

ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание данного конспекта лекций продиктовано потребностью в учебном пособии небольшого объема, соответствующем рабочей программе курса физики, изучаемого в НИ РХТУ. Это предопределило как отбор материала, включенного в пособие, так и уровень его изложения. В нем рассмотрены лишь стержневые вопросы и, разумеется, далеко не все из них. Опущены второстепенные детали и сложные доказательства.

Основная цель, которую ставили себе составители пособия, заключалась в том, чтобы, избегая упрощенчества в разъяснении трудных физических вопросов, изложить основы физики атомного ядра и элементарных частиц в доступной форме и вместе с тем с достаточной строгостью.

Составители сочли целесообразным предпослать изложению основного материала краткий исторический обзор развития физики атомного ядра и элементарных частиц, что и сделано во введении.

Пособие предназначено для студентов НИ РХТУ всех специальностей.

ВВЕДЕНИЕ

Строение материи всегда было одной из центральных проблем естествознания. Пытаясь объяснить многообразие окружающего нас мира, ученые стремились отыскать мельчайшие бесструктурные, неделимые частицы, которые можно было бы считать «элементарными кирпичиками» мироздания. В XX веке такие частицы получили название элементарных частиц.

Первоначально на этом пути была выдвинута атомная гипотеза, согласно которой материя представляет собой комбинации мельчайших частиц, названных атомами (в переводе с греческого слово «атом» означает «неделимый»). Учение об атомах, как элементарных частицах материи, зародившееся еще в древней Греции, развиваясь и видоизменяясь, просуществовало более двух тысячелетий.

Открытия, сделанные на рубеже XIX-XX веков, такие как экспериментальное обнаружение электрона (Дж. Дж. Томсон, 1897 г.), открытие радиоактивности (А. Беккерель, 1896 г.), опыты Резерфорда и сотрудников по рассеянию α -частиц атомами (1906, 1909 гг.), создание (Э. Резерфорд, 1911 г.) планетарной модели атома, показали, что атом – не бесструктурная неделимая частица, а состоит из ядра и электронной оболочки. При этом сразу же было понятно, что и атомное ядро, в котором сосредоточена практически вся масса атома, тоже не является бесструктурной элементарной частицей. В связи с этим физикам пред-

стояло ответить на вопросы: из каких частиц состоит ядро атома, каковы характеристики этих частиц и силы взаимодействия между ними, построить модель ядра и т.д. Приведенное перечисление проблем физики атомного ядра показывает, что они совпадают, либо тесно связаны с проблематикой физики элементарных частиц.

Что касается состава ядра, то в первоначальной модели атома Резерфорда предполагалось, что ядро состоит из положительно заряженных частиц – протонов (экспериментально обнаружены Э. Резерфордом в 1919 г.) и отрицательных электронов. В дальнейшем было выяснено, что электроны не могут находиться внутри ядра. После открытия электрически нейтральной частицы, названной нейтроном (Д. Чедвик, 1932 г.), Д.Д. Иваненко предложил (1932 г.) модель ядра, состоящего из протонов и нейтронов. Эти две очень близкие по массе частицы получили общее название нуклонов.

Характеристики ядра, ядерные силы, действующие между составляющими ядро нуклонами, модели ядра, радиоактивность, а также ядерные реакции описаны в главе «Атомное ядро» настоящего пособия.

Выяснив, из каких частиц состоит ядро атома (1932 г.), физика вышла на более глубокий уровень строения материи. Теперь были известны следующие частицы, которые могли бы считаться элементарными: фотон, электрон, протон, нейтрон и нейтрино – частица, названная так потому, что она не имеет электрического заряда, а ее масса покоя равна нулю или же чрезвычайно мала. Существование нейтрино было предсказано В. Паули (1931 г.) и позднее доказано экспериментально.

Пока количество известных частиц, которые могли бы считаться элементарными, было мало, существовала надежда на скорое решение проблемы элементарности этих частиц. Но с середины 30-х годов прошлого века физики открыли более 200 новых частиц, т.е. их стало так много, что возникли сомнения в их элементарности. Кроме того, в экспериментах по рассеянию электронов на нуклонах была обнаружена зернистая структура последних, а это означало, что нуклоны являются составными, а не истинно элементарными частицами.

Проблему элементарных частиц стали решать в двух направлениях. Первое из них состояло в изучении и сопоставлении свойств известных частиц и их систематизации (подобно тому, как это сделал Д.И. Менделеев, который на основе сопоставления свойств атомов создал периодическую систему элементов). Одним из результатов этой работы явилась классификация элементарных частиц. По принципу участия в тех или иных видах фундаментальных взаимодействий все

известные частицы были разбиты на три класса: фотоны, лептоны (от греческого слова «лептос» - «легкий») и адроны (в переводе с греческого – «крупный»). Такая классификация явилась большим достижением физики элементарных частиц. Виды взаимодействий и классификация частиц описаны в главе «Элементарные частицы» данного пособия.

Параллельно велись работы во втором направлении, представлявшем собой попытку построить известные частицы из небольшого числа фундаментальных субчастиц. Это удалось в 1964 г. Гелл-Манну и Цвейгу. Было показано, что все известные адроны можно составить из шести фундаментальных частиц, названных кварками. Это был новый, более глубокий уровень строения материи.

Представления о современном состоянии физики элементарных частиц изложены в главе «Элементарные частицы» настоящего пособия.

Существуют ли более глубокие уровни строения материи, в настоящее время неизвестно, хотя такая возможность обсуждается и даже разрабатываются соответствующие модели. Дать ответ на этот вопрос может только эксперимент.

1. Атомное ядро

1.1. Состав и характеристики атомного ядра

Ядро состоит из **протонов** и **нейтронов**, которые носят общее название **нуклонов**.

Главными характеристиками ядра являются **зарядовое число Z** и **массовое число A** . Зарядовое число равно количеству протонов в ядре и определяет его заряд, который равен $+Ze$, где Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева, e – элементарный заряд ($e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл). Массовое число ядра равно количеству нуклонов (т.е. суммарному числу протонов и нейтронов) в ядре. Число нейтронов в ядре $N = A - Z$.

