
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ**§ 44. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

Ядерная физика зародилась при изучении явлений, обнаруженных впервые всего 50—70 лет тому назад. За прошедшие после этого годы проводились глубокие исследования, в результате которых многократно исправлялись и изменялись взгляды на природу процессов, происходящих в микромире. Был накоплен большой экспериментальный материал, который еще анализируется и систематизируется. Это привело к созданию новых отраслей науки. Так, прошло немногим более десяти лет с тех пор, как выделилась особая ветвь ядерной физики, предметом изучения которой являются первичные свойства, пространственная структура, взаимодействия и взаимные связи различных элементарных частиц.

Часто эту отрасль ядерной физики называют физикой высоких энергий, потому что для проведения большинства экспериментов в данной области нужны частицы весьма высокой энергии. Это обусловлено двумя причинами: во-первых, для изучения пространственной структуры элементарных частиц необходимо использовать пучки частиц с очень малой длиной волны λ , сравнимой с изучаемыми расстояниями; во-вторых, для генерации новых частиц необходимо превысить порог генерации, определяемый их массами. Так, если при изучении ядерных реакций были достаточны энергии бомбардирующих частиц порядка энергии связи нуклонов в ядрах, т. е. ≥ 10 Мэв, то для опытов по рождению пионов потребовались протоны, ускоренные до энергий 300 Мэв, а для экспериментов по рождению протон-антипротонных пар-частицы — с энергией 6 млрд. эв.

Естественным источником частиц высоких энергий являются космические лучи. Не случайно поэтому, что до начала 50-х годов развитие физики элементарных частиц было тесно связано с изучением процессов в космических лучах. Однако интенсивность потока их сравнительно мала, и поэтому интересующие исследователей события крайне редки. Кроме того, космические частицы неуправ-

ляемы, многие параметры их при высоких энергиях неизвестны, и поэтому опыты не вполне однозначны.

Совершенно новые возможности появились, когда частицы высоких энергий научились получать в лабораториях с помощью ускорителей заряженных частиц. Современные ускорители — это огромные инженерные сооружения, оснащенные сложнейшей управляющей, контрольной и измерительной аппаратурой. Будущее физики элементарных частиц тесно связано с развитием и усовершенствованием ускорительной техники для генерации частиц еще больших энергий в пучках повышенной плотности.

В настоящее время, когда интенсивно разрабатывается теория элементарных частиц, на основе которой можно будет предсказывать и объяснять их характеристики, для подтверждения высказанных гипотез и теоретических построений необходима постановка новых экспериментов, проведение которых невозможно с помощью существующей аппаратуры. Поэтому разрабатываются все более сложные установки для исследования взаимодействий при энергиях $10^{12} \div 10^{13}$ эв в космических лучах и новые ускорители, на которых можно будет производить прецизионные опыты при энергиях $\sim 10^{11} \div 10^{12}$ эв.

В начале тридцатых годов были известны только четыре частицы: электрон (e), протон (p), нейтрон (n) и γ -квант. Первая элементарная частица — электрон — была предсказана Лоренцом и открыта Томсоном в 1897 г. Вторая частица — протон — открыта Резерфордом в 1911 г. Открытие нейтрона Чадвиком привело к представлению о том, что из этих четырех частиц можно построить все известные формы материи: ядра, атомы вещества и электромагнитное поле. Открытие других частиц значительно усложнило картину.

Остановимся на важнейших этапах проникновения в мир элементарных частиц.

Античастицы. Существование античастиц было предсказано Дираком, как об этом уже говорилось в § 26. В настоящее время известно, что, за немногими исключениями, всякой элементарной частице, в том числе и электрически нейтральной, соответствует так называемая античастица. Массы, спины, изотопические спины и четности частицы и античастицы в точности равны. Знаки электрического и нуклонного зарядов, странностей¹, а также магнитных моментов частицы и античастицы противоположны. В вакууме античастицы имеют то же время жизни, что и частицы; так, например, позитрон и антипротон стабильны.

