральных слабых токов

⁷⁷ Клайн Д., Манн А., Руббиа К. Обнаружение нейтральных слабых токов. УФН, 1976, 120, с. 97.

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 тщательные экспериментальные 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 слабых нейтральных токов. Клайн, Манн и Руббия, открыватели нейтральных токов, писали впоследствии: «... первый цикл нейтральных экспериментов в Брукхейвене и ЦЕРНе не привел к обнаружению событий, вызванных нейтральными токами. В некоторых случаях даже утверждалось, что нейтральные токи весьма маловероятны. В сочетании с безрезультатными экспериментами с распадами странных частиц эти выводы, казалось, подтверждали полное отсутствие нейтральных слабых токов. Как следствие этого, в конце 60-х годов считалось практически достоверным, что либо нейтральных слабых токов совсем нет в природе, либо они проявляют себя в исключительно редких случаях»⁷⁸.

И тем не менее нейтральные токи были открыты при взаимодействии нейтрино с нуклонами, причем вероятность процессов, которые обусловлены нейтральными слабыми токами, составляет приблизительно одну треть от вероятности процессов, которые обусловлены заряженными слабыми токами. Несколько позднее было обнаружено рассеяние мюонного нейтрино и антинейтрино на электронах, $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ и $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$, которое полностью определяется нейтральными токами. В 1976 г.

⁷⁸ Клайн Д., Манн А., Руббия К. Обнаружение нейтральных слабых токов. УФН, 1976, 120, с. 97.

Райнес 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 нейтронов, образующихся в атомном реакторе. Энергии антинейтрино в этом эксперименте не превышали 10 МэВ. Зарегистрировав рекордно малые сечения порядка 10^{-45} см², Райнесу удалось показать, что процесс $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$ определяется одновременным вкладом как заряженных слабых токов, так и нейтральных слабых токов.

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

Нейтральные слабые токи в теории Вайнберга—Салама характеризуются фундаментальным параметром θ_W , иazyваемым углом Вайнберга. Этот угол определяет отношение масс заряженного (W) и нейтрального (Z) промежуточных векторных бозонов. Величина θ_W в настоящее время не может быть найдена теоретически, и поэтому она определяется из экспериментальных данных относительно рассеяния нейтрино (или антинейтрино) электронами и нуклонами. Очень важно, что значения θ_W , найденные из разных реакций взаимодействий нейтрино (с различными энергиями), удивительным образом совпадают друг с другом, так что $\sin^2 \theta_W = 0,20 \pm \pm 0,03$, что близко к значению $1/5$.

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 элект-

тромагнитного механизма должна привести к разнообразным эффектам несохранения пространственной четности. 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 экспериментальные методы, существующие в атомной физике, позволят обнаружить их присутствие. Эксперименты по поиску таких эффектов в настоящее время уже увенчались успехом.

Из существования нейтральных слабых токов не вытекает однозначно вывод о справедливости теории Вайнберга—Салама. Предстоит еще выполнить большую работу по изучению свойств этих токов, прежде чем удастся установить вид взаимодействия, определяемого нейтральными слабыми токами.

Несмотря на явный успех теории Вайнберга—Салама, особенно наглядный в связи с проблемой перенормируемости теории, она не дает ответа на целый ряд важнейших проблем физики слабого взаимодействия. Остается, к примеру, непонятной природа нарушения CP -инвариантности в распадах каонов. Другая проблема связана с подавлением вероятностей слабых процессов с изменением странности по сравнению с вероятностями процессов, в которых странность адронов не изменяется. Это подавление в настоящее время описывается феноменологически введением так называемого угла Кабиббо, но физические причины, лежащие в основе введения этого угла, в настоящее время не установлены. Существуют проблемы многообразия калибровочных теорий, которые претендуют на единое описание слабого и электромагнитного взаимодействий элементарных частиц. Дело в том, что теория Вайнберга—Салама является простейшей схемой. Возможны и другие схемы, отличающиеся сортом и числом новых гипотетических частиц, которые приходится вводить.

Резюмируя сложившуюся в настоящее время ситуацию в физике слабого взаимодействия, Фейнман говорил: «Люди бились над тем, как фиксировать теорию слабых взаимодействий, в частности, как урегулировать проблему расходимостей. (Они начинают оттуда). Способ, которым они думали это сделать, заключается в требовании, чтобы теория была сходящейся. Идея, как достичь этой цели, состоит в построении некоторых новых диаграмм для вычисления расходимостей. Это оказывается возможным, если в теорию глубоко внедрены определенные симметрии. Они называются калибровочными симметриями. Эти теории обладают одним дополнительным свойством, вытекающим из них. Они позволяют пытаться построить симметрию слабых и электромагнитных взаимодействий и объединить их. Мы не знаем, связаны ли взаимодействия. Но возможная связь электромагнитных и нейтринных экспериментов — приятная вещь. Конечно, возникает вопрос: «Помогает ли нам эта попытка избавиться от расходимостей в каком-то другом месте?». Я ставлю этот вопрос, потому что по опыту знаю, если вы на правильном пути, вы получаете больше, чем закладываете. Когда строилась калибровочная теория, было желание сделать ее сходящейся. Руками были вложены две вещи — симметрия и характер сходимости — с тем, чтобы эти два условия были выполнены, но ничего более не проистекало, за исключением нейтральных токов. Никакого понимания угла Кабиббо, никакого понимания малой разницы масс K_1^0 и K_2^0 и т. д. С помощью этого шага мы не получили ключей ни к одной фундаментальной трудности нашей теории. Имеется очень, очень много калибровочных теорий, люди пробуют разные типы симметрии; идея очень хорошая, и может быть правильная, но следует помнить, что выхода нового нет»⁷⁹.

⁷⁹ Фейнман Р. Что мы знаем о слабых взаимодействиях. УФН, 1976, 119, с. 689.

«Очарованный» кварк и шармоний

В конце 1974 г. двумя группами экспериментаторов одновременно было сделано важнейшее открытие в физике элементарных частиц: открыта новая частица — резонанс с массой, равной 3,1 ГэВ (превышающей три массы протона).

Наиболее удивительным свойством этого резонанса оказалась его малая ширина распада, которая равна всего 70 кэВ, что соответствует времени жизни порядка 10^{-20} с, в то время как время жизни других адронных резонансов составляет 10^{-24} с. Необычность открытой частицы подчеркивалась еще тем обстоятельством, 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.

«История открытия резонанса довольно интересна. Группа Тинга начала опыты с весны 1974 г. Эксперимент, который она вела, был весьма трудным: достаточно сказать, что при столкновении протона с ядром Ве вероятность рождения электронно-позитронной пары в интересующей области эффективных масс составляла 10^{-8} от полной вероятности неупругого столкновения. Ранее эксперименты подобного рода в реакции $p + \text{ядро} \rightarrow \mu^+ + \mu^- + \text{«все»}$ проводились группой Ледермана и дали ряд интересных результатов: была выяснена зависимость сечения мюонных пар от эффективной массы пары и обнаружено «плечо» в спектре масс мюонных пар в области 3—4 ГэВ. Никаких резонансов в спектре масс мюонных пар группа Ледермана не видела. Экспериментальная установка группы Тинга имела, однако, существенное преимущество перед установкой Ледермана: ее разрешение по энергии регистрируемых пар было значительно лучшим, что способствовало поискам уз-

ких резонансов. К осени группа Тинга набрала достаточное количество событий (около 500 к концу октября), находившихся в основном в узкой области спектра эффективных масс e^+e^- -пар вблизи 3 ГэВ.

В Стэнфорде (SLAC) группа Рихтера, Перла, Гольдхабера, Пановского и др. на ускорителе со встречными электронными и позитронными пучками СПИР (SPEAR) вела в 1973—1974 гг. измерения сечения аннигиляции электронно-позитронных пар в сильновзаимодействующие частицы — адроны, которые дали ряд ценных результатов. До июня 1974 г. СПИР работал на энергии каждого из пучков 2,5 ГэВ, в июне он был остановлен для переоборудования и повышения энергии до 4—5 ГэВ и вновь введен в действие в сентябре. Группа Рихтера решила повторить свои эксперименты, прерванные в июне, с более частым шагом по энергии. Начав измерения 9 ноября, она довольно быстро обнаружила возрастание сечения аннигиляции $e^+e^- \rightarrow$ адроны в области 3,1—3,2 ГэВ, а затем, доведя точность измерения энергии встречных пучков до 0,1%, 10 ноября несомненно впервые наблюдала резонанс — более чем десятикратное (а через несколько часов после улучшения точности до 0,1% и стократное) возрастание сечения.

Два сообщения об открытии новой частицы были получены редакцией «Physical Review Letters» одно за другим — 12 и 13 ноября. Группа Тинга назвала новую частицу J , группа Рихтера — ψ . Когда об открытии J/ψ частицы стало по телефону известно в Европе, группа итальянских физиков, работающих на ускорителе со встречными e^+e^- -пучками ADONE во Фраскати (Италия), подняла энергию ускорителя до $2 \times 1,55 = 3,1$ ГэВ, до величины, необходимой для рождения резонанса (ранее ускоритель работал на энергии $2 \times 1,5 = 3,0$ ГэВ), и в течение нескольких дней также наблюдала этот резонанс в той же реакции, $e^+e^- \rightarrow$ адроны, где он наблюдался в Стэнфорде. Свое сообщение итальянские физики

продиктовали в редакцию «Physical Review Letters» по телефону. В результате в номере «Physical Review Letters» от 2 декабря 1974 г. появилось сразу три статьи с сообщениями об открытии новой частицы. Вскоре на встречных электронно-позитронных кольцах в Стэнфорде была открыта еще одна частица, сходная с предыдущей, ее масса оказалась равной 3,9 массы протона (3,7 ГэВ), а ширина порядка нескольких сотен кэВ. Обе открытые частицы, поскольку они наблюдались как резонансы в системе e^+e^- , должны иметь целый спин, т. е. являться бозонами»⁸⁰.

В настоящее время общепринятое объяснение природы ψ -мезонов основано на гипотезе существования наряду со «стандартными» тремя u , d и s -кварками еще четвертого кварка, названного c -кварком. От известных ранее кварков c -кварк отличается значением нового квантового числа, названного шармом. Как и странность, шарм является аддитивным квантовым числом, которое сохраняется в сильном и электромагнитном взаимодействиях, но не сохраняется в слабом взаимодействии. Шарм u , d и s -кварков равен нулю, шарм c -кварка равен $+1$. Поэтому c -кварк получил название шармового (или очарованного) кварка. Все известные до открытия ψ -частиц адроны — мезоны и барионы — составлены из обычных кварков, поэтому их шарм равен нулю. Следовательно, при столкновениях обычных адронов шармовые частицы (с отличным от нуля шармом) должны рождаться парами.

Согласно современным представлениям ψ -частицы составлены из шармового кварка и шармового антикварка, поэтому их шарм равен нулю. Но в отличие от обычных адронов ψ -частицы являются частицами со скрытым шармом.

⁸⁰ Захаров В. И., Иоффе Б. Л., Окунь Л. Б. Новые элементарные частицы. УФН, 1975, 117, с. 227.

Система, состоящая из шармовых кварка и антикварка, получила название шармония (по аналогии с позитронием — системы, состоящей из электрона и позитрона). Масса шармового кварка должна быть существенно больше масс обычных кварков, чтобы объяснить большую массу ψ -частиц.

Имеющиеся экспериментальные данные относительно различных распадов ψ -мезонов позволили установить, что их спин равен единице, а пространственная четность — отрицательна. Удалось также определить величину изотопического спина мезонов: он оказался равным нулю. Эти квантовые числа согласуются с предположением относительно шармониевой кварковой структуры ψ -мезонов. Единичный спин и отрицательная четность означают, что система шармовых кварка и антикварка, образующих шармоний, находится в состоянии с нулевым орбитальным моментом, причем спины кварка и антикварка, равные $1/2$, направлены параллельно.

Очевидно, что у шармония 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 системы должна быть положительной. Состояния шармония с такими квантовыми числами были обнаружены на опыте.

Существование кварка с отличным от нуля шармом должно приводить к существованию (наряду с частицами со скрытым шармом) мезонов и барионов с отличным от нуля шармом. Например, из шармовых кварка и нестранных антикварков можно «составить» нейтральный и положительно заряженный мезоны, шарм кото-

рых равен единице (их обозначают через D^+ и D^0). Так как квантовое число-шарм сохраняется в сильном и электромагнитном взаимодействиях, то шармовые мезоны и барионы должны рождаться парами в этих взаимодействиях.

Наиболее подходящими для рождения шармовых мезонов являются реакции на встречных электронно-позитронных пучках, например процесс $e^+ + e^- \rightarrow D^+ + D^-$. Так как шарм не сохраняется в слабом взаимодействии, то D -мезоны должны быть и нестабильными частицами и распадаться на обычные частицы, причем при распадах шармовых мезонов должны в подавляющем числе случаев образовываться странные частицы, например в распадах: $D^+ \rightarrow K^- + \pi^+ + \pi^+$, $D^+ \rightarrow K^- + \pi^+ + \pi^+ + \pi^0$, в которых странность не сохраняется, а распады без изменения странности должны быть подавлены.

Шармовые 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 они равны двум нуклонным массам. (Об открытии этих мезонов было сообщено на XVIII Международной конференции по физике высоких энергий, проходившей в июле 1976 г. в Тбилиси).

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

Дополнительные указания относительно существования шармовых частиц были получены также в нейтринных реакциях, когда в 1975 г. удалось зарегистрировать процессы образования двух заряженных лептонов (дидептонные события):

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + \mu^+ + X,$$

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X,$$

где X означает нерегистрируемую совокупность частиц (в которой обязательно должно присутствовать нейтрино или антинейтрино, если имеет место закон сохранения лептонного числа).

Особенностью этих процессов явилось то, что энергия μ^- -мезона (μ^+ -мезона) в первой (второй) реакции в среднем в семь раз превышала энергию μ^+ (μ^-)-мезона. Образование дилептонов происходило приблизительно в 100 раз реже, чем образование одного лептона.

Дилептонные события можно интерпретировать как образование шармовых частиц при взаимодействии нейтрино с нуклонами с последующим их распадом, при котором образуется мюон. Так как — согласно теоретическим оценкам — время жизни шармовых частиц не превышает 10^{-12} , то распад их практически должен происходить на ничтожно малом расстоянии от точки рождения.

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

«Одной из проблем,— пишет Глэшоу,— является предполагаемая кварково-лептонная симметрия, которая ведет к гипотезе очарования. Как кварки, так и лептоны, все являющиеся элементарными частицами, могут быть подразделены на две подгруппы. В одну группу

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 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 ответа»⁸¹.

В последнее время получены указания о существовании тяжелого заряженного лептона с массой порядка двух нуклонных масс. Согласно кварк-лептонной симметрии этому новому лептону должен соответствовать новый кварк с новым квантовым числом. Существование еще одного кварка должно привести к существованию нового семейства адронов — мезонов и барионов. В этой связи интересно отметить, что в 1963 г. Чу, Гелл-Ман и 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

⁸¹ Глэшоу Ш. Кварки с цветом и ароматом. УФН, 1976, 119, с. 715.

к подобной ситуации по отношению к какому-то совершенно новому квантовому числу»⁸².

Эти слова оказались пророческими: новым квантовым числом оказался шарм.

Сходные мысли высказал в 1964 г. Салам на Международной конференции по физике высоких энергий в 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»⁸³.

Кроме самостоятельного значения, открытие шармовых частиц, так же как и открытие нейтральных слабых токов, было очень важно для подтверждения справедливости объединительных схем слабого и электромагнитного взаимодействий. Именно с помощью шармового 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 $K^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$, $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \nu$, 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 $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \nu$ протекают с гораздо

⁸² Чу Дж., Гелл-Ман М., Розенфельд Л. Сильно взаимодействующие частицы.— Кн.: Над чем думают физики. Элементарные частицы.— М.: Наука, 1965, с. 108.

⁸³ Салам А. Симметрия сильных взаимодействий.— Кн.: Фундаментальные частицы.— М.: Мир, 1965, с. 456.

меньшими вероятностями. Чтобы устранить это противоречие, необходимо было ввести шармовый 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 ψ -частиц Тингу и Рихтеру в 1976 г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

Цветные кварки и глюоны

До сих пор мы считали, что все адроны построены из четырех кварков u , d , s и c и соответствующих антикварков \bar{u} , \bar{d} , \bar{s} и \bar{c} . Но если кварки — реальные физические частицы, обладающие спином $1/2$, то такое построение невозможно, ибо оно противоречит принципу Паули. Действительно, рассмотрим, например, Ω^- -гиперон. Он должен состоять из трех s -кварков с параллельными спинами, а волновая функция его должна быть симметричной относительно перестановок кварков. Между тем, такая ситуация запрещается принципом Паули.

Это противоречие может быть устранено, если предположить, что три s -кварка в Ω^- -гипероне чем-то отличаются друг от друга. Таким образом, мы приходим к предположению, что кварк — каждый кварк, а не только s -кварк — может находиться в трех различных состояниях, различающихся некоторым новым квантовым числом, которое получило название цвета (Гринберг и Н. Н. Боголюбов с соавторами).

Иными словами, следует говорить о «цветных» кварках, и цветов должно быть три, например: красный, желтый и синий. Можно сказать, что для устранения противоречия с принципом Паули необходимо иметь не четыре, а двенадцать кварков. При такой ситуации тип

кварка (т. е. u , d , s и c) можно обозначать термином «аромат» и говорить, что кварки отличаются «ароматом» и «цветом».

При этом адроны составлены из кварков таким образом, что все адроны — мезоны и барионы — являются «бесцветными» или «белыми» (или, как еще говорят, цветными синглетами). Это означает, что каждый из трех кварков, образующих барион, должен быть представлен в барионе во всех трех цветовых состояниях, а каждый мезон должен быть составлен из всех возможных цветных пар кварка и соответствующего антикварка. Таким образом, возникает своеобразная цветная SU_3 -симметрия для кварков.

Естественно задать вопрос: как взаимодействуют между собой цветные кварки? Получить ответ на него помогло явление глубоконеупругого рассеяния электронов нуклонами. В кварк-партонной модели этого явления предполагается, что импульс нуклона должен быть распределен между партонами — кварками, из которых составлен нуклон. Если импульс всего нуклона считать равным единице, то из данных о глубоко неупругом рассеянии электронов протонами и нейтронами можно определить долю импульса, переносимого кварками. При этом оказывается, что суммарный импульс кварков меньше единицы. Так как электроны могут рассеиваться только на заряженных частицах, то из глубокого неупругого рассеяния электронов нуклонами можно определить, строго говоря, только долю импульса, уносимую заряженными частицами, т. е. кварками. Можно предположить, что оставшаяся доля импульса нуклона приходится на некоторые гипотетические, обязательно электрически нейтральные частицы. Эти частицы были названы глюонами (от английского слова «glue» — клей, чтобы подчеркнуть основную их функцию — «склеивать» вместе кварки). Именно глюоны ответственны за взаимодействие кварков друг с другом.

«Полный импульс протона равен 1,— разъясняет эту гипотезу Фейнман,— так что остальной импульс переносится бог знает чем, называемым глюонами. Мы не знаем, что переносит остальной импульс, но не такое уж безумство утверждать, что нечто это делает. Если весь импульс сидел на кварках, мы были бы несколько обеспокоены, потому что для взаимодействующих кварков, удерживающихся как-то вместе, и, как показывают распределения, более или менее релятивистских (для нерелятивистской системы, рассматриваемой в движении, распределение по импульсам имело бы очень узкий пик), имеется некоторое запаздывание во взаимодействии в поперечном направлении. Одна частица взаимодействует с другой на расстоянии не мгновенно, так что одна частица теряет импульс раньше, чем другая его приобретает. Таким образом, временно имеется недостающий импульс. Он обычно описывается как импульс поля, импульс «фотонов», которыми производится обмен. Итак, в среднем импульс взаимодействующих частей объекта не может быть равен полному импульсу. Поэтому не невероятно, что полный импульс кварков меньше единицы. Фактически отсюда следует, что имеется нечто помимо кварков. Имеется еще нечто, удерживающее кварки вместе. В настоящее время мы не имеем экспериментальных указаний, что это такое конкретно. Их называют «глюонами», они удерживают части вместе, вот и все, что мы знаем»⁸⁴.

Чтобы цветные кварки могли взаимодействовать с глюонами, последние также должны быть цветными. Если имеет место цветная SU_3 -симметрия, то цветные глюоны должны находиться в 8-и различных состояниях, т. е. должно существовать 8 независимых глюонных полей. «Когда кварк испускает или поглощает глюон,

⁸⁴ Фейнман Р. Что мы знаем о слабых взаимодействиях. УФН, 1976, 119, с. 689.

он изменяет свой цвет, но не меняет аромат. Например, испускание глюона преобразует красный u -кварк в синий или желтый u -кварк, но оно не может трансформировать его в d или s -кварк любого цвета. Так как цветные глюоны являются квантами сильного взаимодействия, то отсюда следует, что цвет — это наиболее важное свойство кварков в таких взаимодействиях. Действительно, описывая взаимодействия, которые включают в себя только сильные силы, можно не интересоваться ароматом кварков»⁸⁵.

Гипотеза цветных кварков, взаимодействующих с безмассовыми цветными глюонами, обладает рядом привлекательных черт. Прежде всего в рамках этой гипотезы находит свое естественное объяснение то обстоятельство, что все известные адроны должны быть «белыми», причем наиболее легкими должны быть трехкварковые системы — барионы и кварк-антикварковые системы — мезоны.

В кварк-глюонной схеме сильное взаимодействие определяется процессами испускания и поглощения цветных глюонов цветными кварками. Именно эти кварк-глюонные процессы являются самыми элементарными в теории сильного взаимодействия, а не процессы испускания мезонов нуклонами, как предполагали ранее. Поэтому теорию сильного взаимодействия, основанную на представлении о цветных кварках и глюонах, называют квантовой хромодинамикой.

Процесс взаимодействия пионов с нуклонами выглядит теперь как вторичный эффект взаимодействия довольно сложных систем — нуклонов и пионов. «Более известное сильное взаимодействие адронов, — разъясняет Глэшоу, — (то, которое связывает протоны и нейтроны в ядре) — проявление тех же фундаментальных сил,

⁸⁵ Глэшоу Ш. Кварки с цветом и ароматом. УФН, 1976, 119, с. 715.

по взаимодействие бесцветных адронов — не более чем слабый остаток от основного взаимодействия цветных кварков. Точно так же, как Ван дер Ваальсовы силы между молекулами — только слабый след электромагнитных сил, которые притягивают электроны к ядру; сильные силы, действующие между адронами, — лишь слабый след сил, действующих внутри отдельного адрона»⁸⁶.

Между глюонами, носителями сильного взаимодействия, и фотонами, носителями электромагнитного взаимодействия, имеется ряд общих черт. Прежде всего массы фотона и глюонов равны нулю; кроме того, спин глюонов, как и спин фотона, равен единице. Но электромагнитное взаимодействие обладает свойством калибровочной инвариантности, электромагнитное поле является калибровочным полем. Возникает поэтому естественное желание считать цветную SU_3 -симметрию калибровочной симметрией. Тогда глюоны должны будут описываться калибровочными полями. Так как масса глюонов равна нулю, то цветная калибровочная симметрия является точной, ненарушенной симметрией, как и калибровочная симметрия электромагнитного взаимодействия.

