1.22. Классификация элементарных микрочастиц. Новые квантовые числа в мире микрочастиц

К началу 50-х годов были открыты многие микрочастицы, которых вместе с уже ранее известными оказалось до 30. Все эти микрочастицы и их античастицы можно представить в виде наглядной таблицы, которую предложил Д. Орир (*табл.10*). В левой части рисунка приведены 13 микрочастиц, а в правой части 13 античастиц, в середине же показаны две «истинные» нейтральные частицы – фотон и π^o-пион, т.е. такие микрочастицы, у которых античастицы тождественны самим частицам.

Среди мезонов нам уже известны пионы. Заряженные пионы имеют времена жизни, как уже отмечалось, порядка 10^{-8} с и распадаются на мюоны, электроны, позитроны, нейтрино и антинейтрино по схеме:

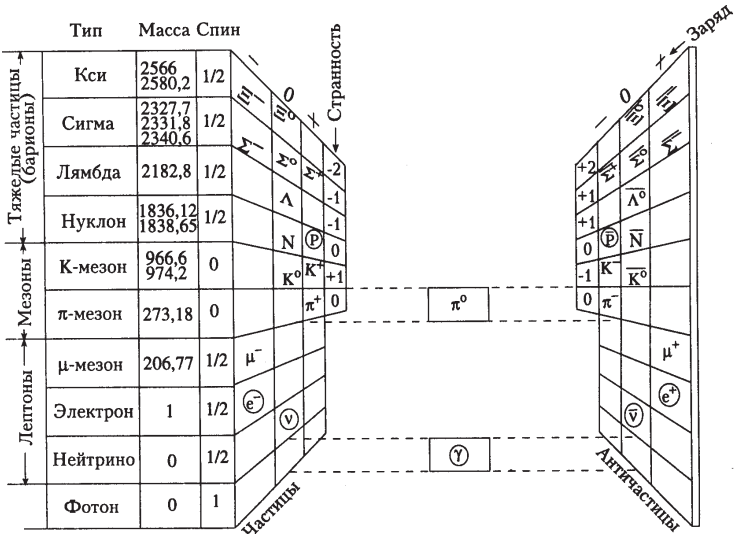

Табл. 10. *Таблица известных к 1961 году микрочастиц. Частицы расположены в порядке возрастания их массы покоя.*

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu \text{ или } \pi^+ \to e^+ + \nu_e,$$

$$\pi^- \to \mu^- + \tilde{\nu}_\mu \text{ или } \pi^- \to e^- + \tilde{\nu}_e .$$

Нейтральный π^o пион распадается на два фотона и имеет более короткое время жизни (порядка 10^{-16} с).

В *таблице 10* показан еще один тип мезонов – *К-мезоны,* или *каоны*: положительно заряженный K^+-мезон и его античастица – отрицательно заряженный K^--мезон. Кроме того, был открыт и нейтральный K^o каон, который имеет античастицу $\overline{K}^\circ$ каон, который также электрически нейтрален, но отличается от K^o мезона знаком другого характерного для каонов квантового числа – *странности S.* Каоны были первыми микрочастицами, которые назвали *странными,* поскольку они имеют ненулевое значение *S*. Протон, нейтрон, электрон и пионы имеют нулевое значение этого квантового числа $S = 0$. Каоны K^+ и K^o имеют $S = +1$, а каоны K^-, $\overline{K}^\circ$ – $S = -1$. Спин каонов равен нулю, и поэтому они являются бозонами.

Из *таблицы* 10 мы видим, что существуют еще три типа микрочастиц тяжелее протона, которые обозначаются заглавными греческими буквами Λ, Σ, Ξ и называются *гиперонами.* Лямбда-гиперон Λ^o обладает нулевым электрическим зарядом, значением странности $S = -1$ и спином 1/2, т.е. является фермионом. Далее идут сигма-гипероны, их три типа: заряженные сигма-гипероны Σ^+ и Σ^- и нейтральный сигма-гиперон Σ^o. Все три типа гиперонов имеют значения странности $S = -1$ и спин 1/2, т.е. являются фермионами. Их античастицы: Σ^-, Σ^+, Σ^0 имеют странность $S = +1$, а остальные характеристики такие же, как и у самих сигма-гиперонов. Третья группа гиперонов – это ***кси***-микрочастицы Ξ: отрицательно заряженные частицы Ξ^- и нейтральные Ξ^o. Первые имеют странность $S = -2$, вторые – $S = +2$, спин у них равен 1/2, т.е. они тоже фермионы.