Для обозначения ядер применяется символ A_ZX или ${}_Z X^A$, где X – химический символ данного элемента. Вверху ставится массовое число, а внизу - зарядовое число. Иногда зарядовое число ядра Z называют атомным номером.

Ядра с одинаковым зарядовым числом Z , но с разными массовыми числами A называются изотопами. Например, водород имеет три изотопа: обычный водород или протий 1_1H ($Z = 1, N = 0$. Ядро такого водорода состоит только из одного протона), тяжелый водород

или дейтерий 2_1H ($Z=1, N=1$). Ядро такого водорода состоит из одного протона и одного нейтрона и называется дейтроном или дейтоном), сверхтяжелый водород или тритий 3_1H ($Z=1, N=2$). Ядро этого водорода состоит из одного протона и двух нейтронов).

Ядро имеет очень малые размеры. Если считать ядро шаром, то радиус ядра довольно точно определяется формулой

$$r = 1,3\sqrt[3]{A} \cdot 10^{-15} \text{ м}.$$

Из этой формулы следует, что объем ядра пропорционален числу нуклонов A в ядре. Поэтому плотность вещества во всех ядрах примерно одинакова.

1.2. Масса и энергия связи

Масса ядра $m_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс входящих в него частиц. Это объясняется тем, что при объединении нуклонов в ядро выделяется энергия связи нуклонов друг с другом.

Известно, что энергия покоя частицы связана с ее массой соотношением $E = mc^2$. Поэтому энергия покоящегося ядра меньше суммарной энергии невзаимодействующих покоящихся нуклонов на величину

$$E_{\text{св}} = [Zm_p + (A-Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2,$$

где $E_{\text{св}}$ – энергия связи нуклонов в ядре. (Она равна работе, которую надо совершить, чтобы ядро разделить на составляющие его нуклоны и удалить их на такое расстояние, при котором взаимодействием нуклонов можно пренебречь), m_p – масса протона, m_n – масса нейтрона, $m_{\text{я}}$ – масса ядра.

Величина $\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - m_{\text{я}}$ называется **дефектом массы**. Дефект массы связан с энергией связи соотношением: $\Delta m = \frac{E_{\text{св}}}{c^2}$.

При решении практических задач для вычисления дефекта массы обычно пользуются приближенной формулой, так как в таблицах не приводятся массы ядер, а только массы атомов. Эта формула имеет вид:

$$\Delta m = Zm_{1\text{H}} + (A-Z)m_n - m_a,$$

где $m_{1\text{H}}$ – масса изотопа водорода 1_1H , m_a – масса атома.

Если энергию связи измерять в МэВ (мегаэлектронвольтах), а дефект массы в а. е. м. (атомных единицах массы), то

$$E_{св} = 931\Delta m, \text{ где } \Delta m - \text{дефект массы.}$$

Удельная энергия связи $\delta E_{св} = \frac{E_{св}}{A}$ – это энергия связи, приходящаяся на один нуклон. Например, удельная энергия связи изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$ составляет 7,1 МэВ.

На рисунке 1 представлен график зависимости удельной энергии связи от массового числа A . Сильнее всего связаны нуклоны в ядрах с массовыми числами порядка 50–60. Удельная энергия связи для этих ядер достигает 8,7 МэВ. С дальнейшим ростом массового числа удельная энергия связи уменьшается и для самого тяжелого природного элемента урана она составляет 7,8 МэВ. Такая зависимость удельной энергии связи от массового числа показывает, что энергетически возможны два процесса: 1. **Деление тяжелых ядер** на несколько более легких ядер, 2. **Слияние (синтез) легких ядер** в одно ядро.

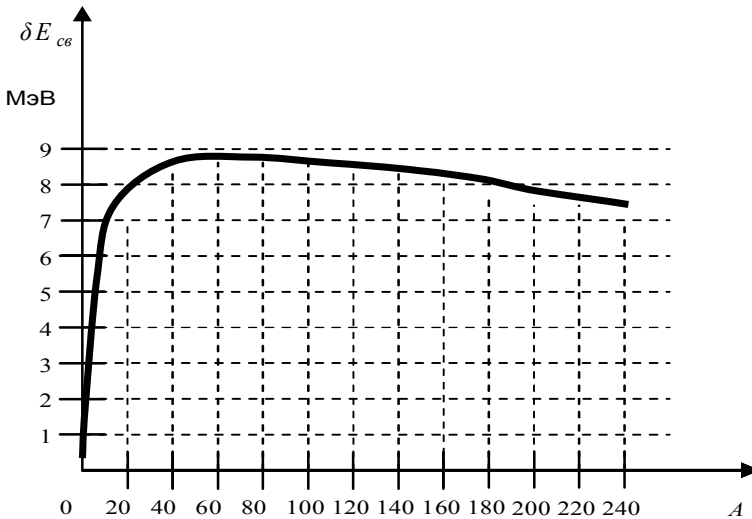


Рис.1.

Оба процесса сопровождаются выделением большого количества энергии. Например, при делении одного ядра изотопа урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ вы-

деляется энергия порядка 200 МэВ, а при слиянии двух ядер тяжелого водорода ${}^2_1\text{H}$ в ядро гелия ${}^4_2\text{He}$ выделяется энергия, равная примерно 20 МэВ. Для сравнения надо указать, что при сгорании угля до CO_2 , т.е. при соединении одного атома углерода с двумя атомами кислорода выделяется энергия порядка 5эВ.

1.3. Модели атомного ядра

Существует много моделей ядра. Наиболее простыми, но во многих случаях хорошо отражающие некоторые свойства ядер, являются следующие модели ядра.

1. *Капельная модель.* Здесь ядро сравнивается с заряженной капелькой жидкости. Сходства атомного ядра с капелькой жидкости заключается в том, что между частицами (молекулами в капельке и нуклонами в ядре) действуют силы, которые являются короткодействующими силами. Кроме того, практически одинаковая плотность вещества в различных ядрах свидетельствует об очень малой сжимаемости ядерного вещества. Такой же малой сжимаемостью обладают и жидкости. На основе капельной модели объясняются многие явления, например, процесс деления тяжелых ядер, а также была выведена полуэмпирическая формула для энергии связи нуклонов в ядре.

