

История открытия элементарных частиц

Оглавление

От электрона до нейтрино	4
Электрон.....	4
Фотон.....	5
Протон	6
Нейтрон	6
Позитрон	8
Пионы и Мюоны. Открытие мезона	10
Нейтрино	15
От странности до очарования	17
Открытие странных частиц.....	17
Резонансы.....	19
«Очарованные» частицы	20
Заключение	22
Литература.....	24

Введение.

В середине и второй половине XX века в тех разделах физики, которые заняты изучением фундаментальной структуры материи, были получены поистине удивительные результаты. Прежде всего, это проявилось в открытии целого множества новых субатомных частиц. Их обычно называют элементарными частицами, но далеко не все из них действительно элементарны. Многие из них в свою очередь состоят из еще более элементарных частичек.

Открытие элементарных частиц явилось закономерным результатом общих успехов в изучении строения вещества, достигнутых физикой в конце 19 в. Оно было подготовлено всесторонними исследованиями оптических спектров атомов, изучением электрических явлений в жидкостях и газах, открытием фотоэлектричества, рентгеновских лучей, естественной радиоактивности, свидетельствовавших о существовании сложной структуры материи.

Мир субатомных частиц поистине многообразен. К ним относятся протоны и нейтроны, составляющие атомные ядра, а также обращающиеся вокруг ядер электроны. Но есть и такие частицы, которые в окружающем нас веществе практически не встречаются. Время их жизни чрезвычайно мало, оно составляет мельчайшие доли секунды. По истечении этого чрезвычайно короткого времени они распадаются на обычные частицы. Таких нестабильных короткоживущих частиц поразительно много: их известно уже несколько сотен.

В 60-70-е годы физики были совершенно сбиты с толку многочисленностью, разнообразием и необычностью вновь открытых субатомных частиц. Казалось, им не будет конца. Совершенно непонятно, для чего столько частиц. Являются ли эти элементарные частицы хаотическими и случайными осколками материи? Или, возможно, они таят в себе ключ к познанию структуры Вселенной? Развитие физики в последующие десятилетия показало, что в существовании такой структуры нет никаких сомнений. В конце XX в. физика начинает понимать, каково значение каждой из элементарных частиц.

Миру субатомных частиц присущ глубокий и рациональный порядок. В основе этого порядка - фундаментальные физические взаимодействия.

Элементарные частицы в точном значении этого термина — первичные, далее неразложимые частицы, из которых, по предположению, состоит вся материя. В понятии “Элементарные частицы” в современной физике находит выражение идея о первообразных сущностях, определяющих все известные свойства материального мира, идея, зародившаяся на ранних этапах становления естествознания и всегда игравшая важную роль в его развитии.

Понятие “Элементарные частицы” сформировалось в тесной связи с установлением дискретного характера строения вещества на микроскопическом уровне. Обнаружение на рубеже 19—20 вв. мельчайших носителей свойств вещества — молекул и атомов — и установление того факта, что молекулы построены из атомов, впервые позволило описать все известные вещества как комбинации конечного, хотя и большого, числа структурных составляющих — атомов. Выявление в дальнейшем наличия составных слагающих атомов — электронов и ядер, установление сложной природы ядер, оказавшихся построенными всего из двух типов частиц (протонов и нейтронов), существенно уменьшило количество дискретных элементов, формирующих свойства вещества, и дало основание предполагать, что цепочка составных частей материи завершается дискретными бесструктурными образованиями — элементарными частицами. Такое предположение, вообще говоря, является экстраполяцией известных фактов и сколько-нибудь строго обосновано быть не может. Нельзя с уверенностью утверждать, что частицы, элементарные в смысле приведённого определения, существуют. Протоны и нейтроны, например, длительное время считавшиеся элементарными частицами, как выяснилось, имеют сложное строение. Не исключена возможность того, что последовательность структурных составляющих материи принципиально бесконечна. Может оказаться также, что утверждение “состоит из...” на какой-то ступени изучения материи окажется лишённым содержания. От данного выше определения “элементарности” в этом случае придется отказаться. Существование элементарных частиц — это своего рода постулат, и проверка его справедливости — одна из важнейших задач физики.

От электрона до нейтрино

Электрон

Исторически первой открытой элементарной частицей был электрон — носитель отрицательного элементарного электрического заряда в атомах.

Это самая «старая» элементарная частица. В идейном плане он вошел в физику в 1881 г., когда Гельмгольц в речи в честь Фарадея указал, что атомная структура вещества вместе с законами электролиза Фарадея неизбежно приводит к мысли, что электрический заряд всегда должен быть кратен некоторому элементарному заряду, - т. е. к выводу о квантовании электрического заряда. Носителем отрицательного элементарного заряда, как мы теперь знаем, и является электрон.

