

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

Учебное пособие

Новосибирск 2011

УДК 53:(075)

Составители: *В.Я. Чечуев, С.В. Викулов*

Рецензенты д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры «Физика и химия» НГАВТ *М.П. Синюков*, канд. физ.-мат. наук, *В.И. Сигимов*, НГАВТ

Элементы физики элементарных частиц: учеб. пособие / Новосиб. гос. аграр. ун-т; сост. В.Я. Чечуев, С.В. Викулов. – Новосибирск, 2011. – 80 с.

Учебное пособие предназначено для студентов дневной и заочной формы обучения всех факультетов НГАУ.

Утверждено и рекомендовано к изданию методическим советом Инженерного института (протокол №14 от 25 января 2011 г.).

© Новосибирский государственный
аграрный университет, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие содержит материал, изучаемый согласно программе в курсе общей физики.

В нём кратко рассмотрена проблема элементарности. Качественно рассмотрены результаты решения уравнения Дирака для электрона. Подробно рассмотрены типы взаимодействий элементарных частиц и дана их классификация. Качественно изложена кварковая теория.

Наряду со стандартной моделью рассмотрены основные идеи и трудности суперструнных теорий.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Дать строгое определение понятия элементарной частицы оказывается затруднительным. В качестве первого приближения можно понимать под элементарными частицами такие микрочастицы, внутреннюю структуру которых на современном уровне развития физики нельзя представить как объединение других частиц.

До конца XIX в. на роль элементарных частиц претендовали атомы («атом» в переводе с греческого означает «неделимый»). Однако в начале XX в. было показано, что атом состоит из электронов и ядра, которое, в свою очередь, состоит из протонов и нейтронов. Добавление к этим частицам фотонов и нейтрино позволило в начале 30-х годов XX в. на основе законов квантовой механики объяснить природу химических элементов, их соединений, испускаемых ими излучений, а также процессы радиоактивного распада.

Казалось, что названные пять элементарных частиц являются, в конечном счёте, основными кирпичами мироздания.

Но эта кажущаяся простота вскоре исчезла. Не прошло и года после открытия нейтрона, как был открыт позитрон. В 1936 г. среди продуктов взаимодействия космических лучей с веществом был обнаружен μ - мезон. В 1947 г. был открыт π - мезон, а когда были построены ускорители, позволяющие получать частицы всё больших энергий, удалось открыть множество новых («субъядерных», т.е. не входящих в ядра и атомы) частиц. Их число в настоящее время приближается к 400 и, скорее всего, неограниченно велико.

И всё это множество частиц принято называть «элементарными частицами». Такой термин не означает, что эти частицы являются кирпичиками мироздания в том

смысле, что все они образуют атомы: с этой задачей вполне удовлетворительно справляются протоны, нейтроны и электроны. Однако эти частицы возникают в результате основных взаимодействий частиц обычного вещества, и многие из них прямым или косвенным образом участвуют в основных взаимодействиях в обычном веществе. Существование этих частиц скоротечно, ни одна из них (кроме позитрона) не живёт дольше нескольких микросекунд, а многие частицы распадаются примерно через 10^{-23} с после своего образования. Конечные продукты распадов этих частиц — обычные составные части вещества, т.е. протоны, электроны, фотоны, а также нейтрино. В настоящее время частицы, претендующие на роль первичных элементов материи, принято называть *истинно элементарными*.

По современным представлениям таких частиц 48: 36 кварков и 12 лептонов.

Существуют ли ещё более глубокие уровни строения материи, неизвестно, хотя такие возможности обсуждаются и даже строятся конкретные модели (субкварки, преоны, ришоны и др.). Этот важнейший вопрос может быть решён только экспериментально. Из соотношения неопределённостей $\Delta r \cdot \Delta p \sim \hbar$ следует, что для выявления деталей структуры с размером порядка Δr нужны зондирующие частицы с импульсами p , не меньшими $\Delta p \sim \frac{\hbar}{\Delta r}$. Таким образом, для изучения очень мелких деталей нужны частицы с очень большими энергиями. Максимальные значения энергии, достигнутые в ускорительных лабораториях сейчас, составляют $\sim 10^3$ ГэВ ($1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$), чему отвечают минимальные расстояния $r \sim 10^{-19}$ м. На этих расстояниях вышеуказанные истинно элементарные частицы ещё не выявляют внутренней структуры. Но конструируются

ускорители, которые позволят проникнуть вглубь материи на ещё меньшие расстояния. С их помощью надеются выяснить, в частности, столь ли уж фундаментальны на самом деле кварки и лептоны.

ЧАСТИЦЫ И АНТИЧАСТИЦЫ

Возникновение теории элементарных частиц можно отнести к 1928 г., когда Дирак ввёл теорию относительности в квантовую теорию.

В результате он установил релятивистское квантово-механическое уравнение для электрона. С его помощью удалось разрешить затруднения с введением в квантовую теорию понятия спина и со значением магнитного момента электрона. Оказалось, что в теории Дирака нет необходимости постулировать спин и магнитный момент электрона, так как их существование является следствием самого уравнения. При этом уравнение предсказывает именно то значение магнитного момента, которое получается из опыта (напомним – теория Бора давала вдвое меньшее значение).

Особенно значительным достижением Дирака следует считать предсказание позитрона – античастицы по отношению к электрону. Анализируя своё уравнение, Дирак пришёл к выводу, что для каждого значения импульса p оно имеет два решения, соответствующих двум значениям полной энергии электрона:

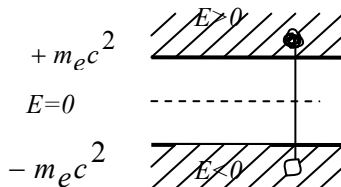


Рис. 1

$$\begin{aligned} E_1 &= +\sqrt{m_e^2 c^4 + p^2 c^2} \quad \text{и} \\ E_2 &= -\sqrt{m_e^2 c^4 + p^2 c^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_e – масса электрона. Отсюда, при $p = 0$ электрон может иметь энергию $E_1 = m_e c^2$ и $E_2 = -m_e c^2$, так что $E_1 - E_2 = 2m_e \cdot c^2$. При $p > 0$ разность энергий $E_1 - E_2 > 2m_e c^2$. Возможные значения энергии электрона можно изобразить схематически в виде двух заштрихованных областей, находящихся на расстоянии $2m_e c^2$ друг от друга (рис. 1). Из анализа уравнения следовало, что оба решения совершенно равноправны, т.е. электрон может находиться не только в верхней области рисунка, где $E > 0$, но и в нижней, где $E < 0$; он также может переходить из одной области в другую.

Конечно, Дирак понимал, что результат, который у него получился, выглядит странно. Ведь частица с отрицательной полной энергией – это частица с отрицательной массой ($E = mc^2$). А согласно классической механике (второй закон Ньютона), частица с отрицательной массой под действием *тормозящей* силы должна *ускоряться*. Также переходя в состояния со всё меньшей энергией, она могла бы выделять энергию, скажем, в виде излучения, причём, поскольку $|E|$ ничем не ограничен, частица с отрицательной массой могла бы излучить бесконечно большое количество энергии. Однако оба эти явления в экспериментах никогда не наблюдались.

Ввиду этих трудностей следовало, казалось бы, исключить состояния с отрицательной энергией из рассмотрения. Дирак же выбрал другой путь. Он предположил, что состояния с отрицательной энергией и массой действительно существуют, но поскольку им

соответствуют минимальные значения энергии, они полностью заполнены электронами, так что образуется сплошной ненаблюдаемый фон необычных ($s, m < 0$) электронов (положение о полном заполнении уровней опирается на принцип Паули).

Предположим далее, что мы сообщили (например, с помощью γ -кванта) одному из необычных электронов энергию $E > 2m_e c^2$, достаточную для перемещения электрона из области $E < 0$ в область $E > 0$ (см. рис. 1). Такая операция разрешается уравнением. Тогда в верхней области появится ещё один обыкновенный ($E > 0, m > 0$) электрон, а из нижней области исчезнет один необычный ($E < 0, m < 0$), т.е. там возникнет «дырка» в сплошном фоне. Легко сообразить, что дырка будет обладать свойствами обычной частицы массой ($m > 0$), равной массе электрона, но с противоположным ему электрическим зарядом. Как же движется дырка? Обязательно навстречу необычному электрону, т.к. она может занять место электрона только после того, как он сам займёт место дырки. Это так же, как при игре в шашки: когда шашка (необычный электрон) передвигается вперёд на свободную клетку (дырка), то свободная клетка оказывается сзади шашки, т.е. она как бы передвигается ей навстречу. Но это означает, что дырка движется не против силы (как необычный электрон), а по силе, т.е. она ведёт себя как нормальная частица с положительной массой. Естественно, что масса дырки в точности равна массе электрона, и она имеет противоположный по знаку и равный по значению электрический заряд ($+e$). Действительно, если из ненаблюдаемого фона отрицательно заряженных электронов с отрицательными массами извлечь один электрон, то в фоне не будет хватать одного отрицательного электрического заряда и одной

отрицательной массы электрона. В результате этого фон перестанет быть ненаблюдаемым и обнаружит себя как частица с положительной массой, равной массе электрона, и единичным положительным электрическим зарядом.

Так был предсказан позитрон, а в 1932 г. он был открыт Андерсоном в составе космического излучения. Его след был обнаружен на одной из фотографий, сделанных с помощью камеры Вильсона в магнитном поле.

Открытие подтвердило правильность квантовомеханического уравнения Дирака. Одновременно его можно рассматривать как подтверждение *принципа Паули*, который был использован в рассуждениях Дирака.

Последующие измерения параметров позитрона показали, что он *действительно* имеет массу, равную массе электрона, у него противоположный электрону электрический заряд $(+e)$, тот же спин $\left(\frac{1}{2}\right)$ и

противоположный магнитный момент, он *стабилен*, т.е. живёт в вакууме бесконечно долго.

Две частицы, имеющие тождественную массу, время жизни и спин, но противоположные электрический заряд, магнитный момент и некоторые другие заряды, о которых мы будем говорить позже, называют частицей и античастицей по отношению друг к другу. Электрон и позитрон являются примером частицы и античастицы.

На примере рассуждения с дыркой мы видели, что частицы и античастицы рождаются вместе, парами. Нетрудно убедиться, что погибают они тоже вместе. Обратимся снова к рис. 1 и рассмотрим процесс перехода одного электрона из области $E > 0$ на свободное место (в дырку) в области $E < 0$. В этом процессе одновременно исчезают в верхней области электрон, а в нижней дырка, т.е. позитрон. Но зато при этом освобождается энергия

$$\Delta E = E_1 - E_2 \geq 2m_e c^2, \quad (2)$$

которая реализуется в виде энергии излучения двух γ -квантов.

Описанный процесс превращения электрона и позитрона в два γ -кванта той же суммарной энергии называется *аннигиляцией*. В переводе слово «аннигиляция» означает «уничтожение», но нужно понимать, что никакого уничтожения материи и энергии в этом процессе не происходит, просто энергия покоя электрона и позитрона *превращается* в энергию двух (реже трёх) γ -квантов:

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow \gamma + \gamma(+\gamma) \quad (3)$$

Аннигиляция электрон-позитронных пар – отнюдь не редкое явление, потому что в нашем мире довольно много позитронов. Позитроны образуются при распаде положительных мюонов, которых много в составе космического излучения, и в пучках частиц, получаемых на ускорителях; позитроны образуются также при β^{+} -распаде искусственно-радиоактивных ядер. Наконец, позитроны можно получить по рассмотренной нами схеме при прохождении γ -излучения через вещество, т.е. при преобразовании γ -квантов высокой энергии в электрон-позитронные пары.

При этом для соблюдения закона сохранения импульса в процессе рождения пары должна участвовать ещё одна частица (электрон или ядро), которая воспринимает избыток импульса γ -фотона над суммарным импульсом электрона и позитрона. Следовательно, схема рождения имеет вид

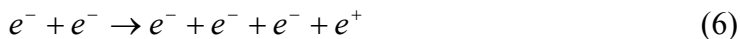
$$\gamma + e^{-} \rightarrow e^{-} + e^{+} + e^{-} \quad (4)$$

либо

$$\gamma + \chi \rightarrow \chi + e^{-} + e^{+}, \quad (5)$$

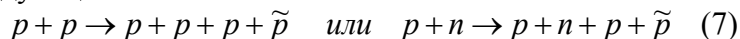
где χ – ядро, в силовом поле которого происходит рождение пары.

Электронно-позитронные пары могут также возникать при столкновениях между двумя заряженными частицами, например, электронами:



После экспериментального обнаружения позитрона физикам стало ясно, что античастицы должны быть у всех элементарных частиц, в том числе и у тех, из которых состоят атомные ядра, т.е. у протонов и нейтронов. Рождение пары протон-антипротон ($p - \tilde{p}$) или нейтрон-антинейтрон ($n - \tilde{n}$), по аналогии с (6), можно было ожидать при столкновении нуклонов достаточно большой энергии.

В 1955г. в г. Беркли (США) был запущен ускоритель (синхрофазотрон), позволявший ускорять протоны до энергии 6.3 ГэВ . Облучая пучком ускоренных протонов медную мишень, О. Чемберлен, К. Виганд, Э. Сегре и П. Ипсилантис, в полном соответствии с теорией, наблюдали образование пары $p - \tilde{p}$. Реакция протекала по одной из следующих схем:



Антипротон отличается от протона знаком электрического заряда и собственного магнитного момента (у антипротона магнитный момент отрицателен, т.е. направлен противоположно механическому моменту). Встречаясь, антипротон и протон аннигилируют. Антипротон может аннигилировать не только с протоном, но и с нейтроном. Совокупность возникающих частиц в отдельных актах аннигиляции различна. Например, возможны процессы:

$$\begin{aligned}
\tilde{p} + p &\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^- + \pi^0 \\
\tilde{p} + p &\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + \pi^0 + \pi^0 \\
\tilde{p} + n &\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0 + \pi^0
\end{aligned}
\tag{8}$$

В 1956 г. на том же ускорителе были наблюдаемы антинейтроны, которые получались перезарядкой антипротонов:

$$\begin{aligned}
\tilde{p} + p &\rightarrow \tilde{n} + n \\
\tilde{p} + n &\rightarrow \tilde{n} + n + \pi^-
\end{aligned}
\tag{9}$$

Новый успех в решении проблемы создания антивещества был достигнут через 10 лет после обнаружения антипротона. В 1965 г. было открыто первое простейшее антиядро – антидейтрон, т.е. связанное состояние из антипротона и антинейтрона. Вслед за этим в 1970 г. на Серпуховском ускорителе было открыто ядро антигелия, а в 1973 г. – ядро антитрития. Это лёгкие ядра. Однако никаких принципиальных возражений против существования достаточно тяжёлых антиядер нет. В принципе группировки антинуклонов могут быть столь же разнообразны, как и группировки нуклонов. Можно также не сомневаться и в том, что антиядра, окружённые позитронами, должны образовывать разнообразные антиатомы, свойства которых будут аналогичны свойствам атомов. Но пока на Земле не получено ещё ни одного антиатома, а значит, не получено аннигиляционное топливо, «калорийность» которого примерно в 1000 раз выше, чем у ядерного топлива, которое, в свою очередь, в миллионы раз «калорийнее» химического топлива.

