



я бы выбрал открытие μ -мезона в 1947 г., потому что он казался совершенно излишним в рамках схемы, принятой в то время.

Упомянутых выше частиц было вполне достаточно для описания молекулярной, атомной и в значительной степени ядерной структуры вещества, а также явления радиоактивности. Все это имело вид замкнутой схемы. Нетрудно было вообразить, что уже известны все основные составляющие блоки вещества. Эта точка зрения была поколеблена открытием μ -мезона. В настоящий момент мы абсолютно уверены в том, что открытые вначале частицы представляют собой только малую долю тех ингредиентов, которые необходимы для понимания строения вещества и природы лежащих в его основе сил. В игру вступило множество новых частиц. Было найдено, что необходимо ввести в рассмотрение новые характеристики частиц, или, как мы их теперь называем, новые квантовые числа. Были открыты и новые характерные свойства сил, в частности их трансформационные свойства и симметрии.

В течение последних двух десятилетий все эти достижения в основном были заслугой экспериментаторов. Впечатляющую по объему информацию о частицах удалось получить не только благодаря созданию новых ускорителей, но и благодаря исключительно важным новым методам регистрации частиц и обработки экспериментальных данных. Однако нам никогда не следует забывать, что всем этим мы обязаны физике космических лучей, которая дала первый импульс развитию этих исследований. В середине тридцатых годов в космических лучах были обнаружены сначала позитрон, а затем и заряженные мезоны, в основном μ -мезоны. То обстоятельство, что эти частицы не были предсказанными в 1935 г. π -мезонами, ответственными за ядерные силы, было продемонстрировано открытием в космических лучах в 1947 г. распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$. Этот факт, наряду с открытиями в космических лучах « V -частиц», гиперонов и K -мезонов в конце 40-х годов, создали условия для зарождения физики элементарных частиц. Весьма вероятно, что эксперименты в физике космических лучей приведут еще к новым фундаментальным открытиям.

ЧЕТЫРЕ СИЛЫ, ДВА НЕЙТРИНО

О с н о в о п о л а г а ю щ и е с и л ы

Согласно принятой в настоящее время точке зрения в природе существуют четыре типа сил взаимодействия. Раньше всех были известны гравитационные силы, которых пока что физика элементарных частиц не касается. Хотя гравитационные силы играют определяющую роль во взаимодействиях больших масс вещества, они, как нам представляется, значительно слабее других сил, действующих между частицами при тех энергиях, которые достижимы в настоящее время, и на тех расстояниях, на которые нам удалось проникнуть. Именно по этой причине я в дальнейшем не буду обсуждать гравитационное взаимодействие. Помимо этих сил, существуют электромагнитные силы; большую роль играют сильные взаимодействия, одним из проявлений которых являются силы, действующие в атомном ядре; и, наконец, имеется слабое взаимодействие, ответственное за β -распады ядер, $\pi - \mu$ -распад и множество других распадных процессов.

В физике давно минуло то время, когда были известны, но еще не объединены единой схемой законы Кулона, Ампера, Био—Савара и др. Естественно надеяться, что и названные выше четыре типа сил окажутся со временем описанными в рамках единой, более общей теории. К сожалению, сейчас не видно никакого ясного пути к этой цели.

Электромагнитные и ядерные силы связаны с полями и их квантами. Вопрос о том, существует ли что-либо подобное в случае слабого взаимодействия, все еще является предметом обсуждения. Было выдвинуто предположение о существовании «поля слабых сил», так называемого W -поля. Во многих лабораториях пытаются обнаружить кванты этого поля, W -мезоны, однако до сих пор эти попытки не имели успеха. Если все же эти W -мезоны существуют, то их масса вероятнее всего должна быть больше $2 \text{ Гэв}/c^2$. В отличие от ситуации с π -мезонами, где радиус действия ядерных сил служил нам указанием на величину их массы, здесь у нас нет никакого ключа к предсказанию того, насколько тяжелыми должны быть W -мезоны. Несомненно, что экспериментальное изучение слабых взаимодействий при высоких энергиях и особенно поиски W -квантов представляют собой одно из наиболее важных направлений будущих исследований. Основным инструментом этих исследований станут пучки нейтрино высоких энергий. Дело в том, что нейтрино не участвуют ни в каких взаимодействиях, кроме слабых. Этот факт приводит к множеству необычайных проблем. Медленное нейтрино провзаимодействует всего один раз, пройдя через толщу свинца, равную одному световому году. Для нейтрино с энергией 1 Гэв число взаимодействий будет равно уже 10^5 ; тем не менее экспериментальная задача все еще оказывается необыкновенно трудной. Необходим большой поток нейтрино и уникальная защита, позволяющая отсортировать с очень высокой точностью все другие нейтральные частицы, которые могли бы помешать проведению точного эксперимента. В первом эксперименте, поставленном на нейтринном пучке в Брукхэйвене, где в качестве фильтра была использована стальная обшивка военного корабля «Миссури», удалось обнаружить весьма важный факт существования двух типов нейтрино, ν_e и ν_μ .