Отличительной особенностью пары — частица и античастица — является их способность аннигилировать при встрече друг с другом, превращаясь в другие формы материи; при этом энергия, эквивалентная сумме масс покоя пары, переходит в энергию покоя и кинетическую энергию новых частиц или в энергию γ -квантов.

¹ Понятия о нуклонном заряде и странности вводятся в § 48.

Наоборот, для рождения пары требуется затратить энергию, эквивалентную или превышающую ту, которая определяется их массами покоя.

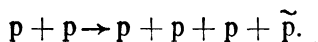
Открытие Дирака послужило основанием для формулировки общего свойства материи, названного *зарядовым сопряжением*, согласно которому наряду с частицей должна существовать ее античастица.

Известны три частицы, у которых античастиц не существует. Можно сказать, что такие частицы тождественны своим античастицам. Это — фотон, π^0 -мезон и η^0 -мезон, их называют абсолютно нейтральными.

Принцип зарядового сопряжения¹ гласит, что законы природы не меняются для системы, в которой все частицы заменены античастицами. Как выяснилось впоследствии, этот принцип справедлив для ядерных («сильных») и электромагнитных взаимодействий и не выполняется для слабых взаимодействий. Иными словами, если исключить из рассмотрения слабое взаимодействие, то мир, составленный из частиц, и мир, составленный из античастиц, тождественны по своим свойствам.

Первой античастицей, которую обнаружили экспериментально, был позитрон. В 1933 г. впервые удалось наблюдать процесс образования пары e^+ , e^- фотонами радиоактивных источников по фотографиям треков в камере Вильсона.

И только более 20 лет спустя удалось наблюдать рождение пары протон-антипротон и таким образом доказать существование частицы зарядово сопряженной протону. Так как масса покоя протона почти в две тысячи раз превышает массу покоя электрона, то и энергия для создания протон-антипротонной пары должна быть в несколько тысяч раз больше энергии, затрачиваемой на электронно-позитронную пару. В лабораторных условиях частицы с энергией в миллиарды электрон-вольт удалось получить только в 1953 г. Поэтому лишь в 1955 г. группа американских физиков обнаружила антипротоны среди других частиц, создаваемых при бомбардировке медной мишени протонами с энергией в 6,2 Гэв. Появление антипротона при этом происходило в результате реакции



После столкновения каждая из четырех частиц движется в среднем с кинетической энергией порядка 1 Гэв. Пороговая энергия для рождения пары (p , \bar{p}) при столкновении двух свободных нуклонов в лабораторной системе координат (принимается, что один из нуклонов до соударения покоился) равна 5,6 Гэв. Если соударение происходит с нуклоном, связанным в ядре Си, то пороговая энергия уменьшается за счет внутриядерного движения нукло-

¹ Иногда встречается другое название — закон сохранения зарядовой четности.

нов. Таким образом, энергии протонов, ускоренных в беватроне¹ до 6,2 Гэв, достаточно для рождения пары (p , \bar{p}).

План первого опыта основывался на трех свойствах антипротона. Во-первых, так как \bar{p} стабилен, то он может пройти через длинную установку. Во-вторых, знак заряда может быть определен по отклонению в магнитном поле, а величина заряда — по ионизации среды. В-третьих, зная, скорость частицы, можно вычислить ее массу по кривизне траектории в данном магнитном поле.