2. *Оболочечная модель.* По этой модели нуклоны в ядре движутся независимо друг от друга в усредненном поле ядерных сил. В соответствии с этим имеются дискретные энергетические уровни (наподобие энергетическим уровням в атоме), заполняемые нуклонами с учетом принципа Паули (т.к. спиновое квантовое число нуклонов $s = \frac{1}{2}$, поэтому нуклоны являются фермионами и подчиняются принципу Паули). Эти уровни группируются в оболочки, в каждой из которой может находиться определенное число нуклонов. Полностью заполненная оболочка образует особо устойчивое ядро. К таким относятся ядра изотопов гелия ${}^4_2\text{He}$, кислорода ${}^{16}_8\text{O}$, изотопов кальция ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ и ${}^{48}_{20}\text{Ca}$, а также свинца ${}^{126}_{82}\text{Pb}$.

1.4. Ядерные силы

Огромная энергия связи нуклонов в ядре показывает, что между нуклонами существует очень интенсивное взаимодействие. Оно удерживает нуклоны на расстояниях, равных примерно 10^{-15} м друг от друга, несмотря на очень сильное кулоновское отталкивание протонов. Взаимодействие между нуклонами внутри ядра называется **сильным**

взаимодействием, а силы взаимодействия нуклонов в ядре называются **ядерными силами**.

Особенности ядерных сил.

1. Ядерные силы являются короткодействующими. Их радиус действия порядка 10^{-15} м.

2. Ядерные силы не зависят от заряда нуклона. Например, ядерные силы, действующие между двумя протонами, между протоном и нейтроном или между двумя нейтронами, имеют одинаковую величину.

3. Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов. Например, нейтрон и протон в ядре тяжелого водорода ${}^2_1\text{H}$ удерживаются вместе, если их спины параллельны.

4. Ядерные силы не являются центральными силами. Их нельзя представлять направленными вдоль прямой, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

5. Ядерные силы обладают свойством насыщения, т.е. каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом нуклонов.

Природа ядерных сил (сильного взаимодействия) имеет обменный характер. По этой теории нуклоны в ядре взаимодействуют, обмениваясь виртуальными π – мезонами. (Виртуальная частица – это такая частица, которая не может быть обнаружена за время ее существования).

Существует 3 вида π – мезонов: положительный (π^+), отрицательный (π^-) и нейтральный (π^0). Заряды π^+ и π^- – мезонов равны элементарному заряду e . Спин всех π –мезонов равен нулю ($s = 0$)

Обменный характер сильного взаимодействия между нуклонами заключается в том, что в результате виртуальных процессов

$$p \rightarrow n + \pi^+,$$

$$n \rightarrow p + \pi^-,$$

$$p \rightarrow p + \pi^0 \text{ или } n \rightarrow n + \pi^0$$

каждый нуклон в ядре оказывается окруженным облаком виртуальных π – мезонов, образующих поле ядерных сил. Поглощение этих мезонов другими нуклонами приводит к сильному взаимодействию между нуклонами.

1.5. Радиоактивность

Радиоактивность – это самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием элементарных частиц. К радиоактивным процессам относятся:

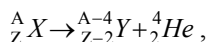
1. α -распад,
2. β -распад,
3. Спонтанное деление тяжелых ядер.

Радиоактивность ядер, существующих в природных условиях, называется естественной. Радиоактивность ядер, полученных путем ядерных реакций, называется искусственной.

При любом виде радиоактивности должны выполняться законы сохранения зарядового числа, массового числа и других законов сохранения. (Законов сохранения энергии, импульса, спина и т.д.)

1. *Альфа-распад*. При альфа-распаде исходное (материнское) ядро ${}^A_Z X$ испускает α -частицы, представляющие собой ядра изотопа гелия ${}^4_2 He$. Поэтому по законам сохранения зарядового и массового чисел образующееся (дочернее) ядро имеет зарядовое число на две единицы, а массовое число на четыре единицы меньше, чем у материнского ядра.

Альфа-распад происходит по схеме:

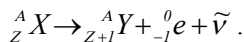


где X – химический символ материнского ядра, Z и A – его зарядовое и массовое числа, Y – химический символ дочернего ядра, $Z-2$ и $A-4$ – его зарядовое и массовое числа.

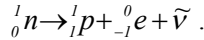
Кинетическая энергия α -частиц, испускаемых данным радиоактивным веществом, принимает строго определенный дискретный ряд значений. Это доказывает то, что дочернее ядро возникает не только в нормальном, но и в возбужденных состояниях. В возбужденном состоянии дочернее ядро находится очень малое время ($\approx 10^{-8} - 10^{-15} c$). Переходя в нормальное состояние, ядро испускает γ -фотон. Поэтому α -распад сопровождается γ -излучением.

2. *Бета-распад*. Существует три разновидности β -распада.

2.1. Электронный или β^- -распад. Электронный распад происходит по схеме:



При β^- -распаде материнское ядро ${}^A_Z X$ испускает электрон ${}_{-1}^0 e$, а также еще одну частицу, которая называется антинейтрино $\tilde{\nu}$. Весь процесс β^- -распада протекает так, как если бы один из нейтронов материнского ядра ${}^A_Z X$ превращается в протон с испусканием электрона и антинейтрино по схеме:



β^- -распад также, как и α -распад, сопровождается γ -излучением. В отличие от α -частиц при α -распаде кинетическая энергия электронов при β^- -распаде принимает самые разнообразные значения от 0 до E_{\max} . По закону сохранения энергии следует, что кинетическая энергия электрона при β^- -распаде:

$$E = [m_X - (m_Y + m_e)] \cdot c^2,$$

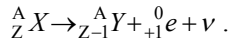
где m_X – масса материнского ядра, m_Y – масса дочернего ядра, m_e – масса электрона, испускаемого материнским ядром.