Из предыдущего следует, что природа симметрична относительно существования частиц и античастиц. Это положение в общем виде было сформулировано как *принцип зарядового сопряжения*. Согласно этому принципу, каждой частице соответствует античастица с тождественными массой, спином и временем жизни и

противоположными зарядами. При встрече частицы с античастицей они аннигилируют, в результате чего их энергия покоя преобразуется в другую форму энергии.

Отметим, что существуют частицы, которые тождественны со своими античастицами (т.е. не имеют античастиц). Такие частицы называются абсолютно нейтральными. К их числу принадлежат фотон, π^0 -мезон и η^0 -мезон. Частицы, тождественные со своими античастицами, не способны к аннигиляции. Это, конечно, не означает, что они вообще не могут превращаться в другие частицы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение элементарной частице. Какая частица называется максимоном?

2. Сопоставьте параметры, характеризующие электрон и позитрон. Какое явление возникает при их встрече? В чём состоит принцип зарядового сопряжения?

3. Какие частицы называются абсолютно нейтральными? Назовите эти частицы.

4. Напишите известные схемы рождения электрон-позитронной пары.

5. Напишите процессы, в которых были наблюдаены первые антипротоны и антинейтроны. Напишите процесс аннигиляции протона с антипротоном и протона с антинейтроном. Можно ли получить антиатомы?

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Все элементарные частицы являются объектами исключительно малых масс и размеров. У большинства из

них массы имеют порядок величины массы протона, равной $1,6 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ (заметно меньше лишь масса электрона: $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$).

Определённые из опыта размеры протона, нейтрона, π -мезона по порядку величины составляют 10^{-15} м . Размеры электрона и мюона определить не удалось, известно лишь, что они меньше 10^{-17} м . Маленькие массы и размеры элементарных частиц обуславливают квантовую специфику их поведения. Характерные длины волн, которые следует приписать элементарным частицам в квантовой теории (\hbar/mc , где \hbar – постоянная Планка, m – масса частицы, c – скорость света), по порядку величин близки к типичным размерам, на которых осуществляется их взаимодействие (например, для π -мезона $\hbar/mc \approx 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}$). Это и приводит к тому, что квантовые закономерности являются определяющими в поведении элементарных частиц.

Наиболее важное квантовое свойство всех элементарных частиц – способность рождаться и уничтожаться (испускаться и поглощаться) при взаимодействии с другими частицами. В этом отношении они полностью аналогичны фотонам. Элементарные частицы – это кванты соответствующих физических полей.

Все процессы с элементарными частицами протекают через последовательность актов их поглощения и испускания. Только на этой основе можно понять, например, процесс рождения π^+ -мезона при столкновении двух протонов:



или процесс аннигиляции электрона и позитрона, когда взамен исчезнувших частиц возникают, например, два γ -кванта:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma \quad (11)$$

Но и процессы упругого рассеяния частиц, например

$$e^- + p \rightarrow e^- + p,$$

также связаны с поглощением начальных и рождением конечных частиц.

Распад нестабильных элементарных частиц на более лёгкие, сопровождаемый выделением энергии, отвечает той же закономерности и является процессом, в котором продукты распада *рождаются в момент самого распада, а до этого момента не существуют*. В этом отношении распад элементарных частиц подобен распаду возбуждённого атома на основное состояние и фотон. Примерами распадов могут служить:

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}; \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu}; \quad K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \quad (12)$$

Знаком «тильда» над символом здесь и везде помечены соответствующие античастицы.

Существование процессов рождения и поглощения элементарных частиц приводит к тому, что для них в значительной мере теряет смысл «состоит из». В связи с этим уточним понятие «элементарная частица».

В макроскопическом мире мы просто видим, что дом состоит из кирпичей. Структуру и составные части микрообъектов непосредственно наблюдать нельзя. Тем не менее, мы считаем, что в состав атома входят электроны, а в состав ядер — протоны и нейтроны, потому что все эти частицы выбиваются из атомов и ядер при бомбардировке последних пучками γ -квантов и других частиц. Но если при столкновении может происходить не только развал сложной частицы на составные части, но и рождение, а также поглощение частиц, то уже непонятно, как отличить

частицу, входившую в состав сложной частицы, от вновь родившейся, поскольку прибору всё равно, какую частицу он регистрирует.

Тем не менее, оказывается можно привести экспериментально проверяемый критерий, по которому элементарные частицы отличаются от остальных. Для этого надо учесть, что само понятие частицы существует лишь пока эта частица свободна, или, по крайней мере, слабо связана, так что её энергия связи намного меньше энергии, соответствующей массе покоя. Фраза «частица x состоит из частиц $x_1, x_2 \dots x_n$ » может иметь смысл лишь при одновременном соблюдении двух условий:

1) частица x может быть раздроблена на частицы $x_1, x_2 \dots x_n$ при каких-либо столкновениях;

2) энергия связи E_{icb} любой x_i частицы намного меньше её энергии

$$\text{покоя } M_i c^2; \quad E_{icb} \ll M_i c^2 \quad (13)$$

Только при соблюдении этих условий существует область энергий столкновений $M_i c^2 > E > E_{icb}$, в которой уже происходит раздробление составных частиц, но ещё не происходит рождение новых. С учётом этого микрочастица называется элементарной, если для неё не соблюдается хотя бы одно из условий. Отметим ещё одно определение элементарной частицы. Оно дано М.А. Марковым. Частица является элементарной только в том случае, если её размеры R не превышают её комптоновской длины волны $R \leq \frac{\hbar}{M c}$. Все известные

элементарные частицы удовлетворяют этому определению. Из этого определения следует ограничение на максимально возможную массу элементарной частицы. Оказывается, что максимально возможное значение массы

элементарной частицы составляет $10^{-5} z$ при радиусе 10^{-33} см . Частица такой массы постулирована М.А. Марковым и названа *максимоном*.

Контрольные вопросы

1. Ниже приведены примеры распадов элементарных частиц:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu; \quad K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$$

Входят ли продукты распадов в состав исходных частиц?

2. Приведите критерий, позволяющий отличить элементарные частицы от остальных.

ТИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Различные процессы с элементарными частицами заметно отличаются по интенсивности их протекания. В соответствии с этим взаимодействия элементарных частиц можно феноменологически разделить на четыре типа: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное. Рассмотрим каждое из них.

1. Сильное взаимодействие выделяется как взаимодействие, которое вызывает процессы, протекающие с наибольшей, по сравнению с другими процессами, интенсивностью. Оно приводит и к самой сильной связи элементарных частиц. Именно сильное взаимодействие обуславливает связь протонов и нейтронов в ядрах и обеспечивает исключительную прочность этих образований, лежащую в основе стабильности вещества в земных условиях. Но у сильных взаимодействий есть и слабые стороны, позволяющие в ряде ситуаций

выдвигаться на первый план другим взаимодействиям. Во-первых, сильные взаимодействия – короткодействующие. Их роль быстро становится ничтожной при переходе к расстояниям, превышающим 10^{-15} м. Поэтому, например, обеспечивая стабильность ядер, эти силы практически не влияют на атомные явления. Другим «слабым местом» сильных взаимодействий является их неуниверсальность. Существуют частицы (фотон, электрон, мюон, τ -лептон, нейтрино трёх видов), которые не подвержены действию сил, обусловленных сильными взаимодействиями, и не могут рождаться за счёт сильных взаимодействий при столкновениях. Наконец, третьим ограничительным свойством сильных взаимодействий является то, что для них существует ряд законов сохранения, не выполняющихся по отношению к другим взаимодействиям.

Сильное взаимодействие является результатом обмена взаимодействующих частиц π -мезонами. Более подробно механизм сильных взаимодействий описан в [14, с. 10-11].

2. Следующими по интенсивности являются электромагнитные взаимодействия. Их интенсивность значительно ниже сильных, но на много порядков выше, чем остальных. В отдельных случаях электромагнитные взаимодействия оказываются конкурентоспособными по отношению к сильным даже в области действия последних. Например, именно кулоновскими силами объясняется процесс деления ядер. Но главной областью деятельности электромагнитных сил являются расстояния от 10^{-14} м и до сантиметров. Отметим, прежде всего, что именно электромагнитное взаимодействие ответственно за существование основных «кирпичиков» вещества – атомов и молекул и определяет взаимодействие положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов в этих микросистемах. Поэтому к электромагнитному

взаимодействию сводится большинство сил, наблюдаемых в макроскопических явлениях: силы упругости, трения, поверхностного натяжения в жидкостях и другие. Свойства различных агрегатных состояний вещества, химические превращения, электрические, магнитные и оптические явления определяются электромагнитным взаимодействием. Электромагнитную природу имеют явления сверхпроводимости и сверхтекучести, процессы излучения, распространения и поглощения радиоволн, света, рентгеновских лучей. Ионизация и возбуждение атомов среды электрическим полем быстро движущихся частиц приводит к свечению ионосферы при попадании в неё корпускулярных потоков от Солнца (северное сияние). Давление света, приводящее, в частности, к образованию «хвоста» у комет во время их прохождения вблизи Солнца, также следствие электромагнитного взаимодействия. Взаимодействие электромагнитного поля с веществом используется для инициирования термоядерных реакций при сверхсильном сжатии твёрдых мишеней сфокусированным лазерным излучением. Процессы расщепления ядер фотонами, реакции фоторождения мезонов, радиационные распады элементарных частиц и возбуждённых состояний ядер, упругое и неупругое рассеяние электронов, мюонов и позитронов обусловлены электромагнитным взаимодействием и т.д.

Таким образом, электромагнитное взаимодействие обуславливает подавляющее большинство явлений окружающего нас мира.

Явления, в которых участвуют слабые ($\varepsilon \ll mc^2$), медленно меняющиеся ($\hbar\omega \ll \varepsilon$) электромагнитные поля, управляются законами классической электродинамики, которая описывается уравнениями Максвелла.

В приведённых неравенствах ε – энергия электромагнитного поля, mc^2 – энергия покоя электрона, ω – характерная круговая частота изменения поля.

Для сильных или быстро меняющихся полей ($\varepsilon \sim mc^2$, $\varepsilon \sim \hbar\omega$) определяющую роль играют квантовые явления, а потому взаимодействия с помощью таких полей описываются уравнениями квантовой электродинамики.

Согласно её представлениям, процесс взаимодействия между двумя заряженными частицами, например, электронами, заключается в обмене фотонами. Каждая частица создаёт вокруг себя поле, непрерывно испуская и поглощая фотоны. Действие поля на другую частицу проявляется в результате поглощения ею одного из фотонов, испущенных первой частицей. Такое описание взаимодействия нельзя понимать буквально. Фотоны, посредством которых осуществляется взаимодействие, являются не обычными реальными фотонами, а *виртуальными*. В квантовой механике виртуальными называются частицы, которые не могут быть обнаружены за время своего существования. Ещё раз поясним смысл термина «виртуальный» (первый раз мы столкнулись с ним при объяснении взаимодействия нуклонов).

Для этого рассмотрим покоящийся электрон. Процесс создания им в окружающем пространстве поля можно представить уравнением

$$e^- \leftrightarrow e^- + \hbar\omega \quad (14)$$

Суммарная энергия электрона и фотона больше, чем энергия покоящегося электрона. Следовательно, превращение, описываемое уравнением (14), сопровождается нарушением закона сохранения энергии. Однако для виртуального фотона это нарушение является кажущимся. Согласно квантовой механике, энергия состояния, существующего время Δt , оказывается

определённой лишь с точностью ΔE , удовлетворяющей соотношению неопределённости:

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar \quad (15)$$

Из этого соотношения вытекает, что энергия системы может претерпевать отклонения ΔE , длительность которых Δt не должна превышать значения, определяемого условием (15). Следовательно, если испущенный электроном виртуальный фотон будет поглощён этим же или другим электроном до истечения времени $\Delta t = \hbar / \varepsilon$ (где $\varepsilon = \hbar \omega$), то нарушение закона сохранения энергии не может быть обнаружено.

При сообщении электрону дополнительной энергии (это может произойти, например, при соударении его с другим электроном) вместо виртуального может быть испущен реальный фотон, который может существовать неограниченно долго.

За определяемое условием (15) время $\Delta t = \hbar / \varepsilon$ виртуальный фотон может передать взаимодействие между точками, разделёнными расстоянием ℓ :

$$\ell = c \Delta t = c \frac{\hbar}{\varepsilon} \quad (16)$$

Энергия фотона $\varepsilon = \hbar \omega$ может быть сколь угодно мала (частота ω изменяется от 0 до ∞). Поэтому радиус действия электромагнитных сил является неограниченным.

Как *фундаментальное* электромагнитное взаимодействие изучается в явлениях на малых расстояниях (обычно порядка или меньше атомных), где существенны квантовые эффекты. Взаимодействия между фотонами (γ) и лептонами – электронами (e^-), позитронами (e^+), мюонами (μ^+, μ^-), τ - лептонами, описываются уравнениями квантовой электродинамики.

Интенсивность электромагнитных взаимодействий в микромире пропорциональна безразмерному параметру

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}, \text{ называемому постоянной тонкой структуры.}$$

Подобно сильным взаимодействиям электромагнитные взаимодействия имеют ряд свойств, ограничивающих проявление их мощи. Во-первых, электромагнитные взаимодействия у разных частиц проявляются с различной интенсивностью. Наиболее велики эти взаимодействия у электрически заряженных частиц.