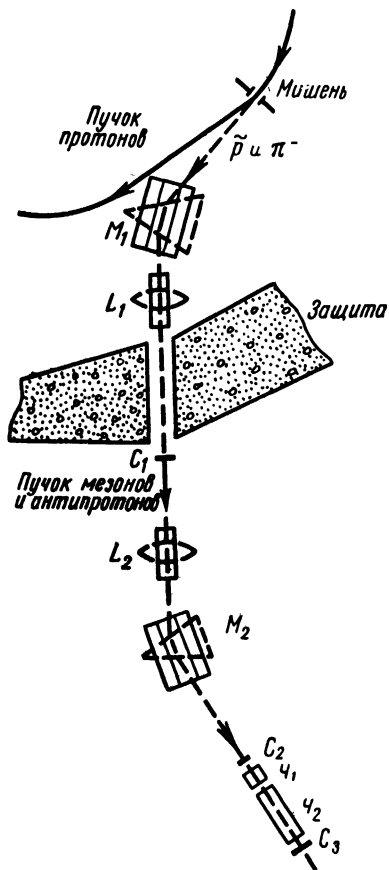


Рис. 94. Схема эксперимента для обнаружения антипротона

Основная трудность заключается в том, что при бомбардировке мишени протонами рождается огромное количество мезонов с такими же импульсами, какие должны быть у антипротона (на один антипротон рождается примерно 62 000 π -мезонов). Они имеют ту же траекторию, но значительно большую скорость из-за малости массы. Разница в скоростях и была использована для отделения антипротонов от π -мезонов. Схема первого опыта приведена на рис. 94. Медная мишень T бомбардировалась пучком протонов. Рожденные при столкновении отрицательные частицы отклонялись магнитными призмами M_1 и M_2 и фокусировались магнитными линзами L_1 и L_2 . При заданных полях через линзы проходили единично заряженные частицы с импульсами, равными 1,19 Бэв/с. Для определения скорости частиц на их пути ставились два быстродействующих

люминесцентных счетчика C_1 и C_2 на расстоянии 12 м друг от друга. С точностью до 10^{-9} сек они регистрировали время пролета частицами 12-метрового интервала. Антипротоны проходили его за $5,1 \cdot 10^{-8}$ сек, а π -мезоны за $4 \cdot 10^{-8}$ сек при одинаковой величине импульса. Для исключения случайных совпадений в счетчиках C_1 и C_2 , вызванных двумя π -мезонами, на пути пролетающих частиц

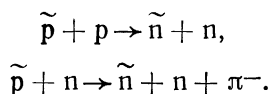
¹ Ускоритель протонов в Беркли (США).

были поставлены два черенковских счетчика $Ч_1$ и $Ч_2$. Счетчик $Ч_2$ регистрировал только те частицы, которые проходят со скоростью от 75 до 78% скорости света, т. е. со скоростью антипротона. Счетчик $Ч_1$, включенный в схему антисовпадений, давал сигнал, когда проходила частица со скоростью, большей 78% скорости света (у π^- -мезона с импульсом 1,10 *Бэв/с* относительная скорость $v/c = 0,99$). Для исключения частиц, которые могут попасть снаружи, ставился люминесцентный счетчик $С_3$, регистрирующий только частицы, движущиеся в направлении пучка.

В результате частица регистрировалась как антипротон лишь по выполнении следующих требований: счетчики $С_1$ и $С_2$ указывали, что она прошла 12 м за $5,1 \cdot 10^{-8}$ сек, счетчик $Ч_1$ не давал сигнала, скорость частицы, зарегистрированная счетчиком $Ч_2$, лежала в интервале (75÷78%) скорости света, счетчик $С_3$ указывал, что частица прошла через всю длину селектора.

Всего в первом опыте было зарегистрировано 60 антипротонов. Для проверки надежности методики ставились контрольные опыты. Изменялись направления магнитных полей, и в установку направлялись протоны с таким же импульсом, равным 1,9 *Бэв/с*. Из результатов этого и последующих экспериментов стало очевидно, что массы протона и антипротона равны, что антипротон является стабильной частицей и исчезает только в результате аннигиляции, сопровождающейся в основном рождением нескольких π -мезонов¹.

Антинейтроны впервые были получены в 1956 г. Для их получения использовался пучок антипротонов, которые в результате взаимодействия с нуклонами могут совершать так называемые процессы переарядки:

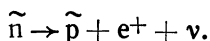


Антинейтрон отличается от нейтрона направлением магнитного момента, оно у антинейтрона совпадает с направлением спина. Подобно антипротону, при встрече с нуклоном, антинейтрон аннигилирует с ним, в результате чего выделяется энергия

$$E = 2m_N c^2 = 1900 \text{ Мэв},$$

которая идет на образование π - и k -мезонов. Именно это свойство антинейтрона было использовано для его обнаружения.