Эта энергия E является максимальной энергией E_{\max} . При других распадах кинетическая энергия электронов меньше E_{\max} , т.е. другие β^- -распады протекают с кажущимся нарушением закона сохранения энергии. Поэтому ученые сделали вывод, что при β^- -распаде кроме электрона испускается еще одна частица, уносящая с собой часть энергии. Эту частицу назвали нейтрино (позже выяснилось, что эта частица является антинейтрино). Нейтрино не имеет электрического заряда.

Существование нейтрино следует еще и из того, что при β^- -распаде (как и при других распадах) выполняется закон сохранения спина (собственного момента импульса частиц). Известно, что спиновое квантовое число протона, нейтрона и электрона одинаковое и равно $s = \frac{1}{2}$. Поэтому спиновое квантовое число нейтрино (и антинейтрино) тоже должно быть равно $\frac{1}{2}$.

2.2. Позитронный или β^+ -распад.

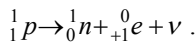
Позитронный распад проходит по схеме:



При β^+ -распаде материнское ядро ${}^A_Z X$ испускает позитрон ${}^0_{+1} e$ и еще одну частицу, которая называется нейтрино ν .

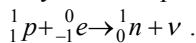
Позитрон является античастицей для электрона. Массы их равны, а заряды одинаковые по величине, но противоположные по знаку.

Процесс β^+ -распада протекает так, как если бы один из протонов материнского ядра превратился в нейтрон, испустив при этом позитрон и нейтрино:



Исходя из закона сохранения энергии невозможен процесс превращения свободного протона в нейтрон с выделением позитрона и нейтрино, так как масса протона меньше массы нейтрона. Но внутри ядра протон может заимствовать недостающую энергию от других нуклонов и этот процесс становится возможным.

2.3. Электронный захват. Он заключается в том, что ядро поглощает один электрон из K -оболочки, в результате чего один из протонов превращается в нейтрон, испуская нейтрино:



Все виды β -распада сопровождаются γ -излучением. Кроме того, при электронном захвате происходит характеристическое рентгеновское излучение. Оно возникает при переходе электронов с более высоких энергетических уровней L -, M - и других оболочек на освободившееся место в K -оболочке.

3. *Спонтанное деление тяжелых ядер.* Например, ядро урана распадается на две примерно равные части.

1.6. Гамма – излучение. Доза излучения

Установлено, что γ -излучение не является самостоятельным видом радиоактивности, а возникает только при ядерных распадах, ядерных реакциях, а также при торможении заряженных частиц. Спектр γ -излучения является линейчатым, что доказывает дискретность энергетических состояний атомных ядер.

Гамма-излучение испускается дочерним (а не материнским) ядром. Дочернее ядро в момент своего образования оказывается в возбужденном состоянии и, переходя в основное состояние, излучает γ -кванты. При этом переходе возбужденное ядро может пройти ряд

промежуточных энергетических состояний, поэтому γ -излучение одного и того же радиоактивного изотопа может содержать несколько групп γ - квантов, отличающихся своей энергией.

При прохождении через вещество γ -кванты могут взаимодействовать как с электронной оболочкой атомов вещества, так и с их ядрами. При этих взаимодействиях наблюдаются такие явления, как фотоэффект, эффект Комптона, а при очень больших энергиях γ -квантов (7-10 МэВ) – образование электронно–позитронных пар и ядерный фотоэффект – выброс из ядра одного из нуклонов. Все эти взаимодействия сопровождаются возникновением в среде, например, в атмосферном воздухе, большого числа свободных заряженных частиц.

Воздействие γ -излучения (а также других видов ионизирующего излучения, например, рентгеновских лучей) на вещество характеризуется дозой ионизирующего излучения.

Поглощенная доза излучения – физическая величина, численно равная энергии излучения, приходящаяся на 1кг массы облучаемого вещества. Единицей измерения поглощенной дозы излучения является грей (Гр). $1\text{Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ – это доза излучения, при которой веществу массой 1кг передается энергия любого ионизирующего излучения 1Дж.

Экспозиционная доза излучения – физическая величина, численно равная сумме энергетических зарядов всех ионов одного знака в облученном воздухе массой 1кг.

Единицей экспозиционной дозы излучения является кулон на килограмм ($\frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$). Внесистемной единицей измерения этой дозы является

рентген (Р). $1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$.

Биологическая доза – величина, определяющая воздействие излучения на организм. Единицей биологической дозы является биологический эквивалент рентгена (бэр). 1бэр – доза любого вида ионизирующего излучения, производящая такое же биологическое воздействие, как и доза рентгеновского или γ - излучения в 1Р.

$(1\text{бэр} = 10^{-2} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}})$

Мощность дозы излучения – физическая величина, численно равная дозе излучения в единицу времени (1с). Различают: 1. Мощ-

ность поглощенной дозы (единица измерения – греи на секунду ($\frac{Гр}{с}$);

2. Мощность экспозиционной дозы (единица измерения – ампер на килограмм ($\frac{А}{кг}$)).

1.7. Закон радиоактивного распада

Количество ядер dN , распавшихся за малый интервал времени dt ,

$$dN = -\lambda N dt,$$

где N – число всех ядер, λ – постоянная распада (величина, характерная для данного радиоактивного вещества). Знак «-» показывает, что с увеличением числа распавшихся ядер dN число нераспавшихся ядер N уменьшается.

После интегрирования получаем:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 – число ядер в начальный момент времени, N – число нераспавшихся ядер через время t .

Это формула выражает закон радиоактивного распада. Он читается так: число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненциальному закону.

Количество ядер, распавшихся за время t ,

$$\Delta N = N_0 - N \Rightarrow \Delta N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}).$$

Время, за которое распадается (или не распадается) половина первоначального числа ядер, называется периодом полураспада T , т.е. если $t = T$, то $\Delta N = N = \frac{N_0}{2}$.

Из закона радиоактивного распада следует, что $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

Среднее время жизни радиоактивных ядер – это время τ , за которое число оставшихся ядер уменьшается в e раз, т.е. если $t = \tau$, то

$$N = \frac{N_0}{e} \Rightarrow \frac{N_0}{e} = N_0 e^{-\lambda \tau} \Rightarrow e^{-1} = e^{-\lambda \tau} \Rightarrow \lambda \tau = 1 \Rightarrow \tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2},$$

где e - основание натуральных логарифмов.