Очень интересными являются процессы сильного взаимодействия нуклонов и пионов с каонами и гиперонами. Хорошо изучена такая реакция образования гиперонов при столкновении π^- пиона с протоном:

$$\pi^- + p \to \Lambda^o + K^o.$$

На фотографии и схеме (*рис. 30*) показана эта реакция, наблюдавшаяся в пузырьковой камере с жидким водородом. Пучок π^- пионов возникает в протонном ускорителе в несколько ГэВ, попадает сверху в камеру и образует при

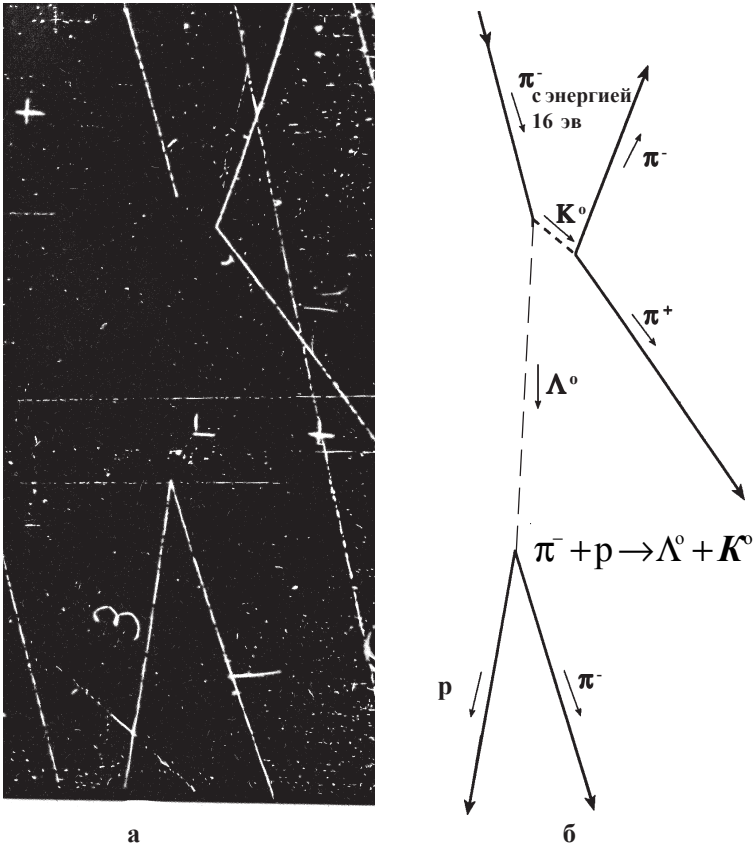

Рис. 30. *а) Фотография V-образного рождения гиперона Λ^o и каона K^o в пузырьковой камере с жидким водородом. π^- пион с энергией в 1 ГэВ от беватрона попадает в камеру и образует при столкновении с протоном пару Λ^o– гиперон и K^o – каон.*

б) схема предыдущей фотографии: V – образное рождение Λ^o и антилямбда Λ^o гиперонов в реакции аннигиляции протона с антипротоном: p + p. Гиперон Λ^o далее распадается на π^+ пион и антипротон, который затем восстанавливается и аннигилирует с протоном жидкого водорода камеры и рождает четыре пиона: $2\pi^+$ и $2\pi^-$. Лямбда-частица Λ^o распадается на два пиона.

столкновении с протоном p две странные частицы Λ^o и K^o с выполнением закона сохранения странности. Дальше одна из странных частиц (ее следа не видно, ибо она электрически нейтральна) распадается на протон p и пион π^-, т.е. идет процесс с нарушением закона сохранения странности. Точно так же происходит распад каона K^o на пару пионов π^+ и π^-.

Лямбда-частица Λ^o на 78 МэВ тяжелее протона и пиона вместе взятых, поэтому в основном возможны такие распады Λ^o гиперона:

$$\Lambda^o \to p + \pi^-,\ \Lambda^o \to n + \pi^o.$$

Поскольку Σ-частица примерно на 75 МэВ тяжелее даже Λ^o – частицы, а спин у нее 1/2, то все сигма-частицы точно так же могут принимать участие в реакциях:

$$\Sigma^+ \to p + \pi^o,\ \Sigma^+ \to n + \pi^+,$$
$$\Sigma^- \to n + \pi^-,$$
$$\Sigma^o \to \Lambda^o + \gamma.$$

Кси-гиперон Ξ на 205 МэВ тяжелее Λ^o-гиперона и имеет отрицательный электрический заряд или является нейтральным, и оба типа гиперонов дают распады:

$$\Xi^- \to \Lambda^o + \pi^-,\ \Xi^o \to \Lambda^o + \pi^o.$$

На фотографии и схеме (*рис. 31 а,б*) показано рождение пар лямбда-частиц в реакции: $p + p \to \Lambda^o + \Lambda^o$.

Рожденные от аннигиляции протона и антипротона две лямбда-частицы затем распадаются. При этом одна из них превращается в пион π^+ и антипротон. Последний аннигилирует с протоном в жидком водороде пузырьковой камеры и рождает четыре пиона, а вторая Λ^o-частица распадается на пион π^- и протон p.