Нейтрино прежде и сейчас

Прежде чем перейти к описанию этого эксперимента, напомним о том, как были открыты «первые нейтрино».

Существование этой частицы было постулировано с целью спасти законы сохранения энергии, импульса и момента при β -распаде. Сейчас законы сохранения не представляются настолько нерушимыми, как это считалось ранее, однако три вышеупомянутых закона до сих пор считаются точными. В то время, когда было постулировано существование нейтрино, высказывались и некоторые сомнения в справедливости законов сохранения при β -распаде. Конечно, эти сомнения удалось бы развеять только в случае, если бы можно было обнаружить эффекты взаимодействия этих гипотетически испускаемых нейтрино с веществом. Это удалось показать в 1956 г., используя интенсивный поток $\bar{\nu}_e$ от ядерного реактора. Наблюдалась следующая реакция: $\bar{\nu}_e + \text{протон} \rightarrow \text{нейтрон} + e^+$. Помимо того, было найдено поглощение ν_e тяжелыми ядрами.

Перейдем теперь к эксперименту по обнаружению двух нейтрино. При распаде μ^+ -мезона $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$ образуется пара нейтрино $+$ антинейтрино. Однако такая пара может аннигилировать. В результате в некоторых случаях мог бы рождаться γ -квант, что в итоге приводило бы к реакции $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$. Но такой распад никогда не наблюдался, несмотря на то, что слабые взаимодействия проявляются в нем с той же силой, что и в распаде на $e^+ + \nu + \bar{\nu}$. Выход из этого затруднения, который и оказался правильным, состоит в том, что ν и $\bar{\nu}$, появляющиеся в этом распаде, не являются античастицами друг для друга. Сейчас мы записываем этот распад в виде $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$.

В чем же состоит отличие ν_e от ν_μ ? Если в какой-то реакции рождается μ^+ , то он обязательно сопровождается ν_μ как, например, при распаде $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. А ν_e всегда появляется вместе с e^+ , как, например, при β^+ -распаде. Эти утверждения можно проверить, показав, что пучок ν_μ может регенерировать только μ^- , а не e^- . В этом вкратце и состоял эксперимент по обнаружению двух нейтрино.

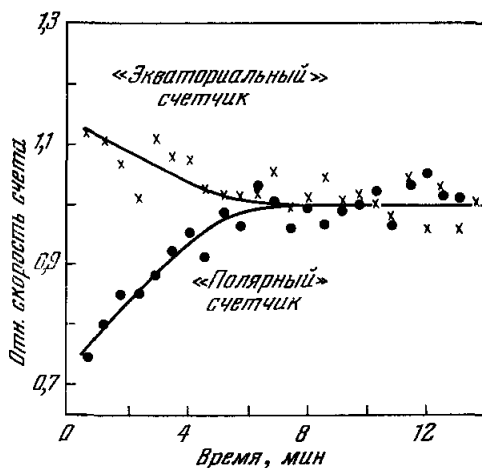


Рис. 1. Асимметрия, обнаруженная Та Ю-Ву с сотрудниками в распаде Co^{60} , показала, что четность не сохраняется при слабых взаимодействиях. На опыте измерялось угловое распределение электронов и γ -квантов, испускаемых при распаде. На графике приведена зависимость числа отсчета γ -квантов от времени для «экваториального» и «полярного» счетчиков

В этом же, насколько мы сейчас можем судить, заключается единственное отличие ν_e от ν_μ . Наличие такого дублирования кажется нам одной из экстравагантных шуток природы. Оно соответствует двум законам сохранения: одному — для μ -числа (равно 1 для μ^- , ν_μ ; —1 для μ^+ , $\bar{\nu}_\mu$ и 0 — в остальных случаях), другому — для e -числа (равно 1 для e^- , ν_e ; —1 для e^+ , $\bar{\nu}_e$ и 0 — в остальных случаях). Сохранение лептонного числа, равного сумме μ - и e -чисел, было известно довольно длительное время.