Так же как и нейтрон, антинейтрон является частицей нестабильной с тем же периодом полураспада $\tau_n = \tau_{\tilde{n}} = 11,7 \pm 0,3$ мин. Распадается он по схеме



¹ В 95% случаях возникают π -мезоны, в 5% — K -мезоны, со значительно меньшей вероятностью образуются γ -кванты.

Как уже говорилось, в настоящее время античастицы известны почти для всех элементарных частиц.

Нейтрино. Следующая элементарная частица — нейтрино — также была предсказана теоретически в 1931 г. в связи с процессами β -распада (см. § 19). Но только 20 лет спустя удалось обнаружить прямое взаимодействие ее с веществом.

Нейтрино с энергией ≈ 1 Мэв имеет эффективное сечение взаимодействия $\sigma \leq 10^{-43}$ см², что соответствует длине свободного пробега, равной примерно 10^{16} км плотного вещества. Для сравнения укажем, что расстояние от Земли до Солнца составляет всего лишь $1,5 \cdot 10^8$ км. Чтобы зарегистрировать хотя бы один акт взаимодействия при столь ничтожном эффективном сечении, надо располагать огромными потоками нейтрино. Поэтому такое наблюдение стало возможным только после появления мощных ядерных реакторов, внутри которых идут процессы β -распада с образованием антинейтрино. Поток антинейтрино от реактора мощностью около 100 тыс. квт за толстой стеной, защищающей от нейтронов и γ -квантов, но легко проницаемой для нейтрино, огромен и составляет приблизительно 10^{19} частиц/см⁻² сек.

Это дало возможность Ф. Рейнесу и К. Коуэну в 1956 г. при работе с реактором зарегистрировать процесс:



Такая реакция возможна, если энергия антинейтрино превышает 2 Мэв (это связано с тем, что масса нейтрона и позитрона на 3,5 m_e превышает массу протона и антинейтрино).

Детектором и одновременно мишенью в данных опытах служил жидкий сцинтиллятор объемом 1 м³ с высоким содержанием водорода и, кроме того, насыщенный кадмием. Его окружали свыше ста фотоумножителей, которые должны были регистрировать световые вспышки. На рис. 95 приведена схема процессов, идущих внутри детектора антинейтрино.

Итак, антинейтрино вызывает превращению протона в нейтрон и позитрон в точке 1. Позитрон замедляется и аннигилирует с испусканием двух γ -квантов с энергией по 0,51 Мэв в точке 2.

Рис. 95. Схема опыта для обнаружения нейтрино

За счет фото- и комптон-электронов они дают первую вспышку в сцинтилляторе. Нейтрон в течение нескольких микросекунд замедляется водородом, содержащимся в

сцинтилляторе, потом захватывается кадмием в точке З. Происходит реакция (n, γ) и γ -кванты, возникающие при этом захвате, дают вторую вспышку. Схема запаздывающих совпадений регистрирует эти две вспышки.

Теоретически время аннигиляции позитрона имеет порядок 10^{-8} сек. Диффузия нейтрона, который должен замедлиться до тепловых скоростей ($\sigma_{n\gamma} \sim 1/v_n$), происходит в течение 10^{-6} сек, т. е. на два порядка медленнее. Таким образом, на выходе радиосхемы появляются два коррелированных импульса с интервалом в 1 мксек. Этому соответствует сечение реакции (113), равное $\sigma = (11 \pm 4) \cdot 10^{-44}$ см².

Так как частота событий была мала и не превышала уровня фона от космических лучей, то возникла необходимость в постановке контрольных опытов:

а) изменялась мощность реактора, соответственно изменялась частота событий;

б) увеличивалось содержание кадмия в сцинтилляторе, в результате чего время диффузии нейтрона уменьшалось и интервал времени между импульсами сокращался.

В результате длительной работы установки было найдено, что детектор регистрирует за час примерно 3 импульса. Эти опыты по существу впервые дали экспериментальное доказательство существования нейтрино.