Из приведенных выше ядерных реакций видно, что странность сохраняется при сильных взаимодействиях. Например, в реакции:

$$p + p \to p + \Lambda^o + K^+,$$

слева странность равна нулю, и справа тоже нуль, ибо у Λ^o странность равна – 1, а у K^+ она равна +1. Таким образом, странные частицы рождаются либо парами, либо так, чтобы сумма соответствующих квантовых чисел была бы равна нулю. Участие в реакциях кси-гиперона, который имеет квантовое число странности, равное –2, сопровождается появле-

нием вместе с ним двух странных частиц со значением S = +1. Например, это может быть такая реакция:

$$p + p \rightarrow \Xi^o + p + K^o + K^+.$$

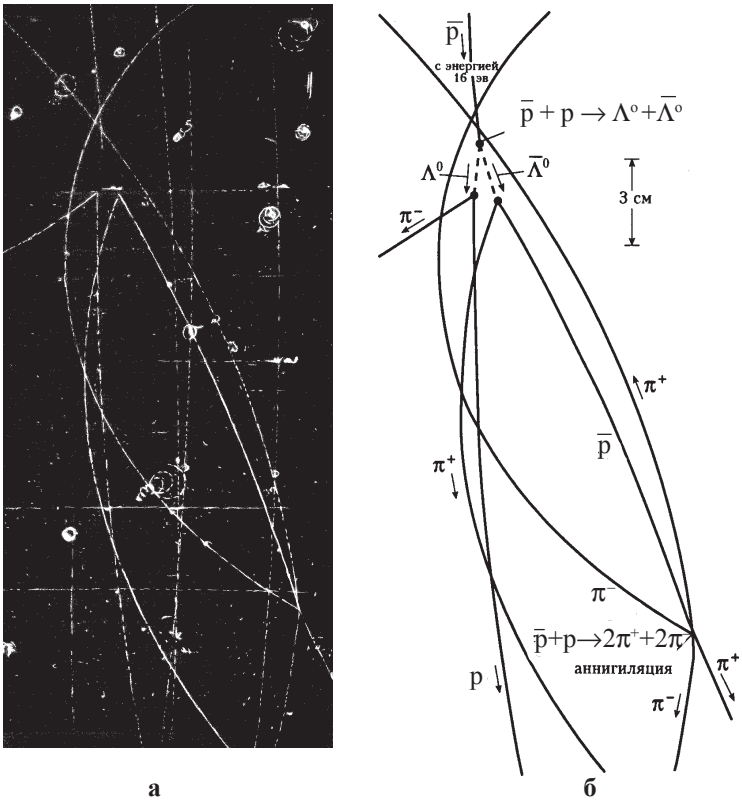

Рис. 31. *а) Фотографии треков в пузырьковой камере рождения от аннигиляции протона и антипротона двух лямбда-частиц Λ^o и Λ^o. Первая из них превращается в отрицательно заряженный пион π^- и протон p, а вторая – в положительно заряженный пион π^+ и антипротон, который потом аннигилирует с протоном камеры и рождает четыре пиона – $2\pi^-$ и 2 π^+.*

б) то же самое на схеме.

Если странная частица соударяется с нуклоном, то и тогда закон сохранения странности выполняется, например, в реакции:

$$\Lambda^o + p \rightarrow n + p + K^o$$

или

$$K^- + p \rightarrow K^+ + \Xi^-.$$

Однако при распаде странных частиц закон сохранения числа *S* может нарушаться. Рассмотрим в качестве простейшего примера распад каона – самой легкой из странных частиц (с массой покоя порядка 500 МэВ). Если закон сохранения странности был абсолютным, то *K* мезон не смог бы распасться и был бы стабильной частицей. Но закон сохранения странности справедлив только при сильных взаимодействиях и не выполняется для так называемых *слабых* взаимодействий. Тогда каону не удается испытать быстрый распад при сильном взаимодействии с временем жизни ~ 10^{-22} с, а по слабому взаимодействию с временем жизни ~10^{-10} с распад нарушением сохранения странности разрешен: $K^+(K^-) \rightarrow \pi^0 + e^+(e^-) + \nu_e(\tilde{\nu}_e)$. Почему так происходит, пока не очень понятно.

Заметим, что, начиная с 50-х годов XX века, основными инструментами для искусственного получения микрочастиц и их исследования стали *ускорители*. К 70-м годам энергия, получаемая на ускорителях, уже достигла многих десятков и сотен ГэВ. Высокие энергии открывали возможность исследовать строение материи на все более малых расстояниях между сталкивающимися микрочастицами и рождать более тяжелые микрочастицы. Первым исторически научным ускорителем, которым воспользовался 360 лет тому назад Галилей для изучения законов гравитации, была Пизанская башня в Италии. С помощью этого «ускорителя» было сделано великое открытие, что все тела под действием силы тяжести падают одинаково. Если пересчитать энергию, которую получали тела, падая с башни, на атомные микрочастицы, то для нее получится ничтожно малая величина – всего лишь 10^{-4} эВ. Нынешние электронные и протонные ускорители последнего поколения уже дают энергии до 10^{14} эВ., т.е. в 10^{18} раз превышающие энергии, получаемые с помощью Пизанской башни.