Максвелл же, создавший фундаментальную теорию электрических и магнитных явлений и использовавший существенным образом экспериментальные результаты Фарадея, не принимал гипотезы атомного электричества.

Между тем «временная» теория о существовании электрона была подтверждена в 1897 г. в экспериментах Дж. Дж. Томсона, в которых он отождествил так называемые катодные лучи с электронами и измерил заряд и массу электрона. Частицы катодных лучей Томсон называл «корпускулами» или изначальными атомами. Слово «электрон» первоначально использовалось для обозначения величины заряда «корпускулы». И только со временем электроном стали называть саму частицу.

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

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

ФОТОН

Прямое экспериментальное доказательство существования фотона было дано Р. Милликеном в 1912—1915 гг. в его исследованиях фотоэффекта, а также А. Комптоном в 1922 г., обнаружившим рассеяние рентгеновских лучей с изменением их частоты.

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

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

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

Хотя предположение Планка о квантовании энергии света абсолютно противоречило всей классической теории, сам Планк понял это не сразу. Ученый писал, что он «... пытался как-то ввести величину h в рамки классической теории. Однако вопреки всем таким попыткам эта величина оказалась весьма строптивой». Впоследствии эта величина получила название постоянной Планка ($h=6*10^{-27}$ эрг.с).

После введения постоянной Планка ситуация не стала более ясной.

«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 двигаются они со скоростью света.

Итак вывод о существовании частицы электромагнитного поля — фотона — берёт своё начало с работы М. Планка (1900). Предположив, что энергия электромагнитного излучения абсолютно чёрного тела квантована, Планк получил правильную формулу для спектра излучения. Развивая идею Планка, А. Эйнштейн (1905) постулировал, что электромагнитное излучение (свет) в действительности является потоком отдельных квантов (фотонов), и на этой основе объяснил закономерности фотоэффекта.

Протон

Протон был открыт Э. Резерфордом в 1919 г. в исследованиях взаимодействия альфа-частиц с атомными ядрами.

Точнее открытие протона связано с открытием атомного ядра. Оно было сделано Резерфордом в результате бомбардировки атомов азота высоко энергетическими 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). Были и другие предложения по поводу названия. Так, например, предлагалось название «барон» (барос по-гречески означает тяжесть). Однако оно подчеркивало только одну особенность ядра водорода – его массу. Термин «протон» был существенно глубже и содержательнее, отражая фундаментальность протона, ибо протон – это простейшее ядро – ядро самого легкого изотопа водорода. Это, несомненно, один из наиболее удачных терминов в физике элементарных частиц. Таким образом, протоны — это частицы с единичным положительным зарядом и массой, в 1840 раз превышающей массу электрона.

Нейтрон

Другая частица, входящая в состав ядра, — нейтрон — была открыта в 1932 Дж. Чедвиком при исследованиях взаимодействия α -частиц с бериллием. Нейтрон имеет массу, близкую к массе протона, но не обладает электрическим зарядом. Открытием нейтрона завершилось выявление частиц — структурных элементов атомов и их ядер.

Открытие изотопов не прояснило вопрос о строении ядра. К этому времени были известны лишь протоны – ядра водорода, и электроны, а потому естественной была попытка объяснить существование изотопов различными комбинациями этих положительно и отрицательно заряженных частиц. Можно было бы думать, что ядра содержат A

протонов, где A – массовое число, и $\tilde{A}Z$ электронов. При этом полный положительный заряд совпадает с атомным номером Z .

Такая простая картина однородного ядра поначалу не противоречила выводу о малых размерах ядра, вытекавшему из опытов Резерфорда. “Естественный радиус” электрона $r_0 = e^2/mc^2$ (который получается, если приравнять электростатическую энергию e^2/r_0 заряда, распределенного по сферической оболочке, собственной энергии электрона mc^2) составляет $r_0 = 2,82 \cdot 10^{-15}$ м. Такой электрон достаточно мал, чтобы находиться внутри ядра радиусом 10^{-14} м, хотя поместить туда большое число частиц было бы затруднительно. В 1920г. Резерфорд и другие ученые рассматривали возможность существования устойчивой комбинации из протона и электрона, воспроизводящей нейтральную частицу с массой, приблизительно равной массе протона. Однако из-за отсутствия электрического заряда такие частицы с трудом поддавались бы обнаружению. Вряд ли они могли бы и выбивать электроны из металлических поверхностей, как электромагнитные волны при фотоэффекте.