Согласно принципу зарядового сопряжения у нейтрино также должна быть античастица. Действительно, уже экспериментальные данные 1956—1957 гг. свидетельствовали в пользу существования антинейтрино, отличного по своим свойствам от нейтрино.

В 1962 г. был обнаружен совершенно новый факт: слабозаимодействующие нейтральные частицы с нулевой массой существуют двух типов: при β -распаде образуется так называемое электронное нейтрино — ν_e , а при распаде π -мезона образуется нейтрино мюонное — ν_μ . Эксперимент показал, что они отличаются друг от друга по типу взаимодействий.

Мезоны. Как уже говорилось в § 11, существование мезонов — частиц с массой, промежуточной между массами электрона и протона, — было предсказано в 1935 г. Юкава при построении теории ядерных сил.

Эти частицы являются квантами ядерного поля, испускаются и поглощаются протонами и нейтронами в процессе взаимодействия, а при подходящих условиях могут породить нуклон — антинуклонные пары. При аннигиляции нуклона с антинуклоном их энергия и импульс переходят к мезонам.

В 1947 г. английский физик Пауэлл, изучая фотоэмульсионные пластинки, облученные на горах космическими лучами, обнаружил следы от частиц с массой $\approx 300 m_e$. Эти частицы были названы π -мезонами, или пионами. Последующие опыты показали, что существуют π -мезоны с электрическим зарядом (+), (—) и (0). Положительный и отрицательный π -мезоны нужно рассматривать

соответственно, как частицу и античастицу. Каждый из них имеет массу $273,1 m_e$. Масса нейтрального π^0 -мезона равна $264,3 m_e$. Спины пионов равны нулю. Все пионы являются нестабильными частицами. Заряженные π^\pm -мезоны, имея время жизни $2,55 \cdot 10^{-8}$ сек, распадаются по схеме

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu.$$

Время жизни нейтрального π^0 -мезона порядка 10^{-16} сек и распадается он на два γ -кванта:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma.$$

Свойства пионов оказались именно такими, какие предсказывались теорией Юкавы. Было подтверждено сильное взаимодействие π -мезонов с ядром.

На десять лет ранее пиона в космических лучах был открыт μ -мезон (или мюон), который в отличие от π -мезонов не взаимодействует с ядром и поэтому не может быть ответственным за поле ядерных сил. Возникает мюон в результате распада пиона, и за промежуток времени $2 \cdot 10^{-6}$ сек в свою очередь распадается спонтанно на электрон (позитрон), нейтрино и антинейтрино по схеме

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu + \bar{\nu}.$$

Масса мюонов равна $206,8 m_e$, они имеют либо отрицательный, либо положительный заряд. Нейтрального мюона не существует. Подобно электрону и позитрону μ^- и μ^+ являются частицей и античастицей. Свойства мюонов, тип взаимодействий, в которых они участвуют, аналогичны свойствам электронов. В этом смысле их часто и рассматривают как нестабильные тяжелые электроны.

Поиски частиц Юкава привели к открытию и другого семейства мезонов — K -мезонов (каонов). Это еще более тяжелые нестабильные частицы. Масса K^\pm -мезонов равна $966 m_e$. Время жизни $1,2 \cdot 10^{-8}$ сек. K^- -мезон является античастицей K^+ -мезона. Они могут распадаться самыми различными способами, преимущественно образуя π - и μ -мезоны.

Кроме заряженных существуют два нейтральных зарядовоспряженных K -мезона: K^0 и \bar{K}^0 . Массы их равны $974 m_e$, что несколько больше масс заряженных каонов. Нейтральные K -мезоны исключительно интересны, потому что каждый из них является изменяющейся суперпозицией двух других элементарных нейтральных частиц K_1^0 и K_2^0 . K_1^0 и K_2^0 имеют разное время жизни, различные схемы распада и слегка различные массы. Время жизни K_1^0 равно $0,9 \cdot 10^{-10}$ сек и распадается он преимущественно на два π -мезона. Такие каоны называют короткоживущими. Время жизни K_2^0 равно $5,4 \cdot 10^{-8}$ сек и распадается он в большинстве случаев на три пиона. Его называют долгоживущим каоном. Разница в их массах определяется величиной

$$\Delta m = (1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-5} \text{ эв.}$$