Слабее проявляются электромагнитные взаимодействия у нейтральных частиц с ненулевыми массой и спином. Такие частицы (например, нейтрон) обладают магнитными моментами, имеющими порядок $e\hbar/m \cdot c$, где m – масса частицы. Через этот момент они в основном и взаимодействуют с электромагнитным полем. Ещё слабее электромагнитные взаимодействия проявляются у нейтральных бесспиновых частиц, например, у нейтрального пиона π^0 . Наконец, нейтрино практически не подвержены электромагнитным взаимодействиям. Во-вторых, для электромагнитных взаимодействий соблюдаются некоторые из законов сохранения, которые нарушаются в слабых (но не в сильных) взаимодействиях. Наконец, исключительно важным свойством электромагнитных взаимодействий является наличие как отталкивания, так и притяжения в законе Кулона. Из-за этого, например, взаимодействие между атомами и вообще между любыми двумя телами с нулевыми суммарными зарядами имеет *короткий радиус действия*, несмотря на *длиннодействующий* характер кулоновских сил.

3. *Слабое взаимодействие.* В 1934 г. Э.Ферми создал первую теорию β -распада. В этой теории он

предположил существование особого типа сил, которые вызывают переход $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$. На основе данных о времени жизни β - радиоактивных ядер была оценена величина этих сил. Дальнейшие исследования показали, что введённое Ферми взаимодействие имеет универсальный характер и обуславливает распад всех нестабильных частиц, массы которых и правила отбора по квантовым числам не позволяют им распадаться за счёт сильного или электромагнитного взаимодействия. Так возникли (и были подтверждены экспериментально) представления об универсальном слабом взаимодействии.

Так же как и ядерные силы, силы слабого взаимодействия относятся к числу короткодействующих. Радиус действия этих сил даже во много раз меньше радиуса действия ядерных сил. В течение длительного времени его вообще считали равным нулю. Сейчас после открытия квантов слабого взаимодействия – промежуточных W^+, W^- и Z^0 - бозонов, массы которых соответственно равны 81 и 93 ГэВ, радиус слабого взаимодействия оценивают равным $r_{cl} \approx 2 \cdot 10^{-18}$ м, что более чем в 600 раз меньше радиуса сильного взаимодействия. W^+, W^- и Z^0 - бозоны – нестабильные частицы, их время жизни составляет всего $3 \cdot 10^{-25}$ с.

Бета-распад происходит за счёт слабого взаимодействия. Следовательно, в нём должен участвовать промежуточный бозон. В соответствии с этим, например, распад нейтрона в действительности представляет собой двухступенчатый процесс:

$$n \rightarrow p + W^-, \text{ затем } W^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e \quad (17)$$

Силы между частицами, вызываемые слабыми взаимодействиями, на всех доступных исследованию расстояниях безнадёжно малы по сравнению с силами, обусловленными сильными или электромагнитными

взаимодействиями. Правда, слабые взаимодействия так быстро нарастают с уменьшением расстояний, что в масштабах порядка $10^{-19} - 10^{-20}$ м они могут стать сравнимыми с сильными. Но исследования на таких расстояниях пока лежат вне технических возможностей. Слабые взаимодействия порождают не только силы, но и процессы взаимопревращений частиц. И здесь эти взаимодействия, оказывается, способны делать многое, недоступное как сильным, так и электромагнитным взаимодействиям. Так, только под влиянием слабых взаимодействий частица сигма-плюс-гиперон распадается на протон и нейтральный пион:



Многие другие частицы (гипероны, каоны, мюоны) были бы стабильными при отсутствии слабых взаимодействий. Слабое взаимодействие обуславливает все процессы с участием нейтрино, поскольку нейтрино обладает лишь слабым (и гравитационным) взаимодействием. Слабое взаимодействие, по-видимому, не приводит к образованию *связанных состояний*.

4. *Гравитационное взаимодействие* – универсальное взаимодействие (притяжение) между любыми видами материи (частицами и физическими полями).

Из всех взаимодействий оно является самым слабым и в современной теории элементарных частиц обычно *не учитывается*. Гравитационное взаимодействие – дальнodelствующее, т.е. его радиус действия равен бесконечности. Вследствие этого, а также потому, что (в отличие от электрических зарядов) «гравитационные заряды» – массы частиц (или тел) существуют лишь одного знака, действие всех частиц макроскопического тела суммируется, и в макромире гравитационное взаимодействие играет очень важную роль.

Если поле тяготения достаточно слабое и тела движутся медленно по сравнению со скоростью света c , то справедлив закон всемирного тяготения Ньютона:

$$F = \delta \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (19)$$

где $\delta \approx 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ – гравитационная постоянная.

В общем случае, включающем сильные поля тяготения и скорости движения, сравнимые со скоростью света, тяготение описывается общей теорией относительности (ОТО) Эйнштейна.

ОТО является обобщением ньютоновской теории тяготения на основе специальной теории относительности. ОТО описывает тяготение как воздействие физической материи на свойства четырёхмерного пространства-времени, которые, в свою очередь, влияют на движение материи и другие физические процессы: материя искривляет пространство-время, и это искривление, проявляемое как тяготение, влияет на движение материи. В таком пространстве-времени движение тел по инерции происходит уже не по прямым, а по искривлённым линиям и с переменной скоростью. Геометрия такого пространства оказывается неевклидовой: сумма углов треугольника не равна π , отношение длины окружности к радиусу не равно 2π и т.д., а время в разных точках течёт по-разному, причём чем сильнее гравитационное поле, тем медленнее течёт время. Эйнштейновская теория тяготения приводит (по сравнению с ньютоновской) к качественно новым эффектам: существованию гравитационных волн, испускаемых ускоренно движущимися телами, гравитационному красному смещению, возможности возникновения «чёрных дыр» и др. Теория Эйнштейна – некантовая теория. В квантовой теории тяготения, построение которой *не завершено*, гравитационные волны

можно рассматривать как поток квантов-гравитонов, представляющих собой электрически нейтральные частицы с нулевой массой покоя и со спином 2.

В подавляющем большинстве процессов во Вселенной квантовые эффекты гравитации чрезвычайно слабы. Но вблизи сингулярностей поля тяготения (когда плотность вещества становится равной ∞), квантовые эффекты должны быть определяющими. Эта область начинается, когда радиус кривизны пространства-времени становится равным величине

$$r_{пл} = \sqrt{\frac{\delta \hbar}{c^3}} \sim 10^{-33} \text{ см} \quad (20)$$

На меньших расстояниях теория тяготения Эйнштейна неприменима.

Возможно, что трудности в построении теории элементарных частиц могут быть устранены учётом гравитационного взаимодействия на этих расстояниях. Кажется правдоподобным, что именно планковская длина (20) может быть *фундаментальной длиной*, определяющей размеры «истинно элементарных частиц», и включение гравитационного взаимодействия в единую теорию элементарных частиц устранил расходимости в квантовой теории поля.

«Силу» различных типов взаимодействий элементарных частиц можно приближённо охарактеризовать безразмерными параметрами, связанными с квадратами соответствующих констант взаимодействий. Для сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного взаимодействий протонов при средней энергии процесса $\sim 1 \text{ ГэВ}$ эти параметры соотносятся как $1:10^{-2}:10^{-10}:10^{-38}$. Необходимость указания средней энергии процесса связана с тем, что для слабого взаимодействия безразмерный параметр зависит от энергии. Кроме того, сами интенсивности различных

процессов по-разному зависят от энергии. Это приводит к тому, что относительная роль различных взаимодействий, вообще говоря, меняется с ростом энергии взаимодействующих частиц, так что разделение взаимодействий по типам, основанное на сравнении интенсивностей процессов, надёжно осуществляется при не слишком высоких энергиях. Разные типы взаимодействий имеют, однако, и другую специфику, связанную с различными свойствами их симметрии, которая способствует их разделению и при более высоких энергиях. Сохранится ли такое деление взаимодействий элементарных частиц по типам в пределе самых больших энергий, пока остаётся неясным.

Контрольные вопросы

1. Перечислите типы взаимодействий элементарных частиц. Назовите радиус для каждого взаимодействия и сопоставьте «силу» взаимодействий между собой. Какое взаимодействие не учитывается в современной теории элементарных частиц?
2. Как осуществляется каждое из взаимодействий? Какие частицы называются виртуальными?
3. Как ОТО описывает тяготение?
4. Укажите эффекты, к которым приводит ОТО

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Каждая элементарная частица наряду со спецификой присущих ей взаимодействий описывается набором дискретных значений определённых физических величин – своими характеристиками. В ряде случаев эти дискретные значения выражаются через целые или дробные числа и

некоторый общий множитель – единицу измерения; об этих числах говорят как о квантовых числах элементарных частиц и задают только их, опуская единицы измерения.

Общими характеристиками всех элементарных частиц являются масса (m), время жизни (τ), спин (J) и электрический заряд (Q). Пока *нет* достаточного понимания того, по какому закону распределены массы элементарных частиц и существует ли для них какая-то единица измерения («квант массы»).

В зависимости от времени жизни элементарные частицы делятся на стабильные, квазистабильные и нестабильные (резонансы). Стабильными в пределах точности современных измерений являются электрон ($\tau > 5 \cdot 10^{21}$ лет), протон ($\tau > 10^{32}$ лет), фотон и нейтрино. К квазистабильным относятся частицы, распадающиеся за счёт электромагнитного и слабого взаимодействий. Их времена жизни $> 10^{-20}$ с (для свободного нейтрона даже ~ 1000 с). Резонансами называются элементарные частицы, распадающиеся за счёт сильного взаимодействия. Их характерные времена жизни $10^{-23} - 10^{-24}$ с.

Спин элементарных частиц – это их внутренняя характеристика. Он является целым или полуцелым кратным величине \hbar . В этих единицах спин π - и k -мезонов равен 0, у протона, нейтрона и электрона $J = \frac{1}{2}$, у фотона $J = 1$. Спин частицы определяет поведение ансамбля одинаковых (тождественных) частиц, или их статистику.

Электрические заряды изученных элементарных частиц являются целыми кратными от величины $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, называемой элементарным электрическим зарядом. У известных элементарных частиц $Q = 0, \pm 1, \pm 2$.

Помимо указанных величин, элементарные частицы дополнительно характеризуются ещё рядом квантовых чисел, которые называются «внутренними». К ним относятся: барионный заряд B , лептонные заряды L_e, L_μ, L_τ , странность s , очарование c , прелесть b , правда t . Более подробно о них рассказано далее.

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

По трём причинам законы сохранения играют в физике элементарных частиц несравненно большую роль, чем в любом другом разделе физики.

Первая причина состоит в том, что для элементарных частиц сейчас не существует сколько-нибудь последовательной теории, но хорошо соблюдаются законы сохранения.

Второй причиной является обилие законов сохранения в мире элементарных частиц. Как мы увидим, существует ряд законов сохранения, которые проявляются только в мире элементарных частиц и не играют никакой роли в явлениях привычного для нас макроскопического мира.

Наконец, третьей причиной является то, что при переходе к микромиру законы сохранения начинают действовать более эффективно. А именно, если в макромире законы сохранения только запрещают, то в микромире они ещё и разрешают все процессы, не попавшие под запрет. Иначе говоря, в микромире всё, что не запрещено полной совокупностью законов сохранения, должно обязательно совершаться.

Сначала эти законы понимались просто как эмпирические закономерности. Однако универсальность и точность соблюдения этих законов ясно показывают, что они должны иметь какое-то глубокое физическое

обоснование. Сейчас можно считать установленным, что каждый закон сохранения связан с какой-либо *симметрией* законов природы.

В физике термину «симметрия» придаётся более широкий смысл, чем в обычной геометрии. Чтобы объяснить, что понимают под этим термином в современной физике, рассмотрим связь между физической симметрией и классическими законами сохранения, заодно отметим особенности применения этих законов в ядерной физике и физике элементарных частиц.

Симметрия относительного переноса во времени. Однородность времени (т.е. тот факт, что свойства времени не меняются при изменении начала его отсчёта) означает, что свойства изолированной физической системы не зависят от времени. Прямым следствием симметрии относительно переноса во времени является *закон сохранения энергии*.

В классической физике хорошо известными примерами сохранения энергии являются переход кинетической энергии в потенциальную при колебании маятника (без учёта трения), переход кинетической энергии в тепловую при трении и др.

Специфика применения закона сохранения энергии в ядерной физике и физике элементарных частиц заключается в необходимости учёта изменения энергии покоя $E_0 = m_0 c^2$ и, следовательно, массы взаимодействующих частиц. Например, увеличение энергии тела при его нагревании означает возрастание энергии покоя тела на величину тепловой энергии Q :

$$E'_0 = E_0 + Q, \quad (21)$$

и, следовательно, увеличение его массы на величину

$$\Delta m_0 = \frac{Q}{c^2}:$$

$$m'_0 = m_0 + \frac{Q}{c^2} \quad (22)$$

Аналогично энергия покоя (и масса) двух магнитов, которым что-то мешает притянуться друг к другу, больше энергии покоя (и массы) этих магнитов в притянувшемся состоянии. Здесь различие в энергии покоя равно энергии взаимодействия E магнитов на данном расстоянии между ними, а различие в массе составляет $\Delta m_0 = \frac{E}{c^2}$.

Но приращение энергии покоя (и массы) в обоих случаях настолько мало по сравнению с начальной энергией покоя E_0 (и массой m_0), что на фоне E_0 его невозможно измерить никакими физическими приборами. Поэтому в общей (не ядерной) физике эти приращения энергии покоя рассматривают отдельно и называют соответственно тепловой энергией, энергией магнитного взаимодействия и т.д. И это правильно, потому что для тепловой, магнитной и других видов энергии, рассматриваемых безотносительно к энергии покоя E_0 тела, существуют надёжные способы измерения. Величину же E_0 просто исключают из энергетического баланса, считая её постоянной в данном процессе.

В ядерной физике всё так и не так. Рассмотрим в качестве примера ядро в основном и возбуждённом состояниях, которое в данном случае можно сравнить с холодным и нагретым телами. Энергия покоя (и массы) возбуждённого ядра больше энергии покоя (и массы) ядра, находящегося в основном состоянии. Приращение энергии покоя ΔE_0 равно энергии возбуждения W , которую можно сравнить с тепловой энергией для макроскопического тела. Но в рассматриваемом примере это приращение энергии

покоя $\Delta E_0 = W$ (и массы покоя $\Delta m_0 = \frac{W}{c^2}$) составляет заметную долю всей энергии покоя E_0 (всей массы покоя $m_0 = \frac{E_0}{c^2}$). Аналогично энергия покоя (и масса) протона и нейтрона больше энергии покоя (и массы) ядра дейтрона, состоящего из протона и нейтрона, связанных ядерными силами.