Лишь спустя десятилетие, после того как естественная радиоактивность была глубоко исследована, а радиоактивное излучение стали широко применять, чтобы вызывать искусственное превращение атомов, было надежно установлено существование новой составной части ядра. В 1930 В.Боте и Г.Беккер из Гисенского университета проводили облучение лития и бериллия альфа-частицами и с помощью счетчика Гейгера регистрировали возникающее при этом проникающее излучение. Поскольку на это излучение не оказывали влияния электрические и магнитные поля, и оно обладало большой проникающей способностью, авторы пришли к выводу, что испускается жесткое гамма-излучение. В 1932 Ф.Жолио и И.Кюри повторили опыты с бериллием, пропуская такое проникающее излучение через парафиновый блок. Они обнаружили, что из парафина выходят протоны с необычно высокой энергией, и заключили, что, проходя через парафин, гамма-излучение в результате рассеяния порождает протоны. (В 1923 было установлено, что рентгеновские лучи рассеиваются на электронах, давая комптоновский эффект.)

Дж.Чедвик повторил эксперимент. Он также использовал парафин и с помощью ионизационной камеры, в которой собирался заряд, возникающий при выбивании электронов из атомов, измерял пробег протонов отдачи.

Чедвик использовал также газообразный азот (в камере Вильсона, где вдоль следа заряженной частицы происходит конденсация водяных капелек) для поглощения излучения и измерения пробега атомов отдачи азота. Применив к результатам обоих экспериментов законы сохранения энергии и импульса, он пришел к выводу, что обнаруженное нейтральное излучение – это не гамма-излучение, а поток частиц с массой, близкой к массе протона. Чедвик показал также, что известные источники гамма-излучения не выбивают протонов.

Тем самым было подтверждено существование новой частицы, которую теперь называют нейтроном.

Расщепление металлического бериллия происходило следующим образом:

Альфа-частицы ${}^4_2\text{He}$ (заряд 2, массовое число 4) сталкивались с ядрами бериллия (заряд 4, массовое число 9), в результате чего возникали углерод и нейтрон.

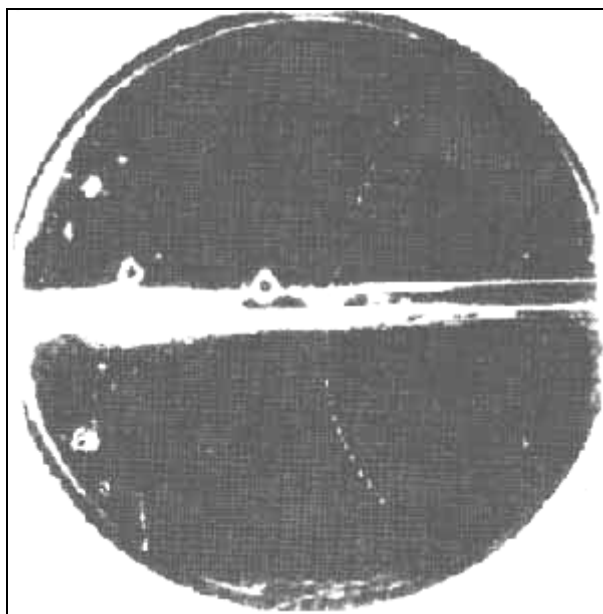
Открытие нейтрона явилось важным шагом вперед. Наблюдаемые характеристики ядер теперь можно было интерпретировать, рассматривая нейтроны и протоны как составные части ядер.

Нейтрон, как теперь известно, на 0,1% тяжелее протона. Свободные нейтроны (вне ядра) претерпевают радиоактивный распад, превращаясь в протон и электрон. Это напоминает о первоначальной гипотезе составной нейтральной частицы. Однако внутри стабильного ядра нейтроны связаны с протонами и самопроизвольно не распадаются.

Позитрон

Начиная с 30-х годов и вплоть до 50-х годов новые частицы открывались главным образом в космических лучах. В 1932 г. в их составе А. Андерсоном была обнаружена первая античастица — позитрон (e^+) — частица с массой электрона, но с положительным электрическим зарядом. Позитрон был первой открытой античастицей. Существование e^+ непосредственно вытекало из релятивистской теории электрона, развитой П. Дираком (1928—31) незадолго до обнаружения позитрона. В 1936г. американские физики К. Андерсон и С. Неддермейер обнаружили при исследовании космических лучей мюоны (обоих знаков электрического заряда) — частицы с массой примерно в 200 масс электрона, а в остальном удивительно близкие по свойствам к e^- , e^+ .

Позитроны (положительные электроны) в веществе не могут существовать, потому что при замедлении они аннигилируют, соединяясь с отрицательными электронами. В этом процессе, который можно рассматривать как обратный процесс рождения пар, положительный и отрицательный электроны исчезают, при этом образуются фотоны, которым передается их энергия. При аннигиляции электрона и позитрона в большинстве случаев образуются два фотона, значительно реже - один фотон. Однофотонная аннигиляция может произойти только в том случае, когда электрон сильно связан с ядром; участие ядра в этом случае необходимо для сохранения импульса. Двухфотонная аннигиляция, напротив, может происходить и со свободным электроном. Часто процесс аннигиляции происходит после практически полной остановки позитрона. В этом случае испускаются в противоположных направлениях два фотона с равными энергиями.