В европейском физическом международном центре близ Женевы в Швейцарии имеется новый действующий ускори-

тель LEP. Он представляет собой гигантское сооружение, длина окружности которого около 27 километров. Ускоренные электроны и позитроны, двигаясь навстречу друг к другу в так называемых «встречных» пучках с энергией, которая в каждом из пучков в 1990 году равнялась 45 ГэВ, при столкновении выделяли энергию величиной до 100 ГэВ. В момент столкновения эффективная температура составляет величину в 400 миллиардов раз большую, чем температура поверхности Солнца, равная 6000 К. Если считать гипотезу «большого взрыва» при рождении нашей Вселенной правильной (о ней речь пойдет во второй части нашего курса), то лабораторные условия на ускорителе LEP соответствуют времени в 10^{-19} с от момента сотворения Вселенной (так называемой «сингулярности»). Модернизация ускорителя проводится непрерывно, а к 1998 году планировалось довести энергию частиц в пучке до энергий почти в 100 ГэВ. Планируется, что этот ускоритель, который хотят назвать LEP2, откроет очень тяжелые *H*-бозоны, предсказанные в квантовой теории поля английским физиком Хиггсом, и их обнаружение будет большим событием в микрофизике.

Поэтому дальнейший прогресс в строительстве новых еще более мощных ускорителей, например, на встречных пучках протонов и антипротонов, сулит новые захватывающие открытия в области физики микромира. Ускорители уже позволили расширить наши представления о закономерностях поведения микрочастиц: именно на них были открыты в 1955–1956 годах упоминавшиеся выше античастицы: антипротон и антинейтрон; в 1960 году был обнаружен антисигма-гиперон, а в 1964 году – самый тяжелый гиперон Ω^- с массой покоя около двух масс покоя протона.

В 60-х годах на ускорителях было получено большое число крайне неустойчивых микрочастиц – *резонансов* с массами покоя, в большинстве случаев превышающих массу покоя протона. Первый из резонансов, известный еще с 1953 года, имеет массу покоя в 1232 МэВ и называется дельта-резонансом – Δ, время его жизни равно 7×10^{-24}с. К настоящему времени резонансов уже открыто достаточно много, все они участвуют в сильных взаимодействиях. Резонансы показали нам, что таблица элементарных частиц еще далека от завершения. Обычно рождение и гибель резонансов происходит на расстояниях, значительно меньших, чем размеры отдельного атома. Поэтому, как мы уже неоднократно гово-

рили, они недоступны для непосредственного наблюдения в камере Вильсона или в пузырьковой камере. Лишь изучая продукты распада резонансов, можно установить факт их существования. Допустим, например, что при аннигиляции протона и антипротона образовалось пять пионов:

$$\bar{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^o.$$

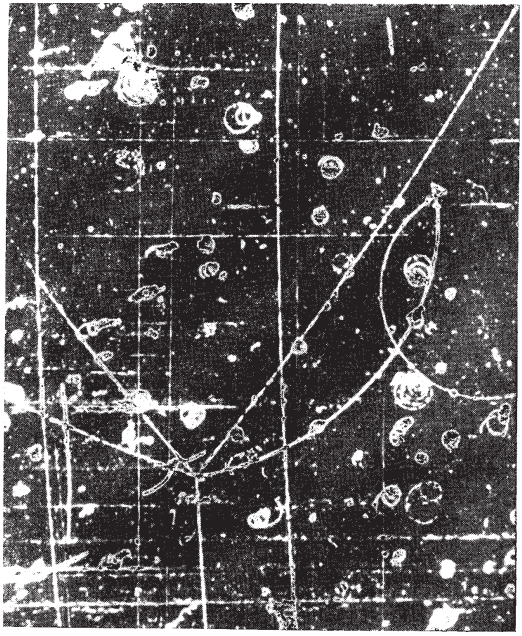

Рис. 32. *а) Снимок образования резонанса* ω^o. *Антипротон двигается в пузырьковой камере снизу вверх, аннигилирует с протоном мишени и создает два пиона и* ω^o *микрочастицу:* $\bar{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \omega^o$. *Через* 10^{-22} *сек. резонанс* ω^o *распадается на три пиона* $\omega^o \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^o$. *Мимолетное существование резонанса-мезона* ω^o *устанавливается при исследовании следов пионов. Один из* π^+ *пионов распадается на* μ^+ *мюон и нейтрино* ν_μ, *а мюон в свою очередь распадается на позитрон* e^+ *и две частицы – нейтрино и антинейтрино (которые не дают следов):* $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_\mu$.