Между электромагнитным полем и полями глюонов существует и одно важное принципиальное отличие, заключающееся в том, что фотоны могут быть испущены только заряженными частицами и не могут быть испущены фотонами. Цветные глюоны могут быть испущены не только цветными кварками, но и цветными глюонами. Возникает как бы «светящийся» свет! Математически это различие сводится к тому, что уравнения Максвелла линейны по полю, аналогичные же уравнения для

⁸⁶ Глэшоу Ш. Кварки с цветом и ароматом. УФН, 1976, 119, с. 715.

полей глюонов нелинейны. Поля глюонов в отличие от электромагнитного поля, называют неабелевыми калибровочными полями.

Неабелевы калибровочные поля обладают удивительным свойством: сила взаимодействия цветных кварков с цветными глюонами уменьшается с ростом энергии, т. е. с уменьшением расстояния. В квантовой электродинамике имеет место противоположная картина. Это замечательное свойство неабелевых калибровочных полей, получившее название асимптотической свободы, позволяет объяснить явление глубоко неупругого рассеяния электронов нуклонами.

Действительно, при больших переданных импульсах кварки, образующие нуклон, ведут себя как свободные невзаимодействующие частицы. А так как кварки являются точечными частицами, то в результате и возникает масштабная инвариантность глубокого неупругого рассеяния.

Если взаимодействие между кварками ослабевает с уменьшением расстояния, то можно предположить, что с увеличением расстояния между кварками их взаимодействие будет усиливаться. «Развитие асимптотически свободных калибровочных теорий,— пишет Вайнберг,— уже привело Гросса, Вильчека, Политцера, Джорджи, Глэшоу, Куин и меня к ряду интересных выводов. Если эффективное взаимодействие ослабевает при высоких энергиях и на малых расстояниях, то оно должно становиться большим при малых энергиях и на больших расстояниях. Возможно, это объясняет, почему элементарные частицы не могут быть раздроблены на кварки: когда кварк начинает удаляться от содержащей его частицы, силы могут беспредельно возрасть. Возможно притяжение при сильных взаимодействиях в действительности того же порядка величины, что и при слабых и электромагнитных взаимодействиях, сильными они кажутся лишь потому, что наши эксперименты вы-

полняются при относительно низких энергиях, соответствующих большим расстояниям»⁸⁷.

Усиление взаимодействия кварков на больших расстояниях приводит, таким образом, к «запиранию» кварков внутри адрона, возникает как бы кварковая «тюрьма» (она называется инфракрасной «тюрьмой», так как большие расстояния отвечают малым энергиям, т. е. инфракрасной области).

Важно подчеркнуть, что в калибровочных теориях с запиранием кварков утрачивают прежний смысл понятия элементарной и составной частиц. В атомной физике понятие составного атома, образованного ядром и электронами, прежде всего означает, что, сообщив некоторую энергию атому, его можно расщепить на составные части: электроны и ядро. Составное ядро, в свою очередь, можно расщепить на отдельные нуклоны и убедиться таким образом, что ядро составлено из протонов и нейтронов. Опираясь на эти рассуждения, можно поставить вопрос, «...является ли протон элементарной частицей или же его можно разделить. Единственный способ разделения протона состоял бы в столкновении его при крайне высоких энергиях с другой частицей. Тогда действительно, поскольку протон будет расколот, может возникнуть много кусков, однако они будут не меньше самого протона. Поэтому более правильным было бы говорить о порождении новых частиц не путем деления, а из-за большой кинетической энергии. Возвращаясь к тому же вопросу о том, из чего состоит протон, можно сказать: из любого числа других частиц, включая и сам протон, либо просто из энергии или из материи»⁸⁸.

Несмотря на то, что кварки и глюоны не наблюдались как реальные частицы, концепция цвета, приводя-

⁸⁷ Вайнберг С. Объединенные теории взаимодействий элементарных частиц. УФН, 1976, 118, с. 505.

⁸⁸ Гейнзенберг В. Развитие понятий в физике XX века. Вопросы философии, 1975, № 1, с. 70.

щая к устроению числа кварков, может быть непосредственно проверена на опыте. Так как кварки определенного аромата имеют одинаковые заряды независимо от цвета, то увеличение числа кварков за счет введения цвета должно проявиться в процессах электромагнитного взаимодействия адронов. Оказывается, что вероятность распада нейтрального пиона на два фотона, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, в модели цветных кварков должна в три раза превышать вероятность этого распада, вычисленную в модели обычных кварков. Измеренное на опыте значение вероятности распада $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ согласуется с предсказанием модели цветных кварков.

Вероятность образования адронов при аннигиляции электроннопозитронной пары на встречных пучках, $e^+ + e^- \rightarrow$ адроны, в кварковой модели определяется вероятностью образования различных пар кварков при взаимодействии электронов и позитронов, $e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q}$ (q -кварк), а эта вероятность пропорциональна квадрату электрического заряда кварка. Поэтому вероятность образования адронов на встречных пучках должна быть пропорциональна сумме квадратов электрических зарядов всех кварков. Имеющиеся экспериментальные данные относительно реакции $e^+ + e^- \rightarrow$ адроны говорят в пользу введения цветных кварков.

Заканчивая обзор развития теории сильного взаимодействия, можно сказать, что наиболее мощными теоретическими методами исследования свойств сильного взаимодействия является теория поля, теория S -матрицы и теория групп. Теория поля, которая сначала была отвергнута из-за большой константы взаимодействия, в последнее время снова получила развитие на основе концепции калибровочных симметрий. Наиболее эффективный метод теории поля, основанный на теории возмущений, нашел свое оправдание в гипотезе асимптотической свободы, когда константа взаимодействия кварков с глюонами становится малой. Метод S -матрицы

позволяет получать наиболее общие результаты, не прибегая к теории возмущений. Метод теории групп позволяет эффективно описывать те следствия, которые вытекают только из свойств симметрии. Однако «ни один из этих методов не заслуживает названия «теории» — пишет Дайсон,— если под термином «теория» подразумевать нечто подобное великим теориям прошлого, например, общую теорию относительности или квантовую механику. Упомянутые методы слишком неясны, слишком частны или слишком фрагментарны. Разумеется, это мое сугубо личное мнение. Если даже они успешно решают намеченные задачи, все равно не смогут удовлетворить эстетическим требованиям, предъявляемым к теории. Я не могу не поддаться искушению назвать эти методы «снежными мостиками над пропастями незнания», чтобы описать свое чувство неудовлетворенности. Этой образной фразой удобно характеризовать теоретические идсы, не вызывающие симпатий. Следует, однако, помнить, что впервые такую характеристику использовал Карл Пирсон в горячем споре против закона наследственности Менделя»⁸⁹.

Тем не менее исследования последних лет дают некоторые основания для оптимизма. Прежде всего успешная попытка объединить слабое и электромагнитное взаимодействия элементарных частиц на основе калибровочной симметрии, которая подтверждена экспериментальными открытиями слабых нейтральных токов и шармовых частиц, делает обоснованной надежду включить в объединенную теорию также и сильное взаимодействие. Ведь сильное взаимодействие имеет ряд общих черт со слабым и электромагнитным взаимодействиям — оно определяется обменом векторной частицей — глюоном, и слабое и электромагнитное взаимодействия также определяются обменами векторными

⁸⁹ Дайсон Ф. Математика и физика, УФН, 1965, 85, с. 351.

частицами. Константа сильного взаимодействия кварков с глюонами может оказаться малой и сравнимой по величине с константами слабого и электромагнитного взаимодействий. И, наконец, как уже отмечалось, для сильного взаимодействия имеет место точная калибровочная SU_3 -симметрия. Поэтому можно думать, что физика элементарных частиц вступает в новый и важный период своего развития.

Футурология в физике

Шармовые частицы были открыты в 1974 г. И неожиданно. Таким образом, «создание» новых элементарных частиц продолжается и в настоящее время. Пока не видно конца этому процессу. Это значит, что все время поступает новая и новая информация о свойствах субъядерной материи — информация, которая должна и будет использоваться будущей теорией фундаментальных взаимодействий. Но новой теории пока нет, и представляется довольно очевидным, что для создания основополагающих новых физических теорий все еще не хватает информации о свойствах субъядерной материи.

Эта информация получается в основном с помощью мощных ускорителей заряженных частиц — главного экспериментального орудия физики элементарных частиц. Мощные ускорители представляют собой очень дорогостоящие машины, сооружение которых требует больших материальных и людских ресурсов. И здесь мы подходим к довольно тонкому и трудному вопросу. Если ускорители — очень дорогие машины, то какие ускорители нужно строить, какие эксперименты на них ставить, нужно ли ускорители строить в рамках одного государства, или целесообразнее иметь интернациональные машины. Таким образом, мы естественно приходим к проблеме прогнозирования в области физики элементарных частиц, являющейся составной частью более общей проблемы прогнозирования в области фундаментальных знаний.

Возникает прежде всего вопрос: можно ли делать разумные конкретные предсказания о будущем передового фронта науки, к которому относится физика элементарных частиц?

Вопрос этот крайне сложен. Еще Максвелл писал, что «... мы, которые дышим воздухом нашего века и знаем только характеристики современного мышления — не можем предсказать общий тон науки будущего, не можем предвидеть тех открытий, которые принесет это будущее»¹.

Конкретные предсказания о будущем передового фронта науки часто делаются на основании интуиции и внутренней убежденности, которые не всегда соответствуют логике развития науки. Можно привести много примеров, иллюстрирующих эту мысль. Но, пожалуй, самым удивительным является выступление Резерфорда на съезде Британской ассоциации содействия развитию науки в сентябре 1933 г. Тогда Резерфорд заявил: «Всякий, кто ожидает получения энергии в результате трансформации атомов, говорит вздор»².

Кстати, это выступление последовало после открытия нейтрона. Не все физики разделяли мнение такого признанного эксперта ядерной физики, каким был Резерфорд, о невозможности использования ядерной энергии. Совершенно неожиданную реакцию вызвала речь Резерфорда у американского физика Сциларда: «Его (т. е. Резерфорда) слова заставили меня задуматься над этой проблемой. В октябре 1933 г. мне пришла в голову мысль, что цепная реакция могла бы стать реальностью, если бы удалось найти элемент, который, поглощая один нейтрон, эмитировал бы два других. Сначала мне казалось, что таким элементом может быть бериллий, и затем — некоторые другие элементы, вклю-

¹ Максвелл Д. К. Статьи и речи.— М.: Наука, 1968, с. 16.

² Юнг Р. Ярче тысячи солнц.— М.: Госатомиздат, 1961, с. 47.

чая и уран. Но по тем или иным причинам критический эксперимент так и не был мною осуществлен»³.

Даже после открытия деления урана Бор, как вспоминает Вигнер, не верил в возможность освобождения ядерной энергии: «В начале 1939 г. Нильс Бор указывал на 15 веских доводов, в соответствии с которыми, по его мнению, практическое использование процесса деления было невозможно»⁴.

Можно привести также целый ряд неудачных прогнозов не только в области науки, но и в области техники. Так, в 1940 г. Национальная академия наук США создала специальную комиссию для оценки перспективности газовой турбины. После тщательного и продуманного анализа комиссия заключила, что удельный вес газовых турбин должен равняться 6—7 кг на лошадиную силу, т. е. они должны значительно уступать двигателям внутреннего сгорания, удельный вес которых составлял всего 0,5 кг на лошадиную силу. Комиссия, в которую входили такие известные специалисты, как фон Карман, Кеттеринг, Милликен, Мейсон, Кристи и Маркс, ошиблась более чем на порядок. Фактически спустя всего год в Англии уже появилась первая газовая турбина, а удельный вес газовых турбин составляет всего 0,2 кг на лошадиную силу.

В 1956 г. королевский астроном Вулли, являвшийся консультантом английского правительства, по проблемам исследования космоса, заявил: «Космические полеты — это совершеннейшая чепуха»⁵. Заявление было сделано за год до запуска первого советского искусственного спутника Земли!

Не нужно, однако, думать, что прогнозы всегда были ошибочными. В истории науки известны случаи, когда

³ Юнг Р. Ярче тысячи солнц.— М. : Госатомиздат, 1961, с. 47.

⁴ Данин Д. Нильс Бор. Наука и жизнь, 1975, № 7, с. 84.

⁵ Эйрес Р. Научно-техническое прогнозирование и долгосрочное планирование.— М. : Мир, 1971, с. 19.

великие ее представители формулировали главные задачи, которые стояли перед наукой и ждали своего решения. Достаточно указать на знаменитую программу Гильберта — его 23 проблемы, которые он предложил в 1900 г. математикам XX века. Уже сама формулировка этих проблем сыграла важную роль в математике, так как будущее показало, что те из проблем, которые были решены, действительно представляют собой важные вехи в развитии математической науки. Очень существенным было то, что, формулируя свою программу, Гильберт сумел избежать субъективизма и основывался на реальном состоянии математики своего времени.

Хотя необходимость объективной оценки состояния науки для целей прогнозирования и очевидна сама по себе, — иначе попытка прогнозирования теряет смысл и может быть даже вредной, — эта необходимость была недавно вновь подчеркнута в специальном номере журнала «Курьер ЮНЕСКО», посвященном исследованию проблем будущего: «Футуролог является одновременно и судьей, и истцом. Даже если он и не таит злого умысла, ему все равно трудно подняться над собственными убеждениями, взглядами, предвзятыми мнениями, привитыми ему воспитанием и средой; ему трудно отрешиться от личного опыта или того, что почерпнуто им из литературы, — а то и другое отнюдь не всегда способствует развитию в человеке объективности»⁶.

В этой связи нельзя не упомянуть статью В. Л. Гинзбурга «Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными?»⁷, в которой содержится перечень важных физических задач, ждущих своего решения. Автор сделал очень полезное дело, собрав и прокомментировав эти пробле-

⁶ Курьер ЮНЕСКО. Исследование проблем будущего, 1971, № 4,

⁷ Гинзбург В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными? УФН, 1971, 103, с. 87.

мы, хотя они в большинстве своем относятся к компетенции существующей физической теории, и решение их вряд ли выведет теорию за существующие рамки. Однако нельзя согласиться с оценкой состояния современной физической науки, которая дается в статье Гинзбурга. Особенно это касается футурологических высказываний автора, объединенных под общим названием «О микрофизике вчера, сегодня и завтра». Смысл этих высказываний состоит в том, что «микрофизика» (так автор называет физику элементарных частиц), занимавшая, по словам автора, доминирующее место в физике и в естествознании вообще, потеряла свое место «навсегда, или, во всяком случае, очень надолго», так что «блистательный период в жизни микрофизики уже позади».

К иным выводам пришла специальная комиссия по прогнозированию физических проблем в США. Эта комиссия, состоящая из 19 компетентных экспертов — специалистов по разным областям физики, разделила все физические исследования на 69 элементов, причем в число элементов вносились также и крупные ускорители. Для оценки значимости различных элементов программы применялись три группы критериев — внутренние, внешние и структурные.

Внутренние критерии определяли степень фундаментальности элементов программы, т. е. вероятность открытия принципиально новых законов природы, широких обобщений. При этом внутренние критерии учитывали интересы ведущих ученых к тому или иному элементу программы.

Внешние критерии учитывали влияние данного элемента программы на развитие других наук (инженерного дела, медицины), возможность немедленного приложения, рост национального престижа.

И, наконец, структурные критерии учитывали эффективность использования материальных и людских ресурсов, обеспеченность научными кадрами, а также

значение данного элемента программы для поддержания необходимого уровня большого раздела физики.

Более конкретно внутренние критерии оценивали элементы программы, основываясь на следующих вопросах:

— в какой мере данная область физики созрела для исследований;

— в какой мере данная область физики направлена в сторону важнейших научных проблем, решение которых обещает привести к открытию новых разделов науки и к постановке новых научных вопросов для исследования;

— в какой мере данная область физики обладает потенциальной возможностью для открытия новых фундаментальных законов природы или же для существенного расширения области применимости известных законов;

— в какой мере данная область физики обладает потенциальной возможностью для открытия или развития широких обобщений фундаментального характера, которые могут оказаться твердой основой для атаки на большие разделы науки;

— в какой мере данная область физики привлекает наиболее способных ученых и студентов.

Внешние критерии для оценки различных элементов физической программы основывались на следующих вопросах:

— в какой мере данная область физики вносит вклад в прогресс других научных дисциплин путем передачи им своих концепций или инструментальных достижений;

— в какой мере данная область физики, заимствуя из смежных разделов науки понятия, технологию и методику, способствует их обогащению и развитию;

— в какой мере данная область физики вносит вклад в развитие технологии;

— в какой мере данная область физики вносит вклад

в инженерное дело, медицину, в прикладные науки, а также в обучение специалистов в этих областях;

— в какой мере данная область физики имеет немедленное применение;

— в какой мере данная область физики вносит вклад в национальную оборону;

— в какой мере активность данной области физики существенна для национального престижа и для международной кооперации в науке;

— в какой мере активность в данной области физики имеет непосредственное влияние на общественную систему образования.

Структурные критерии оценивали различные элементы физической программы, исходя из того:

— в какой мере требуется новая техника для прогресса в данной области физики;

— в какой мере требуется поддержка данной области физики — дополнительная по сравнению с текущим уровнем, — чтобы обеспечить необходимую научную отдачу;

— насколько эффективно используются ресурсы данной области физики;

— насколько квалифицированы и подготовлены специалисты в данной области физики;

— в какой степени сбалансированы существующая в настоящее время и предполагаемая в будущем потребности в специалистах в данной области физики с их текущим предложением;

— в какой мере поддержка данной области физики существенна для сохранения положения того более широкого раздела физики, частью которого является данный элемент программы.

Необходимость введения целой системы критериев для оценки значимости того или иного элемента программы вызвана большой сложностью и разветвленностью фронта современных физических исследований,

желанием получить сбалансированное представление о значимости различных областей физики, по возможности избежав субъективизма при оценке. Важным при таком подходе было то обстоятельство, что оценки специалистов того или иного раздела программы оказались довольно близкими.

По фундаментальным критериям первые пять мест в программе, как и следовало ожидать, заняли те элементы программы, которые связаны с физикой элементарных частиц. По внешним, т. е. прикладным, критериям, первые места заняли лазеры и мазеры, квантовая оптика, ядерная спектроскопия и термоядерные исследования.

Была сделана также попытка расставить элементы программы по объединенному признаку с учетом оценок одновременно по трем группам критериев. При этом внешним и внутренним критериям был присвоен одинаковый вес, а структурным критериям — одна треть веса от первых двух. В итоговом списке первое и третье места принадлежали лазерам и мазерам, а пять из восьми первых мест — физике элементарных частиц.

Роль мощных ускорителей

Возвратимся теперь к вопросу об ускорителях заряженных частиц.

Можно с уверенностью утверждать, что постройка более мощных ускорителей является неизбежной при попытках решить фундаментальные проблемы строения материи. Ибо «... ускорители высоких энергий,— как замечает Т. Ли,— это не просто дорогостоящие орудия физиков, они являются в настоящее время наиболее эффективными средствами изучения элементарных частиц с целью раскрытия фундаментальных принципов, лежащих в основе множества явлений природы»⁸.

⁸ Ли Т. О физике элементарных частиц. УФН, 1965, 86, с. 625.

Объективная необходимость создания все более мощных ускорителей связана с необходимостью изучать свойства фундаментальных взаимодействий на все более малых расстояниях. Вся история физики учит, что проникновение в область все меньших расстояний, т. е. переход ко все большим энергиям, сопровождалось открытием принципиально новых физических явлений. В свою очередь это всегда оказывало решающее влияние на другие разделы естествознания, на развитие техники и обогащало философское мышление.

Действительно, явления молекулярной физики разгрызаются на расстояниях 10^{-5} — 10^{-7} см, что соответствует энергиям порядка 1 эВ. Изучение атомных явлений привело к созданию квантовой теории, которая служит в настоящее время мощнейшим инструментом исследования всевозможнейших явлений во всех областях физики.

Переход к энергиям порядка 10 МэВ, т. е. на расстояния 10^{-11} см, привел к открытию рождения электронно-позитронных пар, т. е. к открытию взаимопревращаемости частиц и к открытию антиматерии. «Открытие антиматерии,— писал Гейзенберг,— привело к радикальным изменениям в фундаментальных понятиях атомной физики. Можно спорить о том, что оказало большее воздействие на создание по существу новой физической картины в нашем столетии — открытие ли Планком кванта действия или же открытие Дираком антиматерии»⁹.

Область ядерной физики раскрылась на расстояниях порядка 10^{-13} см. Поэтому свойства ядер и различных реакций стало возможным изучать после достижения энергий порядка 100—1000 МэВ.

И, наконец, мир адронов — странных частиц, мезонных и барионных резонансов был открыт на расстояни-

⁹ Гейзенберг В. Развитие понятий в физике XX века. Вопросы философии, 1975, № 1, с. 78.

ях порядка 10^{-13} — 10^{-15} см, что соответствует энергиям порядка 10 — 100 ГэВ. При таких энергиях было открыто большое число новых явлений.

Но природа фундаментальных взаимодействий остается еще в значительной мере непознанной, и только переход к более высоким энергиям позволит существенно продвинуться в понимании явлений, происходящих на очень малых расстояниях. Собственно говоря, уже давно известно, что изучение свойств материи на более малых расстояниях, т. е. при более высоких энергиях, всегда позволяло понять сущность явлений, происходящих на больших расстояниях, т. е. «этажом ниже». Так, например, молекулярные явления были более глубоко поняты после изучения атомного мира, а существенные сведения о свойствах ядер и о природе ядерных сил были получены только после открытия λ -мезона и исследования свойств адронов при высоких энергиях.

Но можно указать и целый ряд конкретных причин, которые заставляют переходить к более высоким энергиям. Рассмотрим, например, слабое взаимодействие. До сих пор природа этого взаимодействия остается непонятой. Известно только, что существующая четырехфермионная схема локального слабого взаимодействия приводит к сечениям, неограниченно растущим с ростом энергии. Сколь угодно долго такой рост продолжаться не может, так как при энергиях взаимодействующих частиц порядка 300 ГэВ (в их системе центра инерции) наступит противоречие с условием унитарности, которое должно выполняться для любой физической теории. Этой энергии соответствует длина порядка 10^{-17} см, которая имеет, по-видимому, фундаментальную природу, так как она связана с константой слабого взаимодействия. Поэтому вопрос о том, как будут себя вести сечения процессов, обусловленных слабым взаимодействием, при энергиях порядка 300 ГэВ, является исключительно важным. Может, в частности, оказаться, что слабое

взаимодействие только в области сравнительно небольших энергий проявляется как локальное четырехфермионное взаимодействие, являясь на самом деле трехчастичным взаимодействием промежуточного векторного заряженного бозона (называемого W -бозоном) с обычными частицами, аналогично тому, как электромагнитное взаимодействие сводится к взаимодействию γ -кванта с заряженными частицами. Такой W -бозонный вариант слабого взаимодействия имеет, как мы уже указывали, много общих свойств с электромагнитным взаимодействием, и на этом пути удастся построить объединенные модели слабого и электромагнитного взаимодействия.

Наряду с W -бозоном в таких моделях предсказывается существование тяжелых лептонов и промежуточных векторных нейтральных бозонов. Все эти гипотетические частицы должны иметь большие массы — порядка нескольких десятков ГэВ. Поэтому они могут рождаться только при энергиях порядка сотен ГэВ (в системе центра инерции).

При больших энергиях, несомненно, будет получена также новая информация о структуре адронов. Тяжелые кварки, если только они существуют в свободном состоянии, должны рождаться при взаимодействии частиц при очень больших энергиях. Детальной проверке должна быть подвергнута гипотеза о существовании целых семейств новых «шармовых» частиц — как мезонов, так и барионов.