Позитрон был открыт Андерсоном при изучении космических лучей методом камеры Вильсона. На рисунке, который является репродукцией с полученной Андерсоном фотографии в камере Вильсона, видна положительная частица, входящая в свинцовую пластину толщиной 0,6 см с импульсом $6,3 \cdot 10^7$ эВ/с и выходящая из нее с импульсом $2,3 \cdot 10^7$ эВ/с. Можно установить верхний предел для массы этой частицы, допустив, что она теряет энергию только на столкновения. Этот предел составляет 20 ме. На основании этой и других сходных фотографий Андерсон выдвинул гипотезу о существовании положительной частицы с массой, примерно равной массе обычного электрона. Это за-

ключение скоро было подтверждено наблюдениями Блэккета и Оккиалини в камере Вильсона. Вскоре после этого Кюри и Жолио открыли, что позитроны образуются при конверсии гамма-лучей радиоактивных источников, а также испускаются искусственными радиоактивными изотопами. Так как фотон, будучи нейтральным, образует пару (позитрон и электрон), то из принципа сохранения электрического заряда следует, что по абсолютной величине заряд позитрона равен заряду электрона.

Первое количественное определение массы позитрона было проделано Тибо, который измерял отношение e/m методом трохрид и пришел к выводу, что массы позитрона и электрона отличаются не больше чем на 15 %. Более поздние эксперименты Шписа и Цана, которые использовали масс-спектрографическую установку, показали, что массы электрона и позитрона совпадают с точностью до 2 %. Еще позже Дюмонд и сотрудники измерили с большой точностью длину волны аннигиляционного излучения. С точностью до ошибок эксперимента (0,2 %) они получили такое значение длины волны, которого следовало ожидать в предположении, что позитрон и электрон имеют равные массы.

Закон сохранения момента количества движения в применении к процессу рождения пар показывает, что позитроны обладают полуцелым спином и, следовательно, подчиняются статистике Ферми. Разумно предположить, что спин позитрона равен $1/2$, как и спин электрона.

Пионы и Мюоны. Открытие мезона

Открытие мезона, в отличие от открытия позитрона явилось не результатом единичного наблюдения, а скорее выводом из целой серии экспериментальных и теоретических исследований.

В 1932 году Росси, используя метод совпадений, предложенный Боте и Кольхерстером, показал, что известную часть наблюдаемого на уровне моря космического излучения составляют частицы, способные проникать через свинцовые пластины толщиной до 1 м. Вскоре после этого он также обратил внимание на существование в космических лучах двух различных компонент. Частицы одной компоненты (проникающая компонента) способны проходить через большие толщи вещества, причем степень поглощения

их различными веществами приблизительно пропорциональна массе этих веществ. Частицы другой компоненты (ливнеобразующая компонента) быстро поглощаются, в особенности тяжелыми элементами; при этом образуется большое число вторичных частиц (ливни). Эксперименты по изучению прохождения частиц космических лучей через свинцовые пластины, проведенные с камерой Вильсона Андерсоном и Неддемейером, также показали, что существуют две различные компоненты космических лучей. Эти эксперименты показали, что, в то время как в среднем потеря энергии частиц космических лучей в свинце совпадала по порядку величин с теоретически вычисленной потерей на столкновения, некоторые из этих частиц испытывали гораздо большие потери.

В 1934 году Бете и Гайтлер опубликовали теорию радиационных потерь электронов и рождения пар фотонами. Свойства менее проникающей компоненты, наблюдавшейся Андерсоном и Неддемейером, находились в согласии со свойствами электронов, предсказанными теорией Бете и Гайтлера; при этом большие потери объяснялись радиационными процессами. Свойства ливнеобразующего излучения, обнаруженного Росси, также могли быть объяснены в предположении, что это излучение состоит из электронов и фотонов больших энергий. С другой стороны, признавая справедливость теории Бете и Гайтлера, приходилось делать вывод, что "проникающие" частицы в экспериментах Росси и менее поглощающиеся частицы в экспериментах Андерсона и Неддемейера отличаются от электронов. Пришлось предположить, что проникающие частицы тяжелее электронов, так как согласно теории потери энергии на излучение обратно пропорциональны квадрату массы.

В связи с этим обсуждалась возможность краха теории излучения при больших энергиях. В качестве альтернативы Вильямс в 1934 году высказал предположение, что проникающие частицы космических лучей, возможно, обладают массой протона. Одна из трудностей, связанных с этой гипотезой, заключалась в необходимости существования не только положительных, но и отрицательных протонов, потому что эксперименты с камерой Вильсона показали, что проникающие частицы космических лучей имеют заряды обоих знаков. Более того, на некоторых фотографиях, полученных Андерсоном и Неддемейером в камере Вильсона, можно было видеть частицы, которые не излучали подобно электронам, но, однако, были не такими тяжелыми, как протоны. Таким образом, к концу 1936 года стало почти очевидным, что в космических лучах имеются, кроме

электронов, еще и частицы до тех пор неизвестного типа, предположительно частицы с массой, промежуточной между массой электрона и массой протона. Следует отметить также, что в 1935 году Юкава из чисто теоретических соображений предсказал существование подобных частиц.