Приращение энергии покоя равно энергии ядерного взаимодействия между нуклонами, которое можно уподобить магнитному взаимодействию макроскопических тел, но доля $\frac{\Delta E}{E_0}$ приращения энергии покоя в данном случае несравненно больше. И это не просто количественное, но и в некотором смысле *качественное* отличие, потому что приращению ΔE_0 в ядерной физике соответствует настолько большое изменение массы покоя $\Delta m_0 = \frac{\Delta E_0}{c^2}$, что его можно измерить как разность масс покоя до и после процесса:

$$\Delta m_0 = m'_0 - m_0 \quad (23)$$

Таким образом, в ядерной физике появляется новый способ измерения энергии. И это очень важно, потому что иногда этот способ является единственно возможным. В соответствии с этим закон сохранения энергии в ядерной физике формулируется следующим образом.

Полная энергия всех частиц, вступающих в ядерное взаимодействие, равна полной энергии всех частиц, образовавшихся в результате этого взаимодействия.

Симметрия относительно переноса в пространстве. Однородность пространства (т.е. тот факт, что свойства пространства не меняются от точки к точке)

означает, что свойства изолированной физической системы не меняются при пространственном переносе. Прямым следствием симметрии пространства относительно переноса является закон сохранения импульса.

В отличие от энергии, скалярной величины, импульс – величина векторная, поэтому сохранение импульса означает неизменность не только его числового значения, но и направления.

Применяя закон сохранения импульса в классической механике, в формулу для импульса $\vec{p} = m\vec{v}$ подставляют массу покоя m_0 . В физике элементарных частиц, которая имеет дело с быстро движущимися частицами, под m

надо понимать релятивистскую массу $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. В

остальном применение закона сохранения импульса остаётся таким же.

Закон сохранения импульса, так же как и закон сохранения энергии, относится к числу точных (абсолютных) законов сохранения, которые справедливы для всех взаимодействий.

Закон сохранения импульса обычно применяют совместно с законом сохранения энергии. Чтобы сделать процесс передачи энергии при столкновении частиц наглядным, рассмотрим два нерелятивистских примера их совместного применения.

1. Выстрел из пушки. Из пушки массой M под действием энергии взрыва E вылетает снаряд массой m . Найти, как распределяется энергия взрыва E между снарядом и пушкой.

В соответствии с законом сохранения импульса векторная сумма импульсов пушки \vec{p}_n и снаряда \vec{p}_c в результате выстрела не должна измениться. Но до

выстрела она была равна нулю. Значит и после выстрела $\vec{p}_n + \vec{p}_c = 0$. Отсюда $\vec{p}_c = -\vec{p}_n$ и $|\vec{p}_c| = |\vec{p}_n| = p$, т.е. импульсы снаряда и пушки после выстрела равны по значению и противоположны по направлению.

В соответствии с законом сохранения энергии $E_{\kappa_c} + E_{\kappa_n} = E$, где E_{κ_c} и E_{κ_n} – соответственно кинетические энергии снаряда и пушки или с учётом того, что

$$E_{\kappa_c} = \frac{p^2}{2m} \text{ и } E_{\kappa_n} = \frac{p^2}{2M};$$

$$E = \frac{p^2}{2m} + \frac{p^2}{2M} = \frac{m+M}{m} \cdot \frac{p^2}{2M} \quad (24)$$

$$\text{Из (24): } E_{\kappa_n} = \frac{p^2}{2M} = E \frac{m}{m+M} \quad (25)$$

$$E_{\kappa_c} = \frac{p^2}{2m} = E \frac{M}{m+M} \quad (26)$$

2. Выстрел в ... пушку. Рассмотрим теперь обратную задачу. В пушку массой M попадает снаряд массой m , движущийся со скоростью \vec{v} , и застревает в ней, не взорвавшись. Каковы скорость V и кинетическая энергия E_{κ_n} пушки после попадания в неё снаряда?

Из закона сохранения импульса следует $mv = (m+M)V$, откуда

$$V = \frac{mv}{m+M} \quad (27)$$

С учётом (27) кинетическая энергия пушки с застрявшим в ней снарядом равна:

$$E_{\kappa_n} = \frac{m+M}{2} V^2 = \frac{m}{m+M} \cdot \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{M+m} E_{\kappa_c}, \quad (28)$$

где $E_{\kappa_c} = \frac{mv^2}{2}$ – первоначальная кинетическая энергия снаряда. Остальная часть энергии снаряда $E_{\kappa_c} - E_{\kappa_n} = \frac{M}{m+M} E_{\kappa_c}$ пойдёт на нагревание (или разрушение) пушки. При $M \gg m$ скорость пушки и её кинетическая энергия, как это следует из (27) и (28), будут пренебрежимо малы: $V \ll v$ и $E_{\kappa_n} \ll E_{\kappa_c}$.

Взаимодействие нуклона с ядром. Аналогичная картина наблюдается при взаимодействии нерелятивистского нуклона массой m с тяжёлым ядром массой M . Сравнительно небольшая доля кинетической энергии нуклона E_{κ_N} , согласно (28), идёт на движение образовавшегося составного ядра, а остальная большая часть энергии $E_{\kappa}' = \frac{M}{m+M} E_{\kappa_N}$ – на процесс внутреннего преобразования ядра, т.е. на собственную ядерную реакцию. При $m = M$ эти части равны друг другу. В этом случае только половина кинетической энергии нуклона может быть использована на ядерное взаимодействие, т.е. на преобразование атомного ядра. Вторая половина энергии затрачивается на бесполезное (для ядерного взаимодействия) движение продуктов реакции.

Взаимодействие элементарных частиц. В мире элементарных частиц соотношение между полезной и бесполезной частями энергии получается ещё более невыгодным. Например, для рождения π^+ -мезона в реакции



Бомбардирующий протон должен иметь кинетическую энергию

$$E_{\kappa_p} \geq E_{\kappa_{\min}} = 2m_{\pi}c^2 \left(1 + \frac{m_{\pi}}{4m_N} \right), \quad (30)$$

где $m_N = m_p \approx m_n$ (при выводе (30) использовались релятивистские формулы для энергии и импульса).

Подставив в (30) значения масс, получим:

$E_{\kappa_{\min}} = 2,074m_{\pi} \cdot c^2 \approx 290 \text{ МэВ}$. Из них только $139,6 \text{ МэВ}$

используется на рождение π -мезона ($m_{\pi} \cdot c^2 = 139,6 \text{ МэВ}$),

а $150,4 \text{ МэВ}$ уходит на движение образовавшихся частиц.

Симметрия относительно вращения. Изотропность пространства (т.е. тот факт, что свойства пространства одинаковы в любом направлении, проведённом из произвольно выбранной точки) означает, что свойства изолированной физической системы не меняются при повороте на заданный угол относительно любой произвольно выбранной оси вращения. Прямым следствием симметрии относительно пространственных вращений является *закон сохранения момента импульса*.

В классической механике момент импульса материальной точки \vec{L} определяется как векторное произведение радиус-вектора \vec{r} , определяющего положение частицы относительно выбранной точки отсчёта на её импульс $\vec{p} = m\vec{v}$:

$$\vec{L} = [\vec{r} \times \vec{p}] \quad (31)$$

Направление \vec{L} определяется по правилу правого винта.

Произвольно вращающееся тело также обладает моментом импульса. Чтобы его подсчитать, надо мысленно разбить это тело на небольшие элементы и просуммировать моменты импульса относительно оси вращения для всех элементов этого тела. В результате получим:

$$\vec{L} = \sum_{i=1} \Delta m_i r_i^2 \vec{\omega} \quad (32)$$

Момент импульса – столь же важная характеристика для вращающегося тела, как импульс для тела, движущегося поступательно.

Проявление закона сохранения момента импульса мы можем наблюдать, следя за тем, как фигуристка начинает и заканчивает вращение. Фигуристка начинает вращение с раскинутыми в сторону руками и далеко отставленной ногой (большое r_i). Затем она опускает одну руку и поднимает другую, придвигает ногу и вообще старается вся стать как можно ближе к своей оси вращения. При этом r_i в (32) для некоторых элементов тела уменьшаются, что приводит к возрастанию $\vec{\omega}$. И вот в результате мы видим вместо спортсменки только сплошное и длительное мелькание. Чтобы остановиться, фигуристка просто разводит руки в стороны.

Микрочастицы также могут обладать моментом импульса, причём двоякого рода. Как мы уже отмечали, у них может быть собственный момент импульса – спин (от англ. spin – веретено, вращать), подобный тому, которым обладает вращающийся волчок. Кроме того, у частиц может быть орбитальный момент импульса, сходный с моментом импульса гири, вращающейся на верёвке.

Но это только аналогии. Дело в том, что по существу ничего общего между классическим моментом импульса и спином (а также орбитальным моментом) нет. Оказывается, микрочастица *не может* иметь любое значение момента импульса, как это имеет место для волчка и гири на верёвке. Спин микрочастицы имеет вообще только одно значение (и лишь несколько ориентаций в пространстве). Кроме того, аналогия спина с вращением вокруг собственной оси приводит к неправильному значению магнитного момента электрона.

Что касается орбитального момента, то для него имеется больше возможностей, но и его значения и направления не могут быть произвольными.

Спин частицы – столь же важная её характеристика, как и масса, заряд, время жизни и др. Его значение *не зависит* от состояния движения частицы. Это её внутренняя характеристика. Значение орбитального момента определяется состоянием движения частицы.

Согласно квантовой механике, спин частицы может быть равен целому (0,1,2...) или полуцелому ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2} \dots$) числу постоянных Планка \hbar ; орбитальный момент может равняться только целому числу $\hbar(0, \hbar, 2\hbar \dots)$, причём верхняя граница определяется значением энергии.

В квантовой механике представление о спине электрона возникло автоматически в результате анализа уравнения Дирака.

Подсчёт орбитального момента импульса электрона, сделанный с помощью этого уравнения, показал, что для орбитального момента не выполняется закон сохранения момента импульса. Между тем весь опыт, накопленный наукой, говорит в пользу этого закона сохранения, поэтому естественно было предположить, что это невыполнение лишь кажущееся, аналогично тому, как это было с «нарушением» закона сохранения энергии в процессе β -распада.

Аналогично для спасения закона сохранения момента импульса электрону приписали добавочный собственный момент импульса, равный $\frac{\hbar}{2}$. Этот добавочный момент и есть спин. С учётом спина закон сохранения момента импульса восстанавливается.

Как мы уже говорили, спин является одной из важнейших характеристик элементарных частиц. В зависимости от его значения частицы делятся на два

различающихся по свойствам класса: бозоны и фермионы. К бозонам относятся частицы, имеющие целый спин ($0, \hbar, 2\hbar \dots$), например, фотон, π -мезон, K -мезон, к фермионам – полуцелый ($\hbar/2, 3/2 \hbar \dots$), например, протон, нейтрон, электрон, мюон, Ω^- -гиперон, нейтрино.

Эти классы отличаются друг от друга тем, что для одного из них (фермионов) справедлив, а для другого (бозонов) не справедлив *принцип Паули*. Согласно этому принципу, два тождественных фермиона в одной квантовой системе не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии, т.е. иметь одинаковыми все квантовые числа.

С помощью принципа Паули был объяснён периодический закон Менделеева. Как показано ранее, принцип Паули позволил Дираку предсказать позитрон. Он лежит в основе современных моделей атомного ядра.

С учётом спина закон сохранения момента импульса *выполняется* во всех процессах, рассматриваемых в ядерной физике и физике элементарных частиц.

После того как стало известно, что рассмотренные выше классические законы сохранения можно вывести из свойств симметрии пространства и времени, предпринимались многочисленные попытки найти новые свойства симметрии элементарных частиц. Действительно, были обнаружены некоторые новые свойства симметрии; другие, надежда на существование которых ещё не исчезла, пока не найдены.

Новые свойства симметрии. Исследование реакций с участием элементарных частиц и античастиц и процессов их распада привело к открытию некоторых новых свойств симметрии.

Симметрия относительно зарядового сопряжения. Если в уравнении данной реакции каждую частицу

заменить на античастицу, то получится уравнение, описывающее новую реакцию. Эта операция называется *зарядовым сопряжением* (операция C). Применяя эту операцию к реакции

$$p + \tilde{p} \rightarrow \Sigma^+ + K^0 + K^- + \tilde{\Lambda}^0, \quad (33)$$

получим реакцию

$$\tilde{p} + p \rightarrow \tilde{\Sigma}^+ + \tilde{K}^0 + \tilde{K}^- + \Lambda^0, \quad (34)$$

которая также является разрешённой. Такие элементарные процессы называют инвариантными относительно операции зарядового сопряжения.

Зарядовое сопряжение только заменяет частицу на античастицу, импульс и спин при этом не меняются. Вследствие этого слабые взаимодействия оказываются неинвариантными относительно зарядового сопряжения; однако этот закон строго выполняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях.

Симметрия относительно пространственного отражения. Если наблюдать в зеркало бадминтонный матч, когда игрок ударом справа посылает волан в правую половину площадки, то мы увидим в зеркале игрока-левшу и волан, летящий в левую половину площадки. Нельзя утверждать, что мы наблюдаем «настоящую» игру, хотя это безусловно *допустимая игра*, подчиняющаяся всем физическим законам. Таким образом, бадминтон инвариантен относительно зеркального отражения; это отражение называется операцией изменения чётности (операция P).

Как выглядят в зеркале различные векторы? Существуют два типа векторов, по-разному ведущих себя при зеркальном отражении. Например, вектору импульса \vec{p} соответствует обычное зеркальное отражение (рис. 2а), а вектор момента импульса \vec{L} , направление которого

определяется правилом правой руки, при отражении меняет направление на обратное (рис. 2б).