Такая реакция на снимке в пузырьковой камере имеет вид, изображенный на фотографии (*Рис. 32а*). Мы видим следы падающего антипротона и четырех электрически заряженных пионов, вылетевших, казалось бы, из одного места. Закон сохранения энергии и закон сохранения импульса требуют, чтобы невидимый след нейтрального π^o пиона тоже начинался в этой точке.

Анализ всей картины подобных реакций показывает, что возникшие пионы должны частично быть продуктами распада какой-то еще одной микрочастицы. Этой микрочастицей в данном конкретном случае является резонанс ω^o-мезон. Сначала образуется резонанс и два положительно и отрицательно заряженных пиона по схеме, которая имеет вид:

$$p + \bar{p} \rightarrow \omega^o + \pi^+ + \pi^-,$$

а резонанс распадается потом очень быстро по схеме:

$$\omega^o \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^o$$

(*рис. 32 б*). Несмотря на то, что омега-ноль мезон как типичный резонанс не успевает пройти измеримое расстояние от точки, где он родился, нет оснований сомневаться в его существовании. Сейчас число резонансов, существование которых считается установленным, превышает сотню.

В 1974 году были обнаружены массивные (в 3–4 раза тяжелее протона) и относительно устойчивые микрочастицы $\mathfrak{J}/\psi$ и ψ' с временами жизни очень большими для резонансов. Их называют мезонами со скрытым «очарованием». Это понятие теоретическое, а на опыте оно означает, что обладающие таким свойством микрочастицы легко распадаются на «*очарованные*» микрочастицы, и переход их в обычные микрочастицы сильно подавлен. Микрочастица $\mathfrak{J}/\psi$ с массой покоя 3,096 ГэВ и спином 1 была открыта в США независимо двумя группами физиков-экспериментаторов: на протонном ускорителе в Брукхавене коллективом под руководством С. Тинга и коллективом под руководством Б. Рихтера на ускорителе со встречными электрон-позитронными пучками в Стандфорде. Первая группа назвала эту частицу $\mathfrak{J}$, а вторая – ψ, отсюда и двойное название $\mathfrak{J}/\psi$. Тинг и Рихтер в 1976 году получили Нобелевскую премию за свое открытие. $\mathfrak{J}/\psi$ микрочастица, несмотря на свою большую массу покоя, оказывается относительно устойчивой, имея время

жизни на 3–4 порядка больше, чем для всех известных резонансных микрочастиц типа мезонов. Второй открытый ψ′-мезон с массой покоя в 3,684 ГэВ также оказался более устойчивым, чем другие тяжелые микрочастицы. Позже было открыто целое семейство ψ-мезонов.

Мы подошли еще к одному семейству микрочастиц, связанных с микрочастицами со скрытым «очарованием». Оно относится к адронам, которые обладают новым квантовым

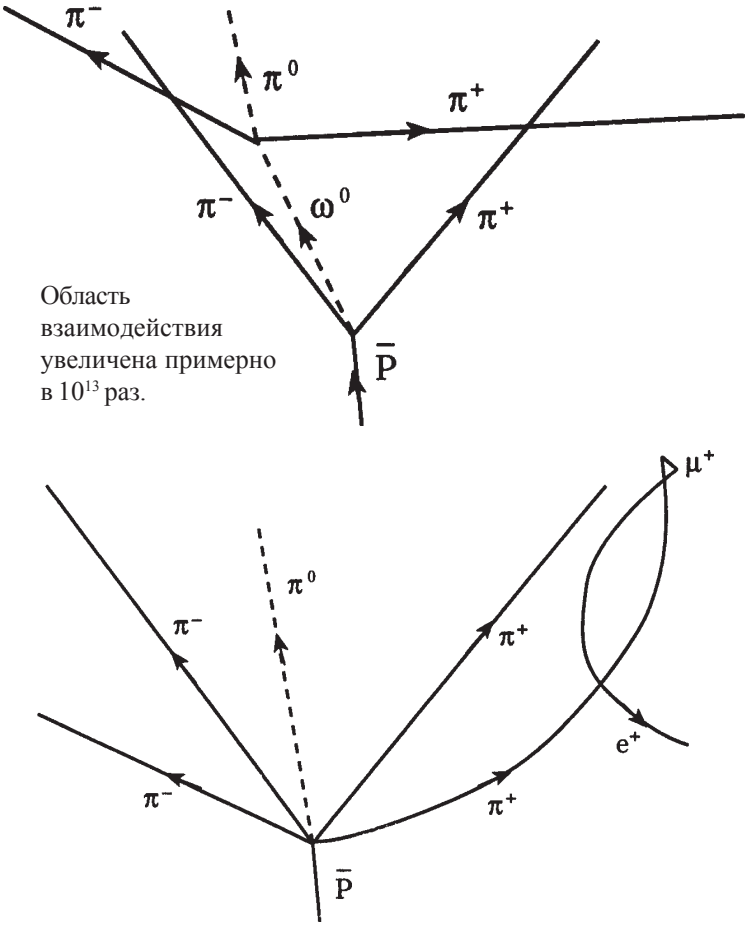

Рис. 32 б. *Схема образования резонанса* ω_o.