Существование частиц с промежуточной массой было непосредственно доказано в 1937 году экспериментами Неддемейера и Андерсона, Стрита и Стивенсона.

Эксперименты Неддемейера и Андерсона явились продолжением (с улучшенной методикой) упоминавшихся выше исследований по потерям энергии частиц космических лучей. Они были проведены в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле и разделенной на две половины платиновой пластиной толщиной 1 см. Потери импульса для отдельных частиц космических лучей определялись путем измерения кривизны следа до и после пластины.

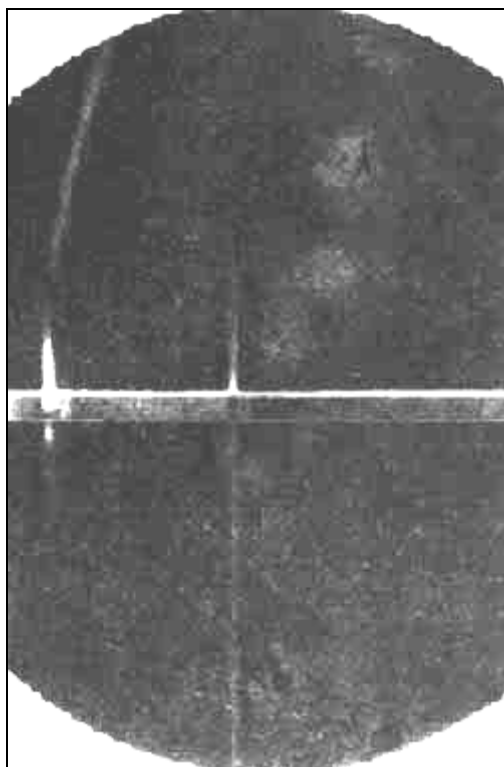
Поглощающиеся частицы легко могут быть интерпретированы как электроны. Такая интерпретация подкрепляется тем, что поглощающиеся частицы в отличие от проникающих часто вызывают в платиновом поглотителе вторичные процессы и по большей части встречаются группами (по две и больше). Именно этого и следовало ожидать, так как многие из электронов, наблюдаемых при такой же геометрии эксперимента, что у Неддемейера и Андерсона, входят в состав ливней, образующихся в окружающем веществе. Что касается природы проникающих частиц, то здесь многое пояснили два следующих результата, полученных Неддемейером и Андерсоном.

1). Несмотря на то, что поглощающиеся частицы относительно чаще встречаются при малых значениях импульсов, а проникающие частицы наоборот (более часты при больших значениях импульсов), имеется интервал импульсов, в котором представлены и поглощающиеся и проникающие частицы. Таким образом, различие в поведении этих двух сортов частиц не может быть приписано различию в энергиях. Этот результат исключает возможность считать проникающие частицы электронами, объясняя их поведение несправедливостью теории излучения при больших энергиях.

2). Имеется некоторое число проникающих частиц с импульсами меньше 200 Мэв/с, которые производят не большую ионизацию, чем однозарядная частица вблизи минимума кривой ионизации. Это означает, что проникающие частицы космических лу-

чей значительно легче, чем протоны, поскольку протон с импульсом меньше 200 Мэв/с производит удельную ионизацию, примерно в 10 раз превышающую минимальную.

Стрит и Стивенсон попытались непосредственно оценить массу частиц космических лучей путем одновременного измерения импульса и удельной ионизации. Они использовали камеру Вильсона, которая управлялась системой счетчиков Гейгера-Мюллера, включенной на антисовпадения. Этим достигался отбор частиц, близких к концу своего пробега. Камера помещалась в магнитное поле напряженностью 3500 гс; камера срабатывала с задержкой около 1 сек, что позволяло производить счет капелек. Среди большого числа фотографий Стрит и Стивенсон нашли одну, представлявшую чрезвычайный интерес.



На этой фотографии виден след частицы с импульсом 29 Мэв/с, ионизация которой примерно в шесть раз превышает минимальную. Эта частица обладает отрицательным зарядом, поскольку она движется вниз. Судя по импульсу и удельной ионизации, ее масса оказывается равной примерно 175 массам электрона; вероятная ошибка, составляющая 25 %, обусловлена неточностью измерения удельной ионизации. Заметим, что электрон, обладающий импульсом 29 Мэв/с, имеет практически минимальную ионизацию. С другой стороны, частицы с таким импульсом и массой протона (либо движущий-

ся вверх обычный протон, либо отрицательный протон, движущийся вниз) обладают удельной ионизацией, которая примерно в 200 раз превышает минимальную; кроме того, пробег такого протона в газе камеры должен быть меньше 1 см. В то же время след, о котором идет речь, ясно виден на протяжении 7 см, после чего он выходит из освещенного объема.