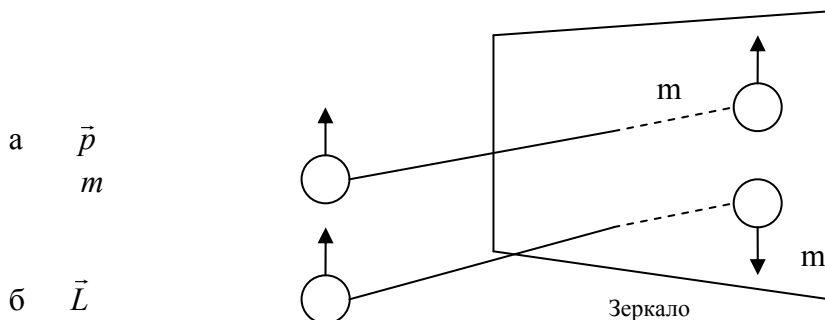


Рис. 2

Векторы, ведущие себя так, как это изображено на рис. 2а (к ним относятся, в частности, скорость, импульс, сила, напряжённость электрического поля), называются *полярными*; векторы, ведущие себя так, как изображено на рис. 2б (к ним относятся, в частности, момент импульса, напряжённость магнитного поля), называются *аксиальными*. Любой вектор, связанный с физическими процессами, является либо полярным, либо аксиальным.

Законы классической физики (механики и электродинамики) инвариантны *относительно зеркального отражения*. Это означает, что зеркальный образ любого процесса, подчиняющегося законам классической физики и происходящего в природе, подчиняется тем же законам и так же может происходить в природе. Следовательно, полярные и аксиальные векторы всегда образуют такие комбинации, что законы классической физики инвариантны относительно отражения. Можно сказать, что классические законы удовлетворяют сохранению чётности.

В квантовой механике состояние элементарной частицы описывается волновой функцией $\psi(x, y, z)$. Эта функция обладает свойством своеобразной зеркальной симметрии. При замене координат x, y, z координатами $-x, -y, -z$ волновая функция либо не меняется совсем:

$$\psi(-x, -y, -z) = \psi(x, y, z), \quad (35)$$

либо меняет только знак

$$\psi(-x, -y, -z) = -\psi(x, y, z) \quad (36)$$

Функции первого типа называют чётными ($P = +1$), второго – нечётными ($P = -1$). Нуклоны, например, описываются чётными волновыми функциями, π -мезоны – нечётными. Чётность атомного ядра зависит от его энергетического состояния. Одни состояния атомного ядра чётные, другие – нечётные.

Закон сохранения чётности выполняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях. Это означает, что характер чётности волновой функции, описывающей взаимодействующие частицы, не меняется в этих взаимодействиях. Если волновая функция чётна (нечётна) в начальный момент времени, то она остаётся чётной (нечётной) и в последующие моменты времени. Примером может служить реакция



которая запрещена законом сохранения чётности при кинетической энергии протонов $E_{\kappa_p} < 0,5 \text{ МэВ}$. Волновая функция пары частиц $p + {}^7_3\text{Li}$ нечётна, а пары ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ – чётна.

Если какой-либо процесс разрешён законом сохранения чётности, то должна соблюдаться симметрия этого процесса относительно замены x, y, z на $-x, -y, -z$, т.е. относительно операции зеркального отражения.

В слабых взаимодействиях закон сохранения чётности *не выполняется*. В эксперименте это проявляется в том, что, в частности, при β -распаде радиоактивных ядер число вылетевших электронов со спином, параллельным импульсу, не равно числу электронов со спином, антипараллельным импульсу. Как показали дальнейшие исследования, слабые взаимодействия инвариантны относительно комбинированной операции *CP*.

Симметрия относительно обращения времени. Мяч, брошенный с высоты h над поверхностью, приобретает в конце падения скорость $v = \sqrt{2gh}$. Подобным же образом мяч, подброшенный вверх с начальной скоростью v , поднимается на высоту h , где будет (одно мгновение) находиться в состоянии покоя. Эти процессы симметричны во времени; каждый из них осуществим, и не в одном из них не нарушается какой-либо физический закон.

Если снять какой-нибудь физический процесс на киноплёнку, а затем прокручивать ленту в обратном направлении, то мы увидим другой возможный физический процесс. Этот обращённый во времени процесс может оказаться крайне маловероятным, но ни один физический закон не будет в нём нарушен. При прокручивании киноленты в обратном направлении видно, как прыгун с вышки выскакивает из воды и, пролетев по воздуху, аккуратно приземляется на подкидную доску. Это событие могло бы осуществиться, если бы молекулы воды, двигаясь соответствующим образом, передали пловцу в бассейне энергию и импульс, достаточные для того, чтобы он мог подняться на вышку, однако вероятность такого события чрезвычайно мала. Принцип возрастания энтропии применительно к макроскопическим (т.е. содержащим большое число частиц или тел) системам устанавливает, что время течёт в направлении реализации вероятных процессов, хотя ни один физический закон не

запрещает осуществление какого-либо маловероятного процесса. Действительно, оказывается, что все физические процессы могут происходить, если *время потечёт вспять*. Таким образом, все физические процессы инвариантны относительно обращения времени (операции T). Принцип возрастания энтропии применим только к макроскопическим системам, а не к событиям микромира (т.е. процессам, в которых участвуют отдельные частицы), и, следовательно, изучая такие процессы, нельзя определить направление времени.

В ядерной физике и в реакциях с элементарными частицами инвариантность относительно обращения времени означает, что реакции в равной степени могут протекать в любом направлении. Например, применение операции T к реакции



приводит к реакции



Подобным же образом распавшаяся частица может быть «воссоздана» с помощью обращения времени; символически применительно к распаду нейтрона операцию T можно записать следующим образом:

$$T \times [n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e] = [p + e^- + \tilde{\nu}_e \rightarrow n] \quad (40)$$

Хотя образование нейтрона из протона, электрона и антинейтрино (при соответствующей затрате энергии) возможно, вероятность этого события крайне мала, так как, чтобы оно имело место, необходимо собрать три частицы в одной точке в один и тот же момент времени.

Теорема CPT . Какое значение имеет тот факт, что для слабых взаимодействий имеет место CP -инвариантность? Что означает этот довольно своеобразный вид инвариантности, можно понять, обратившись к так называемой теореме CPT , которая всецело основана на

фундаментальных положениях квантовой механики и теории относительности. Согласно этой теореме, все виды взаимодействия инвариантны относительно комбинированной операции CPT .

В случае слабых взаимодействий теорема CPT приводит к следующему заключению. Если слабые взаимодействия инвариантны относительно операции CP , а также инвариантны относительно операции CPT , то они должны быть инвариантны относительно операции T . Таким образом, CP -инвариантность слабых взаимодействий означает, что все слабые взаимодействия инвариантны относительно обращения времени.

Если же в слабых взаимодействиях будет обнаружено нарушение CP -инвариантности, то при непоколебленной CPT -инвариантности это будет означать нарушение T -инвариантности в этих процессах.

Действительно, небольшое нарушение CP -инвариантности было обнаружено при точном измерении вероятностей распада K^0 - и \tilde{K}^0 -мезонов. Если распады K^0 и \tilde{K}^0 были бы CP -инвариантными, то вероятности распада в единицу времени в точности совпадали бы. Эксперимент, однако, показал, что между двумя вероятностями имеется различие, хотя и очень малое; отсюда следует, что распады нейтральных каонов неинвариантны относительно обращения времени. Таким образом, эти распады являются единственными пока известными микроскопическими процессами, в которых можно провести различие между возможными направлениями течения времени.

Закон сохранения электрического заряда. Он был сформулирован Франклином ещё в 1747 г.: в замкнутой системе полный заряд (разность величин положительного и отрицательного зарядов) остаётся постоянным.

Электрический заряд измеряется в единицах элементарного заряда, т.е. всякий заряд q является целым кратным e :

$$q = Ne, \quad (41)$$

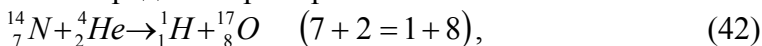
где N – число элементарных зарядов. Целочисленность зарядов и их сохранение до сих пор остаются эмпирическими фактами, не получившими более глубокого обоснования.

Приведём примеры использования законов сохранения электрического заряда. При электризации трением оба тела приобретают одинаковые по значению и противоположные по знаку электрические заряды, сумма которых равна нулю, т.е. первоначальному суммарному электрическому заряду обоих тел до электризации. То же наблюдается при электризации через влияние (индукцию).

Во всех расчётах, связанных с передачей электрического заряда от одного тела к другому, мы всегда считаем, что суммарный заряд остаётся неизменным. Например, при соприкосновении заряженного проводника с внутренней поверхностью другого проводника последнему передаётся весь заряд. При соприкосновении двух одинаковых сферических проводников, один из которых несёт заряд q , заряд распределяется между ними поровну.

В физике микромира электрический заряд выступает в двух ролях: как аддитивное сохраняющееся квантовое число, характеризующее элементарные частицы, и как мера взаимодействия заряженных частиц с электромагнитным полем, т.е. как константа электромагнитного взаимодействия.

В ядерных реакциях и реакциях с другими элементарными частицами учитывается только первое свойство заряда. Например:



т.е. преобразование ядер происходит так, что суммарное число протонов (т.е. электрический заряд атомных ядер z) до и после реакции остаётся неизменным.

Наконец, процесс рождения электрон-позитронной пары также идёт в соответствии с законом сохранения электрического заряда

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (0 = -1 + 1) \quad (43)$$

Этот пример поучителен тем, что он позволяет понять необходимость существования у частиц ещё нескольких зарядов, для которых также должны выполняться законы сохранения.

В самом деле, закону сохранения электрического заряда удовлетворяет не только процесс $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$, но и процессы $\gamma \rightarrow p + e^-$, $\gamma \rightarrow \mu^+ + e^-$, $\gamma \rightarrow \pi^+ + e^-$, $\gamma \rightarrow K^+ + e^-$ и др.

Между тем из числа перечисленных на опыте наблюдается только процесс типа $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$. Значит кроме закона сохранения электрического заряда существуют какие-то другие законы сохранения, т.е. правила запрета, которые разрешают γ -кванту образовать $(e^+ - e^-)$ -пару и запрещают $(p - e^-)$, $(\pi^+ + e^-)$, $(\mu^+ + e^-)$, $(K^+ + e^-)$ -пары. По аналогии с законом сохранения электрического заряда это означает существование у частиц каких-то ещё «зарядов», сумма которых должна оставаться неизменной в ядерных процессах. Таких зарядов в настоящее время известно восемь: барионный заряд B , лептонный электронный заряд L_e , мюонный лептонный заряд L_μ , тау-лептонный заряд L_τ , странность S , очарование c и прелесть b , правда t .

Закон сохранения барионного заряда. Если барионам (т.е. нуклонам и гиперонам) приписать барионный заряд (или барионное число) $B = +1$, антибарионам – барионный

заряд $B = -1$, а всем остальным частицам – барионный заряд $B = 0$, то для всех процессов, протекающих с участием барионов и антибарионов, например:

$$\begin{aligned}\tilde{p} + p &\rightarrow \pi^+ \pi^- + \pi^+ + \pi^- + \pi^0, \\ \tilde{p} + p &\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + \pi^0 + \pi^0, \\ \tilde{p} + n &\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0 + \pi^0,\end{aligned}\tag{44}$$

будет характерно сохранение барионного заряда.

Закон сохранения барионного заряда обуславливает стабильность самого лёгкого из барионов – протона. Другие законы сохранения (энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда и т.д.) не запрещают, например, процесса

$$p \rightarrow e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_e,\tag{45}$$

который, в конечном итоге, привёл к аннигиляции атомов. Однако такой процесс сопровождался бы уменьшением барионного заряда на единицу и поэтому не наблюдается. Аналогично закон сохранения электрического заряда обуславливает стабильность электрона, запрещая, например, процесс

$$e^- \rightarrow \gamma + \gamma + \nu_e\tag{46}$$

Закон сохранения лептонного заряда. Для объяснения протекания процессов с участием лептонов и антилептонов приходится ввести квантовое L , получившее название лептонного заряда (или лептонного числа). Лептонам приписывается $L = +1$, антилептонам $L = -1$, всем остальным частицам $L = 0$. При этом условии во всех процессах наблюдается сохранение суммарного лептонного заряда рассматриваемой физической системы.

Теперь мы имеем возможность объяснить, почему частицу, возникшую при β^- -распаде

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + e^- + \tilde{\nu}_e,\tag{47}$$

следует называть антинейтрино, а возникающую при β^+ -распаде



- нейтрино (в (47) и (48) X и Y обозначены соответственно материнское и дочернее ядра). Это вытекает из требования сохранения лептонного заряда. У электрона и нейтрино $L = +1$, а у позитрона и антинейтрино $L = -1$. Поэтому суммарный лептонный заряд не изменяется, если электрон возникает вместе с антинейтрино, а позитрон – вместе с нейтрино.

Лептоны, очевидно, сохраняются и в процессе $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$, однако мы знаем, что этот процесс не наблюдается. В связи с этим можно сформулировать более сильный принцип сохранения лептонов, который более чётко определяет типы разрешённых процессов. В этой схеме мы делим семейство лептонов на три ветви: электронную, мюонную и тау-лептонную, и каждой частице приписываем либо электронное L_e , либо мюонное L_μ , либо тау-лептонное L_τ число. Таким образом, для каждой из частиц $L = L_e + L_\mu + L_\tau$. Согласно названному более сильному принципу сохранения лептонов, электронные, мюонные и тау-лептонные числа сохраняются по отдельности при любом процессе. Физический смысл симметрии, связанный с электрическими, барионными и лептонными зарядами, пока неизвестен. Загадочным свойством остаётся и целочисленность этих зарядов.

Мы не будем подробно рассказывать, как пришли к необходимости введения каждого из оставшихся «зарядов» (S , c , b , t). В двух словах: чтобы объяснить, почему одни реакции идут, а другие нет, вернёмся к процессам распада γ -кванта. Процесс $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ возможен потому, что у

электрона и позитрона противоположны не только электрические заряды, но и лептонные, а все остальные заряды у обеих частиц равны нулю. Таким образом, у электронно-позитронной пары все заряды равны нулю, т.е. такие же как и у γ -кванта. Следовательно, рассматриваемый процесс не противоречит ни одному из законов сохранения.