Возможность появления «новой физики» на расстояниях порядка 10^{-17} см может быть «предсказана», если можно так выразиться, на основе следующих соображений. При больших энергиях в рассеянии электронов нуклонами, как мы уже говорили, наблюдается масштабная инвариантность. Качественно это явление характеризуется плавной, монотонной зависимостью сечения рассеяния электронов нуклонами от кинематических

переменных — переданной энергии и квадрата переданного импульса. При меньших энергиях (порядка 1 ГэВ) поведение сечений радикально отличается от поведения сечений в области глубоко неупругого рассеяния: вместо плавной зависимости имеет место резонансная зависимость сечений от энергии. Такая зависимость свидетельствует о возбуждении нуклонных резонансных состояний.

С другой стороны, смена резонансной зависимости сечений плавной зависимостью наблюдается не только в адронной физике. Так, в атомной физике сечение рассеяния электронов с энергией, не превышающей 10 эВ, на атомах характеризуется сильной зависимостью от энергии — рассеяние при этом сопровождается возбуждением атомных уровней. Если увеличить энергию электронов, то рассеяние происходит на отдельных электронах атома. Атомная структура при этом не проявляется, а сечение слабо зависит от энергии.

В ядерной физике наблюдается аналогичное явление — рассеяние электронов с энергией порядка 1—10 МэВ характеризуется возбуждением уровней атомного ядра, ядро ведет себя при этом, как целое, и сечение рассеяния сильно зависит от энергии электрона. При увеличении энергии электроны рассеиваются на отдельных нуклонах ядра, при этом ядерная структура проявляется слабо, и сечение рассеяния монотонно меняется с энергией.

Можно предполагать поэтому, что монотонная зависимость сечений взаимодействия частиц при переходе к более высоким энергиям должна смениться немонотонной зависимостью, свидетельствуя об отклонении от масштабной инвариантности и о появлении «новой физики». Рис. 4 иллюстрирует масштаб энергий, при которых наблюдаются резонансные или структурные эффекты. В настоящее время достигнуты энергии, при которых нарушения масштабной инвариантности малы,

г. е. гипотетические новые частицы еще не проявляются. Т. Ли получил интересное эмпирическое правило, связывающее различные характерные энергии:

$$\frac{10^9 \text{ эВ}}{1 \text{ эВ}} = \left[\frac{10^9 \text{ эВ}}{10^6 \text{ эВ}} \right]^2 = \left[\frac{3 \cdot 10^{10} \text{ эВ}}{10^9 \text{ эВ}} \right]^4.$$

Из приведенного рисунка видно, что энергия ускорителей должна быть увеличена примерно в 10 раз (в пересчете по энергии в системе центра инерции), чтобы возникла «новая» физика.

Современные ускорители представляют собой универсальные приборы для исследования свойств частиц и их взаимодействий. Так, на протонном ускорителе можно получить не только пучки протонов больших энергий, но и интенсивные пучки таких частиц, как пионы и каоны гипероны и мюоны, пучки антипротонов и антинейтронов. Пучки нейтрино и антинейтрино высоких энергий также можно формировать на протонном ускорителе. На электронных и протонных ускорителях можно получать интенсивные пучки γ -квантов очень больших энергий. Все это расширяет круг проблем, касающихся фундаментальных взаимодействий, которые можно изучать на современных ускорителях.

Мощные ускорители, как мы уже говорили, — это очень дорогие устройства. Поэтому все-таки может возникнуть вопрос о том, следует ли тратить колоссальные средства на сооружение ускорителей, или рациональнее, с точки зрения развития науки в целом, использовать эти средства для развития других областей физики, тем

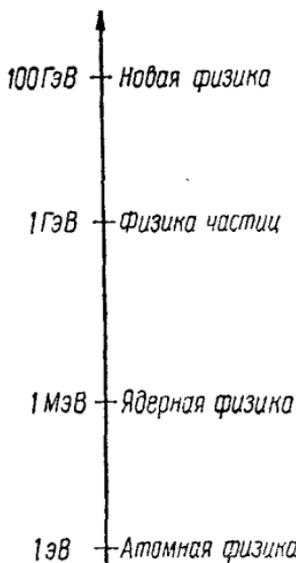


Рис. 4. Масштаб энергий для различных областей науки.

более, что физика элементарных частиц находится «далеко от дома», т. е. не приносит пользы в узком утилитарном смысле.

Касаясь этой проблемы, Вик писал: «И вот теперь этот старый затасканный вопрос задают снова — не «практики», а ученые — коллеги из других областей науки, которые хотят знать, что будет из всего этого для них. Я отвечаю так: «Вы должны немного подождать». Я думаю, уже сейчас можно с уверенностью утверждать, что открытия в этой области будут иметь большое влияние на другие отрасли науки. Действительно, не было ни одного крупного шага в физике в прошлом, который не оказал глубокого влияния и на другие науки. Кто мог думать 60 лет назад, что катодные лучи с энергией 100 кэВ будут представлять интерес для биологии? Тем не менее электронный микроскоп стал теперь одним из главных инструментов в этой области. Кто мог думать, что α -частицы способны приводить к эффектам, представляющим для химии не только побочный интерес, — таким, как пожелтение кристаллов и тому подобные вещи! В конце концов, мир химии — это «мир очень малых энергий», несколько десятков электрон-вольт уже разрушают любые молекулы. Что толку химии от миллионов электрон-вольт? Тем не менее настойчивость Резерфорда в его игре с α -частицами изменила весь облик химии. Конечно, эксперименты Резерфорда не стоили много денег. Но какое отношение имеют ко всему этому деньги? Бессмысленный вопрос не приобретает смысла только из-за того, что здесь замешаны деньги. Совсем наоборот, именно из-за того, что речь идет о больших суммах денег, я полагаю, следовало бы с особенной осмотрительностью задавать вопросы, отбирая среди них разумные и осмысленные»¹⁰.

¹⁰ Вик Дж. О необходимости больших энергий. УФН, 1965, 86, с. 604.

Когда против физики элементарных частиц выдвигается аргумент, что она «далеко от дома», то нелишне вспомнить 1933 г.— время, когда ядерная физика была архиксотической областью науки. В то время один только Сцилард взял патент на открытие цепной реакции, и через 30 лет мы стали свидетелями бурного расцвета ядерной техники. А что, если бы один затравочный нейтрон при делении ядер урана никогда не приводил к образованию двух нейтронов?

Закончится ли физическая наука

Поэтому не следует сейчас говорить о пользе физики элементарных частиц в практическом смысле. Речь идет о значительно большем — ключ от закономерностей природы, от понимания которых в конечном счете зависит наша власть над силами природы, находится в физике элементарных частиц.

Прогресс в области физики элементарных частиц, как ни в какой другой области физики, содействует общему прогрессу в познании природы. В связи с этим Бете указывает, что «физика твердого тела остается плодотворной областью, имеющей важные успехи в понимании того, как нерелятивистское уравнение Шредингера действует в сложных системах. Однако вряд ли можно утверждать, что она содействует более глубокому пониманию природы»¹¹.

Эти мысли можно проиллюстрировать, следуя Вайскопфу, диаграммой развития физики, изображенной на рис. 5. Здесь оси x соответствуют так называемые интенсивные исследования, приводящие к открытию новых частиц и новых закономерностей в их взаимодействиях и превращениях. Оси y соответствуют так называемые экстенсивные исследования, приводящие к развитию та-

¹¹ Бете Г. Физика высоких энергий. УФН, 1965, 86, с. 598.

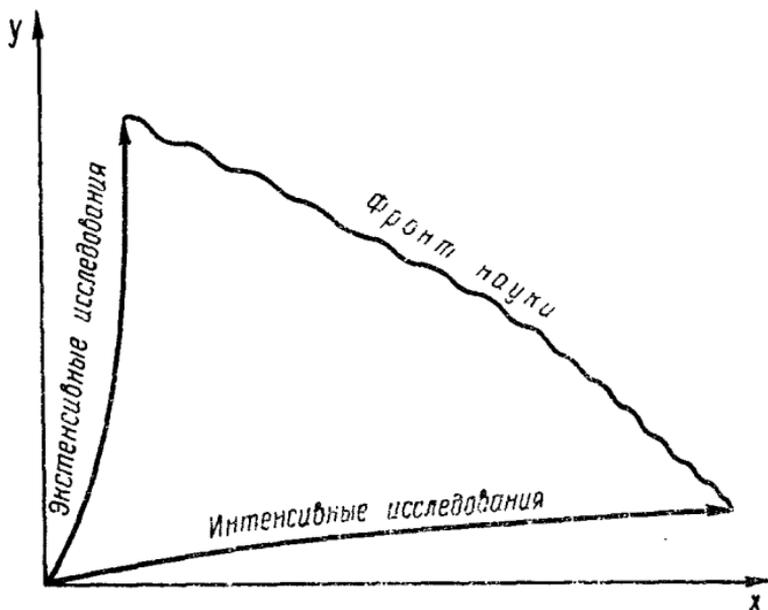


Рис. 5. Диаграмма фронта развития науки (соотношение между интенсивными и экстенсивными исследованиями).

ких наук, как атомная физика, ядерная физика вместе с ядерной техникой, астрофизика, химия, биология.

Прогресс в интенсивных исследованиях, т. е. движение вдоль оси x , вызывает прогресс в экстенсивных исследованиях, т. е. движение вдоль оси y . Есть и обратное влияние, т. е. движение вдоль оси y вызывает движение вдоль оси x , и в этом сказывается единство науки, которая в результате развивается в направлении, схематически соответствующем перпендикуляру к гипотенузе треугольника, изображенного на рис. 5.

Но фронт науки находится в вершине треугольника по оси x . Все остальное — это приложения уравнения Шредингера, уравнений Максвелла и других данных, получаемых из фундаментальных (т. е. интенсивных)

исследований, приложения как научные, так и технические, к числу которых относятся и физика твердого тела, и физика плазмы, и др.

Есть ли конец у оси x -ов? Вопрос этот можно сформулировать и так: может ли появиться окончательная физическая теория, после которой уже не будут нужны новые теории, т. е. не будут ли исчерпаны одной теорией все законы природы?

Сначала нужно понять, что необходимо для создания новой физической теории; т. е. теории, объясняющей и описывающей явления, относящиеся к ядерной и субъядерной материи? Несомненно, для этого необходима новая информация о свойствах субъядерной материи, которая будет получена с помощью как старых, так и новых мощных ускорителей заряженных частиц.

С другой стороны, теория — это отражение объективных закономерностей природы, «снятие слепка с нее», а оно «... не есть простой, непосредственный, зеркально-мертвый акт, а сложный, раздвоенный, зигзагообразный, включающий в себя возможность отлета фантазии от жизни»¹².

Предыдущее развитие физики позволяет думать, что эта необходимость отлета фантазии будет обеспечена математикой, развитием ее методов. «Наши математические усилия,— говорит Дирак,— позволяют пока понять во Вселенной лишь немного. Но развивая все более совершенные математические методы, мы можем надеяться на лучшее понимание Вселенной. Математические исследования дают надежду угадать, каким будет аппарат будущей теоретической физики.

Рано или поздно появится новый Гейзенберг, способный уловить существенные особенности новой информации и открыть метод ее использования подобно тому, как ранее экспериментальные данные по спектрам были

¹² Ленин В. И. Полное собрание сочинений. Т. 29, с. 330.

использованы Гейзенбергом для построения матричной механики»¹³.

Как же обстоит дело с концом у оси x -ов? По этому вопросу существуют разные мнения. Так, Эйнштейн считал, что «наши представления о физической реальности никогда не могут быть окончательными». Эти мысли Эйнштейна соответствуют мыслям Ленина: «Человек не может охватить=отразить=отобразить природы *всей*, полностью, ее «непосредственной цельности», он может лишь *вечно* приближаться к этому, создавая абстракции, понятия, законы, научную картину мира и т. д. и т. п.»¹⁴. При этом важно иметь в виду, что эти «... понятия, законы etc. (мышление, наука=«логическая идея») и *охватывает* условно, приблизительно универсальную закономерность вечно движущейся и развивающейся природы»¹⁵.

Однако точка зрения о том, что конца у оси x — нет, разделяется не всеми. Например, Фейнман на этот счет пишет: «Что же можно сказать о будущем этого увлекательного приключения? Чем же все это закончится? Некоторые из моих коллег говорят, что этот основной аспект нашей науки сохраняется всегда. Но мне кажется, что трудно рассчитывать на постоянную смену старого новым, скажем, в течение ближайших 1000 лет. Не может быть, что бы это движение вперед продолжалось вечно и чтобы мы могли открывать все новые и новые законы. Ведь если это было бы так, то нам быстро надоело бы все это бесконечное наслаждение знаниями. Мне кажется, что в будущем произойдет одно из двух. Либо мы узнаем все законы, т. е. будем знать достаточно законов для того, чтобы делать все необходимые выводы,

¹³ Дирак П. Эволюция физической картины мира.— Кн.: Над чем думают физики. Элементарные частицы.— М.: Наука, 1965, с. 452.

¹⁴ Ленин В. И. Полное собрание сочинений. Т. 29, с. 164.

¹⁵ Там же.

а они всегда будут согласовываться с экспериментом, на чем наше движение вперед закончится. Либо окажется, что проводить новые эксперименты все труднее и труднее и все дороже и дороже, так что мы будем знать о 99,9% всех явлений, но всегда будут такие явления, которые только что открыты, которые очень трудно наблюдать и которые расходятся с существующими теориями, а как только вам удалось объяснить одно из них, возникает новое, и весь этот процесс становится все более медленным и все менее интересным. Так выглядит другой вариант конца. Но мне кажется, что так или иначе, но конец должен быть.

Нам необыкновенно повезло, что мы живем в век, когда еще можно делать открытия. Это — как открытие Америки, которую открывают раз и навсегда. Век, в который мы живем, это век открытия основных законов природы, и такое время уже никогда не повторится. Это удивительное время, время волнений и восторгов, но этому наступит конец»¹⁶.

Похожие мысли 20-ю годами ранее высказывал Вигнер. «Возникает вопрос: будет ли развитие науки (хотя бы потенциально) неограниченно долго происходить по типу сдвига, т. е. когда новая дисциплина оказывается глубже старой и включает последнюю в себя, по крайней мере, «виртуально». Мне кажется, что на этот вопрос следует дать отрицательный ответ, потому что сдвиги, понимаемые в указанном только что смысле, всегда связаны с углублением еще на один слой в «тайны природы» и с еще большим удлинением цепочки понятий, опирающихся на более ранние понятия»¹⁷.

Современная физика элементарных частиц, по мнению Вигнера, располагается в четвертом слое после классической механики, квантовой механики и теории

¹⁶ Фейнман Р. Характер физических законов.— М.: Мир, 1968, с. 190—191.

¹⁷ Вигнер Е. Этюды о симметрии.— М.: Мир, 1971, с. 174.

относительности. Дальнейшее углубление существующих понятий, т. е. переход на новые слои должно замедлиться и стать более трудоемким: «Признание неадекватности понятий десятого слоя и замена их более тонкими понятиями одиннадцатого слоя будет гораздо менее важным событием, чем открытие теории относительности, но для того, чтобы найти корень зла, нам придется провести более трудоемкие и продолжительные исследования, чем некогда понадобившиеся для оценки тех противоречий с опытом, которые исключила теория относительности. Нетрудно представить себе, что наступит и такое время, когда изучающий физику утратит интерес или будет попросту не в силах пробиваться сквозь уже накопившиеся слои к переднему фронту науки, к самостоятельному исследованию. Тогда число аспирантов-физиков резко упадет и прорыв науки в новые области станет заметнее, чем привычные нам сдвиги; новая дисциплина уже не будет включать в себя физику так, как, например, теория включает классическую физику»¹⁸.

Следует заметить, что подобные предсказания о замедлении и даже о законченности физической науки высказывались уже очень давно. В качестве исторического анекдота обычно приводят высказывания Жолли — учителя Планка, предостерегавшего своего ученика от занятий теоретической физикой, поскольку, по его мнению, все великие физические открытия уже сделаны: «Конечно, в том или ином уголке можно еще заметить или удалить пылинку, но система, как целое, стоит прочно, и теоретическая физика заметно приближается к той степени совершенства, каким уже столетия обладает геометрия»¹⁹.

¹⁸ Вигнер Е. Этюды о симметрии.— М.: Мир, 1971, с. 174.

¹⁹ Планк М. От относительного к абсолютному.— Вологда, 1925, с. 15—16.

Можно также напомнить, что даже великий Гильберт думал об аксиоматическом построении физики, подобно тому, как это делается при построении геометрии.

Ближе к истине был Кельвин, указавший в конце прошлого века, что на чистом небосклоне теоретической физики находятся два пятнышка: парадоксы теплового черного излучения и отрицательный результат опыта Майкельсона. Из первой проблемы возникла квантовая теория, из второй — теория относительности.

О непрекращающемся и непрерывном развитии физической науки очень образно и оптимистично говорил Дж. Дж. Томсон: «Великое открытие это не конечная станция, а скорее дорога, ведущая в области, до сих пор неизвестные. Мы взбираемся на вершину пика, и нам открывается другая вершина, еще более высокая, чем мы когда-либо видели до сих пор, и так продолжается дальше. Вклад, сделанный в понимание физики одним поколением, не становится меньшим или менее глубоким, или менее революционным по мере того, как одно поколение сменяет другое. Сумма нашего знания не похожа на то, что математики называют сходящимися рядами, .. где изучение нескольких членов позволяет понять общие свойства целого. Физика соответствует скорее другому типу рядов, рядам расходящимся, где добавляемые члены не становятся все меньше и меньше и где нельзя считать, что выводы, к которым мы пришли при изучении нескольких известных членов, совпадут с теми, которые мы сделаем, когда наши знания будут больше»²⁰.

Значение физики элементарных частиц

Независимо от различных точек зрения, можно с уверенностью сказать, что если даже у оси x и есть конец, то мы еще очень далеки от него. Действительно,

²⁰ Томсон Дж. Дж. Дух науки.— М.: Знание, 1970, с. 163—164.

предстоит еще решить большое число важных проблем, касающихся фундаментальных взаимодействий элементарных частиц, главнейшими из которых является проблема структуры материи и проблема объединения разных фундаментальных взаимодействий.

По поводу первой проблемы Вайскопф говорит: «Остается главный вопрос: почему протон, нейтрон и электрон являются именно теми элементарными частицами, из которых состоит вещество в земных условиях? Почему эти частицы вместе с квантами света и нейтрино образуют самые устойчивые формы среди большой группы частиц, включающей гипероны, многочисленные бозоны и тяжелые электроны? Эти вопросы касаются основ всей науки. Пока на них нет ответа, структура любого вида материи по-настоящему остается непонятной»²¹.

Задача объяснения свойств и структуры материи всегда была первой задачей естествознания. Открытие атомов и молекул, атомных ядер и электронов, протонов и нейтронов — таковы главнейшие вехи на этом пути. В настоящее время свойства химических элементов удалось объяснить с помощью квантовой теории в рамках известных свойств электромагнитного взаимодействия электронов с атомными ядрами. Это сыграло фундаментальную роль во всей атомной физике, химии и молекулярной биологии. В свою очередь, поиски частиц, из которых состоят ядра, завершились открытием нейтрона. Попытки понять причину стабильности ядер и выяснить их свойства привели к открытию π -мезона, а затем и всей совокупности частиц, названных адронами.

«Эти открытия,— пишет Ли,— позволили в значительной степени понять особенности строения ядра. Это

²¹ Вайскопф В. В защиту физики высоких энергий. УФН, 1965, 86, с. 600.

понимание, с одной стороны, изменило основу наших представлений об эволюции и структуре звезд, а с другой стороны, сделало возможными широчайшие технические достижения, связанные с ядерной энергией»²².

Несмотря на эти бесспорнейшие успехи в понимании структуры материи, теория в своей существенной части остается описательной феноменологической схемой, которая позволяет только систематизировать наши знания о структуре материи. Предстоит дальнейшее проникновение в тайны структуры материи, ибо до сих пор не решены проблемы строения таких «обычных» элементарных частиц, как протон, нейтрон и электрон, свойства которых определяют все многообразие живой и неживой природы вокруг нас.

«Квантовая теория,— замечает в этой связи Вайскопф,— по существу не объясняет характерных свойств, внутренне присущих каждому элементу: она выводит их из другой непонятной совокупности фактов — существования небольшого числа элементарных частиц с их особыми внутренними свойствами. Таким образом, главный вопрос, лежащий в основе всех физических дисциплин,— вопрос о строении материи все еще не решен. Именно над этой проблемой бьется сейчас субъядерная физика»²³.

Вопрос об объединении различных взаимодействий не нов. Ранее физика уже успешно решила вопросы объединения ряда взаимодействий, например, электрические и магнитные силы; химические силы, капиллярные силы и силы сцепления были сведены к силам электромагнитного взаимодействия между электронами и ядрами.

Известные в настоящее время слабое, сильное и электромагнитное взаимодействия представляются слиш-

²² Ли Т. О физике элементарных частиц. УФН, 1965, 86, с. 625.

²³ Вайскопф В. В защиту физики высоких энергий. УФН, 1965, 86, с. 500.

ком различными по своим свойствам: интенсивности, свойствам симметрии и подверженным им частицам. Тем не менее успехи в объединении слабого и электромагнитного взаимодействий позволяют надеяться, что связь между фундаментальными взаимодействиями элементарных частиц будет установлена. «Наша цель здесь,— пишет Швингер,— не просто найти систематику субъядерных частиц, новую периодическую систему элементов, как бы интересно и важно это ни было. Вероятнее всего мы подбираемся к новой теории материи, такой, которая объединит и расширит то, что мы сейчас видим как не связанные друг с другом аспекты явлений природы. Во времена своих былых триумфов физика связала свет с электромагнетизмом, массу с энергией, поняла химию и механические и тепловые свойства сплошных сред через атомные закономерности квантовой механики. Но основные проблемы остались»²⁴.

Их решает физика элементарных частиц. В этом заключается ее значение.

«Во-первых,— пишет Янг,— физика высоких энергий изучает фундаментальную структуру материи, из которой построен окружающий нас физический и биологический мир. Она представляет собой естественное продолжение замечательно успешной традиции в физике, шедшей от изучения макроскопической материи к молекулам, атомам и ядрам...

Во-вторых, попытки понять фундаментальную структуру материи служили в прошлом источником новых понятий и новых принципов, лежащих в основе физики в целом и различных физических наук. Развитие специальной теории относительности и квантовой механики по существу оставило глубокий след даже в философском мышлении человечества. В своей теперешней на-

²⁴ Швингер Ю. Будущее физики основных свойств материи, УФН, 1965, 86, с. 613.

пряженной работе над явлениями при очень высоких энергиях и очень малых расстояниях физики исследуют основную структуру не только вещества, но и пространства—времени, энергии и электрического заряда. Истинный прогресс в этих изысканиях повлек бы за собой глубокие изменения самих основ физики и вместе с тем физических наук в целом.

В-третьих, всегда трудно предсказать возможные технические следствия научного исследования. Однако, вообще говоря, у нас перед глазами пример электроники твердого тела, возникшей в результате физических исследований электронной структуры атомов, молекул и кристаллов, пример использования ядерной энергии, возникшей непосредственно из исследования строения ядер. Мы, несомненно, находимся в начале новой эры тончайшей техники, в которой человек начинает манипулировать все более мелкими единицами вплоть до атомных и субатомных размеров. Такая техника еще находится в колыбели. Ее развитие потребует все более тщательного и тонкого контроля. Следует ожидать, что физика высоких энергий, изучая крохотные расстояния и мельчайшие интервалы времени, будет источником новых идей и новых руководящих принципов, которые будут существенны в развитии новой технологии»²⁵.