Описанные выше эксперименты, безусловно, доказали, что проникающие частицы действительно являются более тяжелыми, чем электроны, но более легкими, чем протоны. Кроме того, эксперимент Стрита и Стивенсона дал первую примерную оценку массы этой новой частицы, которую мы можем теперь назвать ее общепринятым именем - мезон.

Итак в 1936 г. А. Андерсон и С. Неддермейер открыли мюон (μ - мезон). Эта частица отличается от электрона только своей массой, которая примерно в 200 раз больше электронной.

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

Так как при распаде остановившихся пионов всегда образовывались мюоны строго определённой энергии, отсюда следовало, что при переходе π в μ должна образовываться ещё одна нейтральная частица (масса её 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.

Итак, был открыт заряженный мезон Юкавы, распадающийся на мюон и нейтрино. Время жизни π -мезона относительно этого распада оказалось равным $2 \cdot 10^{-8}$ с. Потом выяснилось, что и мюон нестабилен, что в результате его распада образуется электрон. Время жизни мюона оказалось порядка 10^{-6} с. Так как электрон, образующийся при распаде мюона, не имеет строго определенной энергии, то был сделан вывод, что наряду с электроном при распаде мюона образуются два нейтрино.

В 1947 также в космических лучах группой С. Пауэлла были открыты p^+ и p^- -мезоны с массой в 274 электронные массы, играющие важную роль во взаимодействии протонов с нейтронами в ядрах. Существование подобных частиц было предположено Х. Юкавой в 1935.

Нейтрино

Открытие нейтрино — частицы, почти не взаимодействующей с веществом, ведёт своё начало от теоретической догадки В. Паули (1930), позволившей за счёт предположения о рождении такой частицы устранить трудности с законом сохранения энергии в процессах бета-распада радиоактивных ядер. Экспериментально существование нейтрино было подтверждено лишь в 1953 (Ф. Райнес и К. Коуэн, США).

При β -распаде ядер, как мы уже говорили, кроме электронов вылетают ещё нейтрино. Частица эта сначала была «введена» в физику теоретически. Именно существование нейтрино было постулировано Паули в 1929 году, за много лет до его экспериментального открытия (1956 год). Нейтрино нейтральная частица с нулевой (или ничтожно малой) массой понадобилась Паули для того, чтобы спасти закон сохранения энергии в процессе β -распада атомных ядер.

Первоначально Паули назвал гипотетическую нейтральную частицу, образующуюся при β -распаде ядер, нейтроном (это было до открытия Чедвика) и предположил, что она входит в состав ядра.

Насколько трудно было прийти к гипотезе нейтрино, образующихся в самом акте распада нейтрона, видно хотя бы из того, что всего за год до появления фундаментальной статьи Ферми о свойствах слабого взаимодействия исследователь, выступая с докладом о современном состоянии физики атомного ядра использовал термин «нейтрон» для обозначения двух частиц, которые называются сейчас нейтроном и нейтрино. «Например, согласно предложению Паули, - говорит Ферми, - было бы возможно вообразить, что внутри атомного ядра находятся нейтроны, которые испускались бы одновременно с β -частицами. Эти нейтроны могли бы проходить через большие толщи вещества, практически не теряя своей энергии, и поэтому были бы практически не наблюдаемы. Существование нейтрона, несомненно, могло бы просто объяснить некоторые пока

непонятные вопросы, такие, как статистика атомных ядер, аномальные собственные моменты некоторых ядер, а также, быть может, природу проникающего излучения». В самом деле, когда речь идёт о частице, испускаемой с β -электронами и плохо поглощаемой веществом, необходимо иметь в виду нейтрино. Можно сделать вывод, что в 1932 году проблемы нейтрона и нейтрино были крайне запутаны. Понадобился год напряжённой работы теоретиков и экспериментаторов, чтобы разрешить как принципиальные, так и терминологические трудности.

«После открытия нейтрона, - говорил Паули, - на семинарах в Риме мою новую частицу, испускаемую при β -распаде, Ферми стал называть «нейтрино», чтобы отличить её от тяжёлого нейтрона. Это итальянское название стало общепринятым».

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

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

В 1962 было выяснено, что существуют два разных нейтрино: электронное и мюонное. В 1964 в распадах нейтральных К-мезонов было обнаружено несохранение т. н. комбинированной чётности (введённой Ли Цзун-дао и Ян Чжэнь-нином и независимо Л. Д. Ландау в 1956), означающее необходимость пересмотра привычных взглядов на поведение физических процессов при операции отражения времени.