Все это «лептонное семейство», состоящее из μ , e , ν_e и ν_μ , выглядит весьма странно. Они выпадают из рамок всех схем симметрии, которые мы приписываем сильно взаимодействующим частицам, или адронам, как их принято называть с 1962 г. Должны быть какие-то веские причины того, почему до сих пор нам неясна ситуация в этом вопросе. Именно поэтому изучение слабых взаимодействий при высоких энергиях представляет собой одну из главных наших надежд на прогресс в понимании всей проблемы.

АДРОННЫЕ СИММЕТРИИ

И з о с п и н

Изучение этого круга вопросов началось с понятия изоспина. Нам хотелось бы считать, что протон и нейтрон представляют вырожденный дублет, называемый нуклоном (N), если пренебречь электромагнитными эффектами. Подобным же образом π^\pm -мезоны образуют триплет вместе с π^0 -мезоном, первой частицей, открытой на ускорителях еще в 1950 г.

На многих примерах из квантовой механики мы знаем, что вырождение всегда естественным образом связано с тем или иным свойством инвариантности, а сама инвариантность связана с законом сохранения. И в этом случае появляется новое сохраняющееся квантовое число — изоспин T . Для нуклона $T = 1/2$. «Квантуя вдоль выбранного направления», мы приписываем проекции $T_3 = 1/2, -1/2$ протону и нейтрону соответственно. Точно так же π -мезонам отвечает изоспин $T = 1$, с проекциями $T_3 = 1, 0, -1$ для π^+, π^0, π^- . Наличие выделенной оси вытекает из того факта, что эти частицы, конечно, отличаются друг от друга их зарядами $Q = T_3 + N/2$, где N — число нуклонов. Эта формула для Q применима как к нуклонам, так и к π -мезонам. Нам известно, что полный изоспин и его проекция T_3 сохраняются в сильных взаимодействиях, тогда как в электромагнитных взаимодействиях T не сохраняется, а T_3 сохраняется. Указывает ли эта «выделенная ось Z » направление в некотором пространстве? В данный момент наилучшим ответом на этот вопрос будет то, что T «ведет себя подобно» угловому моменту в абстрактном смысле, т. е. математически корректно это выражается в виде утверждения, что мы используем T -компоненты в качестве генераторов группы симметрии $SU(2)$.

Использование понятия изоспина может намного облегчить понимание ряда проблем. Это было наглядно продемонстрировано еще в 1952 г. на Рочестерской конференции. В то время только что был открыт резонанс в сечении взаимодействия π -мезонов с нуклонами ($(3, 3)$ -резонанс). В области резонанса отношение сечений реакций $(\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p) : (\pi^- + p \rightarrow \pi^- + p) : (\pi^+ + p \rightarrow \pi^0 + n)$ равняется $9 : 1 : 2$. Это отвечает рождению частицы N^* с соответствующим зарядом при реакции $\pi + N \rightarrow N^*$ с условием, что ее изоспин равен $3/2$ ($T = 3/2$). Затем N^* быстро распадается вновь на $N + \pi$.

Мы считаем этот широкий максимум, где образуется N^* , такой же частицей, как и N . На тех же основаниях мы могли бы назвать и возбужденное состояние атома водорода такой же «частицей», как и основное состояние. Однако там в нашем распоряжении имеется настолько много сведений о структуре водорода, что описание в этих терминах несколько не помогло бы нам. Возможно, когда-нибудь впоследствии мы будем описывать по-другому и элементарные частицы.

Со времени открытия N^* -резонанса, было обнаружено множество новых резонансов с большой массой. И сейчас в этом направлении ведется большая работа. Особые трудности возникают здесь вследствие того, что неупругие процессы усложняют выделение и идентификацию резонансов.

Однако эти резонансы представляют собой лишь одну из граней той необыкновенной по своему богатству структуры, которая была обнаружена в течение последних 20 лет.

Новая спектроскопия

Все резонансы, о которых шла речь выше, характеризуются временами жизни порядка 10^{-23} сек. Однако еще в конце 40-х — начале 50-х годов мы узнали, что при столкновениях, например, π -мезонов с нуклонами могут рождаться и другие частицы, которые в чем-то сродни нуклонам, но которые живут, в относительных масштабах, астрономически долго, больше или порядка 10^{-10} сек. Это — гипероны, одним из представителей которых можно назвать, например, Λ -частицу.