Говоря о физике элементарных частиц, трудно преуменьшить ее значение в формировании и развитии основных принципов философского мышления и материалистического мировоззрения. Достаточно указать на такие фундаментальные идеи, как идея о взаимопревращаемости элементарных частиц и идея существования античастиц.

Выработка новых идей и понятий в физике всегда проходила, как мы видели, в трудной и мучительной

²⁵ Янг Ч. Некоторые соображения об экспериментах при высоких энергиях. УФН, 1965, 86, с. 648.

борьбе, но такова вообще судьба научного прогресса. «Последние столетия в науке,— говорит Оппенгеймер,— отмечены непрекращающейся борьбой за описание и понимание природы материи, ее закономерностей, свойств и языка, на котором ее можно понять. Успехи в этой борьбе, начиная с XVI столетия и вплоть до наших дней, вдохновляли всю научную деятельность, озаряли мир техники и жизнь человека. Они проникали в образование и завоевывали сердца молодых людей. Они составляли необходимый элемент прогресса, здоровья, духа и сущности науки. Сейчас, несмотря на соблазнительные и блестящие успехи, мы переживаем мучительно трудный момент в этой борьбе. Но все, кто борются, убеждены: без дальнейшего проникновения в область бесконечно малого усилия в этот раз могут и не закончиться торжеством человеческого разума»²⁶.

²⁶ Оппенгеймер Р. Цели физики высоких энергий. Предисловие. УФН, 1965, 86, с. 593.

ХРОНОЛОГИЯ ОТКРЫТИЙ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1816. У. Проут выдвинул гипотезу о том, что все атомы сложены из атомов водорода, и поэтому вес каждого атома должен быть целым кратным атомного веса водорода.

1843. М. Фарадей экспериментально установил закон сохранения электрического заряда.

1849. А. Физо, используя быстро вращающееся зубчатое колесо, первым в лабораторных условиях измерил скорость света, для которой получил значение 313000 км/с.

1852. Ж. Фуко, пользуясь вращающимся многогранным зеркалом, получил для скорости света значение 298000 км/с с возможной ошибкой 300 км/с.

1858. Ю. Плюккер обнаружил, что при понижении давления в разрядной трубке (ниже 10^{-3} мм рт. ст.) появляются лучи, исходящие из катода и вызывающие флуоресценцию на противоположной от катода стенке стеклянной трубки. Эти лучи получили название катодных.

1869. И. Хитторф, поместив твердый предмет между катодом и местом свечения стеклянной трубки, обнаружил, что предмет отбрасывает тень, доказав тем самым, что катодные лучи распространяются прямолинейно.

1860—1865. Дж. Максвелл создал теорию электромагнитного поля на основе дифференциальных уравнений в частных производных для напряженностей электрического и магнитного полей.

1865. Дж. Максвелл предсказал существование электромагнитных волн, т. е. периодических колебаний взаимно перпендикулярных электрического и магнитного полей, распространяющихся со скоростью света.

— Дж. Максвелл предположил, что свет имеет электромагнитную природу и представляет собой электромагнитную волну определенной длины.

1874. Дж. Стоней выдвинул гипотезу дискретности электрического заряда и, используя экспериментальные результаты Фарадея относительно электролиза, получил для элементарного заряда величину 10^{-20} Кл, т. е. примерно $1/16$ принятого в настоящее время

значения. Им же для минимальной единицы электрического заряда предложено название «электрон».

1878—1882. А. Майкельсон в результате большой серии опытов для скорости света получил значение 299910 ± 50 км/с.

1881. Дж. Дж. Томсон ввел понятие электромагнитной массы.

1885. И. Бальмер получил формулу для вычисления частот спектральных линий, расположенных в видимой части спектра водорода (серия Бальмера).

1887. А. Майкельсон, Э. Морли с точностью до 5 км/с показали, что скорость света по направлению движения Земли совпадает со скоростью света в перпендикулярном направлении, не обнаружив тем самым влияния эфирного ветра.

1890—1895. Г. Кайзер, К. Рунге, Ф. Пашен нашли формулу для описания частот в инфракрасной области спектра атома водорода.

1895. В. Рентген в экспериментах с катодными лучами открыл γ -лучи, названные позже рентгеновскими лучами, и показал, что они обладают большой проникающей способностью, не отклоняются ни в электрическом, ни в магнитном полях.

— . Ж. Перрен, собирая поток катодных лучей на коллектор, экспериментально показал, что они являются потоком отрицательно заряженных частиц, которые можно отклонять магнитным полем.

1896. А. Беккерель обнаружил, что кристалл двойной сернистой соли урана и калия засвечивает фотографическую пластинку, открыв тем самым естественную радиоактивность.

— . М. Склодовская-Кюри предположила, что излучение урана является свойством его атомов.

— . П. Зеeman, помещая источник света в магнитное поле, обнаружил уширение спектральной линии паров натрия, которое составляло около одной сороковой расстояния между двумя соседними линиями. Спустя несколько месяцев О. Лодж в процессе подготовки к демонстрации этого явления в Лондонском Королевском обществе обнаружил, что уширение в действительности является расщеплением линии на три компоненты (эффект Зеемана).

1897. Дж. Дж. Томсон, изучая движение катодных лучей в магнитном поле, определил для них отношение заряда к массе, доказав, что это отношение постоянно и не зависит от вида источника лучей. Дж. Дж. Томсон назвал составляющие катодных лучей корпускулами и предположил, что они имеют малую массу.

— . Э. Ридберг предположил, что свойства химических элементов определяются их порядковым номером в таблице Менделеева, а не атомным весом.

— . Дж. Лармор установил явление прецессии вращающихся электронов во внешнем магнитном поле, обусловленной действием силы магнитного поля на магнитный момент вращающегося электрона и силы инерции вращающегося электрона.

— . Х. Лоренц, используя представление о классическом осциляторе в магнитном поле, развил теорию эффекта Зеемана и объяснил, почему линии, наблюдаемые в поперечном поле (перпендикулярном к лучу света), расщепляются на три компоненты, тогда как линии в продольном поле (параллельном лучу света) расщепляются на две компоненты.

1898. М. Склодовская-Кюри и П. Кюри открыли два новых радиоактивных элемента — полоний и радий.

— . П. Зееман, М. Корню обнаружили явление расщепления атомных спектральных линий более чем на три компоненты (аномальный эффект Зеемана).

1899. Ст. Мейер, Э. Швейдлер, Ф. Гизель и А. Беккерель обнаружили отклонение лучей радиоактивного излучения радия в магнитном поле.

— . Э. Резерфорд доказал наличие в излучении урана двух компонент, различающихся степенью проникающей способности: легко поглощаемая компонента получила название альфа-лучей, сильно проникаемая компонента получила название бета-лучей.

1900. М. Планк показал, что трудности с объяснением свойств спектрального излучения черного тела можно устранить, допустив, что свет испускается не непрерывно, а дискретными порциями — квантами с энергией $h\nu$, h — универсальная постоянная, названная постоянной Планка, ν — частота испущенного света. Константу h впервые определил Планк из опытных данных, привлекая закон Стефана и закон смещения Вина.

— . П. Кюри, М. Склодовская-Кюри установили, что бета-лучи несут отрицательный заряд.

— . А. Беккерель попытался измерить отношение заряда к массе и скорость бета-лучей, пропуская их через электрическое и магнитное поля, и установил, что скорость их составляет примерно $2/3$ скорости света.

— . Э. Дори обнаружил, что бета-лучи отклоняются электрическим полем.

— . П. Виллард обнаружил, что радиоактивные вещества наряду с α и β -лучами испускают третий тип лучей, которые, обладая чрезвычайно высокой проникающей способностью, не отклонялись в магнитном поле. Этот тип излучения получил название γ -лучей.

— . М. Склодовская-Кюри высказала гипотезу относительно корпускулярной природы альфа-лучей.

1901. А. Беккерель и П. Кюри обнаружили физиологическое действие радиоактивного излучения.

— . В. Кауфман доказал экспериментально, что масса частицы, движущейся со скоростями, которые близки к скорости света, зависит от скорости.

— . Ж. Перрен предложил планетарную модель атома, соглас-

но которой атом состоит из положительно заряженного ядра, окруженного отрицательно заряженными электронами, причем электроны должны двигаться по индивидуальным орбитам со скоростями, соответствующими частотам световых волн.

1902—1903. М. Абрагам ввел понятие электромагнитного импульса и получил формулу для электромагнитной массы электрона. Чтобы отклонить движущийся заряженный электрон, необходима дополнительная сила для изменения электромагнитного поля, которое связано с электроном.

1902. М. Абрагам предложил модель электрона — жесткого шарика, сохраняющего свою форму в процессе движения (вследствие наличия бесконечно больших внутренних сил неэлектрического происхождения).

1903. П. Кюри ввел понятие периода полураспада, который совпадает со временем, в течение которого распадается половина общего числа атомов.

— П. Кюри предложил использовать период полураспада в качестве эталона времени для определения абсолютного возраста земных пород.

— Э. Резерфорд в опытах по отклонению частиц в электрическом поле доказал, что альфа-лучи состоят из положительно заряженных частиц, причем отклонить их гораздо труднее, чем катодные лучи (вследствие большой массы α -частиц).

— Э. Резерфорд, Ф. Содди, У. Рамзай наблюдали образование гелия из радона, доказав гелиевую природу α -лучей.

— Дж. Дж. Томсон предложил модель атома, в которой положительный заряд считался распределенным в некоторой небольшой области пространства, возможно сферической формы, тогда как электроны вкраплены в этот заряд. В невозмущенном состоянии атома электроны и положительный заряд должны покоиться.

— У. Крукс, Г. Гейтель, Ю. Эльстер заметили, что если вблизи флуоресцирующего экрана поместить радиоактивный препарат, то на экране наблюдаются вспышки света (сцинтилляционные явления).

1904. Х. Лоренц нашел преобразования координат и времени, оставляющие инвариантными уравнения Максвелла и ставшие в дальнейшем одной из основ специальной теории относительности.

— Х. Лоренц получил данные, что масса электрона должна изменяться при ускорении электрона.

— Х. Нагаока предложил планетарную модель атома, исходя из аналогии между атомами и планетой Сатурн.

— Дж. Дж. Томсон предположил, что электроны в атоме могут образовывать различные конфигурации, обуславливающие периодичность в свойствах элементов.

1904—1905. А. Пуанкаре сформулировал принцип относительности, ввел термины «преобразования Лоренца» и «группа Лоренца».

1905. А. Эйнштейн, постулируя принцип постоянства скорости света во всех системах отсчета, создал специальную теорию относительности.

— А. Эйнштейн нашел соотношение между энергией E и массой m покоящейся частицы, $E=mc^2$ (c — скорость света), которые в классической физике считались независимо сохраняющимися величинами. Это релятивистское соотношение оказалось исключительно важным при обсуждении ядерных реакций и процессов взаимопревращения частиц.

— А. Эйнштейн, развивая идеи о квантовом характере испускания излучения, распространил квантовые представления на самоизлучение, предположив, что световой квант, будучи излучен, не рассеивается, но сохраняет свою индивидуальность: «...мы должны предположить, что однородный свет состоит из зерен энергии — «световых квантов», т. е. небольших порций энергии, несущихся в пустом пространстве со скоростью света».

— А. Эйнштейн на основе гипотезы о квантах света объяснил законы фотоэффекта. (В 1923 г. А. Комптон предложил для квантов света название «фотоны»).

1906. Ч. Баркли открыл характеристические рентгеновские лучи, линейчатый спектр которых характеризует свойства вещества антикатода в такой же степени, в какой оптический спектр газа или пара характеризует вещество.

— Э. Резерфорд обнаружил рассеяние α -частиц.

— Т. Лайман открыл ультрафиолетовую серию атома водорода.

— М. Планк вывел уравнения релятивистской динамики, получив выражения для энергии и импульса электрона, и ввел термин «теория относительности».

1907. Г. Минковский продемонстрировал тесную связь свойств пространства и времени в теории относительности, введя понятие четырехмерного многообразия: «...отныне и навсегда пространство и время превращаются лишь в тени, и только некий род единства того и другого сохраняет независимое существование».

— А. Эйнштейн постулировал эквивалентность гравитации и инерции и, исходя из этого, вычислил красное смещение света в поле тяготения Солнца.

1908. Г. Гейгер, Э. Резерфорд сконструировали прибор для регистрации отдельных заряженных частиц. В 1928 г. Гейгер совместно с В. Мюллером усовершенствовал его (счетчик Гейгера—Мюллера).

— В. Ритц улучшил предложенные в 1888 г. И. Ридбергом приближенные формулы для частот спектральных серий возбужде-

ных атомов, установив один из основных принципов систематики атомных спектров — комбинационный принцип.

— . А. Бухерер экспериментально проверил справедливость релятивистской формулы Лоренца для зависимости массы частиц от их скорости.

1909. Э. Резерфорд, Т. Ройдс окончательно доказали, что α -частицы являются дважды ионизованными атомами гелия.

1910. Г. Гейгер, Д. Марсден, изучая прохождение α -частиц через тонкие пластинки из золота и других металлов, заметили, что хотя большинство α -частиц проходит через пластинку почти по прямой, иногда какая-нибудь из α -частиц — примерно одна из 10000 — все же сильно отклонялась, причем отклонение превышало 90° .

— . О. Байер, О. Ган впервые определили энергию β -частиц по их отклонению в магнитном поле.

1910—1911. Р. Милликен, изучая движение заряженных масляных капель под действием силы тяжести и электрической силы плоского конденсатора, впервые показал, что заряд капли всегда кратен одной и той же величине, которую естественно было отождествить с зарядом электрона.

1911. Э. Резерфорд, используя экспериментальные данные о рассеянии α -частиц в веществе, развил представление об атомном ядре и планетарной модели атома.

— . Э. Резерфорд получил формулу для эффективного сечения рассеяния нерелятивистских заряженных частиц, взаимодействующих по закону Кулона.

— . Г. Гейгер, Дж. Неттол установили зависимость между энергией α -частицы, образующейся при распаде ядра, и скоростью этого распада, согласно которой довольно узкому интервалу энергий соответствует очень большой разброс в значениях их периодов полураспада.

— . А. Зоммерфельд в стремлении спасти электромагнитную теорию исходил из того, что универсальная постоянная Планка является не элементом энергии, а квантом действия, и поэтому предложил заменить гипотезу «квантов энергии» новым принципом, согласно которому время, необходимое материи для того, чтобы получить или отдать некоторое количество энергии, тем короче, чем больше эта энергия, так что произведение энергии на время определяется постоянной h .

— . П. Вейсс, П. Ланжевен ввели понятие кванта магнитного момента-магнетона, величина которого для электрона может быть получена на основе магнитных моментов атомов, определив магнитную восприимчивость данного вещества.

1912. Ч. Вильсон изобрел прибор для наблюдения следов заряженных частиц, в основу принципа действия которого положен тот

факт, что пересыщенный водяной пар образует капельки вдоль следа заряженной частицы (камера Вильсона).

— В. Гесс, проводя измерения фонового излучения на высотах более 5 км с помощью воздушных шаров, обнаружил, что интенсивность излучения возрастает с высотой и что интенсивность одинакова днем и ночью. Выяснилось, что это излучение приходит из межзвездного пространства, поэтому лучи были названы космическими.

— Р. Милликен выполнил экспериментальную проверку уравнения Эйнштейна, связывающего линейным образом частоту падающего света с энергией вырванных фотоэлектронов, и нашел в этих измерениях постоянную Планка.

1913. Н. Бор развил квантовую теорию строения атома, в основу которой были положены следующие постулаты:

- 1) Существование у атомов стационарных состояний, в которых атомы не излучают и не поглощают энергию;
- 2) Эти состояния характеризуются дискретным рядом энергий;
- 3) При переходе из одного стационарного состояния в другое атом излучает или поглощает излучение строго определенной энергии, равное разности энергий этих состояний.

— Дж. Франк, Г. Герц экспериментально доказали существование дискретных уровней энергии в атомах.

— Ф. Содди ввел понятие об изотопах элементов, которые различаются массой, но химически полностью эквивалентны. В этом же году Дж. Дж. Томсон в опытах по отклонению каналовых лучей обнаружил изотопы натрия с массовыми числами 20 и 22.

— Ф. Содди, К. Фаянс независимо установили закон радиоактивного смещения: после испускания α -частицы атом-остаток сдвигается влево на две клетки периодической системы, т. е. в направлении меньших валентностей по водороду. Напротив, испускание β -частицы смещает атом на одну клетку вправо.

— А. Ван дер Брук высказал гипотезу, согласно которой заряд атомного ядра численно равен порядковому номеру соответствующего элемента в периодической таблице. Он заметил, что данные по рассеянию α -частиц лучше объясняются планетарной моделью атома в том случае, если предположить, что ядерный заряд равен порядковому номеру элемента в периодической системе Менделеева, который назван им атомным номером.

— Э. Резерфорд предсказал протон — ядро простейшего атома водорода, заряд которого по абсолютной величине равен электрическому заряду электрона, но противоположен по знаку. Масса протона в 1840 раз превышает массу электрона.

— А. Ван дер Брук выдвинул гипотезу строения атомных ядер из протонов и электронов, причем все вещество построено из этих частиц в два этапа: сначала из протонов с некоторым участием цементирующих электронов образуются ядра малых размеров, а

затем ядра окружаются сравнительно рыхлым электронным облаком.

— П. Ланжевен ввел понятие дефекта масс, равного разности масс частиц, составляющих ядро, и самого ядра.

— Дж. Даныш, Э. Резерфорд, Г. Робинсон создали магнитный спектрометр с фокусировкой и фотографической регистрацией частиц, прошедших через спектрометр.

1914. Г. Мозли обнаружил зависимость между частотой характеристического рентгеновского излучения вещества и его порядковым номером, что по измеренной длине волны позволяет точно установить заряд ядра данного элемента. «Атому присуща некая характерная величина, которая регулярно увеличивается при переходе от атома к атому. Это количество не может быть ничем иным, как только зарядом внутреннего ядра».

— Н. Бор получил формулу для энергий стационарных состояний атома водорода.

— Э. Резерфорд, Э. Андраде доказали идентичность рентгеновских спектров изотопов, получив еще одно убедительное доказательство совпадения атомных номеров (или порядковых номеров) у изотопов данного элемента.

— Дж. Чэджик обнаружил, что электроны, образующиеся при β -распаде ядер, характеризуются непрерывным энергетическим спектром.

— Э. Резерфорд выдвинул идею об искусственном превращении атомных ядер при ядерных столкновениях.

— Д. Хевеши разработал метод меченых атомов.

1915—1916. А. Зоммерфельд усовершенствовал теорию атома Бора, распространив ее с просто периодических на случай многократно периодических систем, и разработал квантовую теорию эллиптических орбит. При этом были введены радиальное и азимутальное квантовые числа.

1916. А. Зоммерфельд объяснил возникновение тонкой структуры водородного спектра, т. е. зависимости энергии атомного электрона от его орбитального момента, деформацией кругового движения в эллиптическое.

— А. Эйнштейн впервые обратил внимание на то, что под действием внешнего электромагнитного поля возбужденные атомы могут либо поглощать энергию поля, переходя на более высокий уровень, либо отдавать энергию поля, возвращаясь на более низкий уровень (вынужденные или индуцированные переходы с излучением).

1917. У. Харкинс заметил, что ядра с четными значениями атомного числа встречаются чаще и являются более стабильными по сравнению с ядрами с нечетными атомными номерами.

1918. Э. Нетер в общем виде установила связь свойств симметрии с законами сохранения определенных физических величин.

— Н. Бор сформулировал принцип соответствия, согласно которому предсказания квантовой теории в пределе больших значений квантовых чисел должны совпадать с результатами классической теории.

1918—1919. А. Эйнштейн, а также Г. Вейль, Э. Картан, А. Эддингтон предприняли первые попытки объединенного описания гравитационного и электромагнитного полей (и вещества) на базе геометризованной картины мира, т. е. создания единой теории поля.

1919. Э. Резерфорд при бомбардировке ядер азота высокоэнергетическими α -частицами наблюдал образование протонов, при этом «атом азота (ядро распадается вследствие громадных сил, развивающихся при столкновении с быстрой α -частицей, а освобождающийся водородный атом образует составную часть ядра азота)».

— Э. Резерфорд из опытов по изучению рассеяния α -частиц ядрами оценил размеры ядра (примерно 10^{-13} см).

1920. Э. Резерфорд предположил существование нейтрона — частицы с нулевым значением электрического заряда и массой порядка массы протона.

— А. Эддингтон выдвинул предположение, что источником энергии Солнца и звезд является ядерная реакция превращения водорода в ядра гелия.

1921. О. Ган открыл явление изомерии атомных ядер протактиния, которое заключается в том, что ядро характеризуется двумя различными периодами полураспада (равными 6,7 часа и 1,22 мин).

— О. Штерн, В. Герлах измерили магнитные моменты атомов и молекул, пропуская пучки частиц через неоднородное магнитное поле и наблюдая расщепление пучка на несколько отдельных пучков. Этим доказывалось квантование магнитного момента.

1922. А. Комптон, исследуя рассеяние рентгеновского света на парафине, обнаружил, что рассеянные лучи обладают большей длиной волны, чем исходное излучение, т. е. частота вторичной волны оказывается, вопреки волновой классической теории, меньше, чем частота первоначального поля. Этот результат становится очевидным в рамках корпускулярной теории, в которой фотон является частицей с определенными значениями энергии и импульса.

1923. П. Л. Капица и независимо Д. В. Скобелцын поместили камеру Вильсона в сильное магнитное поле и наблюдали искривление следов α -частиц. По кривизне можно определить импульс частиц и установить знак ее электрического заряда.

1923—1924. А. де Бройль предположил существование волновых свойств частиц материи, длина волны которых пропорциональна постоянной Планка и обратно пропорциональна импульсу частицы. А. Эйнштейн советовал М. Борну ознакомиться с диссертацией де Бройля: «Прочтите ее! Хотя и кажется, что ее писал сумасшедший, написана она солидно».

1924—1925. В. Паули сформулировал принцип запрета, согласно которому в любом квантовомеханическом состоянии может находиться только один электрон.

— . Ш. Бозе, А. Эйнштейн предположили квантовую статистику для световых квантов (и других частиц с целым спином), постулируя неразличимость световых квантов. На основе этой статистики была доказана справедливость формулы Планка.

1924. Л. Лапорт сформулировал общее правило о разрешенных и запрещенных атомных переходах, которое потом нашло объяснение в рамках закона сохранения пространственной четности применительно к процессу испускания света атомами.

1925. В. Боте, Г. Гейгер доказали справедливость законов сохранения энергии и импульса при рассеянии фотонов электронами для каждого элементарного акта рассеяния.

— . П. М. С. Блеккет, проанализировав 23000 фотографий, содержащих 460000 траекторий α -частиц в камере Вильсона, обнаружил 8 случаев вылета протона; при этом α -частица поглощалась атомом, поскольку ее следа после соударения не обнаруживалось. В этом опыте впервые наблюдаены протоны.

— . С. Гаудсмит, Дж. Уленбек постулировали существование внутреннего механического момента электрона — спина, равного $1/2$ (в единицах \hbar).