числом «очарование». Первые представители этого семейства были открыты в 1976 году, и самые легкие из них были обозначены так: D^0, D^+, D^-, F^+, F^-. Открытие «очарованных» микрочастиц явилось триумфом теории, в особенности *кварковой* модели элементарных частиц, о которой речь будет идти ниже. Именно она и предсказывала существование такого рода микрочастиц задолго до их экспериментального открытия.

В 1975 году был открыт тяжелый тау-лептон с массой покоя, как уже было сказано, почти в два раза больше, чем у протона, а в 1977 году – Υ (ипсилон) микрочастица, сверхтяжелая, с массой покоя до десятка масс покоя протона, ее существование также согласуется с гипотезой кварков.

Мы видим, что за годы после открытия первой субатомной микрочастицы, электрона было обнаружено экспериментально огромное число микрочастиц. Для их описания кроме обычных величин: массы, заряда и т.п., которые были известны частично и в классической физике, пришлось вводить много новых характеристик, например, «странность», «очарование», «прелесть» и другие. Уже из этих названий видна необычность свойств микрочастиц по сравнению с макроявлениями. Все они с точки зрения макропредставлений имеют очень маленькие массы покоя и размеры.

Определенные из опыта *размеры* протона, нейтрона, пионов и т.д. оказываются порядка 10^{-13} см. Размеры электрона и других лептонов пока на опыте не определены, но, по оценкам, не превышают величин порядка 10^{-15} см. Микроскопические значения масс покоя и размеров микрочастиц обусловливают их квантовую природу. Характерные длины волн де Бройля для микрочастиц: $\lambda_B = h/Mc$, где M – масса покоя микрочастицы, близки к их характерным размерам. Так, например, для пионов длина волны де Бройля составляет $1{,}4\times10^{-13}$ см.

Наиболее важное свойство микрочастиц – их способность рождаться, поглощаться и распадаться с превращением одних микрочастиц в другие,что окончательно было установлено к середине 30-х годов XX века. Все нестабильные микрочастицы распадаются самопроизвольно, а стабильные микрочастицы тоже могут исчезать, но только при их встрече и аннигиляции со своими античастицами. При достаточной кинетической энергии и при столкновениях можно создать как стабильную, так и нестабильную микрочастицу. Приме-

ром возникновения и уничтожения микрочастиц может служить распад нестабильных микрочастиц, показанный на *рис. 32б*. Или при бета-распаде

$$n \to p + e^- + \nu_e.$$

Здесь нейтрон внутри атомного ядра исчезает, превращаясь в протон, а из атомного ядра вылетают возникшие в таком превращении электрон и антинейтрино. Это почти единственный распад нейтрона, если не считать случаев, когда при распаде еще образуется фотон. С другой стороны, есть примеры большого числа способов распада одной и той же микрочастицы. Интересны распады на фотоны (свет!) нейтрального пиона π^o:

$$\pi^o \to \gamma + \gamma,$$

или рождение фотонов при аннигиляции электрон-позитронной пары:

$$e^- + e^+ \to \gamma + \gamma.$$

При столкновении протонов на встречных пучках могут образовываться новые и (или) более тяжелые микрочастицы, (последние за счет кинетической энергии сталкивающихся микрочастиц), например, протонов:

$$p + p \to p + n + \pi^+,$$
$$p + p \to p + \Lambda^o + K^+,$$

а родившийся в первой реакции положительно заряженный пион π^+ может в дальнейшем распасться, скажем, столкнувшись с протоном:

$$\pi^+ + p \to \Sigma^+ + K^+.$$

В общем наша Вселенная не очень устойчива из-за того, что жизнь большинства микрочастиц слишком скоротечна, чтобы они могли быть полезны в качестве строительного материала для устойчивых макротел. Даже наиболее стабильные микрочастицы могут, как мы только что видели для протона, разрушаться при столкновениях с другими, несущими большую энергию микрочастицами или при аннигиляции со своими античастицами. И лишь поскольку мы живем в мире, где парк бомбардирующих микрочастиц очень «слаб» и очень мало античастиц, стабильные микрочастицы

– протон, электрон, нейтрон (внутри атомных ядер) – смогли построить прочный макромир.

Обсудим масштабы некоторых физических величин, характерных для микромира. Во-первых, еще раз вспомним, что размеры протона порядка 10^{-13} см (это расстояние в честь знаменитого итальянского физика Энрико Ферми назвали «ферми»). Физикам удалось на современных ускорителях проникнуть на расстояния порядка 0,1 ферми (т.е. на 10^{-14} см). Наименьшие размеры, встречающиеся в микромире, имеют лептоны, (порядка 10^{-15} см), а наибольшие размеры в макромире – размеры нашей Вселенной ~ 10^{28}см. Таким образом, самый малый размер отличается от самого большого примерно в 10^{42} раз. Это, конечно, громадный диапазон. Скорости движения атомов и молекул в газах достаточно «вялые», они меньше скорости света *c* приблизительно в 10^5–10^6 раз. Фотон и нейтрино с антинейтрино с массами покоя, равными нулю (или, для последних, близкими к нулю), имеют скорость своего движения, равную *c*. Макротела не ускоряются до таких скоростей. А микрочастице со скоростью, близкой к *c*, чтобы пройти расстояние порядка своего размера, нужно время порядка 10^{-23} с, которое можно считать естественной единицей времени для всех процессов, протекающих в микромире.