Их долгое время жизни поставило перед нами новую загадку. Подобно N^* ($\pi + N \rightarrow N^*$) эти частицы рождаются при сильных взаимодействиях. Их масса достаточно велика, чтобы, подобно N^* , они распадались на нуклон и π -мезон. И такой распад имеет место. Однако совершенно

очевидно, что по сравнению с распадом N^* он происходит значительно медленнее. Весь процесс удается объяснить с помощью механизма ассоциативного (или связанного) рождения: образование, например, Λ -гиперона происходит за счет сильных взаимодействий $\pi + N \rightarrow \Lambda + K$, где K обозначает новый мезон; при этом можно показать, что процессы рождения (сильные взаимодействия) и распада $\Lambda \rightarrow N + \pi$ (слабые взаимодействия) не связаны друг с другом.

Сходство гиперонов с нуклонами состоит в том, что все гипероны с течением времени распадаются, обязательно приводя к образованию нуклонов. Так, сохранение числа нуклонов перешло в сохранение числа нуклонов плюс гиперонов или же, как принято говорить с 1953 г., — в сохранение числа барионов. Мы полагаем, что этот закон сохранения является абсолютным — ему подчиняются все силы, действующие в природе. Помимо этого, имеются и менее универсальные принципы сохранения. Например, связанное рождение интерпретируется в рамках нового закона сохранения странности или гиперзаряда Y . T^2 , T_3 и Y сохраняются при сильных взаимодействиях. При электромагнитных взаимодействиях сохраняются только T_3 и Y . В слабых взаимодействиях не сохраняется ни одна из этих величин по отдельности. Однако электрический заряд $Q = T_3 + Y/2$ сохраняется абсолютно строго при всех взаимодействиях. Написанная сейчас формула для Q служит естественным обобщением приведенной ранее формулы $Q = T_3 + N/2$ на случай, когда учитывается также новая гиперзарядовая степень свободы частицы.

Полную картину барионной спектроскопии можно нарисовать теперь в следующем виде. Каждому значению Y отвечает множество найденных резонансов с различными значениями T и других квантовых чисел. Они распадаются за счет сильных взаимодействий с сохранением Y , переходя в свое «основное состояние при данном Y », а затем уже за счет слабых взаимодействий происходит переход к основному барионному состоянию — нуклону. Совершенно аналогичная картина имеет место в случае мезонов. Создание этой новой спектроскопии, одного из наиболее важных достижений эксперимента за последний период, оказалось возможным, благодаря использованию остроумной методики обработки данных о реакциях с большим числом частиц в конечном состоянии. Несомненно, что в будущем мы получим еще больше сведений, но уже сейчас эксперимент дал нам весьма важные указания.

П р а в и л а с о х р а н е н и я и н а р у ш е н и я

Сначала было найдено, что даже в случае, если закон сохранения не выполняется при том или ином взаимодействии, можно иногда обнаружить некую закономерность в том, каким образом проявляется нарушение этого закона. Так появились «законы нарушения». Например, слабые взаимодействия, при которых не сохраняется Y , приводят к тому, что изменение Y , обозначаемое ΔY , оказывается равным только ± 1 . Те же самые взаимодействия приводят к такому несохранению T , что $\Delta T = 1/2$. Объяснять, что эти утверждения в свою очередь являются только приближенными, вряд ли имеет смысл, так как это увело бы нас слишком далеко в сторону от темы. Однако они выполняются с достаточно хорошей точностью.

Затем начались поиски более высоких симметрий. Весьма привлекательной представлялась возможность обнаружить более тесную связь между Y и T , описываемую группой $SU(2)$. В конечном итоге было найдено, что объединение Y и T в рамках группы $SU(3)$ приводит к весьма полезному дальнейшему упорядочению всех адронов. Такая более высо-

кая симметрия привела бы к большему числу вырождений, если бы она была точной. Однако предполагается, что симметрия, описываемая этой группой, является приближенной и соответственно этому вновь появляются некоторые характерные законы нарушения, выражающиеся, например, в том, как расщепляются мультиплеты $SU(3)$. При таком способе описания наборы изоспиновых мультиплетов, как нетрудно видеть, связаны с нарушенными $SU(3)$ -мультиплетами. Открытие Ω^- -частицы, предсказанной с помощью $SU(3)$ -симметрии и дополняющей до полного один из $SU(3)$ -мультиплетов, явилось блестящим подтверждением полезности идеи об $SU(3)$ -симметрии.