1.8. Активность радиоактивного вещества

Активность радиоактивного вещества

$$A = \frac{dN}{dt},$$

где dN – число распавшихся ядер (число распадов) за очень малое время dt .

Активность радиоактивного вещества численно равна числу распадов за единицу времени.

Число распавшихся ядер

$$dN = \lambda N dt \Rightarrow A = \lambda N.$$

Активность радиоактивного вещества прямо пропорциональна числу нераспавшихся ядер N , а также зависит от природы вещества (λ – постоянная радиоактивного распада, характерная для данного радиоактивного вещества).

Единицей активности является беккерель ($Бк$). $1 Бк$ – это активность препарата, в котором за одну секунду распадается одно ядро.

$$1 Бк = 1 \frac{pac}{c}.$$

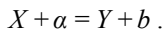
Внесистемной единицей активности является кюри ($Ки$).

$1 Ки$ – это активность такого препарата, в котором за одну секунду распадается $3,7 \cdot 10^{10}$ ядер, т.е. $1 Ки = 3,7 \cdot 10^{10} Бк$.

1.9. Ядерные реакции

Ядерная реакция – это процесс сильного взаимодействия ядра с элементарной частицей или с другим ядром, приводящий к преобразованию ядра или ядер. Ядерная реакция происходит лишь в том случае, когда указанные выше частицы сближаются до расстояния действия ядерных сил ($10^{-15} м$).

Наиболее распространенным видом ядерных реакций является взаимодействие ядра X с легкой частицей a , в результате которого образуется новое ядро Y и другая легкая частица b . Эта реакция идет по схеме:



Сокращенная запись таких реакций имеет вид: $X(a, b)Y$

В качестве легких частиц a и b могут быть нейтрон (n), протон (p), дейтрон (d) (ядро изотопа водорода 2_1H), α - частица (α) (ядро изотопа гелия 4_2He) и γ – фотон (γ).

Ядерные реакции сопровождаются выделением или поглощением энергии. Количество выделенной энергии называется **энергией реакции**. Она определяется по формуле:

$$\Delta E = 931 \Delta m,$$

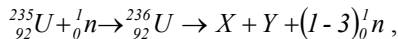
где ΔE – энергия ядерной реакции, выраженная в $MэВ$, Δm – дефект массы ядерной реакции, выраженной в а.е.м.

$$\Delta m = (m_x + m_a) - (m_y + m_b).$$

Если сумма масс конечных ядра Y и легкой частицы b превосходит сумму масс начальных ядра X и легкой частицы a , то реакция идет с поглощением энергии и энергия реакции будет отрицательной.

1.10. Вынужденное деление тяжелых ядер

При облучении изотопа урана ${}^{235}_{92}U$ медленными (энергия которых мала, порядка $3эВ$) нейтронами, которые часто называются тепловыми нейтронами, ядро урана захватывает нейтрон n , превращаясь в изотоп урана ${}^{236}_{92}U$, который является неустойчивым и распадается на два осколка с выделением нескольких нейтронов (от 1 до 3). Эта ядерная реакция называется вынужденным (в отличие от спонтанного) делением ядер. Она происходит по схеме:



где X и Y – осколки деления, т.е. ядра других атомов, лежащих где-то в середине таблицы Менделеева.

Кроме изотопа урана ${}^{235}_{92}U$ при облучение нейтронами делятся также изотопы тория ${}^{233}_{90}Th$, протактиния ${}^{231}_{91}Pa$ и плутония ${}^{239}_{94}Pu$

При делении тяжелых ядер выделяется очень большая энергия, примерно $200 MэВ$ при делении одного ядра. (Для сравнения укажем, что при химической реакции соединения одного атома углерода с двумя атомами кислорода (полное сгорание угля) выделяется энергия $\approx 5эВ$, т.е. меньше приблизительно в $4 \cdot 10^7$ раз).

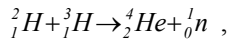
Испускание нескольких (от 1 до 3) нейтронов при делении каждого ядра приводит к образованию цепной ядерной реакции, когда эти нейтроны вызывают деление других ядер с выделением еще большего числа нейтронов и т.д. Эта реакция деления ядер протекает очень быстро, так что за очень малое время выделяется большое количество энергии и поэтому ядерная реакция происходит в виде взрыва.

Но скорость течения цепной ядерной реакции можно замедлить, используя свойства некоторых веществ поглощать часть нейтронов. Такая ядерная реакция называется управляемой. Устройство, в котором осуществляется управляемая ядерная реакция называется ядерным реактором. Использование ядерной энергии в мирных целях впервые осуществлено в нашей стране в 1954г. с пуском атомной электростанции в г. Обнинске Калужской области.

1.11. Реакция синтеза атомных ядер

Источником огромной энергии служит реакция синтеза атомных ядер – образование более тяжелых ядер из легких.

Удельная энергия связи ядер (см.рис.1) резко увеличивается при переходе от ядер тяжелого водорода(дейтерия 2_1H и трития 3_1H) к литию 6_3Li и особенно к гелию 4_2He . Поэтому при синтезе легких ядер в более тяжелые выделяется большое количество энергии. Например, при ядерной реакции синтеза ядер тяжелого водорода, проходящей по схеме



выделяется энергия, равная $17,6 \text{ МэВ}$.

Особенностью реакции синтеза легких ядер является то, что в них энергия, выделяемая на один нуклон, значительно превышает такую же энергию при делении тяжелых ядер. Например, при делении одного ядра изотопа урана ${}^{238}_{92}U$ выделяется энергия, приблизительно равная 200 МэВ , т.е. на один нуклон приходится примерно $0,84 \text{ МэВ}$. При синтезе же изотопов водорода (дейтерия 2_1H и трития 3_1H) выделяется $17,6 \text{ МэВ}$ энергии, т.е. на один нуклон приходится энергия, примерно равная $3,5 \text{ МэВ}$.

Реакция синтеза легких ядер происходит при очень высоких(сверхвысоких) температурах ($\sim 10^7 \text{ К}$), поэтому она называется термоядерной реакцией.