— . П. Оже, фотографируя при помощи камеры Вильсона выходящие рентгеновскими лучами фотоэлектроны, обнаружил, что в некоторых случаях в одной точке берут начало два следа (эффект Оже).

— . В. Гейзенберг разработал основы матричной квантовой механики согласно которой наблюдаемым физическим величинам соответствуют не числа, а матрицы, правила действия с которыми не совпадают с правилами обычной алгебры, так как произведение матриц не обладает свойством коммутативности.

— . Л. В. Мысовский и др. разработали метод толстослойных ядерных фотоэмульсий.

— . Г. А. Изинг предложил принцип линейного резонансного ускорителя, выдвинув две основные идеи непрямых методов ускорения, а именно многократное использование одной и той же ие очень большой разности потенциалов и синхронизм (резонанс) между появлением частицы в заданном месте установки и появлением ускоряющего поля в том же месте.

1926. Э. Ферми и независимо от него П. Дирак, используя принцип запрета Паули, развили квантовую статистику для частиц с полуцелым спином.

— . Э. Шредингер написал уравнение для волновой функции, которая характеризует состояние частицы или системы частиц. Для заданной частицы и заданных действующих на нее сил это урав-

нение даст возможность найти все волновые функции для всех возможных значений энергии.

— Э. Шредингер доказал математическую эквивалентность матричной квантовой механики Гейзенберга и волновой механики, основанной на уравнении Шредингера.

М. Борн дал вероятностную интерпретацию волн де Бройля, согласно которой квадрат модуля волновой функции характеризует плотность вероятности нахождения частицы в данном месте пространства.

— М. Борн, П. Иордан написали перестановочное соотношение для матриц координат и импульсов.

— В. А. Фок, О. Клейн, В. Гордон предложили простейшее релятивистское волновое уравнение для частиц со спином нуль, используя релятивистское соотношение между энергией, импульсом и массой и сопоставляя с энергией и импульсом определенные дифференциальные операторы.

— М. Борн, Н. Винер предложили каждой физической величине сопоставлять в квантовой механике некоторый оператор, собственные значения которого определяют возможные экспериментальные значения этой физической величины.

— М. Борн развил приближенный метод решения задачи о рассеянии частиц силовым полем в квантовой механике.

— Л. Бриллюэн, Г. Вентцель, Х. Крамерс разработали метод нахождения приближенных собственных функций и собственных значений одномерного уравнения Шредингера, устанавливающий связь со старыми правилами квантования Бора и Зоммерфельда (метод ВКБ).

— П. Дирак разработал теорию представлений в квантовой механике, в основе которой лежит введение некоторого абстрактного пространства векторов состояний, причем базис в этом пространстве не конкретизируется. Матричная и волновая квантовые механики могут быть получены из такой схемы, как некоторые конкретные представления абстрактной алгебры, отвечающие как бы выбору определенной системы координат.

— Х. Крамерс, Р. Кроинг сформулировали дисперсионное соотношение, связывающее вещественную часть показателя преломления света в диэлектрической среде с некоторым интегралом от их коэффициента поглощения, основываясь только на принципе причинности.

1927. В. Гейзенберг сформулировал фундаментальное положение квантовой механики — принцип неопределенности, согласно которому невозможно одновременно измерить положение и импульс частицы, так как всегда должно выполняться неравенство $\Delta p \Delta q > h$, Δq — неопределенность измерения координаты, Δp — неопределенность измерения импульса частицы.

— Н. Бор постулировал принцип дополнительности, согласно которому в силу соотношения неопределенности два аспекта описания частиц — корпускулярный и волновой — никогда не приходят в столкновение, так как никогда не предстают одновременно; чем более четкими оказываются в каком-либо явлении корпускулярные свойства электрона, тем более незаметными и нечеткими оказываются его волновые свойства. Оба эти аспекта взаимоисключают и в то же время дополняют друг друга.

— Ю. Вигнер ввел представление о четности волновой функции, как о характеристике ее поведения при зеркальном отражении, и сформулировал закон сохранения четности в квантовой механике.

— В. Паули ввел двухрядные матрицы для описания спина электрона (спиновые матрицы Паули).

— Д. Деннисон доказал существование спина протона.

— П. Дирак разработал метод вторичного квантования, согласно которому операторам становятся сами волновые функции.

— Ю. Вигнер продемонстрировал эффективность аппарата теории групп при решении различных задач квантовой механики: «Точное решение квантовомеханических уравнений в общем случае настолько трудно, что с помощью прямых вычислений можно получить лишь грубые приближения к точным решениям. Поэтому оказывается весьма полезным вывести значительную часть квантовомеханических результатов из рассмотрения основных свойств симметрии. Когда в 1931 г. вышло первое немецкое издание данной книги («Теория групп»), в среде физиков существовало нежелание принимать аргументы теории групп и теоретико-групповую точку зрения».

— П. Дирак предложил считать компоненты разложения Фурье электромагнитного поля динамическими операторными переменными, постулировав для них стандартные коммутационные соотношения, и таким способом получил первую модель квантованного поля.

— К. Дэвиссон, Л. Джермер и независимо Дж. П. Томсон наблюдали дифракцию электронов.

— П. Дирак развил квантовую теорию излучения.

— Д. В. Скобельцын впервые наблюдал следы заряженных частиц высоких энергий в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле.

— Дж. Клей измерял интенсивность космических лучей при помощи ионизационной камеры во время путешествия от Лейдена до Явы и обнаружил уменьшение интенсивности на несколько процентов в районе Суэцкого канала (широтный эффект).

— Л. Томас, Э. Ферми разработали приближенную схему описания свойств многоэлектронных атомов (модель Томаса — Ферми).

1928. П. Дирак, синтезируя свойства квантовой механики с теорией относительности, написал квантовомеханическое уравнение для релятивистского электрона, из которого автоматически получился спин электрона $1/2$.

— . Дж. Гамов, Э. Кондон, Р. Герни разработали теорию альфа-распада как туннельного перехода α -частицы через потенциальный барьер, создаваемый положительно заряженным ядром. Так как в квантовой механике с частицей связана волна, то барьер ведет себя по отношению к этой волне как преломляющая среда по отношению к световой волне. Поэтому существует некоторая вероятность проникновения α -частиц через потенциальный барьер.

— . П. Дирак, В. Гейзенберг постулировали обменное взаимодействие — обменные силы, которые зависят от перестановки частиц. Силы эти возникают только в квантовой механике, где понятие тождественности частиц приводит к перестановочной симметрии.

— . В. Паули объяснил сверхтонкую структуру атомных спектров как результат взаимодействия магнитных моментов электрона и ядра.

1928—1930. Д. Хартри и независимо от него В. А. Фок разработали приближенный метод решения задач квантовой механики многих тел — метод самосогласованного поля, получивший название метода Хартри—Фока.

1929. О. Клейн, У. Нишина в квантовой теории вычислили сечение рассеяния фотонов электронами, которое описывало энергетическое и угловое распределения электрона и фотона в конечном состоянии.

— . В. Гайтлер, Г. Герцберг (независимо Ф. Разетти в 1930 г.) определили статистику ядер азота на основе изучения чередования интенсивностей линий молекулярных спектров. Оказалось, что ядра азота подчиняются статистике Бозе—Эйнштейна в противоречии с предсказаниями протон-электронной модели строения атомных ядер.

— . В. Боте, В. Кольхёрстер разработали технику совпадений для регистрации заряженных частиц: работа счетчиков Гейгера—Мюллера так была согласована, что регистрировались только одно-временные импульсы в них. В результате своих опытов они пришли к выводу, что господствующие представления о природе космических лучей ошибочны и что первичное космическое излучение состоит скорее всего не из фотонов, а из заряженных частиц.

— . Н. Мотт вывел формулу для дифференциального сечения рассеяния релятивистского электрона со спином в кулоновском поле точечной мишени. Он указал, что неполяризованный пучок электронов может поляризоваться при таком рассеянии за счет электромагнитного взаимодействия в высших приближениях.

— В. Гейзенберг, В. Паули попытались сформулировать квантовую электродинамику, исходя из принципа наименьшего действия, в рамках которого были найдены коммутационные соотношения между полями и сопряженными с ними импульсами. На этом пути обнаружилась трудность, связанная с инвариантностью теории относительно так называемого градиентного преобразования.

1929—1930. Э. Ферми (независимо от В. Паули и В. Гейзенберга) развил другой подход к квантовой электродинамике, в которой схема квантования удовлетворяла требованию релятивистской инвариантности, а условие Лоренца интерпретировалось не как операторное тождество, а как дополнительное условие, которому должны удовлетворять физические векторы состояний.

1930. Э. Ферми, используя объяснение В. Паули сверхтонкой структуры спектров как результата взаимодействия спина электрона и магнитного момента ядер, в рамках теории Дирака развил теорию сверхтонкой структуры, которая справедлива для ядер с любым спином.

— В. Боте, Г. Бечер, бомбардируя ядра легких элементов, таких как бор и бериллий, α -частицами, обнаружили весьма проникающее излучение, которое, по их мнению, имело электромагнитную природу и было обусловлено расщеплением ядра. В действительности это излучение состояло из нейтронов.

— Б. Росси, используя метод совпадения нескольких счетчиков Гейгера—Мюллера, обнаружил, что космические лучи образуют вторичные частицы в веществе. Это явление наблюдал также Д. В. Скобельцын в опытах с камерой Вильсона.

— П. Дирак обнаружил, что его уравнение предсказывает существование у электрона положительно заряженного партнера, который он пытался отождествить с протоном (но который оказался позитроном). Дирак ввел понятие вакуума, который заполнен бесконечным числом электронов с отрицательной энергией. Дырки в этом вакууме соответствуют антиэлектронам. «Мы поэтому вынуждены предположить,— писал Дирак,— что дырками в распределении электронов, обладающих отрицательной энергией, являются протоны. Когда электрон с положительной энергией попадет в дырку и заполняет ее, мы должны наблюдать одновременное исчезновение электрона и протона, сопровождающееся испусканием излучения». Однако Оппенгеймер заметил, что подобная интерпретация приводит к нестабильности атома.

1931. Р. Ван де Грааф создал электростатический ускоритель заряженных частиц, в котором между полыми шарами (диаметром 61 см) возникала разность потенциалов в 1 500 000 вольт при токе искоренных частиц 25 мкА. Это напряжение вдвое превышало когда-либо полученное до этого напряжение.

— Э. Лоуренс, М. Ливингстон построили первый циклотрон

с диаметром полюсов магнита 28 см, в котором были ускорены протоны до энергии 1,22 МэВ (при токе 10^{-9} А). Это был рекорд: никому до этого не удавалось ускорить протоны до такой энергии.

— В. Паули для объяснения парадоксов β -распада, связанных с непрерывным характером β -спектра и нарушением закона сохранения углового момента, постулировал существование нейтрино — частицы с нулевой массой и нулевым электрическим зарядом, но с отличным от нуля спином, равным $1/2$.

— П. Дирак предсказал существование элементарных магнитных зарядов — монополей.

— П. Эренфест, Р. Оппенгеймер показали, что ядра, состоящие из нечетного числа частиц со спином $1/2$, должны подчиняться статистике Ферми—Дирака, а из четного — статистике Бозе—Эйнштейна.

1932. К. Андерсон наблюдал в камере Вильсона, помещенной в магнитном поле, след положительно заряженной частицы, масса которой существенно меньше массы протон-позитрона. Знак заряда частицы определялся по знаку кривизны ее трека.

— И. Жолио-Кюри, Ф. Жолио-Кюри, повторяя опыт Боте—Бечера по бомбардировке ядер бериллия и лития интенси́вным пучком α -частиц, установили, что излучение бериллия приводит к вылету быстрых протонов из парафина и других водородсодержащих веществ. Они истолковали это явление как результат комптоновского рассеяния очень высокоэнергетических γ -квантов на протонах.

— Дж. Чедвик установил, что излучение бериллия (после бомбардировки α -частицами) не может иметь электромагнитную природу, а состоит из нейтронов. «...ясно, что излучаемая бериллием частица должна иметь крайне малый заряд по сравнению с зарядом протона. Естественнее всего принять, что она вообще не несет никакого заряда. Все свойства излучения бериллия могут быть объяснены с помощью такой гипотезы: это излучение состоит из частиц с массой 1 и зарядом 0, т. е. из нейтронов», — говорил Чедвик в своей побелевской лекции.

— Н. Фезер, Л. Мейтнер, У. Харкинс первыми наблюдали ядерные превращения под действием нейтронов. В камере Вильсона, облучаемой нейтронами из полоний-бериллиевого источника, было получено 1500 фотографий, на одной из которых были видны два трека, исходящих из одной точки: один из треков можно было отождествить с протоном (или α -частицей) другой — с ядром отдачи.

— Д. Д. Иваненко, а затем В. Гейзенберг выдвинули гипотезу протон-нейтронного строения ядер.

— Дж. Кокрофт, Э. Уолтон создали установку, в которой напряжение трансформатора выпрямлялось и умножалось несколько раз с помощью системы термоионных ламп и конденсаторов. Установка позволяла ускорять ионы водорода до энергии в 700 000 эВ при токе их порядка 10^{-6} А.

— Дж. Кокрофт, Э. Уолтон осуществили первую ядерную реакцию с ускоренными на своей установке протонами: при взаимодействии протонов с ядрами лития на экране наблюдались вспышки, число которых было пропорционально интенсивности протонов тока. С помощью камеры Вильсона образующиеся при ядерном расщеплении частицы были отождествлены с ядрами ${}^4\text{He}$. Через несколько месяцев эта реакция была осуществлена в СССР (А. К. Вальтером, К. Д. Синельниковым, А. И. Лейпунским).

— Э. Лоуренс, М. Ливингстон, М. Уайт впервые расщепили ядро лития протонами, ускоренными на циклотроне.

— Г. Юри с сотрудниками с помощью спектроскопического анализа обнаружил тяжелый водород — дейтерий.

— В. Гейзенберг постулировал существование обменных ядерных сил притяжения между протоном и нейтроном, а также между двумя нейтронами. Теория ядра, по мнению Гейзенберга, должна исходить из наличия этих сил, а также сил кулоновского отталкивания между двумя протонами.

— В. Гейзенберг ввел понятие формального изотопического пространства. Протон отличается от нейтрона в этом пространстве величиной некоторого числа, принимающего два значения: +1 для нейтрона и —1 для протона. Это число пропорционально проекции изотопического спина нуклонов.

— Ю. Вигнер постулировал симметрию электромагнитного взаимодействия относительно операции обращения времени, поставив ей антиунитарный оператор, содержащий комплексное сопряжение.

— Э. Ферми опубликовал обзор «Квантовая теория излучения», сыгравший важную роль в последующем развитии квантовой электродинамики.

— В. А. Фок, П. Дирак, Б. Подольский разработали многовременной формализм, согласно которому каждой частице приписывается свое время; отдельное время сопоставляется также электромагнитному полю. Уравнения Максвелла при этом обобщены на случай, когда времена электронов не равны времени поля.

— В. А. Фок последовательно вывел основные соотношения метода вторичного квантования и предложил метод конфигурационного пространства для описания систем с переменным числом части.

1932—1933. Л. Мейтнер, К. Филлип, Дж. Данинг, Дж. Пеграм наблюдали рассеяние нейтронов протонами и исследовали угловое

распределение протонов отдачи, определив полное эффективное поперечное сечение взаимодействия.

1932—1934. В. А. Фок для описания систем с переменным числом частиц развил функциональный метод, в котором вместо бесконечной последовательности волновых функций вводится производящий функционал, с помощью которого можно найти амплитуды вероятности состояний с определенным числом частиц.

1933. Ф. Жолио-Кюри, И. Жолио-Кюри, а также К. Андерсон, П. Блэккетт и Дж. Оккиалини наблюдали образование электрон-позитронной пары при взаимодействии жестких γ -лучей со свинцом.

— Р. Оппенгеймер дал интерпретацию процессу фотообразования электрон-позитронных пар как своего рода фотоэффекту, при котором фотон вырывает электрон из вакуума отрицательных энергий и переводит его в область положительных энергий. В результате образуется свободный электрон с положительной энергией и позитрон-дырка в области отрицательных энергий.

— Ф. Жолио-Кюри, Ж. Тибо наблюдали аннигиляцию электрона и позитрона.

— О. Штерн, О. Фриш методом отклонения молекулярных пучков в неоднородном магнитном поле с большими градиентами поля измерили магнитный момент протона.

— П. Блэккетт, Дж. Оккиалини сконструировали камеру Вильсона, управляемую счетчиками. Чтобы расширение камеры происходило в момент прохождения через нее заряженной частицы, использовалась схема совпадений для счетчиков, расположенных над и под камерой.

— Б. Росси, используя технику совпадений, обнаружил, что космические лучи образуют ливни в веществе.

— П. Блэккетт, Дж. Оккиалини с помощью управляемой камеры Вильсона наблюдали два (и более) ливня, образованных одновременно в пластине (помещенной в камере) или в стенках камеры.

— В. Эльзассер обнаружил, что наибольшей устойчивостью обладают те ядра, которые содержат 2, 8, 20, 50, 82 и 126 протонов и нейтронов, — так называемые магические ядра.

— Э. Ферми, Дж. Уленбек развили теорию аннигиляции позитрона на связанном электроны в один фотон и показали, что вероятность такой аннигиляции существенно меньше вероятности двухквантовой аннигиляции.

— Э. Ферми, Ф. Перрен, анализируя энергетические спектры электронов, образующихся при β -распаде, пришли к заключению, что масса нейтрино должна быть очень малой (даже нулем).

— Ю. Вигнер, анализируя энергии связи различных ядер, пришел к заключению, что радиус действия ядерных сил должен быть малым, но ядерные силы в этой области должны быть гораздо интенсивнее электромагнитных сил.

— . П. Дирак предсказал эффект поляризации вакуума, обусловленный смещением электронов с отрицательной энергией под действием внешнего электромагнитного поля.

— . Ч. Лауритсен и др. наблюдали большой выход нейтронов при бомбардировке лития и бериллия ускоренными дейтронами. Этот выход в сотни раз превышал выход нейтронов при бомбардировке этих ядер α -частицами.

1933—1934. О. Штерн, И. Эстерман, а также И. Раби с сотрудниками измерили магнитный момент дейтрона.

— . Э. Ферми развил теорию бета-распада, согласно которой β -частицы не содержатся в ядре, а порождаются протонами и нейтронами, которые образуют ядра. Им была оценена константа нового взаимодействия, которая оказалась очень малой, и поэтому взаимодействие, ответственное за β -распад, называют слабым.

1934. И. Жолио-Кюри, Ф. Жолио-Кюри открыли искусственную радиоактивность: при облучении некоторых ядер α -частицами ядра начинали испускать позитроны.

— . Э. Ферми, облучая различные ядра нейтронами, открыл искусственную радиоактивность с испусканием электронов.

— . Э. Ферми с сотрудниками «...при выполнении экспериментов по изучению наведенной нейтронами радиоактивности серебра заметил аномалию в интенсивности активации: слой парафина толщиной в несколько сантиметров, помещенный между источником нейтронов и сербром, увеличивает, а не уменьшает активность». Это явление было объяснено им замедлением нейтронов в парафине при столкновении их с протонами с последующим захватом нейтронов ядрами.

— . Э. Резерфорд, М. Олифант, П. Хартек наблюдали реакцию образования трития — еще одного тяжелого изотопа водорода.

— . Т. Ли наблюдал γ -кванты, образующиеся при взаимодействии нейтронов с протонами, $n + p \rightarrow d + \gamma$ (реакция радиационного захвата).

— . В. Гайтлер, Л. Нордгейм предсказали существование процессов комптоновского рассеяния, при которых в конечном состоянии образуется не один (как в обычном комптон-эффекте), а два или более γ -квантов. В квантовой электродинамике эти процессы определяются высшими приближениями по константе электромагнитного взаимодействия.

— . Х. Бете, В. Гайтлер создали теорию радиационных потерь энергии электроном при движении его в веществе. Используя идеи и методы квантовой электродинамики, они показали, что для легких частиц эти потери во много раз превышают потери для тяжелых заряженных частиц, причем интенсивность потерь пропорциональна квадрату заряда ядер вещества и растет с ростом энергий.

— . Х. Бете, В. Гайтлер в рамках квантовой электродинамики

развили точную теорию процессов образования электрон-позитронных пар при взаимодействии фотонов с веществом. Вероятность такого образования растет с увеличением заряда ядер вещества, а также с ростом энергии γ -квантов.

— П. А. Черенков открыл свечение чистых прозрачных жидкостей под действием γ -лучей. Было выяснено, что свечение обусловлено движением электронов, образованных γ -квантами при фотоэффекте или комптоновском рассеянии. Излучение Черенкова образуется под определенным углом к направлению движения электрона. Его интенсивность не зависит от заряда среды.

— В. Бааде, Ф. Цвикки предсказали существование нейтронных звезд, представляющих собой конечную стадию эволюции звезд. Вещество нейтронной звезды состоит из нейтронов с малой примесью электронов и протонов.

— Э. Ферми, используя предположенную им теорию слабого взаимодействия, вычислил форму β -спектра, т. е. энергетическое распределение электронов, которые образуются при β -распаде.

— Дж. Вик обобщил теорию Ферми на позитронный распад, при котором протон превращается в нейтрон. Для связанных в ядре протонов и нейтронов такое превращение возможно.

— Х. Бете, Р. Пайерлс, исходя из теории слабого взаимодействия Ферми, предсказали процессы взаимодействия нейтрино с ядрами, в результате которых могут образоваться электрон или позитрон. Впервые было указано на чрезвычайно малую величину вероятности таких процессов.

— В. Вайскопф, В. Паули последовательно применили формализм квантовой электродинамики Гейзенберга—Паули к скалярному релятивистскому волновому уравнению для полей частиц, подчиняющихся статистике Бозе—Эйнштейна.

— И. Е. Тамм оценил силы между протоном и нейтроном, обусловленные обменом электронами и нейтрино, и показал, что энергия взаимодействия очень мала.

— Дж. Челвик, М. Гольдхабер наблюдали в камере Вильсона расщепление дейтрона на протон и нейтрон под действием γ -лучей с энергией 2,62 МэВ. Измеряя энергию протонов, им удалось найти величину энергии связи дейтрона, которая оказалась равной 2,14 МэВ.

— Дж. Мэрфи, Г. Джонстон при исследовании молекулярного спектра дейтрона обнаружили, что симметричные переходы более интенсивны. Это однозначно свидетельствовало о справедливости статистики Бозе—Эйнштейна для ядер дейтерия, причем спин его должен равняться единице.

1935. Э. Ферми с сотрудниками показал, что при поглощении медленных нейтронов ядрами происходит испускание относительно интенсивного γ -излучения.

— . Х. Юкава постулировал существование сильно взаимодействующей с нуклонами частицы с отличной от нуля массой, обмен которой осуществляет взаимодействие между нуклонами (мезонная теория ядерных сил).

— . Х. Юкава, С. Саката предсказали, что электрон самой нижней К-оболочки атома может быть захвачен ядром за счет слабого взаимодействия — К-захват.

— . Дж. Даннинг, Дж. Пеграм, Дж. Финк, Д. Митчелл обнаружили, что тепловые нейтроны сильно поглощаются кадмием: сечение поглощения достигает $2500 \cdot 10^{-24}$ см².

— . П. Мун, Дж. Тильман и др. установили резонансный характер взаимодействия медленных нейтронов с некоторыми ядрами.