До сих пор неизвестно никакой связи между этими симметриями адронов и симметриями пространства времени. В этом отношении новые симметрии отличаются от тех приближенных симметрий, которые известны нам из других отраслей физики. Например, рассел-саундерсовская связь в атомах является приближенной «статической» симметрией, справедливой только для состояний с небольшим средним импульсом. «Динамические симметрии» появляются и в физике элементарных частиц. Одной из многочисленного числа таких симметрий является $SU(6)$ -симметрия.

Она дала нам возможность понять связь между $SU(3)$ -мультиплетами с различным спином. Одним из интересных предсказаний, вытекающих из нее, является значение $-3/2$, приписываемое отношению магнитных моментов протона и нейтрона.

Динамические симметрии могут послужить ключом к решению проблемы динамики элементарных частиц. Так, например, можно задать вопрос, не являются ли симметрии, подобные изоспиновой, в конце концов динамическими по самому своему происхождению, как это пытаются описать в так называемом подходе «бутстрапа». Этот и другие подходы к решению задачи, которые известны под названиями «коллинеарная», «копланарная симметрия» и «теория некомпактных групп», могут сыграть важную роль в дальнейшем продвижении по пути к цели.

Адронная физика не сводится только к изучению резонансов. Область, в которой существенны резонансы, как теперь известно, простирается несколько дальше $2 \text{ Гэв}/c^2$. Однако выше имеется «трансрезонансная» область, в которой наблюдается меньше нерегулярностей в поведении сечений. Там также были обнаружены новые важные закономерности в энергетической зависимости сечений и в поведении дифференциальных сечений как функций переданного импульса. Другим существенным источ-

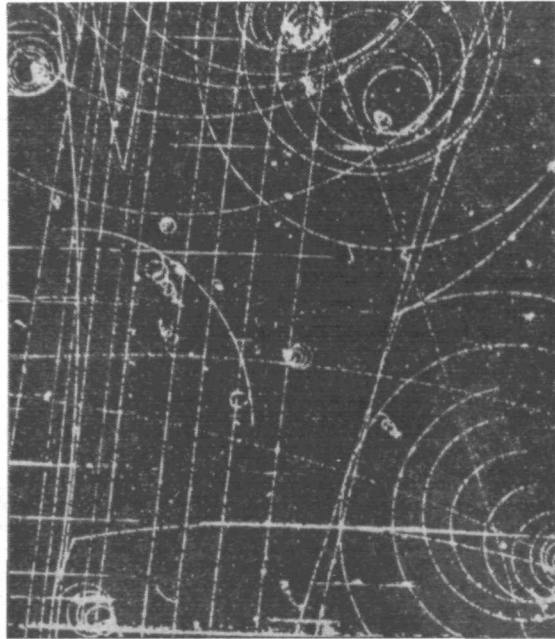


Рис. 2. Открытие Ω^- -частицы при анализе фотографий, полученных на пузырьковой камере, привело к заполнению $SU(3)$ -мультиплета и доказало применимость используемых теоретических представлений.

ником информации о сильных взаимодействиях служат соударения с адронами частиц, участвующих только в электромагнитных или слабых взаимодействиях, о факторах которых мы уже знаем достаточно много. Открытие антинуклонов в 50-х годах (а позднее и других антибарионов) дало нам много новой информации.

В данный момент остро дискутируется проблема, является ли современная адронная физика химией с точки зрения возможного существования до сих пор не обнаруженных более фундаментальных триплетов частиц. Будущее покажет.

АДРОДИНАМИКА

Мы не знаем, существует ли в динамической теории адронов (адродинамике) какой-либо аналог уравнениям Максвелла — Лоренца, применимым в электродинамике. В случае электродинамики в нашем распоряжении имеется малый параметр — постоянная тонкой структуры α , по степеням которой можно проводить разложение. Все конкретные результаты, полученные в рамках электродинамики, связаны с малостью константы α . Насколько нам известно, в адродинамике нет никакого эквивалента малой величины α . Поэтому, даже если полевые уравнения для описания эффектов сильных взаимодействий и постулированы, мы не знаем никакой разумной схемы для построения приближенных решений, а следовательно, не можем проверить правильность этих уравнений.