Вот, например, процесс $\gamma \rightarrow p + e^-$ противоречит сразу двум законам сохранения – барионного заряда и лептонного электронного заряда, и поэтому не может идти:

$$\gamma \rightarrow p + e^- \quad (B: 0 \neq 1 + 0; \quad L_e: 0 \neq 0 + 1) \quad (49)$$

Процесс $\gamma \rightarrow \mu^+ + e^-$ противоречит двум законам сохранения лептонных зарядов, поэтому также невозможен:

$$\gamma \rightarrow \mu^+ + e^- \quad (L_e: 0 \neq 0 + 1; \quad L_\mu: 0 \neq -1 + 0) \quad (50)$$

Приведём ещё несколько примеров разрешённых и запрещённых процессов, идущих под действием различных частиц.

$$1. \text{ Процесс } \pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0 \quad (51)$$

разрешён всеми законами сохранения:

$$Z: -1 + 1 = 0 + 0; \quad B: 0 + 1 = 0 + 1; \quad L_e: 0 + 0 = 0 + 0; \quad L_\mu: 0 + 0 = 0 + 0; \quad L_\tau: 0 + 0 = 0 + 0; \\ S: 0 + 0 = 1 - 1; \quad c: 0 + 0 = 0 + 0; \quad b: 0 + 0 = 0 + 0.$$

Этот процесс характерен тем, что в нём под действием обычных (нестранных) частиц образуются две странные частицы с противоположными странностями.

2. В качестве трёх частичного процесса рассмотрим реакцию рождения Ω^- -гиперона:

$$K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0 \quad (52)$$

$$Z: -1 + 1 = -1 + 1 + 0; \quad B: 0 + 1 = 1 + 0 + 0; \quad L_e: 0 + 0 = 0 + 0 + 0; \quad L_\mu: 0 + 0 = 0 + 0 + 0; \\ L_\tau: 0 + 0 = 0 + 0 + 0; \quad S: -1 + 0 = -3 + 1 + 1; \quad c: 0 + 0 = 0 + 0 + 0; \quad b: 0 + 0 = 0 + 0 + 0.$$

Эта реакция была предсказана Гелл-Манном теоретически.

3. Очень интересно сравнить процессы

$$\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^- \quad (53)$$

и

$$\pi^- + p \rightarrow K^- + \Sigma^+, \quad (54)$$

которые, казалось бы, отличаются друг от друга только знаками электрического заряда образующихся частиц. При этом закон сохранения электрического заряда не нарушается. Выполняются и законы сохранения других зарядов: $B, L_e, L_\mu, L_\tau, c, b$. Тем не менее, первый процесс действительно наблюдается, а второй запрещён законом сохранения странности ($S_{K^-} = S_{K^+} = S_{\Sigma^-} = -1$; $S_{K^+} = +1$).

4. Добавим процесс аннигиляции медленного антипротона с протоном

$$\bar{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0 \quad (55)$$

$$B: -1+1=0+0+0+0+0; \quad Z: -1+1=+1+1-1-1+0.$$

В заключение заметим, что странность S сохраняется только в сильных и электромагнитных взаимодействиях. Слабые взаимодействия с участием странных частиц протекают с изменением странности на единицу.

Мы не будем приводить примеров законов сохранения очарования, прелести. По существу, здесь всё обстоит так же, как и в приведённых выше примеры. Оба этих заряда подобно странности сохраняются в сильном и электромагнитном взаимодействиях.

Закон сохранения изотопического спина. Из зарядовой независимости ядерных сил вытекает, что протон и нейтрон обнаруживают гораздо больше сходства, чем различий. В сильном взаимодействии они участвуют равным образом, спин обеих частиц одинаков, массы очень близки. Это даёт основание рассматривать протон и нейтрон как два различных состояния одной и той же частицы – нуклона. Если «выключить» электромагнитное взаимодействие, то оба эти состояния полностью совпадут (небольшое различие масс протона и нейтрона

обусловлено электромагнитным взаимодействием). Это обстоятельство послужило основанием для того, чтобы назвать протон и нейтрон зарядовым мультиплетом (дублетом). Другие частицы также объединяются в зарядовые мультиплеты. Так, например, π -мезоны образуют триплет (при выключении электромагнитного взаимодействия все три π -мезона становятся неразличимыми), а Λ -гиперон – синглет.

Тождественность свойств протона и нейтрона (а также других частиц) можно формально (но математически очень удобно) описать с помощью квантово-механического вектора изотопического спина (изоспина) \vec{T} , который имеет одинаковые значения для обоих нуклонов ($|\vec{T}| = 1/2$) и, согласно правилам квантовой механики, $2T + 1 = 2$ разные проекции: $T_z = \pm \frac{1}{2}$. Во избежание недоразумений

отметим, что квантовое число T не имеет никакого отношения ни к изотопам, ни к обычному спину. Слово «изотопический» появилось в названии числа T потому, что протон и нейтрон образуют различные «разновидности» нуклона, подобно тому, как действительные изотопы образуют разновидности данного химического элемента. Слово «спин» появилось в названии вследствие того, что математический аппарат, описывающий квантовое число T , оказался точно таким же, как математический аппарат обычного спина. В остальном между изотопическим и обычным спинами нет ничего общего. Вектор \vec{T} и его проекции T_z существуют в так называемом изотопическом пространстве (не имеющем никакого отношения к *обычному пространству*).

Проекция $T_z = +\frac{1}{2}$ соответствует протону, проекция

$T_z = -\frac{1}{2}$ – нейтрону. Зарядовая независимость, выраженная на языке изотопического спина, означает независимость ядерного взаимодействия от проекции вектора \vec{T} , т.е. от его ориентации в изотопическом пространстве (изотопическая инвариантность ядерных сил).

Закон сохранения изотопического спина выполняется только при сильных взаимодействиях, при электромагнитных взаимодействиях сохраняется только T_z , сам же изотопический спин \vec{T} не сохраняется. Слабые взаимодействия протекают, как правило, с изменением изотопического спина.

Контрольные вопросы

1. На какие классы делятся изученные элементарные частицы? Перечислите частицы, относящиеся к этим классам.

2. Какими параметрами характеризуются элементарные частицы?

3. Что такое спин J и в каких единицах он меряется? Как называются частицы с полуцелым и целочисленным спином? Для какого из классов частиц справедлив принцип Паули и в чём он состоит?

4. В чём состоит закон сохранения барионного заряда? Почему не распадается протон по схеме $p \rightarrow e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_e$?

4. В чём состоит закон сохранения лептонного заряда? Почему частицу, возникающую при β^- -распаде, называют антинейтрино, а возникающую при β^+ -распаде – нейтрино?

5. Распады каких частиц неинвариантны относительно обращения времени?

УНИТАРНАЯ СИММЕТРИЯ

Введение изотопического спина позволило объединить частицы в зарядовые мультиплеты. Расширение схемы изотопического спина привело к созданию теории унитарной симметрии элементарных частиц. Оказывается, если известные адроны рассортировать по значениям их спина и внутренней чётности, то образуется несколько больших групп адронов, внутри которых наблюдаются интересные закономерности. Такие группы называют супермультиплетами или *унитарными мультиплетами*. В то время можно было вполне чётко выделить четыре большие группы частиц. Мезонные адроны с нулевым спином и отрицательной чётностью образуют группу из девяти частиц (нонет), состоящую из унитарного октета и унитарного синглета.

Электрический заряд, странность и масса членов этой девятки закономерно изменяются от частицы к частице (рис. 3а). Аналогичную девятку образуют также мезонные адроны со спином, равным единице, и отрицательной чётностью (рис. 3б). Барионы со спином $\frac{1}{2}$ и положительной чётностью образуют сходный октет (рис. 3в). Наконец, барионные адроны со спином $\frac{3}{2}$ и положительной чётностью составляют десятку-декуплет (рис. 3г). В последнем случае закономерность изменения свойств у частиц особенно очевидна.

Все частицы декуплета размещены на четырёх строках, характеризующихся определёнными значениями странности $S: 0, -1, -2, -3$. Строки имеют разную длину и вместе образуют правильный треугольник. На самой нижней строке находятся четыре члена изотопического квартета Δ -частиц, характеризующихся одним и тем же

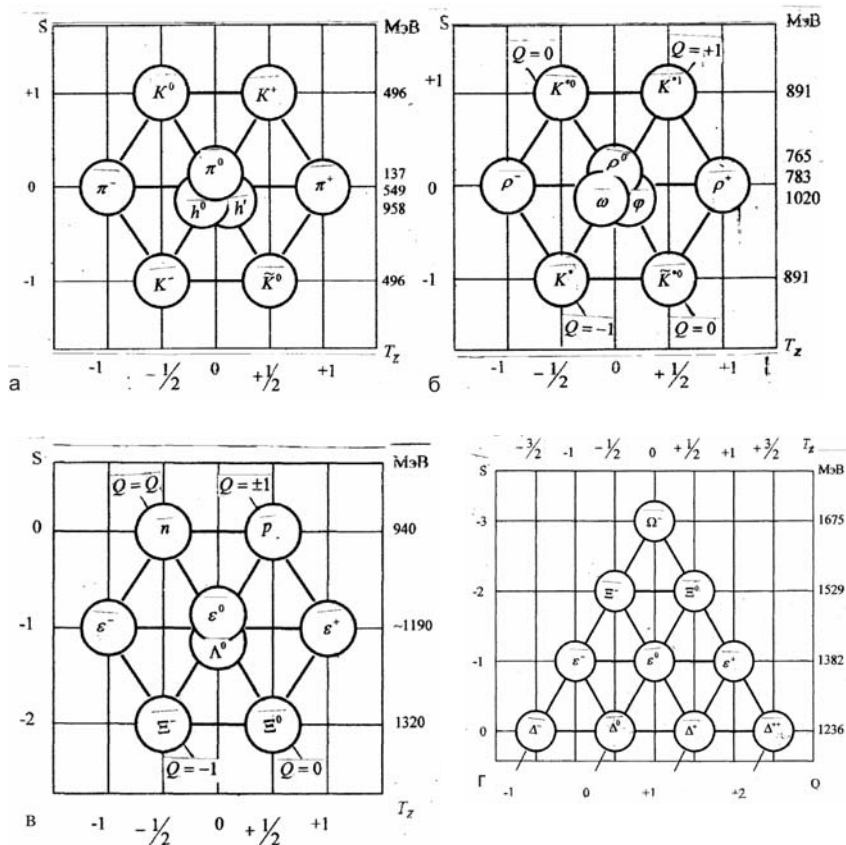


Рис. 3

значением изотопического спина $T = \frac{3}{2}$, который в этом случае имеет четыре проекции ($2T + 1 = 4$). Все члены этого квартета должны иметь одинаковую массу с погрешностью порядка нескольких мегаэлектрон-вольт. Вторую строку занимает Σ_{1385} -триплет резонансов с $T = 1$ и близкими массами. В третьей строке размещён изотопический Ξ_{1530} -дублет с $T = \frac{1}{2}$, и, наконец, вершину

треугольника венчает изотопический синглет с $T = 0 - \Omega^-$ -гиперон. Электрический заряд частиц, входящих в изотопический мультиплет, возрастает на единицу при движении вдоль строки слева направо. Каждой вертикали соответствует определённое значение проекции изотопического спина. На диагоналях, направленных под острыми углами к оси абсцисс, расположены частицы с одинаковым электрическим зарядом. И что особенно замечательно, разности средних значений масс для двух любых соседних строк практически одинаковы ($\sim 146 \text{ МэВ}$).

Перечисленные закономерности позволили Гелл-Манну в 1962 г. по свойствам девяти известных частиц предсказать все основные характеристики десятой частицы, занимающей верхний угол треугольника. В начале 1964 г. Ω^- -гиперон с предсказанными свойствами был найден.

Аналогичные закономерности можно проследить также и в других супермультиплетах, хотя там они не столь просты и очевидны, как в случае декуплета.

КВАРКОВАЯ ГИПОТЕЗА

Чтобы объяснить существование унитарных мультиплетов, число частиц в них и их свойства, Гелл-Манн и независимо от него Цвейг в 1964 г. выдвинули гипотезу, что все адроны построены из трёх истинно элементарных частиц, названных кварками. Кварки обладают спином $\frac{1}{2}$, барионным зарядом $\frac{1}{3}$ и электрическими зарядами, кратными $\frac{1}{3}e$, где e – элементарный электрический заряд. В связи с такой экзотичностью свойств и с тем, что их три, кварки и получили своё название. Словосочетание «три кварка»

встречается в романе Дж. Джойса «Поминки по Финнегану» как таинственный крик чаек, который слышится герою романа во время кошмарного бреда. Основные свойства кварков указаны в таблице 1.

Нетрудно видеть, что если кваркам приписать свойства в соответствии с таблицей 1, то достаточно всего трёх кварков и трёх антикварков, чтобы из них, как из деталей конструктора, построить любой из указанных выше адронов, причём можно показать, что адроны, «слеplенные» из кварков, будут группироваться в те самые супермультиплеты, которые были известны (они рассмотрены нами) в то время. Буквы u , d и s в таблице 1 – сокращения от общепринятых названий кварков: up – верхний, $down$ – нижний и $strange$ – странный. Позднее в кварковую модель ввели четвёртый, пятый и шестой кварки.

Таблица 1

Свойства u , d , s кварков и \bar{u} , \bar{d} , \bar{s} антикварков

Кварк	Элементарный заряд Q	Барионный заряд B	Спин	Изотопический спин T	Странность S
u	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
d	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
s	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	0	-1
\bar{u}	$-\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
\bar{d}	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
\bar{s}	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	0	+1

Мезоны образуются из пары кварк-антикварк, а барионы из трёх кварков. В таблице 2 приведены некоторые из этих образований.

Таблица 2

Кварковый состав некоторых частиц

Частица	Состав	Взаимная ориентация спинов кварков	Взаимная ориентация изотопических спинов кварков
π^+	$u\bar{d}$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\uparrow$
π^-	$\bar{u}d$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\uparrow$
K^+	$u\bar{s}$	$\uparrow\downarrow$	\uparrow
p	uud	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$\uparrow\downarrow\uparrow$
n	udd	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$\uparrow\downarrow\uparrow$
Σ^+	uus	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$\uparrow\uparrow$
Λ	uds	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$\uparrow\downarrow$
Δ^{++}	uuu	$\uparrow\uparrow\uparrow$	$\uparrow\uparrow\uparrow$
Δ^-	ddd	$\uparrow\uparrow\uparrow$	$\uparrow\uparrow\uparrow$
Ω^-	sss	$\uparrow\uparrow\uparrow$	—

Разумность кварковой гипотезы в случае барионного октета (рис. 3в) очень убедительно иллюстрируется тем, что эта гипотеза объясняет с 2,5%-й погрешностью экспериментальное значение отношения магнитных моментов нейтрона и протона:

$$\left(\frac{\mu_n}{\mu_p}\right)_{\text{эксп.}} = \frac{-1,91}{+2,79} = -0,685; \quad \left(\frac{\mu_n}{\mu_p}\right)_{\text{теор.}} = \frac{2}{3} \approx -0,667 \quad (56)$$

Итак, если сравнить кварки с деталями детского конструктора, то следует признать, что эти детали сделаны очень рационально: всего из шести деталей легко складываются все 36 частиц-членов четырёх унитарных мультиплетов. Более того, до 1974 г. казалось, что из них

можно составить любой из существующих в природе адронов. Однако эта точка зрения не подтвердилась.