От странности до очарования

Открытие странных частиц

Конец 40-х — начало 50-х гг. ознаменовались открытием большой группы частиц с необычными свойствами, получивших название “странных”. Первые частицы этой группы K^+ - и K^- -мезоны, L^- , S^+ -, S^- -, X^- -гипероны были открыты в космических лучах, последующие открытия странных частиц были сделаны на ускорителях — установках, создающих интенсивные потоки быстрых протонов и электронов. При столкновении с веществом ускоренные протоны и электроны рожают новые элементарные частицы, которые и становятся предметом изучения.

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

V -частицы допускают, на первый взгляд, и другую интерпретацию: их появление можно было бы истолковать 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 основании, что процессы рассеивания 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).

Заметим, что если экспериментальное открытие π -мезона было в каком-то смысле «ожидаемым» в связи с необходимостью объяснить природу нуклонных взаимодействий, то открытие V -частиц, как и открытие мюона, оказалось полной неожиданностью.

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

Как выяснилось позднее, все эти наблюдения оказались наблюдениями различных распадов одной и той же частицы – K -мезона (заряженного или нейтрального).

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

Странные частицы в лаборатории впервые получены в 1954г. Фаулером, Шаттом, Торндайком и Вайтмором, которые, используя пучок ионов от Брукхейвенского космострона с начальной энергией 1,5 ГэВ, наблюдали реакции ассоциативного образования странных частиц.

С начала 50-х гг. ускорители превратились в основной инструмент для исследования элементарных частиц. В 70-х гг. энергии частиц, разогнанных на ускорителях, составили десятки и сотни млрд. электрон-вольт (ГэВ). Стремление к увеличению энергий частиц обусловлено тем, что высокие энергии открывают возможность изучения строения материи на тем меньших расстояниях, чем выше энергия сталкивающихся частиц. Ускорители существенно увеличили темп получения новых данных и в короткий срок расширили и обогатили наше знание свойств микромира. Применение ускорителей для изучения странных частиц позволило более детально изучить их свойства, в частности особенности их распада, и вскоре привело к важному открытию: выяснению возможности изменения характеристик некоторых микропроцессов при операции зеркального отражения — т. н. нарушению пространств, чётности (1956). Ввод в строй протонных ускорителей с энергиями в миллиарды электрон-вольт позволил открыть тяжёлые античастицы: антипротон (1955), антинейтрон (1956), антисигма-гипероны (1960). В 1964 был открыт самый тяжёлый гиперон W - (с массой около двух масс протона).

Резонансы.

В 1960-х гг. на ускорителях было открыто большое число крайне неустойчивых (по сравнению с др. нестабильными элементарными частицами) частиц, получивших название “резонансов”. Массы большинства резонансов превышают массу протона. Первый из них D_1 (1232) был известен с 1953 г. Оказалось, что резонансы составляют основная часть элементарных частиц.

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

Нуклонный резонанс, открытый Ферми в 1952 г., позже стали называть $\Delta_{3/2\ 3/2}$ – изобарой (чтобы выделить тот факт, что спин и изотопический спин Δ -изобары равны $3/2$). Так как время жизни резонансов незначительна, их нельзя наблюдать непосредственно, аналогично тому, как наблюдают «обычные» протон, π -мезоны и мюоны (по их следам в трековых приборах). Резонансы обнаруживают по характерному поведению сечений рассеивания частиц, а также изучая свойства продуктов их распада. Большинство известных элементарных частиц относится именно к группе резонансов.

Открытие Δ -резонанса имело важнейшее значение для физики элементарных частиц.

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

Возбуждённые состояния существуют не только у нуклона (в этом случае говорят о его изобарных состояниях), но и у π -мезона (в этом случае говорят о мезонных резонансах).

«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 остаётся неясной».

«Очарованные» частицы

В конце 1974г. две группы экспериментаторов (группа Тинга на протонном ускорителе в Брукхейвене и группа Б. Рихтера, работавшая на установке со встречными электронно-позитронными пучками в Стэнфорде) одновременно сделали важнейшее открытие в физике элементарных частиц: открыли новую частицу – резонанс с массой, равной 3,1 ГэВ (превышающей три массы протона).

Наиболее удивительным свойством этого резонанса оказалась его малая ширина распада – она равна всего 70кэВ, что соответствует времени жизни порядка 10^{-23} с.

Общепринятое объяснение природы ψ -мезонов основано на гипотезе существования наряду со «стандарными» тремя u -, d - и s -кварками ещё четвёртого, c -кварком. От известных ранее кварков c -кварк отличается значением нового квантового числа, названного чармом. Поэтому c -кварк получил название чармового – или очарованного – кварка.