Таким образом, адродинамика еще не столь развита, как электродинамика, в которой за последние двадцать лет был достигнут величайший прогресс. Несмотря на весьма неприятные бесконечности, появляющиеся в теории поля, с помощью новой техники вычислений, называемой «перенормировками», удалось извлечь осмысленные конечные ответы в более высоких порядках по α , нежели это казалось возможным большинству физиков. Небольшое воздействие сильных взаимодействий на электромагнитные явления скоро станет доступным экспериментальной проверке. Возможно, что появятся и другие ограничения на «чистый» электромагнетизм. Для выяснения этих вопросов большое значение имеют весьма точные измерения, например эксперимент по измерению величины $g - 2$ для μ -мезона. Эта величина была известна в 1958 г. с точностью порядка 30%, а сейчас она измерена с точностью 0,1%.

В адродинамике также было заметно продвижение вперед. Во-первых, продолжается изучение содержания общих аксиом теории поля. Это очень трудная область, имеющая большое значение. Однако ее приложения еще весьма далеки от конкретных физических проблем, хотя они все ближе подходят к ним.

Во-вторых, колоссальные усилия были направлены на то, чтобы выяснить, насколько далеко можно продвинуться, используя только такие совсем общие постулаты, как причинность и унитарность, которые отнюдь не предполагают существования какой-либо полевой теории. Этот подход широко известен под названием «дисперсионной теории». Ее возникновение относится к 1955 г., когда были написаны дисперсионные соотношения для рассеяния вперед π -мезонов на нуклонах. Эти соотношения все еще продолжают оставаться в этой области наилучшими как с точки зрения их точности, так и с точки зрения практической пользы. Вслед за ними были предложены и частично доказаны дисперсионные соотношения для рассеяния под углами, отличными от 0° . Затем были также предложены двойные дисперсионные соотношения (по энергии и по передаваемому импульсу).

Дисперсионные соотношения отражают аналитические свойства амплитуд. Исследования в этой области четко делятся на два взаимо-

связанных направлений: это — попытки доказать с достаточной степенью точности аналитические свойства и попытки, предположив ту или иную область аналитичности амплитуд, изучить следствия, вытекающие из такого предположения. Например, свойство аналитичности, известное под названием «перекрестной симметрии», связывает амплитуды реакций $a + b \rightarrow c + d$ (так называемый s -канал), $a + \bar{c} \rightarrow \bar{b} + d$ (t -канал) $a + \bar{d} \rightarrow \bar{b} + c$ (u -канал), где обозначение \bar{b} применено, чтобы указать античастицу для b . Разложения в ряд теории возмущений, применяемые в этом случае с целью получить хоть какие-то указания, дают основания полагать, что аналитические продолжения, необходимые для «перекрестной симметрии», выполнимы. Несмотря на отсутствие полного доказательства этого свойства, оно тем не менее было уже использовано (и с заметным успехом!). Это — весьма типичный пример того, как физики пытаются одновременно пробиться на нескольких направлениях.

Другим примером может служить гипотеза о полюсах Редже, согласно которой семейства резонансов с одинаковыми внутренними квантовыми числами, но разными спинами, динамически взаимосвязаны. Применяя свойство перекрестной симметрии, можно получить поведение амплитуды в s -канале при высоких энергиях, которое в простейшем варианте описывается степенным законом, причем показатель степени тесно связан с наличием описанных выше семейств резонансов в t - и u -каналах.

Часто задают вопрос, насколько полно отражают динамику процесса эти разнообразные свойства аналитичности и предложения по их применению. Мнения по этому вопросу весьма разпоречивы. Тем не менее на этом пути уже удалось получить некоторые весьма интересные и общие результаты.

S , P , T И ДИНАМИКА СЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Д и с к р е т н ы е с и м м е т р и и