Впервые искусственная термоядерная реакция была проведена в нашей стране в 1953 г. в виде взрыва водородной бомбы. Взрывчатым

веществом служили смеси изотопов водорода 2_1H и 3_1H , а “нагревателем” – атомная бомба, при взрыве которой возникает высокая температура, достаточная для протекания термоядерной реакции.

В водородной бомбе термоядерная реакция носит неуправляемый характер. Для проведения управляемой термоядерной реакции необходимо создать и поддерживать температуру порядка $10^8 K$. При такой высокой температуре вещество находится в плазменном состоянии. (Плазма – это сильно ионизированный газ, в котором суммарный заряд электронов в некотором объеме равен (почти равен) суммарному заряду ионов в этом же объеме).

Но на пути проведения управляемой термоядерной реакции возникают многие трудности. В частности – как получить очень высокие температуры и как удержать плазму в заданном объеме при необходимой концентрации заряженных частиц. Любой сосуд при такой высокой температуре мгновенно испарится. В настоящее время ученые пытаются удержать плазму с помощью внешнего магнитного поля, а высокую температуру получают при пропускании через плазму очень сильного тока (электрического разряда). Под действием силы Лоренца, электрические заряды (электроны и ионы) движутся по винтовым линиям и поэтому должны быть локализованы в определенном объеме. Но пока таким способом удержать плазму удастся на очень малое время, да и температура такой плазмы еще очень низкая ($\sim 10^6 K$).

2. Элементарные частицы

2.1. Общие свойства элементарных частиц

Согласно современным представлениям истинно **элементарными частицами** следует называть частицы, которые не являются простым соединением других частиц. Например, экспериментально установлено, что α – частица не является элементарной, так как состоит из двух протонов и двух нейтронов. В свою очередь, согласно современным воззрениям, протоны и электроны не являются истинно элементарными частицами, а состоят из других элементарных частиц. Опыты по рассеянию электронов на нуклонах обнаруживают их зернистую («партоновую») структуру, заряд протона и магнитный момент нуклонов спадают к периферии по экспоненте.

Истинно элементарными частицами следует считать электрон, фотон и кварк. Однако, исторически, на данном этапе, элементарными называют частицы, размеры которых не более $R \sim 10^{-15} m$, и которые могут иметь внутреннюю структуру (например, адроны).

В предыдущих разделах курса физики встречались элементарные частицы: электрон e^- , позитрон e^+ , протон p , фотон γ , электронные нейтрино ν_e и антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Эти частицы стабильны или квазистабильны и они существуют в природе в свободном или слабосвязанном состоянии. Так квазистабильные нейтроны входят в состав атомных ядер, многие из которых являются абсолютно устойчивыми. Почти все остальные элементарные частицы крайне нестабильны.

Для описания свойств отдельных элементарных частиц вводится ряд физических величин, значениями которых они и различаются. Наиболее известными из них являются масса m , среднее время жизни τ , спин J , электрический заряд q , магнитный момент \bar{P}_m .

Массу частиц выражают в энергетических единицах (МэВ или ГэВ) в соответствии с соотношением Эйнштейна $W_0 = m_0 c^2$. Таким образом в таблицах приводится фактически не масса m частиц, а их энергия покоя. Масса упомянутых частиц:

$$m_\gamma = 0; \quad m_\nu = 0; \quad m_e \approx 0,51 \text{ МэВ};$$

$$m_p \approx 938,3 \text{ МэВ}; \quad m_n \approx 939,6 \text{ МэВ}.$$

Наиболее массивная из известных частиц (промежуточный бозон) в 100 раз массивнее протона.

Мерой стабильности частицы является среднее время жизни τ , выражаемое в секундах. Электрон, протон и нейтрино абсолютно стабильны: $\tau = \infty$. Нейтрон квазистабильная частица: $\tau_n = (898 \pm 16) \text{ с}$. Существуют группы частиц со средним временем жизни порядка $10^{-6}, 10^{-8}, 10^{-10}, 10^{-13} \text{ с}$. У наиболее короткоживущих частиц, называемых **резонансами**, $\tau \sim 10^{-24} - 10^{-23} \text{ с}$.

Спин – это собственный момент импульса частицы, т.е. ее момент импульса в системе отсчета покоя. Обычно спин выражается в единицах \hbar и принимает только целые и полуцелые значения. У электрона, протона, нейтрона и нейтрино $J = 1/2$, у фотона $J = 1$. Известны частицы со спинами от 0 (многие мезоны) до 6 (мезонный резонанс). Все частицы с целыми спинами являются бозонами (статистика Бозе-Эйнштейна), все частицы с полуцелыми спинами – фермионами (статистика Ферми-Дирака). Например, электроны – это фермионы, а фотоны – бозоны.

Электрический заряд q характеризует способность частицы участвовать в электромагнитном взаимодействии и выражается в еди-

ницах элементарного заряда $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. Для всех частиц, существующих в свободном состоянии, он принимает целочисленные значения – обычно 0 и ± 1 , для некоторых резонансов ± 2 .

Вектор собственного магнитного момента \vec{P}_m характеризует взаимодействие покоящейся частицы с внешним магнитным полем:

$$\vec{F} = \text{grad}(\vec{P}_m \vec{B}), \quad \vec{M} = [\vec{P}_m \vec{B}], \quad W = -(\vec{P}_m \vec{B}).$$

Векторы \vec{P}_m и \vec{J} параллельны:

$$\vec{P}_m = \gamma \vec{J}.$$

Если $\gamma > 0$, они одного направления, если $\gamma < 0$, противоположны.

Для проекции P_{mz} на направление оси Z можно записать:

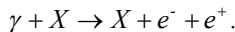
$$P_{mz} = \gamma J_z.$$

Значение P_{mz} , отвечающее максимальному значению $J_z = J$, называется просто **собственным магнитным моментом** частицы и обозначается символом μ . Таким образом:

$$\mu = \gamma J.$$

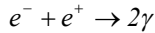
Практически у каждой частицы есть **античастица**, обычно обозначаемая тем же символом, но с добавлением тильды (\sim) над ним. Существование античастиц предсказал Дирак. Из теории следует, что массы, времена жизни и спины частиц и античастиц должны быть одинаковыми, что подтверждается на опыте. Остальные характеристики, в том числе электрический заряд и магнитный момент, у частиц и античастиц равны по модулю и противоположны по знаку. Примеры частиц и античастиц: электрон e^- и позитрон $e^+ \equiv \tilde{e}$, протон p и антипротон \tilde{p} , нейтрон n и антинейтрон \tilde{n} , нейтрино ν_e и антинейтрино $\tilde{\nu}_e$. У некоторых частиц, называемых **истинно нейтральными**, все «заряды» равны нулю и они тождественны своим античастицам. К истинно нейтральным частицам относится, например, фотон γ .