В 1974 были обнаружены и другие массивные (в 3—4 протонные массы) и в то же время относительно устойчивые u -частицы, с временем жизни, необычно большим для резонансов. Они оказались тесно связанными с новым семейством элементарных частиц — «очарованных», первые представители которого (D^0 , D^+ , L_c) были открыты в 1976. В 1975 были получены первые сведения о существовании тяжёлого аналога электрона и мюона (тяжёлого лептона t).

За открытие ψ -частиц Тингу и Рихтеру в 1976 году была присуждена Нобелевская премия по физике.

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

Заключение

Таким образом, за годы, прошедшие после открытия электрона, было выявлено огромное число разнообразных микрочастиц материи. Для всех элементарных частиц характерны исключительно малые размеры: линейные размеры нуклона и пиона примерно равны 10^{-15} м. Теория предсказывает, что размер электрона должен быть порядка 10^{-19} м.

Масса же подавляющего большинства частиц сравнима с массой протона, которая в энергетических единицах близка к 1 ГэВ (1000 МэВ).

Мир элементарных частиц оказался достаточно сложно устроенным. Неожиданными во многих отношениях оказались свойства обнаруженных элементарных частиц. Для их описания, помимо характеристик, заимствованных из классической физики, таких, как электрический заряд, масса, момент количества движения, потребовалось ввести много новых специальных характеристик, в частности для описания странных элементарных частиц — странность (К. Нишиджима, М. Гелл-Ман, 1953), “очарованных” элементарных частиц — “очарование” (американские физики Дж. Бьёркен, Ш. Глэшоу, 1964); уже названия приведённых характеристик отражают необычность описываемых ими свойств элементарных частиц.

Изучение внутреннего строения материи и свойств элементарных частиц с первых своих шагов сопровождалось радикальным пересмотром многих устоявшихся понятий и представлений. Закономерности, управляющие поведением материи в малом, оказались настолько отличными от закономерностей классической механики и электродинамики, что потребовали для своего описания совершенно новых теоретических построений.

Изучение внутреннего строения материи и свойств элементарных частиц с первых своих шагов сопровождалось радикальным пересмотром многих устоявшихся понятий и представлений. Закономерности, управляющие поведением материи в малом, оказались настолько отличными от закономерностей классической механики и электродинамики, что потребовали для своего описания совершенно новых теоретических построений. Такими новыми фундаментальными построениями в теории явились частная (специальная) и общая теория относительности (А. Эйнштейн, 1905 и 1916; Относительности теория, Тяготение) и квантовая механика (1924—27; Н.Бор, Л. де Бройль, В. Гейзенберг, Э.

Шредингер, М. Борн). Теория относительности и квантовая механика знаменовали собой подлинную революцию в науке о природе и заложили основы для описания явлений микромира. Однако для описания процессов, происходящих с элементарными частицами, квантовой механики оказалось недостаточно. Понадобился следующий шаг — квантование классических полей (т. н. квантование вторичное) и разработка квантовой теории поля. Важнейшими этапами на пути её развития были: формулировка квантовой электродинамики (П. Дирак, 1929), квантовой теории β -распада (Э. Ферми, 1934), положившей начало современной теории слабых взаимодействий, квантовой мезодинамики (Юкава, 1935). Непосредственной предшественницей последней была т. н. b -теория ядерных сил (И. Е. Тамм, Д. Д. Иваненко, 1934; Сильные взаимодействия). Этот период завершился созданием последовательного вычислительного аппарата квантовой электродинамики (С. Томонага, Р. Фейнман, Ю. Швингер; 1944—49), основанного на использовании техники перенормировки (Квантовая теория поля). Эта техника была обобщена впоследствии применительно к другим вариантам квантовой теории поля.

Квантовая теория поля продолжает развиваться и совершенствоваться и является основой для описания взаимодействий элементарных частиц У этой теории имеется ряд существенных успехов, и всё же она ещё очень далека от завершённости и не может претендовать на роль всеобъемлющей теории элементарных частиц Происхождение многих свойств элементарных частиц и природа присущих им взаимодействий в значительной мере остаются неясными. Возможно, понадобится ещё не одна перестройка всех представлений и гораздо более глубокое понимание взаимосвязи свойств микрочастиц и геометрических свойств пространства-времени, прежде чем теория элементарных частиц будет построена.

Литература

Ахиезер А.И., Рекало М.П. Биография элементарных частиц. -К.: Наукова Думка, 1983.

Дорфман Я.Г. Всемирная история физики с начала 19 века до середины 20 века. - М.,: 1979.

Зисман Г.А., Годес О.М. Курс общей физики. -К.: Изд. Эделвейс, 1994.

Кемпфер Ф. Путь в современную физику. -М.: 1972.

Крейчи. Мир глазами современной физики. -М.: Мир, 1974.

Мякишев Г.Я. Элементарные частицы. -М.: Просвещение, 1977.

Пасічний А.П. Фізика елементарних частинок. -К.: Вища школа, 1980.

Савельев И.В. Курс физики. -М.: Наука, 1989.