— . М. В. Ерсмеев, И. В. Курчатов, Г. Я. Шепкин, а также Дж. Даннинг, Дж. Пеграм, Д. Митчелл, Э. Серге, Дж. Финк измерили сечение рассеяния медленных нейтронов протонами и обнаружили рост сечения с уменьшением энергии нейтронов. Ю. Вигнер объяснил это поведение, вводя зависимость ядерных сил от спина взаимодействующих частиц.

— . Дж. Чедвик, М. Гольдхабер с достаточной точностью определили массу нейтрона. Так как масса нейтрона превышает массу протона, нейтрон должен быть нестабильной частицей и распадаться на протон, электрон и нейтрино. Распад нейтрона был предсказан также Х. Бете, М. Олифантом и Э. Резерфордом.

— . Г. Шюлер, Т. Шмидт по дополнительному расщеплению линий в атомных спектрах определили квадрупольный момент некоторых ядер.

— . И. В. Курчатов, Б. В. Курчатов, Л. В. Мысовский, Л. И. Русинов при облучении ядер брома нейтронами обнаружили искусственный ядерный изотоп $^{80}_{35}\text{Br}$ с двумя периодами полураспада (относительно испускания β -частиц).

— . Х. Бете, Р. Пайерлс предложили теорию фотоэлектрического расщепления дейтрона, учитывая взаимодействие γ -квантов только с зарядами частиц.

— . Э. Ферми вычислил вклад магнитного дипольного излучения в процесс радиационного захвата нейтронов протонами и в процесс фоторасщепления дейтрона.

— . М. Гепперт-Майер оценила вероятность двойного β -распада ядер, при котором испускаются два электрона. Если лептонное число сохраняется, то при этом должны образоваться также два антинейтрино, в противном случае может иметь место и безнейтринный распад.

— . Р. Оппенгеймер, М. Филлипс предложили новый механизм протекания ядерных реакций под действием дейтронов, получивший название процесса неполного проникновения дейтрона в ядро (процесс Оппенгеймера—Филлипса).

— . Н. Бор, Я. И. Френкель предложили капельную модель ядра.

— . Н. Бор развил идею образования составного ядра при взаимодействии частиц с ядрами, согласно которой попадающая в ядро частица теряет свою энергию при столкновении с нуклонами ядра и захватывается им, в результате чего образуется составное ядро.

— . Г. Брейт, Э. Кондон разработали теорию рассеяния протонов на протонах, учитывая наряду с эффектами короткодействующих ядерных сил дальнедействующие кулоновские силы, а также свойство тождественности протонов.

— . Д. Митчелл, Х. Халбан, П. Прейсверк наблюдали дифракционное рассеяние нейтронов ядрами.

— . Ф. Блох предложил метод поляризации нейтронов при прохождении их через намагниченное железо. Эффект Блоха обусловлен взаимодействием магнитного момента нейтрона с ориентированными магнитными диполями ферромагнетика, которое зависит от взаимной ориентации магнитных диполей.

— . А. И. Лейпунский поставил опыт по регистрации ядер отдачи, образующихся в результате β -распада изотопа углерода $^{11}_6\text{C}$, $^{11}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu$. Если при этом регистрировать также позитрон, то можно установить факт образования невидимого нейтрино.

— . Г. Брейт, Э. Кондон, Р. Презент выдвинули гипотезу зарядовой независимости ядерных сил, согласно которой ядерные силы между парой любых нуклонов одинаковы, если только частицы находятся в состоянии с одинаковыми спином и угловым моментом.

— . К. Вейцекер объяснил причину ядерной изометрии существованием вблизи основного состояния ядра возбужденного состояния, сильно отличающегося от основного по величине момента количества движения.

— . А. Прока предложил релятивистское уравнение для частицы с единичным спином и отличной от нуля массой.

— . М. Блау для исследования космических лучей применила фотопластинки.

— . Ф. Жолио-Кюри для облегчения сравнения экспериментальных данных относительно спектров β -распада с теоретическим распределением предложил метод построения определенного графика, названного его именем.

— . Б. Кассен, Э. Кондон указали на возможность упростить теорию строения атомных ядер, исходя из наблюдаемой на опыте зарядовой независимости ядерных сил.

1937. В. Гайтлер, Х. Баба, Дж. Карлсон, Р. Оппенгеймер разработали основы каскадной теории ливней в космических лучах, основанной на квантовой электродинамике.

— . И. Раби для определения магнитных моментов ядер предложил метод магнитного резонанса, который заключается в принудительной переориентации магнитного момента ядра резонансным электромагнитным полем, имеющим место при определенной частоте.

— . Т. Шмидт развил простую одноуклонную модель спина и магнитного момента ядер, согласно которой эти величины для нечетного ядра определяются полным угловым моментом непарного нуклона.

— . Л. Д. Ландау, В. Вайскопф разработали основы статистической модели ядра, в которой получены формулы для расщепления ядерных уровней, а также для их ширин.

— . Ю. Вигнер предложил однородную модель ядра, в которой ядерные силы не зависят от зарядов и спинов нуклонов.

— . М. Блау, Г. Вамбахер в фотопластинках, которые экспонировались в горах, впервые наблюдали «звезды», которые представляли собой следы многих частиц (протонов и α -частиц), выходящих из одной точки.

— . Ю. Вигнер изучил следствия зарядовой независимости для свойств ядер.

— . И. Е. Тамм, И. М. Франк построили теорию эффекта Черенкова, согласно которой излучение Черенкова должно возбуждаться равномерно движущимся электроном со скоростью, превышающей скорость света в той среде, через которую движется электрон.

— . В. А. Фок предложил новый метод решения уравнения Дирака для электрона в электромагнитном поле, основывающийся на введении в уравнение нового параметра, который имеет смысл собственного времени.

— . Х. Крамерс постулировал инвариантность основных законов природы относительно замены частиц соответствующими античастицами. Паули предложил для этой инвариантности термин «зарядовая», отметив при этом, что термин не является точным, поскольку эта инвариантность присуща взаимодействиям как заряженных, так и нейтральных частиц.

— . Л. Альварес наблюдал поглощение атомных электронов с K -оболочки (K -захват), предсказываемое теорией слабого взаимодействия.

1938. Х. Юкава, С. Саката предположили, что мезон, определяющий взаимодействие нуклонов, имеет нулевой спин и положительную четность. Однако такой скалярной вариант ядерных сил приводил к отталкиванию между нуклонами в основном состоянии дейтрона. Чтобы устранить это противоречие, Г. Фрелих, В. Гайтлер и Н. Кеммер предложили векторный вариант ядерных сил, согласно которому кванты ядерного поля должны иметь спин — единица.

— . Г. Фрелих, В. Гайтлер, Н. Кеммер, а также Х. Юкава, С. Саката и М. Такетани установили, что принцип зарядовой неза-

зависимости ядерных сил с необходимостью приводит к существованию нейтрального мезона (если ядерные силы обусловлены обменом мезонами).

— . Х. Бете, К. Критчфильд предложили протон-протонный цикл термоядерных реакций в качестве источника энергии звезд.

— . Л. Д. Ландау, Ю. Б. Румер, отправляясь от физической идеи о каскадном происхождении космических атмосферных ливней, дали строгую математическую трактовку этой проблемы.

— . К. Андерсон, С. Неддермейер, изучая при помощи камеры Вильсона энергетические потери космических лучей в веществе, пришли к выводу, что по всей вероятности «...существуют частицы с единичным зарядом и массой (которая может иметь и не одно значение) больше массы свободного электрона и значительно меньше массы протона».

— . Г. Куленкамф на основании явления аномального поглощения мезонов космических лучей при наклонном их падении (по сравнению с вертикальным падением) пришел к выводу о неустойчивости мезона (получив для времени жизни величину порядка 10^{-6} с).

— . П. Оже, В. Кольхёрстер открыли широкие атмосферные ливни (ШАЛ), наблюдая совпадения в счетчиках, разнесенных на расстояния до 75 м. Согласно современным представлениям ШАЛ порождается первичной частицей очень большой энергии (протоном или ядром), которая при столкновении с ядрами атмосферы образует заряженные и нейтральные пионы. В свою очередь, γ -кванты очень больших энергий, которые возникают при распаде π^0 -мезонов, образуют ливни электрон-позитронных пар.

1938—1939. Х. Бете, К. Вейцскер открыли углеродно-азотный цикл термоядерных реакций, протекающих на Солнце и других звездах.

1939. И. Раби измерил квадрупольный момент дейтрона, который определялся так называемыми нецентральными силами, зависящими от спинов взаимодействующих нуклонов.

— . А. Лангсдорф изобрел для регистрации заряженных микрочастиц диффузионную камеру, которая характеризуется непрерывной чувствительностью к заряженным частицам.

— . Р. Оппенгеймер, Г. Снайдер предсказали возможность существования черных дыр — звездных объектов, сжавшихся при их эволюции до размеров, равных так называемому шварцшильдовскому радиусу.

— . Ф. Белинфант ввел термин «нуклон» для обозначения частицы, которая в заряженном состоянии есть протон, а в нейтральном — нейтрон.

1940. Д. Керст построил бетатрон — установку для ускорения электронов электрическим полем, возникающим при изменении во

времени магнитного потока, пронизывающего орбиту частиц. Первый бетатрон ускорял электроны до энергии в 2,2 МэВ.

— Дж. Рочестер, Л. Яноши открыли проникающие ливни в космических лучах, которые отличаются от электронных ливней высоким проникновением вторичных частиц и небольшим угловым расхождением частиц, выходящих из свинцовой пластинки в камере Вильсона.

— Е. Вильямс, Г. Робертс получили первую фотографию распада мезона космических лучей в камере Вильсона: положительный мезон, остановившийся в газе камеры, распадается на положительный электрон — в результате в камере наблюдается излом трека.

— К. Мёллер, Л. Розенфельд предположили, что ядерные силы определяются обменом псевдоскалярным и векторным мезонами с равными массами. При этом удается получить тензорные силы и устранить сингулярную их часть при нулевом радиусе.

— В. Паули показал, что система частиц с полуцелым спином должна описываться антисимметричной волновой функцией (т. е. подчиняться статистике Ферми—Дирака), а с целым спином — симметричной волновой функцией (т. е. подчиняться статистике Бозе—Эйнштейна) — теорема о связи спина и статистики.

— Л. Альварес, Ф. Блох, используя резонансный метод Раби в сочетании с методом поляризации нейтронного пучка при пропускании его сквозь намагниченный ферромагнетик, измерили магнитный момент свободного нейтрона, получив для него величину — $1,935 \pm 0,030$ (знак был определен в другом опыте).

— С. Томонага, Д. Араки показали, что отрицательный мезон, притягиваясь положительно заряженным ядром, может захватываться на атомные орбиты и образовывать мезоатомы.

1941. В. Гайтлер развил теорию радиационного затухания, применив ее к описанию мезон-нуклонного рассеяния.

— Ф. Разетти, используя метод запаздывающих совпадений, который позволяет измерить интервал времени между остановкой мезона и испусканием электрона в результате распада, измерил время жизни мезонов космических лучей ($1,5 \pm 0,3$ мкс).

— М. Шайн и др. в экспериментах на воздушных шарах получили указания, что первичные космические лучи состоят главным образом из протонов.

— Г. Вентцель разработал теорию сильной связи для взаимодействия нуклонов со скалярным полем и предсказал существование возбужденных состояний нуклона, т. е. нуклонных изобар.

— В. Паули показал, что закон сохранения электрического заряда (а также электромагнитного тока) связан с инвариантностью функции Лагранжа относительно калибровочных преобразований с постоянной фазой.

— Э. Ферми ввел единицу ядерного сечения — бари, равную 10^{-24} см².

— Дж. Аллен зарегистрировал ядра отдачи при захвате орбитальных электронов с *K*-оболочки. Измеренное значение энергии ядер отдачи согласуется с нейтринной гипотезой.

1942—1943. Б. Росси усовершенствовал технику запаздывающих совпадений для определения времени жизни мезонов космических лучей и получил довольно точное значение $2,15 \pm 0,1$ мкс.

1943. В. Паули, С. Кусака в приближении сильной связи исследовали теорию ядерных сил Мёллера—Розенфельда, основанных на смеси псевдоскалярных и векторных мезонов.

— С. Саката и независимо И. Таникава выдвинули гипотезу существования двух мезонов: один мезон, тождественный мезону Юкавы, ответственен за ядерные силы, а другой — является продуктом распада мезона Юкавы и присутствует в жесткой компоненте космических лучей.

— В. Гейзенберг ввел понятие матрицы рассеяния, или *S*-матрицы, которая призвана описать вероятности различных переходов частиц и свойства связанных состояний. *S*-матрица определяется как оператор, преобразующий начальное состояние частиц в конечное.

— М. Олифант предложил в ускорителях частиц на большие энергии использовать не сплошную, а кольцевую магнит. Для поддержания непрерывного ускорения должны при этом меняться с течением времени и магнитное поле, и частота ускоряющего электрического поля.

1944. В. И. Векслер открыл новый принцип ускорения частиц. Это принцип автофазировки, который затем широко использовался при создании новых ускорителей заряженных частиц — фазотрона, синхротрона, синхрофазотрона, микротрона. В 1945 г. этот принцип был предложен независимо Э. Макмилланом.

— Д. Д. Иваненко, И. Я. Померанчук предсказали возникновение в циклических электронных ускорителях явления синхротронного излучения.

1945. И. Е. Тамм предложил приближенный метод решения задач в квантовой теории поля, обобщенный в дальнейшем С. Данковым (метод Тамма—Данкова).

— Г. Ван Хеерден изобрел кристаллический счетчик, к положительным физическим свойствам которого относятся отсутствие энергетического порога, линейное соотношение между энергией частицы и амплитудой выходного сигнала в широкой области энергий и малая длительность импульса.

1946. Дж. Фрай и др. создали линейный ускоритель электронов с бегущей волной, скорость которой вдоль ускорительной трубки пути равна скорости частицы.

— Ф. Говард, С. Барнес построили синхротрон-циклический ускоритель электронов, основанный на принципе автофазировки (энергия ускоренных электронов составляла 8 МэВ).

— Э. Ферми, Г. Андерсон получили холодные нейтроны при пропускании тепловых нейтронов через блок графита длиной 23 см. Измерение поглощения прошедших через фильтр нейтронов показало, что их эффективная длина волны составляет 7,15 Å, что соответствует температуре нейтронов 18 К.

— Э. Ферми заложил основы нейтрографии, основанной на изучении интерференционных явлений, которые обусловлены рассеянием нейтронных волн на отдельных атомах и молекулах.

— Б. М. Понгекорво предложил метод детектирования нейтронов с помощью реакции $\nu + {}_{17}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^{-} + {}_{18}^{37}\text{Ar}$.

— С. Пауэлл создал толстую ядерную фотоэмульсию высокой чувствительности, пригодную для регистрации заряженных частиц.

— Ф. Блох, Э. Парселл, Р. Паунд разработали метод магнитного ядерного резонанса, при котором имеет место совпадение частоты прецессии ядерного магнитного момента вокруг направления постоянного магнитного поля с частотой наложенного радиочастотного магнитного поля.

1946—1968. Дж. Гамов разработал теорию «горячей» Вселенной и также теорию образования химических элементов. Открытие реликтового радиоизлучения Вселенной в 1965 г. подтвердило справедливость этой теории.

1947. М. Копверси, Э. Паиччини, О. Пиччиони доказали экспериментально, что мюон космических лучей не взаимодействует сильно с ядрами и поэтому не может служить переносчиком сильного взаимодействия между нуклонами.

— С. Пауэлл, Дж. Оккиалини наблюдали в ядерных фотоэмульсиях следы заряженных пионов, распадающихся на мюоны.

— Дж. Рочестер, К. Батлер впервые наблюдали два случая распада тяжелых частиц в камере Вильсона. Из-за характерных следов этих частиц их назвали V-частицами, позже они получили название странных частиц.

— У. Лэмб, Р. Ризерфорд экспериментально обнаружили сдвиг уровней $2 S_{1/2}$ и $2 P_{1/2}$ атомов водорода и дейтерия — лэмбовский сдвиг, величина которого в теории Дирака в точности равна нулю.

— Х. Крамерс сформулировал принцип перенормировки массы частиц, исходя из предположения, что массу голого невзаимодействующего электрона принципиально нельзя наблюдать.

— Х. Бете, следуя идее Х. Крамерса, интерпретировал лэмбовский сдвиг как результат взаимодействия электрона с вакуумными флуктуациями электромагнитного поля. Нерелятивистский расчет привел к величине сдвига 1040 Мгц, близкой к измеренной на опыте.

— Г. Снайдер выдвинул идею квантования пространства—времени.

— С. Томонага, Ю. Швингер, Р. Фейнман построили явно релятивистски инвариантную теорию возмущений в квантовой электродинамике.

— Э. Ферми, Л. Маршалл, исследуя рассеяние нейтронов атомами, предприняли экспериментальную попытку определить глубину потенциала нейтрон-электронного взаимодействия.

— Н. И. Боголюбов развил метод приближенного вторичного квантования.

— И. Геттинг предложил использовать излучение Черенкова для измерения скорости быстрых заряженных частиц (счетчик Черенкова).

— Х. Кальман изобрел сцинтилляционный счетчик, в котором в качестве сцинтилирующих веществ используются полимеры, органические жидкости, а также органические и неорганические кристаллы.

1948. Дж. Кейфель изобрел искровой счетчик.

— Э. Гарднер, Ч. Латтес наблюдали рождение π -мезонов при столкновении протонов с энергией 345 МэВ, ускоренных на циклотроне с ядрами в Беркли.

— А. Снелл, Л. Миллер экспериментально исследовали β -распад нейтрона и измерили время жизни нейтрона.

— К. Шулл наблюдал когерентное (дифракционное) рассеяние медленных нейтронов кристаллами.

— Б. М. Понтекорво, О. Пиччиони и др. показали, что образующиеся при распаде мюона нейтральные частицы не являются фотонами.

— Б. М. Понтекорво зарегистрировал захват электрона с L -оболочки атомов аргона (L -захват), обусловленный слабым взаимодействием.

— П. Каш измерил величину аномального магнитного момента электрона.

— Ю. Швингер вычислил аномальный магнитный момент электрона, который обусловлен радиационными поправками во втором порядке теории возмущений в квантовой электродинамике. Аномальный момент оказался равным $\alpha/2\mu_B$, $\alpha \cong 1/137$, μ_B — борковский магнетон.

— С. Томонага, Р. Фейнман, Ю. Швингер создали аппарат современной квантовой электродинамики, теоретические расчеты которой с большой точностью согласуются с экспериментом.

— В. Баргман, Ю. Вигнер написали уравнения движения для частиц с большими значениями спинов.

— Ю. Швингер предсказал существование дополнительного взаимодействия движущегося магнитного момента нейтрона с электромагнитным полем ядер.

— О. Клейн, Дж. Пуппи и др. выдвинули гипотезу о существовании универсального слабого взаимодействия.

1948—1949. К. Гортер, М. Роуз предложили статический метод получения ориентированных ядер, в котором используются сильные магнитные поля, возникающие за счет спин-спиновых взаимодействий неспаренных электронов с ядром.

— Р. Фейнман, Ю. Швингер выполнили ковариантный расчет собственной энергии электрона, которая обусловлена взаимодействием электрона с создаваемым им электромагнитным полем.

— Г. В. Ждапов, А. А. Хайдаров и независимо Дж. Штейнбергер доказали, что спектр электронов при распаде мюонов немонотонен. Это свидетельствует об образовании по крайней мере трех частиц при распаде мюона.

1949. Р. Фейнман предложил графический метод представления амплитуд рассеяния и рождения частиц в квантовой электродинамике (диаграммы Фейнмана).

— Ю. Швингер вычислил радиационные поправки к процессам рассеяния электронов в кулоновском поле.

— Э. Ферми, Ч. Янг предложили первую составную модель элементарных частиц, предположив, что π -мезоны составлены из нуклонов и антинуклонов.

— М. Гепперт-Майер постулировала существование сильного спин-орбитального взаимодействия для нуклонов в ядре, чтобы получить правильные значения для больших магических чисел.

— М. Гепперт-Майер, Х. Фенсен создали оболочечную модель ядра.

— Э. Ферми развил теорию галактического происхождения космических лучей, предположив, что космические лучи образуются и ускоряются в пределах Галактики за счет их взаимодействия с блуждающими магнитными полями.

— В. Паули, Ф. Вилларс предложили метод инвариантной регуляризации в квантовой теории поля, согласно которому для расчетов вводятся фиктивные частицы, а затем в окончательных ответах массы их устремляют к бесконечности.

— Ю. Вигнер сформулировал закон сохранения барионного числа, призванный объяснить стабильность протона.

— Р. Видероз выдвинул идею встречных пучков ускоренных частиц.

— Дж. Штейнбергер, В. Панофский зарегистрировали процесс образования нейтральных пионов при взаимодействии γ -квантов с ядрами.

— Д. Юз, М. Берджи получили пучок поляризованных нейтронов путем отражения их от намагниченного зеркала.

1950. Г. Липпман, Ю. Швингер разработали вычислительный метод в формальной теории рассеяния частиц, сформулировав уравнение, названное их именами.

— М. Розенблют получил формулу для дифференциального сечения рассеяния релятивистских электронов протонами, которые обладают неточечным электрическим зарядом и магнитным моментом.

— Э. Ферми развил статистическую теорию множественного образования частиц при высоких энергиях, предположив, что энергия взаимодействующих частиц быстро распределяется между рождающимися частицами согласно статистическим законам.

— Р. Берклунд, В. Крендалл, Б. Мойер, Г. Йорк в космических лучах наблюдали нейтральный пион.

— В. Панофский, Дж. Штейнбергер, Дж. Стеллер в опытах по облучению различных ядер пучком γ -квантов с энергией 330 МэВ наблюдали образование нейтрального π -мезона (по распаду его на два γ -кванта).

— В. Тирринг показал, что перенормировка электрического заряда электрона может быть определена требованием, чтобы теоретическое сечение комптон-эффекта в пределах малых энергий фотона выражалось формулой Томсона, подтвержденной на эксперименте.

— Л. Фолди, С. Воутхьюзен нашли преобразование, которое приводит четырехкомпонентную волновую функцию электрона с определенным импульсом к двухкомпонентной функции, используемой в перерелятивистской теории спина Паули.

1950—1951. В. Панофский, Дж. Штейнбергер в опытах на ускорителе измерили время жизни положительно и отрицательно заряженных π -мезонов: $\tau(\pi^+) = (2,54 \pm 0,11) \cdot 10^{-8}$ с, $\tau(\pi^-) = (1,1 \pm 0,31) \cdot 10^{-8}$ с.

1950—1952. О. Бор, Б. Моттельсон, Дж. Рейнуотер построили коллективную модель ядра.

— Н. Кристофилос, Э. Курант, М. Ливингстон, Г. Снайдер сформулировали идею сильной фокусировки при ускорении заряженных частиц.

1951. В. Панофский и др. определили массу нейтрального пиона с помощью закона сохранения энергии и импульса в реакции образования нейтральных π^0 -мезонов при взаимодействии медленных отрицательных пионов с водородом.

— В. Панофский и др. получили убедительное доказательство псевдоскалярной природы отрицательного π -мезона из изучения реакций поглощения π^- -мезонов в дейтерии: $\pi^- + D \rightarrow n + n$.

— М. Дейч, Э. Дулит наблюдали связанное состояние электрона и позитрона — позитроний.

— Л. Вутерс обнаружил, что в результате упругого рассеяния нейтронов на протонах при энергии 150 МэВ нейтроны оказываются поляризованными.