В конце 1974 г. одновременно в двух лабораториях была открыта новая J/ψ -частица, свойства которой оказались таковы, что их не удалось объяснить в рамках трёхкварковой модели. Для интерпретации этих свойств потребовалось ввести четвёртый – с-кварк, названный очарованным (от слова charm – очарование). с-Кварк имеет $B = 1/3, Q = +2/3, S = 0, T = 0$, спин $1/2$ и $c = +1$,

где с – новое квантовое число, названное очарованием.

J/ψ -частица является комбинацией типа $c\bar{c}$, или, как говорят, частицей со скрытым очарованием. с-Кварк оказался вполне равноправной частицей по отношению к остальным трём кваркам.

В 1977 г. была открыта ещё одна частица, названная ипсилон-мезоном (Y), свойства которой не укладывались в четырёхкварковую модель. Y -мезон интерпретируется как комбинация вида $b\bar{b}$, где b – пятый кварк, названный прелестным (от слова beauty – прелесть); b -кварк имеет следующие свойства:

$$Q = -1/3, B = 1/3, S = 0, T = 0, \text{спин } 1/2, c = 0, b = +1.$$

Наконец, в 1994 г. был обнаружен самый тяжёлый t -кварк. Его масса, по данным на 1999 г., $176 \pm 6 \text{ ГэВ}$. Он имеет следующие свойства:

$$Q = +2/3, B = 1/3, \text{спин } 1/2, S = c = b = 0, T = 0, t = +1.$$

На основании кварковой гипотезы удаётся объяснить основные закономерности физики адронов: их распределение по унитарным мультиплетам, соотношения между сечениями реакций при высоких энергиях, электромагнитные характеристики адронов, свойства их

слабого взаимодействия, масштабную инвариантность, образование частиц с большими поперечными импульсами, адронные струи и ряд других явлений. Однако многочисленные поиски свободных кварков, проводившиеся на ускорителях высокой энергии, в космических лучах и в окружающей среде, оказались пока безуспешными.

Из того, что кварки не найдены, строго говоря, рано делать вывод об их отсутствии, тем более, что результаты проделанных опытов не отрицают существование кварков массой $m > 15m_p$. В то же время нельзя забывать и о том, что не все гипотезы оказываются верными. В принципе и кварковая модель, несмотря на всё её правдоподобие, может оказаться неверной. Вполне возможно, что симметрия элементарных частиц может столь же логично объясняться каким-то другим неизвестным пока способом.

Наконец, ещё одна возможность, в которую в настоящее время верит большинство физиков, заключается в следующем: кварки существуют, но только в связанном состоянии внутри адронов. Вылететь из адронов и существовать в свободном виде кварки не могут. Рассмотрим эту возможность.

Квантовая хромодинамика. Пленение (confinement) кварков внутри адронов является, пожалуй, главной трудностью кварковой модели. Другая трудность этой модели связана с тем, что она допускает барионные комбинации из трёх тождественных кварков, находящихся в одинаковом состоянии. Например, Ω^- -гиперон состоит из трёх S -кварков ($\Omega^- = \hat{s}\hat{s}\hat{s}$). А это запрещено принципом Паули, согласно которому два (а тем более три) фермиона с одинаковыми квантовыми числами не могут находиться в одном и том же состоянии. Обе эти трудности удалось преодолеть введением ещё одной

характеристики кварков, которая условно называется *цветом*.

Каждый кварк независимо от его типа (u, d, s, c, b, t), который называется *ароматом* (*flavour*), имеет три цветовые разновидности, соответствующие трём «основным цветам»: «красному», «синему» и «зелёному».

В состав любого бариона входят обязательно «разноцветные» кварки, так что Ω^- -гиперон, например, является «бесцветной» («белой») комбинацией вида $\hat{s}_k \hat{s}_c \hat{s}_s$, которая не противоречит принципу Паули. Соответственно каждый мезон представляет собой комбинацию кварков и антикварков с «дополнительными» цветами (например, «красный» и «антикрасный» и т.п.), которые также в сумме дают «белый цвет».

Кроме этой функции нового квантового числа цвет играет очень важную роль нового заряда. Согласно современной теории сильных взаимодействий – квантовой хромодинамике, взаимодействие между кварками осуществляется при помощи восьми цветных глюонов (от слова *glue* – клей), которые являются квантами, т.е. переносчиками сильного взаимодействия между кварками любых ароматов и цветов.

Наличие цветового заряда у глюонов резко отличает их от квантов электромагнитного взаимодействия – фотонов, которые не имеют заряда. В отличие от фотона глюон может испускать новые глюоны, что приводит к росту эффективного заряда кварка с увеличением расстояния и, следовательно, к возрастанию энергии взаимодействия между кварками. В результате кварки не могут освободиться друг от друга (периферическая тюрьма, пленение) и встречаются в природе только в связанном состоянии – в форме «белых», «бесцветных» адронов. Наоборот, на очень малых расстояниях кварки взаимодействуют относительно слабо, и их можно

рассматривать как практически свободные частицы (центральная, асимптотическая свобода). Это обстоятельство позволило получить ряд количественных соотношений, подтверждённых экспериментами.

Контрольные вопросы

1. Зачем вводятся такие квантовые числа, как странность s , очарование c , прелесть b , правда t ?

2. Назовите электрический и барионный заряды u , d , s -кварков и составьте из них n , p , и Ω^- -гиперон. Сколько кварков в кварковой модели?

3. Из кварков какого цвета составлены барионы, например, Ω^- -гиперон и мезоны, например, π^+ -мезон?

КЛАССИФИКАЦИЯ ЧАСТИЦ

Известные на современном уровне развития физики частицы можно разделить на два больших класса:

1 – частицы – переносчики взаимодействий. К ним относятся фотон (γ -квант) – переносчик электромагнитного взаимодействия, векторные W^\pm и Z^0 бозоны – переносчики слабого взаимодействия, 8 цветных глюонов – переносчиков сильного взаимодействия между кварками, гипотетический гравитон – переносчик гравитационного взаимодействия. Все эти частицы имеют целочисленный спин (у гравитона – 2, у остальных – 1), а значит, являются *бозонами*.

2 – частицы, из которых состоит материя. Все они имеют полуцелый спин, а значит, являются фермионами. В зависимости от свойств взаимодействия этих частиц они делятся на две группы:

1. Частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях, называют *лептонами*. Таких частиц шесть. Это электрон e , мюон μ^- , тяжёлый тау-лептон τ^- , или таон с массой примерно $3487 m_e$ (m_e – электрона) и три сорта нейтрино: электронное ν_e , мюонное ν_μ и тау-нейтрино ν_τ . У каждой из частиц есть античастица.

Лептоны группируются в пары: электрон с электронным нейтрино, мюон – с мюонным, тау-лептон – с тау-нейтрино. Это объединение обусловлено тем, что каждый сорт нейтрино участвует в реакциях вместе со своим партнёром по паре. Первые три частицы имеют электрический заряд, равный заряду электрона. Все сорта нейтрино электронеutralны. Все лептоны имеют ненулевой лептонный заряд. С учётом античастиц полное число лептонов равно 12.

2. Частицы, участвующие во всех взаимодействиях, это кварки. В исходной схеме кварков шесть. И они группируются в три семейства, соответствующие семействам лептонов: $(u, d), (c, s), (t, b)$. Свойства кварков описаны в разделе «Унитарная система». Полное число кварков с учётом антикварков и трёх цветов равно 36.

Из кварков слагаются частицы, участвующие в сильных взаимодействиях. Они называются *адронами* (от греч. «адрос» – крупный, сильный). Примерами адронов являются протон, нейтрон, π -мезон. Адроны, в свою очередь, подразделяются на барионы и мезоны.

Первая группа объединяет в себе нуклоны (p, n) и нестабильные частицы с массой, большей массы нуклонов. Они получили название гиперонов $(\Lambda, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Xi^-, \Xi^0, \Omega^-)$. Они обладают ненулевым барионным зарядом и нулевым лептонным зарядом.

Самым лёгким барионом является протон. Все барионы являются фермионами.

Мезоны – это частицы с нулевым лептонным и барионным зарядами. Когда их вводили, объединяющим признаком мезонов являлось то, что их массы имели значения, промежуточные между массами электрона и нуклона. Сейчас же известны мезонные резонансы, массы которых превосходят нуклонную. Все мезоны являются бозонами.

Подводя итог, отметим: согласно стандартной модели, окружающая нас Вселенная состоит из 48 фундаментальных частиц: 12 лептонов и 36 кварков.

Контрольные вопросы

1. Какие частицы называются лептонами? Перечислите эти частицы.
2. Какие частицы называют адронами? Приведите пример адрона.
3. Какой барион является самым лёгким?

КОНТУРЫ НОВОЙ ТЕОРИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Если охарактеризовать любой объект окружающего нас мира заданием его размеров и скорости v , то можно следующим образом поделить сферы влияния классической, релятивистской и квантовой механики (рис. 4).

В этой чисто условной схеме одно белое пятно: правая нижняя клетка остаётся незаполненной. По смыслу схемы это место должна занять теория, описывающая поведение микрочастиц при релятивистских энергиях, т.е. теория,

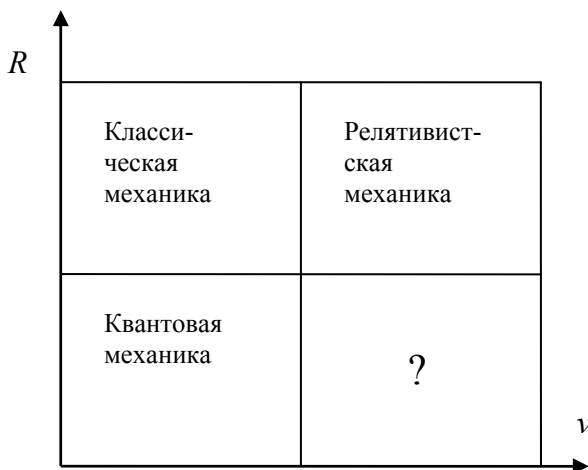


Рис. 4

которую можно назвать релятивистской квантовой теорией. Однако сейчас ещё нет по-настоящему последовательного и универсального варианта такой теории. Ни один из существующих вариантов не может объяснить, например, спектр возможных значений масс элементарных частиц. Конечно, нельзя, утверждать, что белый квадратик на нашей схеме абсолютно пуст.

Совсем напротив! В настоящее время предложено много подходов к решению этой задачи. Но пока нельзя отдать предпочтение ни одному из этих подходов. Возможно даже, что к цели приведёт не один из них, а какой-то совсем новый, пока ещё никому не известный путь, который появится после обнаружения у материи новых свойств.

Всё же скажем несколько слов о состоянии исследований в настоящее время. Все современные варианты теории элементарных частиц в рамках стандартной модели опираются на теорию относительности, квантовую механику и точечность, так называемую локальность, взаимодействия. Однако их

нельзя считать просто дальнейшим обобщением квантовой механики на область релятивистских скоростей, так как в этой области становятся возможными новые эффекты – рождение и уничтожение элементарных частиц как с нулевой массой, например, фотонов, так и с массой, отличной от нуля, например, пионов. Эти частицы являются квантами соответствующих взаимодействий (электромагнитного и сильного).

Из гипотезы де Бройля следует, что частицы с $m \neq 0$, так же как и фотоны, обладают волновыми свойствами, для описания которых необходимо бесконечно большое число степеней свободы (у классической частицы, как известно, три степени свободы). Таким образом, теория, описывающая микромир, должна быть квантовой теорией поля.

В этой теории для каждого вида частиц вводится своё поле: электромагнитное поле фотонов, электрон-позитронное поле, пионное поле и др. Каждое из них может находиться в различных энергетических состояниях, низшее из которых называется *вакуумом*. При повышении энергии поля происходит рождение квантов этого поля (фотонов, электронов и позитронов, пионов и др.), при понижении – исчезновение.

Развитие квантовой теории поля идёт по пути постепенного объединения различных полей и создания единой картины взаимодействия. Первым успешным шагом на этом пути было создание квантовой электродинамики, в которой рассматривается взаимодействие электромагнитного и электрон-позитронного полей. Следующий шаг (сделанный сравнительно недавно) заключается в создании единой теории электрослабых взаимодействий, в которой совместно рассматриваются слабое поле с его квантами (W^+ , W^- , Z^0 – бозонами) и электромагнитное поле с фотонами. В настоящее время предпринимается попытка

создания так называемого *великого объединения*, т.е. теории, объединяющей слабое, электромагнитное и сильное взаимодействия. Следующим шагом может быть включение в общее рассмотрение четвертого, гравитационного взаимодействия (так называемая суперсимметрия).

Возможно, что именно на этом пути в конце концов будет построена всеобъемлющая теория, которая позволит получить единую картину всех четырёх видов взаимодействия и объяснит массовый спектр и другие свойства элементарных частиц.

Другая возможность, достаточно широко обсуждаемая сейчас, – теория суперструн. Она возникла в начале 1970-х годов. В ней утверждается, что если бы мы могли исследовать точечные частицы, существование которых предполагает стандартная модель, с точностью, выходящей далеко за пределы наших современных возможностей, мы бы увидели, что каждая из этих частиц представляет собой крошечную колеблющуюся струну, имеющую форму петли. Длина типичной петли, образованной струной, близка к планковской (10^{-33} см), которая примерно в 10^{20} раз меньше размера атомного ядра. Отсюда следует, что современные эксперименты *не могут подтвердить струнную природу материи*, т.к. для прямого подтверждения нам бы потребовался ускоритель, способный сталкивать частицы с энергией, в несколько миллионов миллиардов раз превышающей максимальный уровень, достигнутый на сегодняшний день.