Согласно Пайсу и Пиччиони, волновые функции K^0 и \tilde{K}^0 -мезонов записываются в форме

$$\psi_{K^0} = \frac{\psi_{K_1^0} + \psi_{K_2^0}}{\sqrt{2}}; \quad \psi_{\tilde{K}^0} = \frac{\psi_{K_1^0} - \psi_{K_2^0}}{\sqrt{2}}.$$

Таким образом, каждая из частиц K^0 и \tilde{K}^0 несет в себе свойства обеих нейтральных частиц K_1^0 и K_2^0 .

K -мезоны сильно взаимодействуют с ядрами и также могут быть квантами ядерного поля.

За последние годы установлено существование еще одного мезона, — η^0 -мезона с массой $1090 m_e$.

Гипероны. После 1947 г. было обнаружено существование целого класса нестабильных частиц, более тяжелых, чем протон, называемых гиперонами. К этому классу относятся следующие частицы.

1. Ламбда-ноль-гиперон — Λ^0 ее масса $2182 m_e$, время жизни $2,5 \cdot 10^{-10}$ сек, распадается преимущественно на протоны и π^- -мезоны.

2. Семейство сигма-гиперонов: Σ^+ ; Σ^- ; Σ^0 . Масса Σ^+ -гиперона составляет примерно $2328 m_e$ и распадается он со временем жизни $0,8 \cdot 10^{-10}$ сек по двум схемам:

$$\Sigma^+ \rightarrow \begin{cases} p + \pi^0 \\ n + \pi^+ \end{cases}$$

Масса Σ^- -гиперона равна $2341 m_e$, время жизни $1,5 \cdot 10^{-10}$ сек, распадается он на нейтрон и π^- -мезон:

$$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-.$$

Кроме этого существует нейтральный сигма-гиперон с массой, равной $2331 m_e$, временем жизни, меньшим, чем 10^{-11} сек ($\sim 10^{-14}$ сек). Его распад происходит по схеме

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma.$$

Довольно интересно то, что Σ^- -гиперон не является античастицей для Σ^+ -гиперона, массы их немного отличаются. Для всех трех сигма-гидеронов существуют свои античастицы.

3. В число гиперонов входят два кси-гиперона Ξ^- и Ξ^0 и соответствующие им античастицы $\tilde{\Xi}^-$, $\tilde{\Xi}^0$. Ξ^- -гиперон с массой, равной $2580 m_e$, имеет время жизни $1,6 \cdot 10^{-10}$ сек, распадается по схеме

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-.$$

Ξ^0 -гиперон с массой в $2565 m_e$ имеет время жизни $3 \cdot 10^{-10}$ сек и распадается по схеме

$$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0.$$

4. Недавно был обнаружен еще один гиперон Ω^- . Его масса близка к $3300 m_e$, а время жизни $1,3 \cdot 10^{-10}$ сек.

Гипероны и К-мезоны называли «странными» частицами, так как обнаружили их неожиданные свойства. В частности, они жили в 10^{13} раз дольше, что это ожидалось из теоретических представлений.

Резонансы. В самое последнее время был открыт ряд резонансных состояний элементарных частиц, называемых кратко резонансами, представляющих короткоживущие образования (частицы), возникающие при взаимодействии элементарных частиц.

Характерная особенность резонансов — их малое время жизни ($\tau \sim 10^{-22} \div 10^{-23}$ сек), т. е. генерации и распад резонансов происходят практически в одной точке. В связи с этим их существование было обнаружено косвенными методами, по наблюдению продуктов их распада.