Микрочастицы, имеющие время жизни порядка 10^{-8}–10^{-6} с, считаются долгоживущими, и даже частицы со временем жизни в 10^{-10} с живут по микромасштабам очень долго. За время 10^{-10} с микрочастица успевает пролететь 1 см пути, что в миллион миллионов раз превышает ее собственные размеры. В наших макромасштабах такой пробег, например, для автомобиля с обычной скоростью в 50 км/час эквивалентен пробегу в 30 миллионов километров. Микрочастицы, живущие 10^{-8}–10^{-6} с (это пионы и мюоны), могут пробегать расстояния, гораздо больше одного сантиметра, а свободный нейтрон, имеющий время жизни 17 минут, в масштабах микромира вообще живет бесконечно долго.

Резонансы имеют время жизни порядка 10^{-20} с и меньше, до 10^{-23} с – это действительно короткоживущие микрочастицы. Они подобны в нашей макроаналогии автомашине, которая разваливается, не успев выехать за ворота завода-изготовителя. Поскольку минимально достигнутое расстояние по порядку величины равно 10^{-14} см, то минимальное время 10^{-24} с, что далеко за пределами прямых возможных

измерений. Наибольший промежуток времени, с которым мы встречаемся в природе, – продолжительность жизни Вселенной (порядка 30 миллиардов лет).

Заметим, что открытие Чедвиком нейтрона привело к созданию протонно-нейтронной модели атомного ядра и бурному развитию теории: бета-распада Ферми, ядерных сил Х. Юкавы, ядерных цепных реакций Я. Зельдовича и Ю. Харитона. Наряду с теорией развивался и микроскопический эксперимент как по изучению свойств самого нейтрона, так и по исследованию его взаимодействия с веществом. Были изучены: замедление нейтронов, искусственная бета-активность (Э. Ферми), деление атомных ядер урана (О. Ган и Ф. Штрассман), открыт 93-й химический элемент – нептуний (Э. Мак-Милан, Ф. Абельсон). Таким образом, открытие Чедвика привело к большим научным достижениям и не менее значительным успехам в технике, а именно: созданию ядерной энергетики, ядерного оружия, методов радиоактивных изотопов, использованию достижений ядерной физики в автоматике, геологии (геохронологии), геофизике, медицине, в биологических исследованиях и т.п.

Повторяем, что фундаментальными и твердо установленными свойствами нейтронов были принадлежность их к классу барионов с барионным квантовым числом $B = 1$, к классу фермионов со спином $/2, а также с положительной внутренней четностью (см. ниже), вместе с протоном нейтрон образует изотопический дублет с изоспином 1/2 и проекцией изоспина – 1/2.

Кроме указанных свойств имеется ряд параметров, которые теоретически еще не всегда понятны и не нашли своего объяснения. Это, прежде всего, вопрос об электрическом заряде нейтрона – есть он или нет, гравитационная и инертная масса нейтрона – как ее измерить, магнитный момент нейтрона – какова его природа. Масса нейтрона

$$m_n = 1{,}008664904(14) \text{ а.е.м.} = 939{,}56563(28) \text{ МэВ}.$$

Следует указать, что разность масс нейтрона и протона в электронных массах m_e равна

$$m_n - m_p = 2{,}6m_e \text{ и } m_n - (m_p + m_e) = 1{,}6m_e,$$

откуда сразу же видна возможность бета-распада нейтрона. Магнитный момент нейтрона

$$\mu_n = -\,1{,}9130428(5)\mu_{яд}.$$

Напоминаем, что знак минус означает антипараллельность магнитного и спинового механического моментов. Отличие от нуля магнитного момента нейтрона одновременно с нулевым электрическим зарядом является аномалией. Подобной природы аномалия возникает и у протона, у которого вместо дираковского значения $\mu_{яд}$ мы имеем $\mu_p \cong 2{,}79\mu_{яд}$. Из равенства двух аномальных частей магнитных моментов протона и нейтрона: $\mu_p - 1 = |\mu_n - 0|$ можно заключить, что данные аномалии одинаковой физической природы. Хотя строгой теории нейтронного магнитного момента нет, но качественно можно считать, что это эффект «шубы» или «облака» отрицательно заряженных электрически пионов, окружающих нейтрон. Нет и теории, объясняющей нулевой электрический заряд нейтрона $Q_n = 0$, величины времени жизни τ_n, угловую корреляцию между импульсами нейтрона и продуктов бета-распада, электрический дипольный момент (есть ли он, или его нет?), а также некоторые другие свойства нейтронов.