Из чего состоят эти струны? Есть два возможных ответа на этот вопрос. Первый: если струны действительно являются фундаментальными объектами – они представляют собой «атомы», неделимые компоненты в самом истинном смысле этого понятия. Как наименьшие составные части материи, они представляют собой конец

пути – последнюю матрёшку – в многочисленных слоях, образующих структуру микромира. С этой точки зрения, даже если струны имеют определённые пространственные размеры, вопрос об их составе лишён какого-либо смысла. Приведём лингвистическую аналогию. Можно сказать, что параграфы состоят из предложений, предложения – из слов, слова – из букв. А из чего состоит буква? С лингвистической точки зрения это конец пути. Буквы есть буквы – они представляют собой фундаментальные строительные блоки письменного языка; они не имеют внутренней структуры. Вопрос об их составе не имеет смысла. Аналогично струна представляет собой просто струну, – поскольку нет ничего более фундаментального, нельзя описать струну как нечто, состоящее из каких-то других компонентов.

Второй: если теория струн не окажется окончательной, тогда струны образуют ещё один слой в луковице мироздания, слой, который становится видимым в масштабах планковской длины. В этом случае струны могут состоять из ещё более мелких структур. За исключением некоторых гипотез струны рассматриваются как наиболее фундаментальные компоненты мироздания.

Теория струн – теоретическое здание единой и жёсткой конструкции. Она сочетает в себе идеи квантовой механики и теории относительности. Основываясь на одном принципе – что на самом микроскопическом уровне всё состоит из комбинаций вибрирующих волокон, – теория струн даёт единый способ объяснения свойств всех взаимодействий и всех видов материи.

Согласно этой теории, свойства элементарных частиц – их массы и константы различных взаимодействий – в точности определяются резонансными модами колебаний, реализуемыми внутренними струнами этих частиц.

Легче всего понять эту ассоциацию для массы частицы. Энергия конкретной моды колебаний струны зависит от её амплитуды и длины волны. Чем больше амплитуда и чем короче длина волны, тем больше энергия. Но масса и энергия связаны между собой $E = mc^2$. Отсюда: чем больше энергия, тем больше масса, и наоборот. Таким образом, в соответствии с теорией струн масса элементарной частицы определяется энергией колебания внутренней струны этой частицы. Внутренние струны более тяжёлых частиц совершают более интенсивные колебания, струны лёгких частиц колеблются менее интенсивно.

Поскольку масса частицы определяет её гравитационные характеристики, существует прямая связь между модой колебания струны и откликом частицы на действие гравитационной силы. Установлено также, что существует аналогичное соответствие между иными характеристиками колебания струны и реакцией на другие взаимодействия. Например, электрический заряд, константы слабого и сильного взаимодействия, которые несёт частица, в точности определяются типом её колебания. Более того, тот же самый принцип справедлив и для частиц, переносящих взаимодействия. Фотоны, калибровочные бозоны слабого взаимодействия и глюоны представляют собой всего лишь иные моды колебаний струн. Что особенно важно, характеристики одной из мод колебаний струн в точности совпадают с характеристиками гравитона, гарантируя, что гравитация является неотъемлемой частью теории струн.

Таким образом, по теории струн наблюдаемые характеристики всех элементарных частиц определяются конкретной модой резонансного колебания внутренних струн. Этот взгляд радикально отличается от точки зрения, которой придерживались физики до открытия теории

струн, когда считалось, что различия между фундаментальными частицами обусловлены тем, что они «отрезаны от разных кусков ткани». Хотя частицы считались элементарными, предполагалось, что они состоят из различного «материала». Так, например, материал электрона имел отрицательный электрический заряд, а «материал» нейтрино был электрически нейтральным. Теория струн радикально изменила эту картину, объявив, что «материал» всего вещества и всех взаимодействий является *одним и тем же*. Каждая элементарная частица состоит из отдельной струны, точнее, каждая частица представляет собой отдельную струну – и все струны являются абсолютно идентичными.

Различия между частицами обусловлены различными модами резонансных колебаний этих струн. То, что представлялось различными частицами, на самом деле является различными «нотами», исполняемыми на фундаментальной струне.

Поскольку каждое физическое явление, событие или процесс на своём наиболее элементарном уровне может быть описано на языке взаимодействия между элементарными компонентами материи, теория струн обещает предоставить в наше распоряжение единое, всеобъемлющее описание физического мира – «теорию всего сущего» (ТВС).

Непротиворечивые и самосогласованные квантовые теории струн возможны лишь в пространстве высшей размерности. Теория бозонных струн может быть построена только в 26-мерном пространстве-времени, а суперструнные теории – в 10-мерном. Поскольку мы, согласно специальной теории относительности, существуем в четырёхмерном пространстве-времени (учтена размерность, связанная со временем), необходимо объяснить, почему остальные дополнительные измерения

оказываются ненаблюдаемыми. В распоряжении теории струн имеются два таких механизма.

Первый из них заключается в компактификации дополнительных 6 или 7 измерений, т.е. замыкание их на себя на таких малых расстояниях, что они не могут быть обнаружены в экспериментах.

Классическая аналогия, используемая при рассмотрении многомерного пространства – садовый шланг. Если наблюдать шланг с достаточно далёкого расстояния, будет казаться, что он имеет только одно измерение – длину. Но если приблизиться к нему, обнаруживается его второе измерение – окружность. Истинное движение муравья по поверхности шланга двумерно, издали же оно будет казаться нам одномерным. Дополнительное измерение доступно наблюдению только с относительно близкого расстояния, поэтому и дополнительные измерения пространства Калаби-Яу доступны наблюдению только с чрезвычайно близкого расстояния, т.е. практически не обнаруживаемы.

Другой вариант – локализация – состоит в том, что дополнительные измерения не столь малы, однако в силу ряда причин все частицы нашего мира локализованы на четырёхмерном листе в многомерной вселенной и не могут его покинуть. Этот четырёхмерный лист (брана) и есть наблюдаемая часть мультивселенной. Поскольку мы, как и вся наша техника, состоим из обычных частиц, то мы в принципе неспособны взглянуть вовне. Единственная возможность обнаружить дополнительные измерения – гравитация. Она, будучи результатом искривления пространства-времени, не локализована на бране, и поэтому гравитоны и микроскопические чёрные дыры могут выходить вовне. В наблюдаемом мире такой процесс будет выглядеть как внезапное исчезновение энергии и импульса, уносимых этими объектами.

Существует множество способов свести 10-мерные и 26-мерные теории к 4-мерной эффективной теории поля. Сама теория струн пока не даёт критерия, с помощью которого можно было бы определить, какой из возможных путей редукции предпочтителен.

Из результатов отметим, что многочисленные свойства стандартной модели, открытые в течение десятилетий кропотливых исследований, естественным образом вытекают из теории струн. Более того, для многих из этих свойств эта теория даёт гораздо более полное и удовлетворительное описание, чем стандартная модель. Эти достижения показывают, что теория струн действительно способна стать теорией всего сущего.

Однако на этом пути есть и существенные трудности. Так, сам вывод уравнений теории оказался столь сложным, что до сих пор удалось получить лишь их приближённый вид. Приближённые же уравнения оказались не способными дать правильный ответ на ряд важных вопросов. Сейчас специалисты по теории струн энергично работают над новыми методами, которые обещают преодолеть встреченные препятствия.

Теория струн нуждается в экспериментальной проверке, однако ни один из вариантов теории не даёт однозначных предсказаний, которые можно было бы проверить в критическом эксперименте. Таким образом, теория струн находится пока в «зачаточной стадии». Всё же, несмотря на то, что арена основных действий в теории струн недоступна прямому экспериментальному изучению, ряд косвенных предсказаний теории струн можно проверить в эксперименте.

Во-первых, обязательным является наличие суперсимметрии. Ожидается, что вступающий в строй в 2010 г. Большой адронный коллайдер сможет открыть

некоторые суперсимметричные частицы. Это будет серьёзной поддержкой теории струн.

Во-вторых, в моделях с локализацией наблюдаемой вселенной в мультивселенной изменяется закон гравитации тел на малых расстояниях. В настоящее время проводится ряд экспериментов, проверяющих с высокой точностью закон всемирного тяготения на расстояниях в сотые доли миллиметра. Обнаружение отклонения от этого закона было бы ключевым аргументом в пользу суперсимметричных теорий.

В-третьих, в тех же самых моделях гравитация может становиться очень сильной уже на энергетических масштабах порядка нескольких ТэВ, что делает возможной её проверку на Большом адронном коллайдере. В настоящее время идёт активное исследование процессов рождения гравитонов и микроскопических чёрных дыр в таких вариантах теории.

Наконец, некоторые варианты теории струн приводят также и к наблюдательным астрофизическим предсказаниям. Суперструны (космические струны, Д-струны или другие струнные объекты), растянутые до межгалактических размеров, обладают сильным гравитационным полем и могут выступать в роли гравитационных линз. Кроме того, движущиеся струны должны создавать гравитационные волны, которые могут быть обнаружены. Они также могут создавать небольшие нерегулярности в реликтовом излучении. Однако к настоящему времени ни одна из указанных возможностей не реализована.

Существуют и другие, в частности, нелокальные теории.

В заключение можно выразить уверенность в том, что, несмотря на трудности, в конце концов, теория элементарных частиц и их взаимодействий будет создана,

и это произойдёт тем скорее, чем раньше будут поставлены опыты при сверхвысоких энергиях.

Контрольный вопрос

В чём суть теории суперструн?

ЗАДАЧИ

1. Построить кварковую схему нейтрального каона K^0 .

Решение.

Каон K^0 имеет странность $s = +1$. Следовательно, в своём составе он должен содержать антикварк \tilde{s} , для которого $s = +1$ и $Q = \frac{1}{3}$. Чтобы получить комбинацию, которая имела бы $Q = 0$, возможен единственный вариант: $K^0 = d\tilde{s}$.

2. Возможны ли следующие распады частиц и если нет, то по какой причине:

1) $\Omega^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$; 2) $\Xi^- \rightarrow n + \pi^-$;

3) $n \rightarrow p + \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$; 4) $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_\mu$;

5) $p \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$; 6) $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \mu^-$?

Решение.

Такие распады запрещены, поскольку: 1) $\Delta s = 2$;

2) $\Delta s = 2$; 3) $m_n < m_p + m_\mu$; 4) не сохраняются лептонные заряды L_e и L_μ ; 5) не сохраняются барионный B и лептонный L заряды; 6) не сохраняется L_μ .

3. Рассмотреть, какие из приведённых реакций запрещены законами сохранения лептонных зарядов:

1) $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \tilde{\nu}_\mu$; 2) $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \tilde{\nu}_e$;

3) $\mu^+ \rightarrow e^- + \gamma$; 4) $K^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \pi_0$;

5) $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$.

Решение.

Запрещены реакции: 1, 3, 5.

4. Найти наибольшую скорость, которую может иметь электрон, образовавшийся при распаде свободного покоящегося нейтрона.

Решение.

Максимальная полная энергия возникшего электрона равна разности энергий покоя нейтрона и протона:

$$\frac{m_e \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = (m_n - m_p) \cdot c^2.$$

Отсюда

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{m_e}{m_n - m_p} \right)^2} = c \sqrt{1 - \left(\frac{0,511}{939,57 - 938,38} \right)^2} = 0,92 c.$$

В последнем соотношении массы подставлены в энергетических единицах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахиезер А.И., Рекало М.П. Элементарные частицы.– М.: Наука, 1986.– 256 с.
2. Белокуров В.В., Ширков Д.В. Теория взаимодействий частиц.– М.: Наука, 1986.– 158 с.
3. Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной: пер. с англ./ под ред. Л.Б. Зельдовича.– М.: Энергоиздат, 1981.– 208 с.
4. Гарднер М. Этот правый, левый мир: пер. с англ.– 2-е изд.– М.: Мир, 1967.– 268 с.
5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.– М.: Высшая школа, 1989.– 607 с.
6. Дирак П.А.М. Пути физики: пер. с англ.– М.: Энергоатомиздат, 1983.– 88 с.
7. Касьянов В.Я. Физика. Класс 11.– М.: Дрофа, 2004.– 416 с.
8. Мухин К.И. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1, 2.– 4-е изд.– М.: Энергоатомиздат, 1983.– М.: Дрофа, 2004.
9. Мэрион Дж.Б. Физика и физический мир.– М.: Мир, 1975.– 623 с.
10. Орир Дж.: пер. с англ. Т. 1, 2.– М.: Мир, 1981.– 622 с.
11. Окуль А.Б. Физика элементарных частиц.– М.: Наука, 1984.– 224 с.
12. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3.– М.: Наука, 1982.– 304 с.
13. Трофимова Т.И. Курс физики.– М.: Высшая школа, 2003.– 542 с.
14. Чечуев В.Я., Митина Л.А. Элементы физики атомного ядра/ НГАУ.– Новосибирск, 2009.– 36 с.
15. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике: пер. с англ. Вып. 1-4.– М.: Мир, 1965.
16. Фраунфельдер Г., Хеилн Э. Субатомная физика: пер. с англ.– М.: Мир, 1979.– 736 с.

17. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика.– М.: Наука. 1980.– 727 с.

18. Гинзбург В.Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас, на пороге XXI века, особенно важными и интересными.– М., 2010.– 24 с.

19. Грин Брайан. Элегантная вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории.– М., 2004.

Содержание

Введение	3
Элементарные частицы	4
Частицы и античастицы	6
Основные свойства элементарных частиц	13
Типы взаимодействий элементарных частиц	17
Характеристики элементарных частиц	27
Законы сохранения	29
Унитарная симметрия	54
Кварковая гипотеза	56
Классификация частиц	62
Контурь новой теории элементарных частиц	64
Задачи	75
Библиографический список	77

Составители:

Чечуев Владимир Яковлевич

Викулов Станислав Викторович

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Учебное пособие

Редактор Н.К. Крупина

Компьютерная вёрстка Т.А. Измайлова

Подписано к печати 18 апреля 2011 г.

Формат 60х84 1/16. Объём 3,5 уч.-изд. л., 5,0 усл.-печ. л.

Тираж 100 экз. Изд. № 48. Заказ № 244.

Отпечатано в издательстве НГАУ «Золотой колос»
630039, РФ, г. Новосибирск, ул. Добролюбова 160, офис 106.
Тел. факс (383) 267-09-10. E-mail: 2134539@mail.ru