Первые резонансы проявились уже в опытах Ферми и его сотрудников, выполненных в 1952 г. в Чикагском университете. Пучок пионов из циклотрона рассеивался на протонах, содержащихся в водороде пузырьковой камеры. При этом могло происходить как упругое, так и неупругое рассеяние согласно реакциям:

- а) $\pi^\pm + p \rightarrow p + \pi^\pm$ (упругое рассеяние);
- б) $\pi^\pm + p \rightarrow p + \pi^\pm + \pi^0$ (неупругое рассеяние);
- в) $\pi^\pm + p \rightarrow n + \pi^\pm + \pi^\pm$ (рассеяние с перезарядкой).

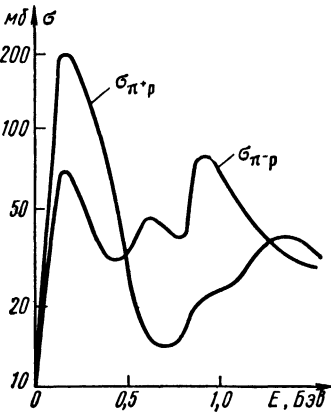


Рис. 96. Зависимости эффективных сечений рассеяния пионов на протонах от эффективной массы системы

Измерялось эффективное сечение рассеяния для различных энергий пионного пучка. Если построить зависимость сечения от эффективной массы пион-протонной системы (эффективной массой называется сумма масс покоя и кинетических энергий обеих частиц: пиона и протона в системе центра масс), то оказывается что сечение имеет резкий пик около значения эффективной массы, равного примерно 1238 Мэв (рис. 96).

Можно предполагать, что при реакции а образуется некоторый комплекс из π^\pm и p , который распадается через время τ , связанное с шириной пика Γ соотношением неопределенностей

$$\tau \Gamma \approx \hbar.$$

Для данного случая τ имеет порядок 10^{-23} сек.

Дальнейшие исследования показали, что при пион-протонном рассеянии возникает серия резонансов. Были найдены резонансные

пики и при других взаимодействиях. Таким образом было обнаружено существование целого класса короткоживущих частиц; их называли резонансами из-за характерного резонансного вида кривых эффективного сечения σ .

Согласно современным представлениям, их можно рассматривать как кратковременную ассоциацию других элементарных частиц, например пионов или пионов и гиперонов. В то же время резонансы имеют достаточно определенные значения энергии, заряда, спина, изотопического спина и по существу отличаются от перечисленных ранее частиц только необычайно малым временем жизни.

Поэтому вынесение их в отдельный класс не означает признания принципиального отличия их от других частиц; это сделано больше для удобства систематизации.

§ 45. ВИДЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ

Если отвлечься от очень слабого гравитационного взаимодействия, то элементарные частицы обладают взаимодействиями трех основных классов: сильными взаимодействиями, электромагнитными взаимодействиями и слабыми взаимодействиями. Они сильно отличаются друг от друга величиной вероятности вызываемых ими процессов. Например, при энергиях ≈ 100 Мэв эти вероятности относятся приблизительно как $1 : 10^{-2} : 10^{-14}$; при других энергиях эти цифры могут несколько изменяться.

Сильные взаимодействия — главные взаимодействия между нуклонами, входящими в состав ядра (p, p), (p, n), (n, n). Они в основном определяют устойчивость атомных ядер, расстояние между энергетическими уровнями в ядрах, энергию связи ядер, ядерные силы, выделение энергии при делении урана. К сильным взаимодействиям относятся также взаимодействия нуклонов с пионами и каонами, являющимися квантами ядерного поля и некоторые другие.

Для того чтобы можно было сравнивать силу различных взаимодействий частиц с соответствующим полем, по аналогии с кулоновскими электрическими зарядами вводится понятие *ядерного заряда* — g . Величина g определяется из опытов по рассеянию пионов на нуклонах и в других экспериментах.

Сила взаимодействия единичного заряда с полем определяется безразмерной константой связи, которая для случая ядерного поля равна

$$\frac{g^2}{\hbar c} \approx 15.$$

Иногда данный тип взаимодействия называют «быстрым», поскольку обусловленные им процессы имеют длительность порядка 10^{-23} сек (характерное ядерное время, которое требуется релятивистской частице, чтобы пройти сквозь ядро).