Следует подчеркнуть, что за истекшее двадцатилетие наибольшие перемены произошли в понимании характера слабых взаимодействий. И самые главные из них касаются поведения слабых взаимодействий по отношению к операциям отражения пространства (P -инвариантность), обращения времени (T -инвариантность) и зарядового сопряжения (C -инвариантность). Грубо говоря, свойство C -инвариантности означает, что физические законы не должны изменяться при замене на обратные всех знаков внутренних мультипольных моментов (электрического заряда, магнитных моментов и т. д.). Оказалось, что при слабых взаимодействиях нарушается P -инвариантность. К исследованиям в этом направлении побудила так называемая « θ — τ -загадка», которая непосредственно связана с утверждением о том, что одна и та же бесспиновая частица не может обладать каналами распада и на две, и на три псевдоскалярные частицы, если только не нарушена P . Прямое доказательство нарушения P -инвариантности было получено в 1956 г. при исследовании β -распада, а вскоре подобные эффекты были обнаружены и в π — μ -распаде. Более того, было найдено, что при этих взаимодействиях нарушается и C -инвариантность. Однако порядок до некоторой степени был восстановлен за счет предположения об инвариантности (с весьма высокой степенью точности) относительно операции комбинированной инверсии CP .

На первый взгляд кажется, что эти результаты предвещают появление новых точек зрения на пространственно-временное описание. Однако, насколько это верно, покажет будущее.

Выполнение этих инвариантных свойств означало бы наличие некоторых очень интересных соотношений между квантовомеханическими фазами. Оказывается, что силы взаимодействия могут быть описаны как состоящие из двух составляющих, каждая из которых по отдельности является P -инвариантной. Но суммарный результат уже не инвариантен относительно операции P ; дает себя знать отличие в трансформационных свойствах составляющих.

Одним из наиболее важных инвариантных свойств, теснее всего связанным со свойствами пространства-времени, является CPT -инвариантность, которая, как мы считаем, выполняется строго. Вскоре будут проведены весьма точные проверки выполнимости этого свойства. Если окажется, что и CPT -инвариантность нарушается, то я бы сказал, что тогда откроется простор для самых неумных фантазий.

С CP -инвариантностью и с так называемой « γ_5 -инвариантностью» тесно связана двухкомпонентная теория нейтрино, которая утверждает, что нейтрино может находиться в одном из только двух возможных состояний с определенной «спиральностью» *). Кроме того, CP -инвариантность позволяет сделать много выводов о свойствах, по-видимому, одной из наиболее загадочных систем в физике элементарных частиц, системы (K^0, \bar{K}^0) . Массы частиц этой пары отличаются друг от друга на величину порядка 10^{-13} от их средней массы. Это отличие удалось наблюдать экспериментально, поскольку оно приводит к появлению в такой системе весьма оригинальных интерференционных эффектов.

И вот в 1964 г. нам был нанесен еще один удар. Оказалось, что и CP -инвариантность не является абсолютно строгой. Небольшое нарушение ее было обнаружено в нейтральной K -системе. До сих пор нам не удалось восстановить хоть какой-то порядок в этом вопросе. Возможно, это — один из величайших вызовов, брошенных нам природой. Необходимо установить, хотя бы феноменологически, что же происходит на самом деле. Это явление разрушает наши понятия об элегантности и простоте. Может быть, его интерпретация приведет к далеко идущим следствиям.

Т о к и, н о в с ю д у т о к и

Было получено также множество других сведений о динамике слабых взаимодействий. Для большинства слабых взаимодействий (возможно, что это окажется верным для всех их) было найдено, что они эффективно описываются четырехмерными векторными токами адронов и лептонов, связанными с другими токами того же типа. Адронные токи состоят из векторной части V_λ и аксиально-векторной части A_λ . Еще в 30-х годах в рамках этого варианта был оставлен ряд вопросов.

Сейчас мы знаем уже намного больше о V_λ и A_λ . Во-первых, было показано, что V_λ связана с некой частью электромагнитного тока (точнее, прямо пропорциональна ей). В результате некоторые эффекты слабого взаимодействия удается описать в терминах электромагнитных параметров (слабый магнетизм). Во-вторых (мы опускаем ряд технических деталей), noting, что дивергенция A_λ пропорциональна μ -мезонному полю. Таким способом удалось получить достаточно хорошее предсказание скорости μ — μ -распада, выразив ее через другие известные параметры. В-третьих, V_λ и A_λ являются операторами токов в квантовомеханическом смысле. В последнее время были предприняты интенсивные исследования коммутационных соотношений этих и других операторов тока. Это направление известно сейчас под названием «алгебра токов». Хотя здесь еще

*) Проекцией спина на направление движения.

много неясных проблем, но уже достигнуты некоторые успехи. В частности, оказалось возможным вычислить абсолютное отношение гамма-теллеровской и фермиевской констант β -распада, используя информацию о рассеянии π -мезонов на нуклонах. Помимо того, был получен ряд интересных результатов для «мягких пионов». При этом удалось связать реакции с рождением n π -мезонов с реакциями, где рождается одним π -мезоном меньше.