Очень интересным является вопрос о так называемых ультрахолодных нейтронах (УХН). В обычных ядерных реакторах с каким-либо замедлителем мы имеем дело с так называемыми тепловыми нейтронами. При температуре T = 300 К энергия нейтронов с наиболее вероятной скоростью равна $\varepsilon = k_B T = 0{,}025$ эВ, где $k_B = 0{,}865\times10^{-4}$ эВ град$^{-1}$ – постоянная Больцмана, такие нейтроны с близкими к $k_B T$ энергиями называют тепловыми. Как правило, область энергий тепловых нейтронов заключена в интервале 5×10^{-3} – 0,5 эВ. Нейтроны с энергией от 0,5 до 10^{-4} эВ называют холодными (ХН), с $\varepsilon > 0{,}5$ и условно до 10^4 эВ – резонансными. Для энергий, меньших нижней границы интервала ХН, имеем область очень холодных нейтронов (ОХН) с условными границами от 10^{-7} до 10^{-4} эВ и, наконец, область ультрахолодных нейтронов (УХН) с энергиями порядка 10^{-7} эВ.

Ультрахолодные нейтроны образуются из тепловых нейтронов не из-за их дополнительного замедления (для этого замедлитель надо было бы держать при температуре ~ 10^{-3} К, что практически невозможно), а в очень редком процессе единственного неупругого соударения, при котором тепловой нейтрон теряет почти всю свою энергию. Для замедления используется жидкий водород с $T = 23$ –25 К, в результате чего получают из пучка тепловых нейтронов почти неизменный по интенсивности пучок ХН. Но при этом ОХН и УХН не получаются. В экспериментах было установлено, что

УХН испытывают полное внутреннее отражение из-за большой длины де-бройлевской волны, а не проходят через стенку сосуда. В первые годы исследования УХН для выделения их из спектра реакторных нейтронов использовались изогнутые в горизонтальной плоскости нейтроноводы, изотовленные из материалов с достаточно хорошим значением полного внутреннего отражения УХН. Из-за изгибов нейтронопровода все нейтроны, кроме УХН, уйдут наружу трубы или поглотятся в стенках, а УХН пройдут по трубе, следуя ее изгибам. В первых опытах удавалось удерживать УХН до 30-ти секунд, а затем это время увеличили почти в 10 раз – до 250-ти секунд. Так же использовали вертикальные нейтроноводы, где замедлению еще способствовала гравитация. Наконец, рекордное время задержания УХН достигло величины в 75 минут! С помощью накопителей УХН было измерено и время жизни запертых в ловушках нейтронов. Усредненное с учетом точности измерений значение времени жизни нейтрона «на свободе» оказалось несколько различным из пучковых экспериментов и из метода хранения УХН. В первом случае τ_n= 894,2(4,2) сек., во втором – τ_n = 885,9(1,7) сек., усредненное значение оказалось равным τ_n = 887,0(1,6) сек.

Заметим, что нейтрон – не точечная микрочастица, а имеет конечные размеры $r_n \cong 0{,}8\times10^{-13}$ см и обладает кварковой структурой – состоит из трех кварков (n = udd), но детали его внутренней структуры пока неясны: неизвестно, как распределен электрический заряд и магнитный момент по объему нейтрона, как согласовать сочетание нулевого электрического заряда нейтрона и его ненулевого магнитного момента.

Любопытно измерение гравитационного взаимодействия нейтронов. Это проделал Дэббс с сотрудниками на 180-метровом пути, где составляющая ХН под действием тяготения отклонилась вертикально вниз по сравнению с прямолинейным путем тепловой составляющей пучка на 14,5 см. Таким образом, для ускорения нейтронов в поле тяготения Земли мы получили 975,4 (3,1) см/с^2, т.е. величину, близкую к универсальному значению ускорения силы тяжести в данной местности опытов, которая равнялась 979,74 см/с^2. Такие же измерения проводились и в России в Дубне.

Имеет смысл остановиться на проблеме трансурановых химических элементов. Пока они получены до порядкового номера Z = 111, последний официально названный элемент – это менделеевий с Z = 101, остальные еще не получили обще-

принятых названий. Опыт показал, что время их полураспада составляет от нескольких секунд до немногих долей секунды, они либо самопроизвольно делятся, либо оказываются альфа- или бета-активными. Есть некоторые основания считать, что среди трансуранов могут существовать и долгоживущие элементы с периодом полураспада до 10^8 лет – так называемые химические элементы с магическими атомными номерами. Например, таким химическим элементом может быть изотоп с $Z = 110$ и $A = 294$, но пока это предположения, не подкрепленные экспериментом, и проблема трансуранов продолжает оставаться еще далеко не решенной.