Часто позитроны образуются совместно с электронами при соударении достаточно энергичных фотонов ($E_\gamma > 2m_e c^2$) с заряженными частицами X :



Частица X (обычно атомное ядро) необходима для того, чтобы выполнялись законы сохранения энергии и импульса. Ясно, что они запрещают самопроизвольный распад одиночного фотона на электрон – позитронную пару.

Встречаясь друг с другом, медленные электроны и позитроны **аннигилируют**, порождая два (реже три) фотона:



Термин «аннигиляция» переводится как «уничтожение». В действительности уничтожения материи нет. Один ее вид (электрон и позитрон) превращается в другой вид (фотоны). При соударении достаточно быстрых электронов и позитронов могут рождаться не только фотоны, но самые разнообразные частицы, вплоть до наиболее тяжелых.

После открытия большого числа античастиц возникла задача – найти антиядра, иными словами, доказать существование антивещества, которое построено из античастиц, так же как вещество из частиц. Первое антиядро – антидейтрон (связанное состояние \bar{p} и \bar{n}) – было получено в 1965г. американскими физиками под руководством Ледермана. Впоследствии на Серпуховском ускорителе были синтезированы ядра антигелия (1970) и антитрития (1973).

2.2. Фундаментальные взаимодействия

Основным экспериментальным и теоретическим методом исследования в физике микромира является метод рассеяния. Частицы, рождающиеся в процессах рассеяния, за редкими исключениями, являются нестабильными и претерпевают распады. Все процессы рассеяния и распадов управляются законами сохранения, из которых можно отметить законы сохранения энергии, импульса, момента импульса и электрического заряда. Некоторые другие законы сохранения обсудим в дальнейшем.

Элементарные частицы обладают фундаментальным свойством – способностью к **взаимопревращениям**. Следует отметить, что образующиеся частицы не содержатся в исходных частицах, а рождаются непосредственно в процессах их соударений (рассеяний) или распадов. При заданных начальных частицах в конце процесса обычно могут возникнуть с различной вероятностью различные группировки частиц. Например:

$$\begin{array}{l}
 \pi^- + p \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow \pi^- + p \\ \rightarrow \pi^0 + n \\ \rightarrow K^+ + \Sigma^- \\ \rightarrow \dots \end{array} \right. \\
 \\
 K^+ \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \\ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \\ \rightarrow \dots \end{array} \right. \begin{array}{l} (63,5\%) \\ (21,2\%) \\ (5,6\%) \\ (11,7\%) \end{array}
 \end{array}$$

В скобках указаны относительные вероятности протекания процесса распада положительного каона на различные группировки частиц. В процессах взаимопревращений открывают ранее неизвестные частицы. Для этого сталкивают друг с другом известные стабильные частицы с как можно более высокими энергиями, а затем исследуют продукты протекающих реакций. До начала 50-х годов XX в. основным источником частиц с высокими энергиями служило космическое излучение. В настоящее время – ускорители.

Все процессы, в которых участвуют элементарные частицы, обусловлены взаимодействиями между ними. В настоящее время различают четыре типа фундаментальных взаимодействий: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.

Сильное взаимодействие свойственно частицам, называемым адронами (см. таблицу 1), к числу которых принадлежат, в частности, протон p и нейтрон n . Наиболее известное его проявление – ядерные силы, обеспечивающие существование атомных ядер.

В **электромагнитном взаимодействии** непосредственно участвуют только электрически заряженные частицы и фотоны. Оно ответственно, например, за процессы рождения и аннигиляции электрон – позитронной пары.

Слабое взаимодействие присуще всем частицам, кроме фотонов. Наиболее известное его проявление – бета-превращение атомных ядер. Оно же обеспечивает нестабильность многих элементарных частиц, например нейтрона. Интенсивно изучаются процессы рассеяния нейтрино и антинейтрино на атомы ядер, протонах и электронах. В этом отношении нейтрино – уникальные частицы, так как они могут участвовать только в слабом взаимодействии (если не считать гравитационного).

Гравитационное взаимодействие свойственно всем телам Вселенной. Гравитационное взаимодействие предельно слабое и в мире элементарных частиц при обычных энергиях непосредственной роли не играет. Здесь гравитация становится существенной лишь при энергиях $W \sim 10^{28}$ эВ, которые соответствуют расстояниям $R \sim 10^{-35}$ м (!).

Фундаментальные взаимодействия различаются интенсивностями α , радиусами действия R и характерными временами τ .

Под **отношением интенсивностей** взаимодействий в первом приближении можно понимать отношение энергий этих взаимодействий для двух одинаковых частиц (например, протонов), разделенных достаточно малым расстоянием. Исходя из этого определения, можно получить, что фундаментальные взаимодействия характеризуются следующими (относительными) интенсивностями:

$$\alpha_S \sim 1, \quad \alpha_E \sim 10^{-2}, \quad \alpha_W \sim 10^{-10}, \quad \alpha_G \sim 10^{-28}.$$

Здесь нижние индексы – символы взаимодействий: S - сильное (strong), E - электромагнитное (electromagnetic), W - слабое (weak), G - гравитационное (gravitational). Таким образом, среди взаимодействий, которые существуют в мире элементарных частиц, сильное – самое интенсивное, слабое – наименее интенсивное, откуда их названия.