— А. Мак Рейнольдс, используя хорошо коллимированные пучки тепловых и холодных нейтронов, доказал, что гравитационная и инертная массы нейтрона совпадают.

— Х. Бете, Э. Солпитер сформулировали релятивистское уравнение для описания связанных состояний.

— Й. Намбу, К. Нишиджима, И. Ямагучи, С. Онеда выдвинули гипотезу о парном рождении странных частиц в нуклон-нуклонных взаимодействиях.

— Дж. Рич, С. Дебендетти обнаружили аннигиляцию позитрония на три γ -кванта (трехквантовая аннигиляция).

1951—1953. Дж. Штейнберг, В. Картрайт и др., сравнивая вероятности процессов $p + p \rightarrow D + \pi^+$ и $\pi^+ + D \rightarrow p + p$, нашли, что спин положительного пиона равен нулю.

1952. Дж. Кейфель и др. произвели детальное измерение времени жизни отрицательных мюонов в веществе.

— Л. Фолди предсказал эффект рассеяния нейтрона электроном, обусловленный магнитным моментом нейтрона, а также распределением электрическим зарядом нейтрона.

— А. Пайс, Р. Ност сформулировали правила отбора для процессов взаимодействия мезонов, следующие из инвариантности относительно зарядового сопряжения и из изотопической инвариантности. (Позже эти правила отбора были получены из сохранения G-четности).

— Р. Арменторос, К. Баркер, К. Батлер, А. Кашон, К. Йорк открыли отрицательный каскадный гиперон, кси-минус-гиперон, Ξ^- .

— Дж. Родебак, Дж. Аллен зарегистрировали ядра отдачи, возникающие при электронном захвате в аргоне. Точное измерение энергии ядер отдачи позволило проверить закон сохранения энергии и импульса при испускании нейтрино.

— Э. Ферми, Г. Андерсон обнаружили быстрый рост с энергией вероятностей рассеяния положительных и отрицательных пионов на протонах, что послужило доказательством существования первого мезон-нуклонного резонанса.

— М. Камак и др. наблюдали образование пи-мезоатомов при взаимодействии медленных π^- -мезонов с ядрами углерода, кислорода и бериллия.

— К. Бракнер, К. Ватсон развили феноменологическую теорию процессов фотообразования пионов на нуклонах, допустив существование резонансного взаимодействия пионов с нуклонами в состоянии с полным угловым моментом и изотопическим спином $3/2$.

— Д. Глезер изобрел пузырьковую камеру, в которой перегретая жидкость закипает вдоль следа заряженной частицы.

— Ф. Дайсон, используя свойства взаимодействия заряженных частиц при отрицательных значениях e^2 , высказал соображения, что ряды в квантовой электродинамике являются асимптотическими.

1952—1953. Д. Пизли, а затем М. Гелл-Ман выдвинули предположение о зарядовой независимости не только пион-нуклонных взаимодействий, но и процессов с участием странных частиц.

1953—1954. М. Гелл-Ман, Ф. Лоу изучили следствия существования группы мультипликативных перепормировок в квантовой теории поля.

— В. В. Фаулер, Р. Шатт, А. Торндайк, В. Вайтемоэ наблюдали рождение странных частиц пучков пионов с энергией 1,37 ГэВ, образовавшееся на протонном ускорителе космотроне.

1953. А. Бонети, Р. Леви-Сетти и др. открыли Σ^+ -гиперон.

1953—1955. Л. Д. Ландау, развивая идеи статистической модели Ферми для процесса множественного рождения частиц в нуклонных соударениях при высоких энергиях, применил релятивистские уравнения гидродинамики, которые позволили учесть взаимодействие частиц при расширении первоначально образовавшегося весьма плотного вещества.

1953—1956. Ф. Рейнес, К. Коуэн зарегистрировали процесс взаимодействия антинейтрино с протоном, $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, в результате которого образуются позитрон и нейтрон.

1953—1954. М. Гелл-Ман, К. Нишиджима ввели понятие аддитивного квантового числа-странности адронов, которое должно сохраняться в сильном и электромагнитном взаимодействиях, но может не сохраняться в слабом взаимодействии.

1953. В. Фитч, Дж. Рейнуотер выполнили систематическое исследование радиационных переходов в мю-мезоатомах. Так как энергии γ -квантов, испущенных при этих переходах, зависят от размера ядра, то удалось этим способом определить радиусы большого числа ядер.

— П. Альфер, Р. Герман установили связь между температурами реликтового фотонного и нейтринного газов во Вселенной. В 1960 г. независимо это сделал П. Пибблз.

— Л. Д. Ландау, И. Я. Померанчук развили теорию тормозного излучения электронов высокой энергии и процесса фотообразования электрон-позитронных пар в средах, указав на важность эффектов многократного кулоновского рассеяния.

— М. Даньш, Е. Пневский открыли связанное состояние ядра и Λ -гиперона, получившего название гиперъядра (или гиперфрагмента).

Участниками конференции в Баньер-де-Бигоре выработана

современная терминология элементарных частиц (барионы, гипероны и лептоны), а также обозначения этих частиц.

— Л. Шифф вычислил сечение упругого рассеяния электронов дейтронами.

1954. Р. Далитц предложил метод определения квантовых чисел нестабильных частиц, распадающихся на три частицы. Распределение точек на предложенной им диаграмме чувствительно к спину и четности распадающейся частицы.

— В. Беркли пушен протонный синхрофазотрон на 6 ГэВ (Бэватрон).

— Р. Фейнман, Дж. Спайзмен высказали предположение, что разность масс протона и нейтрона имеет электромагнитное происхождение.

— Дж. Чу, Ф. Лоу создали теорию рассеяния пионов нуклонами при низких энергиях в рамках приближения нерелятивистского статического нуклонного источника.

— Н. Кролл, М. Рудерман при общих предположениях исследовали поведение амплитуд фоторождения пионов на нуклонах в пределе нулевой массы пиона.

— С. Оксли и др. обнаружили возникновение поляризации у протонов, рассеянных на протонах.

— Дж. Стейнбергер и др. наблюдали рождение сигма-минус-гиперона при взаимодействии отрицательных пионов с нуклонами.

— Ч. Янг, Р. Миллс, исходя из требования локальной инвариантности относительно изотопических поворотов, предсказали существование триплета безмассовых векторных полей, взаимодействующих между собой.

— М. Гелл-Ман, М. Гольдбергер, В. Тирринг, исходя из условия причинности в рамках квантовой теории поля, установили справедливость дисперсионных соотношений для амплитуд рассеяния фотонов нуклонами.

— М. Стирнс обнаружил проявления поляризации вакуума для μ -мезоатомов.

1954—1956. Возникла проблема тау и тэта-мезонов, заключающаяся в существовании двух частиц — K -мезонов с одинаковыми массами и временами жизни, но с различными распадами.

1955. Дж. Бербидж, М. Бербидж, Р. Фаулер, Ф. Хойл развили теорию образования химических элементов за счет термоядерных реакций, протекающих в звездах.

— Н. Кролл, У. Вада исследовали процессы внутренней конверсии при распаде нейтрального пиона ($\pi^0 \rightarrow \gamma + e^+ + e^-$ и $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + e^+ + e^-$).

— В. Паули, Г. Людерс доказали теорему относительно CPT -инвариантности взаимодействий элементарных частиц в рамках локальных релятивистских полевых теорий.

— Р. Дэвис предпринял попытку зарегистрировать образование электронов при взаимодействии пучка антинейтрино с ядрами хлора. Если имеет место сохранение лептонного числа, то такая реакция должна быть запрещена.

— И. М. Шмушкевич предложил эффективный способ для получения соотношений между вероятностями взаимодействия адронов, исходя из изотопической инвариантности.

— И. Н. Боголюбов в рамках аксиоматического подхода к квантовой теории поля сформулировал условие причинности для S -матрицы.

— О. Чемберлен, Э. Сегре, С. Вигапд, Т. Ипсилантис зарегистрировали образование антипротонов при взаимодействии ускоренных протонов с ядрами.

— М. Гелл-Ман, А. Пайс предсказали существование нейтральных K^0_1 и K^0_2 -мезонов, обладающих определенными значениями комбинированной четности.

— Р. Адейр предложил метод определения спина странных частиц.

— С. С. Герштейн, Я. Б. Зельдович постулировали сохранение векторного слабого тока адронов без изменения странности.

1955—1956. Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков получили дифференциальные уравнения Ли для мультипликативных перенормировок в квантовой теории поля и определили с их помощью поведение функции Грина в области больших и малых импульсов.

— Р. Восс и др., а также Ю. А. Александров и Н. И. Бондаренко обнаружили на опыте швингеровское рассеяние быстрых нейтронов электромагнитным полем ядер.

— Л. Альварес, В. Фитч, Ф. Крауфорд доказали экспериментально, что π и Θ -мезоны имеют примерно одинаковые массы и времена жизни.

— Ф. Дайсон, Г. Юберал предсказали эффект когерентного усиления в процессах тормозного излучения электронов, рассеивающихся на кристалле.

1955—1957. М. Гелл-Ман, А. Пайс сформулировали правило отбора по изотопическому спину для слабых адронных распадов с изменением странности.

1956. Р. Хофштадтер с сотрудниками получил первые данные о распределении электрического заряда внутри нуклона и о размерах нуклона, изучая рассеяние электронов больших энергий нуклонами.

— В. Баркас и др. из данных по распаду положительного пиона получили оценку на массу мюонного нейтрино.

— Дж. Фельдман, П. Мэтьюз получили соотношения кросс-симметрии для матрицы рассеяния, связывающие амплитуды различных процессов.

— Т. Ли, Ч. Янг предположили, что в процессах, обусловлен-

ных слабым взаимодействием, не сохраняется пространственная четность.

— В. Панофский, Дж. Масек, А. Лазарус зарегистрировали процесс образования мюон-антимюонных пар при взаимодействии высокоэнергетических γ -квантов с ядрами.

— Л. Ледерман, К. Ланде и др. открыли K^0_2 -мезон, т. е. нейтральный каон с большим временем жизни.

— Н. Н. Боголюбов доказал существование дисперсионных соотношений для рассеяния π -мезонов на нуклонах.

— В. В. Судаков, А. А. Абрикосов вычислили дваждылогарифмические вклады в сечения электродинамических процессов.

— Л. Б. Окунь, И. Я. Померанчук изучили следствия изотопической инвариантности для процессов взаимодействия пионов и нуклонов при высоких энергиях, допустив, что сечения перезарядки малы.

— Б. д'Эспанья, Дж. Прентки ввели понятие гиперзаряда, т. е. квантового числа, сохраняющегося в сильном и электромагнитных взаимодействиях. Ю. Швингер связал гиперзаряд со странностью.

— Т. Ли, Ч. Янг ввели операцию G -сопряжения, которая комбинирует сопряжение и изотопическую инвариантность.

— М. Гольдхабер предложил вариант составной модели сильнордействующих частиц, согласно которой все мезоны и барионы должны быть составлены из частиц p , n и K^- .

— Б. Кокк, О. Пиччиони, У. Вензелл, Г. Лембертсон открыли антинейтрон, образующийся при перезарядке антипротонов.

— С. Трейман предложил новый способ определения спина гиперонов.

— С. Саката развил составную модель мезона и барионов, в которой мезоны образованы из протона, нейтрона, Λ -гиперона и соответствующих антибарионов.

— М. Гелл-Ман ввел понятие минимального электромагнитного взаимодействия, которое определяется только электрическими зарядами элементарных частиц.

1956—1958. М. Гелл-Ман сформулировал правило отбора по странности для лептонных слабых распадов странных частиц, согласно которому изменение странности равно изменению электрического заряда. На обязательность этого правила для модели Саката указал Окунь

1957. Й. Намбу предсказал необходимость существования векторных мезонов для объяснения электромагнитных формфакторов нуклонов.

— Вступил в строй синхрофазотрон на 10 ГэВ в Дубне.

— А. Сильверман, Р. Вильсон зарегистрировали процесс образования странных частиц при взаимодействии γ -квантов больших энергий с протонами.

— Г. Людерс, Б. Зумино на основе *CPT*-теоремы доказали равенство масс и времени жизни частицы и античастицы.

— Ц. Ву с сотрудниками доказала несохранение четности при β -распаде поляризованных ядер ^{60}Co , обнаружив асимметрию вылета электронов относительно направления спина распадающегося ядра.

— Ф. Крауфорд и др. обнаружили эффекты несохранения пространственной четности в распаде Λ -гиперона на протон и отрицательный пион.

— Р. Гарвин, Л. Ледерман, М. Вайнрич, а также Дж. Фридман и В. Телегди зарегистрировали нарушение *P*-инвариантности в распадах пионов и мюонов.

— Л. Д. Ландау, А. Салам, Т. Ли, Ч. Янг предложили теорию двухкомпонентного нейтрино, согласно которой нейтрино имеет отрицательную, а антинейтрино — положительную спиральности. Безмассовые ψ и $\bar{\psi}$ должны быть не тождественными частицами.

— Ю. Швингер выдвинул идею объединения слабого и электромагнитных взаимодействий.

— Л. Ландау, А. Салам, Т. Ли, Ч. Янг постулировали закон сохранения комбинированной четности в слабом взаимодействии.

— Т. Ли, Ч. Янг, Р. Эме, а также Б. Л. Иоффе, Л. Б. Окунь, Л. Л. Рудик показали, что асимметрия β -распада поляризованных ядер ^{60}Co свидетельствует не только о нарушении инвариантности относительно пространственных отражений, но и относительно *C*-преобразования.

— Р. Гарвин, Л. Ледерман, наблюдая прецессию спина мюона в магнитном поле, выполнили прямое измерение спина μ -мезона.

— Л. Альварес с сотрудниками наблюдал явление мюонного катализа — реакцию синтеза $p+d \rightarrow {}^3\text{He}$, вызванную мюонами.

— М. А. Марков, К. Нишиджима, Ю. Швингер указали на то, что нейтрино из β -распада может отличаться от нейтрино, которое образуется при распаде мезонов.

— М. Гелл-Ман, Ю. Швингер предположили справедливость «глобальной» симметрии сильного взаимодействия.

— Т. Кроншау, Дж. де Бир изобрели искровую камеру для регистрации ионизирующих частиц.

— Четыре группы экспериментаторов (А. И. Алиханов и др., С. Я. Никитин и др., П. Каванага и др., Г. Фраунфельдер) получили доказательства существования продольной поляризации бета-электронов.

— В. Паюфский, С. Тотфест на опыте обнаружили эффект радиационных поправок при рассеянии электронов протонами.

1957—1958. Ф. Рейнес и др., Г. Н. Флеров и др. с большой точностью подтвердили на опыте закон сохранения барионного заряда.

— П. Мак, К. Кру, Р. Хэддок измерили спиральность электронов при распаде мюонов.

— М. Бальдо-Чеолин, Д. Праус обнаружили в ядерных фотоэмulsionях случай рождения анти- Λ -гиперона, образованного в реакции $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + \Lambda + n$, при этом Λ наблюдался по распаду $\Lambda \rightarrow p + \pi^+$.

— С. Вайнберг ввел понятия слабых токов первого и второго рода, отличающихся свойствами преобразования при G -сопряжении.

— М. Гелл-Ман, Р. Фейнман, Р. Маршак, Э. Судершан, Дж. Сакураи предложили универсальную теорию слабых взаимодействий, основанную на векторных заряженных слабых токах.

— М. Гольдбергер, С. Трейман нашли соотношение между константами слабого и сильного взаимодействия, используя метод дисперсионных соотношений.

— Дж. Штейнбергер и др. наблюдали распад $\pi \rightarrow e + \nu$, вероятность которого находилась в согласии с универсальной теорией слабого взаимодействия.

— М. Кларк, М. Берджи с сотрудниками доказали в опытах по изучению β -распада поляризованных нейтронов, что слабое взаимодействие инвариантно относительно обращения времени.

— М. Гольдхабер и др. измерили спиральность нейтрино, доказав, что спин нейтрино направлен против его импульса, а спин антинейтрино направлен по импульсу.

— А. И. Алиханов, Г. П. Елисеев и В. А. Любимов при изменении поляризации электронов из распада RaE не обнаружили нарушения T -инвариантности.

— А. Н. Сосновский, П. Е. Спивак с сотрудниками опубликовали результаты своих измерений времени жизни свободного нейтрона.

— И. Я. Померанчук, используя метод дисперсионных соотношений, доказал теорему о равенстве полных сечений взаимодействия частиц и античастиц при высоких энергиях.

— Р. Хофштадтер, М. Ерьян получили данные об электромагнитной структуре нейтрона из экспериментов по неупругому рассеянию электронов высоких энергий на дейтронах.

— С. Мандельстам, постулировав определенные аналитические свойства амплитуд двухчастичных процессов рассеяния частиц, получил двойное дисперсионное соотношение для амплитуд, справедливость которого не была доказана на основе общих принципов квантовой теории поля.

— Ф. Эйлер и др. определили спин Λ и Σ^- -гиперонов, который оказался равным $1/2$.

1959. Л. Альварес с сотрудниками получил фотографию образования гиперонных пар при протон-антипротонной аннигиляции.

— О. Фриш, Д. Олсен зарегистрировали процесс когерентного излучения при рассеянии электронов кристаллами.

— Н. Сеймиос и др., изучая распад нейтрального пиона на две электронно-позитронные пары, установили, что пространственная четность нейтрального пиона отрицательна.

— Д. Крауфорд и др. установили справедливость изотопической инвариантности для процессов с участием странных частиц.

— В. Фрезер, Дж. Фулко, изучая в рамках дисперсионных соотношений электромагнитную структуру нуклонов, пришли к заключению о необходимости введения векторного мезона с единичным изотопическим спином.

— Б. М. Понтекорво обосновал программу возможных экспериментов по обнаружению существования двух типов нейтрино.

— Б. М. Понтекорво указал на важность слабого взаимодействия нейтрино с электронами для астрофизических приложений.

— М. Гольдхабер, Дж. Фейнберг с большой точностью подтвердили справедливость сохранения электрического заряда в процессах взаимодействия элементарных частиц.

— Т. Редже, исследуя аналитические свойства амплитуд рассеяния по угловому моменту, открыл движущиеся полюса (полюса Редже), положение которых (траектория Редже) зависит от квадрата переданного импульса.

— Л. Д. Ландау развил общий метод нахождения особенностей амплитуд квантовой теории поля на основе диаграммной техники.

— Д. В. Волков показал, что современная квантовая теория поля допускает существование не только известных статистик Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака, но также некоторых «промежуточных», названных парастатистиками. Несколько ранее для систем частиц на возможность парастатистик указал Х. Грин.

— Р. Маршак, А. Гамба, С. Окубо постулировали существование лептон-андронной аналогии.

— В ЦЕРНЕ запущен протонный синхрофазотрон на энергию 28 ГэВ.

— Ф. Крауфорд и др. получили указания, что спин K -мезона равен нулю.

1960. В. Хьюз и др. открыли мюоний — связанное состояние положительного мюона и отрицательного электрона — по его характерной частоте ларморовской прецессии.

— Г. Гарвин и др. измерили величину аномального магнитного момента мюона — g -2-эксперимент, выполненный с помощью накопительного кольца мюонов в ЦЕРНе.

— Я. Баттон и др. зарегистрировали реакцию образования анти-сигма-нуль-гиперона.

— В. И. Векслер с сотрудниками наблюдал рождение анти-сигма-минус-гиперона в эксперименте по облучению пропановой камеры пучком отрицательных пионов.

— Э. Амальди, К. Костаньолли и др. обнаружили в эмульсии, облученной антипротонами, след анти-сигма-плюс-гиперона.

— А. Крю и др., Д. Хардинг и др. доказали экспериментально закон сохранения изотопического спина в реакциях, обусловленных сильным взаимодействием.

— Л. Альварес с сотрудниками в опытах с помощью водородной пузырьковой камеры обнаружили существование резонансов в системе Λ -гиперона и пиона.

— И. Намбу, Чжоу-Гуан-чжао и др. постулировали гипотезу частичного сохранения аксиального слабого тока адронов.

— М. А. Марков указал на возможность проведения нейтринных экспериментов с помощью космических лучей.

— Дж. Сакурай, используя идею Янга-Миллса о калибровочной локальной инвариантности, постулировал существование двух векторных изоскалярных и одного изовекторного мезонов.

— Запущен протонный синхрофазотрон с жесткой фокусировкой на энергию в 33 ГэВ (Брукхейвен).

— А. И. Алханов и др. измерили спиральность мюонов, образующихся при распаде π -мезонов.

— В. И. Гольданский и др. в опытах по изучению комптоновского рассеяния γ -квантов протонами определили поляризуемость протона.

1961. Б. М. Понтекоров, Я. А. Смородинский предприняли попытку оценить плотность нейтрино во Вселенной, используя результаты нейтринных экспериментов.

— Я. Б. Зельдович, Я. А. Смородинский оценили максимальную плотность нейтрино, используя тот факт, что при известном современном состоянии Вселенной плотность материи определяет прошлое Вселенной.

— Дж. Чу выдвинул гипотезу «бутстрапа», согласно которой существование и свойства сильно взаимодействующих частиц взаимно обусловлены, так что все эти частицы одинаково фундаментальны.

— М. Гелл-Манн, Ю. Неэман предположили справедливость SU_3 -симметрии сильного взаимодействия элементарных частиц, что позволило классифицировать мезоны и барионы по мультиплетам групп SU_3 .

— Дж. Голдстоун сформулировал теорему, согласно которой инвариантность вакуума относительно некоторой группы преобразований, которые оставляют инвариантным лагранжиан, обязательно приводит к существованию безмассовой частицы.

— А. Эрви и др. наблюдали в пион-протонных столкновениях при высоких энергиях образование резонанса ρ -мезона, распадающегося на два пиона.

— Б. Маглич и др. открыли ω -мезон, образующийся в реак-

ции протон-антипротонной аннигиляции. Нейтральный векторный ω -мезон распадается главным образом на три пиона.

— Г. Шарпак и др. предприняли попытку оценить электрический дипольный момент мюона.

— В. И. Грибов, М. Фруассар получили представление для парциальной амплитуды, которая определяет взаимодействие частиц в состоянии с определенным угловым моментом.

— Дж. Чу, С. Фраучи распространили идею полюсов Редже на физику элементарных частиц.

— С. Джеффрис, М. Боргини предложили способ получения поляризованных протонов, получивший название «эффекта твердого состояния».

— М. Фруассар доказал теорему, которая позволяет получить ограничение на возможный рост с энергией полного сечения взаимодействия адронов.

1961—1964. М. Гелл-Ман сформулировал свойства SU_3 -симметрии в терминах одновременных коммутационных соотношений между токами.

1962. Г. Барбилин и др. получили пучок линейнополяризованных фотонов большой энергии при рассеянии электронов кристаллами.

— А. Ф. Дунайцев, В. И. Петрухин, Ю. Д. Прокошкин, В. И. Рыкалин обнаружили на эксперименте β -распад положительного пиона, вероятность которого чрезвычайно мала.

— Р. Гильдебрант наблюдал реакцию захвата μ -мезона протоном, при этом образуются нейтрон и нейтрино. Эксперимент проводился с помощью водородной пузырьковой камеры.

— М. Гелл-Ман, С. Окубо, исходя из предположения об определенном нарушении SU_3 -симметрии, вывели соотношение между массами мезонов или барионов, принадлежащих к определенному мультиплету группы SU_3 .

— Б. Маглич и др., изучая процессию спина антипротона в однородном магнитном поле, получили указание, что знак магнитного антипротона противоположен знаку магнитного момента протона.

— Р. Куул и др. измерили магнитный момент Λ -гиперона.