ЭПИЛОГ

На этих нескольких страницах мы попытались дать возможность неспециалисту почувствовать состояние, в котором находится физика элементарных частиц. Оно не сильно отличается от того, которое наблюдается, сидя в концертном зале перед началом концерта. На сцене уже появились многие (но не все) музыканты. Они пробуют свои инструменты. Иногда можно услышать ряд интересных музыкальных пассажей; отовсюду раздаются импровизации; иногда слышны и неправильно взятые ноты. Над всем этим нависло чувство ожидания того момента, когда раздадутся первые звуки симфонии.

Короче всего можно было бы подвести итог, сказав: «Шаг за шагом перед экспериментаторами». К концу второй мировой войны наивысшая достижимая энергия протонов равнялась 20 *Мэв* *). Теперь же мы можем пожелать доброго начала работам на серпуховском ускорителе на 75 *Гэв*. За этот период были построены синхротроны на 400 и 600 *Мэв*, уже прекративший работу брукхэйвенский космогон на 3 *Гэв*, беватрон в Беркли, «линак» **), ускорители в Дубне и Саклэ, ДЭЗИ и резерфордский ускоритель, ускорители на 30 *Гэв* в Брукхэйвене и ЦЕРНе. И этот список еще не полон.

На первой Рочестерской конференции мы провели полдня, обсуждая три события с распадом τ -мезона. Теперь же мы уже близки к цели получить пучки K -мезонов с интенсивностью около 10^5 частиц в импульсе. В 1957 г. во всем мире было известно около 50 событий K_{e3} -распадов. Теперь в одном эксперименте были получены снимки миллионов таких распадов. В 1957 г. K_2^0 -мезон был открыт в эксперименте на пузырьковой камере, где было получено 5000 снимков. В 1966 г. в США было получено уже около 10^7 таких снимков на пузырьковых камерах. Данный этап характеризуется тем, что в одном эксперименте в среднем получают от 10^5 до 10^6 снимков. Новые трековые камеры вступают в действие: пузырьковые камеры, объем которых от нескольких кубических сантиметров в 1953 г. возрос до объема огромных четырехметровых камер; искровые камеры и тому подобное. Была развита новая техника детектирования. Вычислительные машины, установленные непосредственно на выходе экспериментальной установки, помогают в обработке данных. Приборы быстрого скадирования и хорошо продуманные вычислительные программы делают возможной обработку данных на совершенно новом уровне, который тем не менее все еще недостаточен, но продолжает повышаться в сторону увеличения статистики и обнаружения более редких событий.

Прошли времена Фарадея с его Андерсоном, Резерфорда с его Ксем. Настало время коллективных усилий. Оплакивать это — значит оплакивать второй закон термодинамики. Но это не означает, что не может быть индивидуально ярких ученых. Изменился характер, но не значимость подготовки в университетах таких ученых-физиков. Особенно возросла

*) Речь идет об искусственно ускоренных протонах.

**) Линейные ускорители.

необходимость во внутригосударственном и международном сотрудничестве. Ведущая роль ЦЕРНа в физике элементарных частиц является одним из наиболее ярких подтверждений факта возрождения послевоенной Европы. Институт в Триесте, в котором в основном занимаются теоретическими исследованиями именно в физике элементарных частиц, помогает объединить усилия развивающихся наций.

Итак, урожай в эти годы был довольно богатым. Новые частицы, новая спектроскопия; новые свойства симметрии, различные для разных сил, переворот некогда святых для физиков положений о C , P и T ; начало развития новой динамической теории — таковы были эти 20 лет.

Относительно того, что будет в дальнейшем, — кто из нас осмелится что-либо утверждать? Конечно, будет получено больше данных о спектре и о формфакторах. Совершенно необходим более полный синтез всех данных. Возможно, при этом возникнут парадоксы, которые заставят нас пересмотреть самые основополагающие концепции. Может быть, мы вдруг поймем, что мы уже столкнулись с такими парадоксами. Даже на сегодняшнем, весьма несовершенном уровне знания мы познали очень многое, столкнулись со множеством новых вопросов. В течение этих 20 лет мы имели счастье присутствовать при многих новых крупных открытиях. Несомненно, что впереди нас ожидает еще больше таких открытий.

Рокфеллеровский университет,
США