— В. Брукхейвене и ЦЕРНе наблюдалось образование Ξ^- -гиперона.

— Г. Дэнби, Л. Ледерман, Дж. Штейнбергер в эксперименте с нейтронами высоких энергий, полученных на протонном ускорителе в Брукхейвене, доказали существование электронного и мюонного нейтрино.

— Р. Сакс, Я. Хэнд, Д. Миллер, Ф. Эрнст ввели понятия электрического и магнитного формфакторов нуклонов и выяснили их преимущества по сравнению с формфакторами Дирака и Паули.

— Т. Ли, Ч. Янг исследовали изотопические трансформационные свойства слабого тока адронов без изменения странности.

— И. Я. Померанчук, В. Н. Грибов доказали справедливость свойства факторизации сечений при больших энергиях, используя условие унитарности и представление о полюсах Редже.

1962—1965. Х. Альфвен, О. Клейн развивали теорию механизма разделения протонов и антипротонов в космологических масштабах.

— В. Н. Грибов изучил свойства фермионных полюсов Редже.

1962—1963. К. Балтэй и др. в реакциях аннигиляции протон-антипротонных пар наблюдали образование антибарионных резонансов.

1963. В Новосибирске и Харькове запущены первые установки со встречными электрон-электронными и электрон-позитронными пучками.

— В. В. Бармин и др. обнаружили распад омега-мезона на нейтральный пион и γ -квант.

— Х. Курант и др. из данных относительно распада Σ^0 -гиперона на Λ -гиперон и электронно-позитронную пару определили относительную $\Sigma\Lambda$ -четность, которая оказалась положительной.

— Н. Кабиббо распространил SU_3 -симметрию на слабое взаимодействие адронов и получил выражение для слабого тока адронов, в котором подавление переходов с изменением странности достигается путем введения одного параметра, получившего название угла Кабиббо.

— Ц. Ву и др. получили подтверждения справедливости гипотезы сохраняющегося векторного тока.

— Г. Линкин изучал свойства SU_2 -подгрупп в унитарной симметрии и показал, что для анализа электромагнитных свойств адронов особенно полезна подгруппа U -спинна.

— М. Даныш и др. обнаружили двойные гиперфрагменты — ядра, содержащие два Λ -гиперона.

— К. Балтэй и др. в протон-антипротонных соударениях наблюдали образование анти- Σ^0 -гиперона.

— Ф. Арутюнян, В. А. Туманян, Р. Милбарн указали на возможность получения пучков высокоэнергетических, поляризованных γ -квантов при столкновении лазерных фотонов с релятивистскими электронами.

— С. Мандельстам доказал, что в релятивистской теории наряду с комплексными полюсами Редже должны существовать также и точки ветвления, появление которых существенно усложняет анализ процессов высокоэнергетического взаимодействия адронов.

— Г. Дардел и др. измерили время жизни релятивистских π^0 -мезонов, измеряя среднее расстояние, проходимое ими от точки рождения до точки распада.

— В. Барнес и др. обнаружили образование омега-минус-гиперона при взаимодействии отрицательных каонов с протонами. Ис-

следование продуктов распада позволило определить массу гиперона и установить, что странность его равна минус три.

1964. Дж. Кристенсон и др. наблюдали несохранение комбинированной четности в распаде нейтральных каонов, а именно: с малой вероятностью был зарегистрирован распад.

— Л. Вольфенштейн предложил сверхслабое взаимодействие для объяснения нарушения CP -инвариантности.

— Ю. Г. Абов, П. А. Крупчицкий, В. М. Лобашов и др. экспериментально обнаружили проявления слабого взаимодействия между нуклонами в ядрах.

— А. Пайс, Л. Радикати, Ф. Гюрсей предположили справедливость статической SU_6 -симметрии и проанализировали следствия этого предположения.

— Дж. Цвейг, М. Гелл-Ман постулировали существование кварков — фундаментальных частиц с дробными значениями электрического заряда.

— П. Хиггс доказал, что теорема Голдстоуна о появлении безмассовых бозонов в теориях с неинвариантным вакуумом не имеет места в присутствии калибровочных векторных полей.

— М. А. Марков допустил существование нейтральных звезд.

— С. А. Бунятов, В. М. Сидоров, Ю. А. Батусов, В. А. Ярба наблюдали превращение π^+ -мезона при рассеянии его ядрами в π^- -мезон (двойная перезарядка пионов).

1964—1965. О. Кулков, Ю. Тельнов, Е. Филиппов, М. Якименко, а также К. Бемпорд и др. получили за счет обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов пучок монохроматических и высокоэнергетических фотонов.

1964—1965. И. Намбу, Н. Н. Боголюбов и др. предложили модель с тремя триплетами кварков, в которой можно было избежать трудностей с дробными электрическими зарядами кварков, а также с выполнением статистики Ферми-Дирака.

1964—1967. В подземных экспериментах зарегистрировано взаимодействие нейтрино космических лучей с веществом.

1964—1969. В нейтринных экспериментах установлено, что ν и $\bar{\nu}_\mu$ отличаются знаком мюонного заряда.

— Дж. Бьёркен, С. Глэшоу, В. В. Владимирский, Л. Б. Окунь и др. выдвинули гипотезу о существовании нового квантового числа — шарма, которое должно сохраняться в сильном взаимодействии.

1965. М. П. Рекало предложил новый способ определения электромагнитных формфакторов протона в той области времениподобных переданных импульсов, которая недоступна в опытах на встречных пучках.

— Г. Бурлесон и др. зарегистрировали γ -излучение атомов, образованных K^- -мезонами и ядром ${}^4\text{He}$.

— Г. Липкин, С. Мешков ввели понятие W -спина.

— В. Фити и др. наблюдали интерференционные эффекты в распадах K^0_1 и K^0_2 -мезонов.

— Л. Костер создал гравитационный рефлектометр, позволяющий очень точно измерять различные параметры нейтронной физики.

— Д. Эванс и др. определили время жизни π^0 -мезона по распаду его на γ -квант и электронно-позитронную пару

— В. Бертрам и др. наблюдали рождение протон-антипротонных пар при взаимодействии γ -квантов большой энергии с ядрами.

— В. Кутяни, В. И. Петрухин, Ю. Д. Прокошкин предприняли попытку зарегистрировать запрещенный распад нейтрального пиона на три γ -кванта.

1966. С. С. Герштейн, Я. Б. Зельдович получили астрофизическую оценку на массу мюонного нейтрино, которая оказалась существенно ниже оценки, найденной в опытах на ускорителях.

— К. Шулл и др. предприняли попытку зарегистрировать электрический заряд нейтрона и получили очень малую величину для верхней границы этого заряда.

— Р. Кук и др. измерили магнитный момент Σ^+ -гиперона, изучая прецессию спина гиперона в магнитном поле.

— Запущен самый мощный линейный ускоритель электронов на энергию 21 ГэВ (Стэнфорд).

1967. В. Ауслендер и др. выполнили измерения формфактора пиона в области времениподобных переданных импульсов в опытах на встречных электрон-позитронных пучках.

— Н. Кролл, Т. Лян, Б. Цумино предположили, что полный электромагнитный ток адронов может быть идентичен определенной линейной комбинации полей нейтральных векторных мезонов (тождество «ток—поле»).

— В Серпухове запущен протонный синхрофазотрон с жесткой фокусировкой на 76 ГэВ.

— А. И. Ахнестер, М. П. Рекало в рамках кварковой модели установили кварковую структуру фотона и развили теорию процессов фотообразования нейтральных векторных мезонов на пучках.

— Р. Бардин и др. получили очень низкую оценку для вероятности двойного бета-распада.

— Р. Долен, Д. Хорн, К. Шмид сформулировали гипотезу (принцип) дуальности, согласно которой усредненный вклад резонансов в амплитуду рассеяния равен вкладу реджевских полюсов в перекрестном канале рассеяния.

— А. М. Балдин и др. экспериментально обнаружили распад векторного ϕ -мезона на электрон-позитронную пару.

— С. Вайнберг, объединив идеи о спонтанном нарушении симметрии и о локальной калибровочной инвариантности, развил мо-

дель едного описания слабого и электромагнитного взаимодействий лептонов.

1968. Р. Карриган из данных относительно γ -переходов в π -мезоатомах получил прямые указания на то, что спин отрицательного пиона равен нулю.

— Р. Дэвис, Д. Хармер, К. Гоффман предприняли безуспешную попытку зарегистрировать солнечные нейтрино. Отрицательный результат этого опыта привел к заключению, что углеродно-азотный цикл вносит очень малый вклад в энергию Солнца.

— Г. Венециано получил представление для амплитуды взаимодействия адронов, удовлетворяющее принципу дуальности.

1969. Е. Блум и др. при рассеянии электронов нуклонами открыли явление масштабной инвариантности, согласно которому структурные функции электрон-нуклонного рассеяния зависят от отношения инвариантных переменных.

— Дж. Бьёркен получил масштабную инвариантность, исходя из свойств коммутаторов электромагнитных токов при равных временах.

— В. И. Крышкин, А. Г. Стерлингов, Ю. П. Усов определили время жизни нейтрального пиона, зарегистрировав образование π^0 -мезонов при рассеянии γ -квантов больших энергий в кулоновском поле ядер свинца (эффект Примакова).

— Р. Фейнман для объяснения свойств масштабной инвариантности глубоко неупругого рассеяния электронов предложил партонную модель нуклонов, согласно которой нуклон состоит из точечных частиц — партонов, обладающих электрическим зарядом, а рассеяние электронов нуклонами определяется суммой сечений рассеяния электронов на отдельных партонах.

— Х. Харарн, Дж. Рознер ввели дуальные диаграммы, позволяющие графически представить те ограничения, которые вытекают из дуальности и из отсутствия экзотических резонансов. Основная идея состоит в том, чтобы показать на диаграмме кварковую структуру барионов и мезонов.

— Ю. Швингер ввел дуальнозаряженные частицы — дионы, несущие не только электрический, но и магнитный заряды. Адроны при этом должны быть составлены из дионов, в результате удается описать электромагнитные свойства адронов и в принципе понять нарушение CP -инвариантности.

— Б. Л. Иоффе, Р. Брандт, Дж. Препарата связали явление глубоко неупругого рассеяния с поведением токов на световом конусе.

— Дж. Баллам и др. в опытах с линейнополяризованными γ -квантами доказали, что в реакции фотообразования нейтральных ρ -мезонов на протоне имеет место сохранение спиральностей частиц в S -канале.

— И. С. Шапиро предсказал возможность существования связанных состояний нуклона и антинуклона — квазинуклонных состояний и исследовал их свойства.

— Г. Исаак доказал невозможность существования связанных состояний электрона и нейтрона с энергией связи порядка тепловой, обусловленных взаимодействием магнитных моментов нейтрона и электрона.

— Дж. Бакенштосс и др. зарегистрировали рентгеновское излучение, возникающее в результате радиационных переходов в антипротонных и Σ^- -гиперонных атомах.

— Ю. М. Антипов и др. наблюдали образование ядер антигелия-3 при взаимодействии протонов высоких энергий с ядрами алюминия. Масса ядер ${}^3\text{He}$ оказалась совпадающей с массой ядер гелия-3.

1971. В Новосибирске выполнено изучение радиационной поляризации пучков частиц в электрон-позитронных накопительных кольцах.

— А. Б. Мингал предсказал существование аномальных состояний ядерной материи, которые могут возникнуть за счет фазового перехода при перестройке пионного поля в достаточно плотной нуклонной среде и которые обуславливают принципиальную возможность существования сверхплотных ядер.

— С. Ф. Бережнев и др. измерили дифференциальное сечение процесса образования электрон-позитронных пар при взаимодействии отрицательных пионов с нуклонами, что дает возможность надежного определения электромагнитных формфакторов π -мезона и нуклона в области времениподобных переданных импульсов.

— Дж. Рассел и др., измеряя сечение образования мюонных пар при рассеянии мюонов на ядрах свинца, подтвердили справедливость статистики Ферми-Дирака для мюонов.

— С. П. Денисов и др. на ускорителе в Серпухове при измерении полных сечений взаимодействия протонов, антипротонов, пионов и каонов с нуклонами в интервале энергий, налетающих до 60 ГэВ, обнаружили изменение энергетической зависимости полных сечений взаимодействия адронов.

— К. А. Тер-Мартirosян с сотрудниками выполнил анализ процессов взаимодействия адронов при высоких энергиях в теории Редже с разрезами.

— Ю. П. Горин и др., исследуя реакцию расщепления антидейтронов при их взаимодействии с ядрами, измерили энергию связи антидейтрона и показали, что в пределах экспериментальных ошибок она согласуется со значением энергии связи дейтрона.

— А. Файстоун и др. обнаружили в дейтериевой пузырьковой камере, облученной положительными каонами с энергией 12 ГэВ, после анализа 300.000 фотографий анти-омега-минус-гиперон $\bar{\Omega}^-$.

— В ЦЕРНе запущена установка с двумя накопительными кольцами, ускоряющими протоны до энергии 28 ГэВ. Светимость установки составляет $4 \cdot 10^{30} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$.

1972. Д. В. Волков, Б. Цумино, П. Весс ввели концепцию суперсимметрии.

— Т. Эйхтен и др. наблюдали рождение странных частиц при взаимодействии пучка антинейтрино с протонами $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + \Lambda$.

— Р. Кул и др. измерили магнитный момент Σ^- -гиперона, изучая прецессию спина Σ^- -гиперона в сильном магнитном поле, образованном в реакции $K^- + p, \Sigma^- + K^+$.

— Дж. Фокс и др. измерили магнитный момент антипротона путем измерения тонкой структуры спектров γ -лучей, испускаемых антипротонными атомами. Магнитный момент антипротона совпадает по величине с магнитным моментом протона, но отличается знаком.

1973. Г. Ярлсгог и др., измеряя дифференциальное сечение рассеяния высокоэнергетических γ -квантов ядрами, выделили вклад дельбрюкковского рассеяния, т. е. упругого рассеяния γ -квантов в кулоновском поле ядер посредством рождения виртуальных электрон-позитронных пар.

— Ф. Хазерт и др. зарегистрировали 370000 $\bar{\nu}_\mu$ и 360000 $\bar{\nu}_\mu$ событий в фреоновой камере Гаргамель и обнаружили один случай упругого рассеяния мюонного антинейтрино на электроны. Подобное рассеяние может возникать только за счет нейтральных слабых токов.

— Группа физиков из ЦЕРНа обнаружила новый тип взаимодействия нейтрино высоких энергий с нуклонами, при котором в конечном состоянии не образуется мюон или электрон. Наиболее вероятная интерпретация сводится к введению нейтральных слабых токов нейтрино и адронов.

— Дж. Фокс и др. нашли величину магнитного момента Σ^- -гиперона путем измерения тонкой структуры спектров γ -лучей, образованных при радиационных переходах в Σ^- -атомах.

— В. Карнзерс зарегистрировал шесть распадов нейтрального каона на мюонную пару в согласии с оценками, которые можно было получить на основе условия унитарности.

— Д. Гросс, Ф. Вильчек установили для неабелевых калибровочных теорий явление асимптотической свободы, согласно которому константа взаимодействия должна стремиться к нулю с ростом энергии, т. е. частицы не взаимодействуют — становятся свободными на малых расстояниях.

— В. Матвеев, Р. Мурадян, А. Тавхелндзе, а также С. Бродский и Дж. Фарар сформулировали правила кваркового счета для определения поведения электромагнитных формфакторов адронов и

амплитуд рассеяния при больших переданных импульсах, согласно которым это поведение зависит простым образом от числа кварков, образующих адроны.

— М. Кастеллано и др. впервые зарегистрировали реакцию образования протон-антипротонных пар на встречных электрон-позитронных пучках, что позволило оценить электромагнитные форм-факторы протона в области времениподобных переданных импульсов.

1974. С. Тинг с сотрудниками, Б. Рихтер с сотрудниками открыли Ψ -частицы — мезонные резонансы с массой 3,1 ГэВ и со временем жизни 10^{-20} с. Ψ -частицы рождаются в протон-ядерных столкновениях, а также в реакциях на встречных электрон-позитронных пучках.

— А. М. Балдин предсказал и обнаружил кумулятивный эффект, согласно которому при столкновении релятивистского ядра с мишенью образующимся частицам передается импульс, значительно превышающий импульс, приходящийся на один нуклон налетающего ядра.

— На ускорителе протонов в Серпухове наблюдалось рождение ядер антитрития ${}^3\bar{\text{H}}$ при взаимодействии протонов с ядрами алюминия. Среди $4 \cdot 10^{11}$ отрицательно заряженных частиц с импульсом 25 ГэВ, образованных под нулевым углом на внутренней мишени ускорителя протонами с энергией 70 ГэВ, идентифицировано 4 ядра антитрития.

1974—1975. Д. Фокс и др., а также Ц. Ченг и др. обнаружили нарушение масштабной инвариантности при изучении рассеяния высокоэнергетических мюонов на ядрах железа.

1974—1977. Г. Т. Адылов и др., Е. Б. Дэлли и др. при изучении рассеяния заряженных пионов очень больших энергий атомными электронами прямым способом определили электромагнитный форм-фактор π -мезона.

1975. Т. Аппелквист, Г. Полтцер предсказали не только существование связанной системы из шармовых кварка и антикварка — шармония, но и его свойства. Физической реализацией шармония служат Ψ -частицы.

— М. Л. Перл и др. в опытах на встречных электрон-позитронных пучках, наблюдая реакцию $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + \mu^+ + \mu^- + 2$ недедетектируемых частиц, получили первые указания относительно существования тяжелого лептона, который распадается на электрон или мезон и совокупность двух недедетектируемых нейтрино. Масса тяжелого лептона должна заключаться в интервале 1,6—2,0 ГэВ.

— А. Бенвенути и др. наблюдали образование двух мюонов противоположного знака по электрическому заряду при взаимодействии нейтрино большой энергии с нуклонами, что может быть истолковано как образование в нейтринных взаимодействиях новой

частицы, например шармового мезона или бариона, с последующим ее распадом на мюон.

— Г. Хансон и др. в опытах на встречных электропозитронных пучках наблюдали образование двух струй адронов, летящих в противоположные стороны, что служит косвенным подтверждением справедливости гипотезы кварков.

— В. Брауншвейг и др. наблюдали каскадный распад Ψ -частицы с массой 3,7 ГэВ, в результате которого испускались два γ -кванта определенной энергии и образовывался Ψ -мезон с массой 3,1 ГэВ.

— Б. Напп и др. наблюдали процесс дифракционного образования Ψ -частиц при взаимодействии γ -квантов больших энергий с нуклонами и ядрами, что указывает на адронную природу Ψ -частиц и на равенство единице их спина.

1975—1977. М. Холдер и др. наблюдали образование мюонов одного знака при взаимодействии нейтрино с ядрами железа, причем в нейтринных пучках рождаются отрицательные, а в антинейтринных — положительные мюоны.

1976. А. М. Скринский и др. выполнили точное определение разности аномальных магнитных моментов электрона и позитрона путем сравнения частот процессии спинов поляризованных электронов и позитронов в накопительных кольцах.

— Т. Калогероупулос и др., изучая процесс аннигиляции антипротонов на поляризованной протонной мишени, нашли, что четность антипротона противоположна четности протона.

— М. Олгвард и др. получили интенсивный пучок поляризованных электронов большой энергии на Стэнфордском линейном ускорителе.

— Е. Т. Третьяков и др. улучшили оценку верхней границы массы электронного нейтрино, понизив ее до 20 эВ.

— А. Бенвенути и др., сравнивая сечения взаимодействия нейтрино и антинейтрино с нуклонами, показали, что в нейтрин-нуклонных взаимодействиях, обусловленных нейтральными слабыми токами, не сохраняется пространственная четность.

— Г. Гольдхабер и др. в опытах на встречных электрон-позитронных пучках наблюдали рождение нейтральных и заряженных D -мезонов с массой 1,865 ГэВ, которые составлены из шармового кварка и нестранных антикварков.

— В. Нарр и др. наблюдали при взаимодействии γ -квантов большой энергии с ядрами образование шармовых антибарионов.

— Ф. Рейнес, Г. Гурр, Г. Собель зарегистрировали процесс рассеяния электронных антинейтрино, образованных при бета-распаде нейтронов из реактора, электронами.

— М. Шварц, исследуя распады долгоживущих нейтральных каонов, открыл связанное состояние пиона и мюона — пионий.

1977. Г. Хидака и др. при изучении рассеяния поляризованных

протонов поляризованными протонами получили указание на существование дибарионного резонанса в системе двух протонов

— С. Хэб и др., измеряя спектр масс мюонных пар, образованных при взаимодействии протонов с энергией 400 ГэВ с ядрами, обнаружили резонансное поведение этого спектра, которое было интерпретировано как новый мезон с массой 9,5 ГэВ.

— В опытах на встречных электрои-позитронных пучках были зарегистрированы полулептонные распады шармовых D -мезонов.

— Р. Бранделик и др. открыли шармовый F -мезон, представляющий собой связанное состояние шармового кварка и странного антикварка.

— Б. Бариш, А. Беивенути, М. Холдер и др. зарегистрировали образование трех мюонов при взаимодействии нейтрино и антинейтрино с ядрами железа.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
От электрона до антивещества	9
Электрон, протон и фотон	9
Открытие нейтрона	14
Гипотеза нейтрино	19
Ядерные силы	23
Открытие пиона и мюона	29
Изотопическая инвариантность	32
Резонансы	36
Происхождение звездной энергии	37
Позитрон	46
Радиационное смещение атомных уровней и аномальный магнитный момент электрона	51
Антипротон и антибарионы	61
От странности до очарования	65
Открытие странных частиц	65
Странность	70
Пузырьковая камера	74
Пространственная четность	77
Θ - τ -парадокс	80
Несохранение пространственной четности	83
Комбинированная четность	85
Двухкомпонентное нейтрино	88
Нарушение комбинированной инвариантности	93
Универсальная теория слабого взаимодействия	99
Два типа нейтрино	109
Адронные резонансы	117
SU_3 -симметрия	119
Кварки	128
Структура адронов	130

Матрица рассеяния и дисперсионные соотношения	137
Полюса и траектории Редже	149
Гипотеза дуальности	153
Нейтральные слабые токи	158
«Очарованный» кварк и шармоний	171
Цветные кварки и глюоны	179
Прогнозы и перспективы	189
Футурология в физике	189
Роль мощных ускорителей	196
Закончится ли физическая наука	203
Значение физики элементарных частиц	209
Хронология открытий в физике элементарных частиц	215

Александр Ильич Ахиезер
Михаил Петрович Рекало

БИОГРАФИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

*Печатается по постановлению Редакционной коллегии
научно-популярной литературы АН УССР*

Редактор *С. И. Забужко*
Оформление художника *В. Д. Харика*
Художественный редактор *Б. И. Прищепя*
Технический редактор *Т. С. Березяк*
Корректоры *В. Н. Божок, Р. С. Коган*

Информ. бланк № 2501

Сдано в набор 24.01.79. Подп. в печ. 27.04.79. БФ 06906.
Формат 70×108/32. Бумага № 2. Лит. гарн. Выс. печ.
Усл. печ. л. 11,55. Уч.-изд. л. 12,97. Тираж 15000 экз.
Заказ 9–67. Цена 55 коп.

Издательство «Наукова думка»,
252601, Киев, ГСП, Репина, 3.

Киевская книжная типография научной книги Республиканского производственного объединения «Полиграф-книга» Госкомиздата УССР, Киев, Репина, 4.