Радиус R взаимодействия связывается с зависимостью энергии данного взаимодействия от расстояния между частицами. Для сильного и слабого взаимодействий энергия убывает очень быстро – по экспоненциальному закону (взаимодействие адронов, как целого). Они скажутся лишь на малых расстояниях. Электромагнитные и гравитационные силы убывают по степенному закону – медленно. Значения R_S и R_W находятся из опытных данных. В итоге:

$$R_S \sim 10^{-15} \text{ м}, \quad R_E = \infty,$$

$$R_W \sim 10^{-18} \text{ м}, \quad R_G = \infty.$$

Понятие **характерного времени** τ взаимодействия условно. Эмпирически его можно ввести как минимальное время жизни частиц, подверженных распадам в результате данного взаимодействия. Таким образом:

$$\tau_S \sim 10^{-23} \text{ с}, \quad \tau_E \sim 10^{-20} \text{ с},$$

$$\tau_W \sim 10^{-13} \text{ с}, \quad \tau_G \approx ?$$

Фундаментальные взаимодействия динамически различаются типами обменного механизма, а также свойственными им законами сохранения. При этом, чем более интенсивно взаимодействие, тем больше ему отвечает законов сохранения.

2.3. Классификация элементарных частиц

Таблица 1

Группа	Название частицы	Символ		Заряд, ед. е	Масса покоя, МэВ	Спин, ед. \hbar	Лептонное число L	Барионное число B	Приблизительное время жизни, с
		частицы	Античастицы						
Фотоны	Фотон	γ		0	0	1	0	0	Стабилен
Лептоны	Электрон	e^-	e^+	1	0,511	1/2	+1	0	Стабильны
	Позитрон								
	Электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	+1	0	Стабильно
	Мюон	μ^-	μ^+	1	106	1/2	+1	0	$2,2 \cdot 10^{-6}$
	Мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	+1	0	Стабильно
	Таон	τ^-	τ^+	1	1784	1/2	+1	0	$3,5 \cdot 10^{-13}$
Таонное нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	1/2	+1	0	Стабильно	

Группа		Название частицы	Символ		Заряд, ед. е	Масса покоя, МэВ	Спин, ед. h	Легтонное число L	Барионное число B	Приближительное время жизни, с
			частицы	Античастицы						
Адроны	Мезоны	Пионы	π^0		0	135	0	0	0	$0,83 \cdot 10^{-16}$
			π^+	π^-	1	140	0	0	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$
		Каоны	K^0	\tilde{K}^0	0	498	0	0	0	$10^{-8} \cdot 10^{-10}$
			K^+	K^-	1	494	0	0	0	$1,2 \cdot 10^{-8}$
		Эта-мезон	η^0		1	549	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$
		Барионы	Протон	p	\tilde{p}	1	938,28	1/2	0	+1
	Нейтрон		n	\tilde{n}	0	939,57	1/2	0	+1	918
	Гиперон: лямбда		Λ^0	$\tilde{\Lambda}^0$	0	1116	1/2	0	+1	$2,5 \cdot 10^{-10}$
			Σ^0	$\tilde{\Sigma}^0$	0	1192	1/2	0	+1	$5,8 \cdot 10^{-20}$
	сигма		Σ^+	$\tilde{\Sigma}^+$	1	1189	1/2	0	+1	$0,8 \cdot 10^{-10}$
			Σ^-	$\tilde{\Sigma}^-$	1	1197	1/2	0	+1	$1,5 \cdot 10^{-10}$
	кси		Ξ^0	$\tilde{\Xi}^0$	0	1315	1/2	0	+1	$3 \cdot 10^{-10}$
			Ξ^-	$\tilde{\Xi}^-$	1	1321	1/2	0	+1	$1,7 \cdot 10^{-10}$

		омега	Ω^-	$\tilde{\Omega}^-$	1	1672	3/2	0	+1	$0,8 \cdot 10^{-10}$
--	--	-------	------------	--------------------	---	------	-----	---	----	----------------------

В таблице 1 элементарные частицы объединены в три группы: фотоны, лептоны и адроны. Элементарные частицы, отнесенные к каждой из этих групп, обладают общими свойствами и характеристиками, которые отличают их от частиц другой группы.

К группе **фотонов** относится единственная частица – фотон, который переносит электромагнитное взаимодействие и является бозоном. В электромагнитном взаимодействии участвуют в той или иной степени все частицы, как заряженные, так и нейтральные (кроме нейтрино).

К группе **лептонов** относятся электрон, мюон, таон, и соответствующие им нейтрино, а также их античастицы. Все лептоны имеют спин равный $1/2$ и, следовательно, являются фермионами. Лептоны в сильных взаимодействиях не участвуют.

Элементарным частицам, относящимся к группе лептонов, приписывают так называемое **лептонное число (лептонный заряд) L** . Обычно принимают, что $L = +1$ для лептонов ($e^-, \mu^-, \tau^-, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$), $L = -1$ для антилептонов ($e^+, \mu^+, \tau^+, \tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$) и $L = 0$ для всех остальных элементарных частиц. Согласно закону сохранения лептонного числа, в замкнутой системе элементарных частиц при всех без исключений процессах взаимопревращаемости лептонное число сохраняется.

Пример 1. β – распад:

$$\begin{aligned} n &\rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e \\ L &\rightarrow 0 = 0 + 1 - 1 \end{aligned}$$

Пример 2. e – захват:

$$\begin{aligned} P + e^- &\rightarrow \bar{n} + \nu_e \\ L &\rightarrow 0 + 1 = 0 + 1. \end{aligned}$$

Из приведенных примеров видно, что алгебраическая сумма лептонного заряда сохраняется: сумма до процесса равна сумме после процесса. Полный лептонный заряд

$$L = L_e + L_\mu + L_\tau,$$

где L_e – электронный заряд (не путать с электрическим зарядом), L_μ – мюонный заряд, L_τ – таонный заряд. Во всех взаимодействиях сохраняется не только L , но и каждый из его компонент.

Адронами называются элементарные частицы, которые участвуют в сильном взаимодействии. Все они подвержены также электромагнитному, слабому и гравитационному взаимодействию. Класс адронов насчитывает более 300 частиц (если считать и античастицы).

Различают стабильные адроны со средним временем жизни $\tau \gg 10^{-23}$ с и **резонансы**, времена жизни которых $\tau \sim 10^{-24} - 10^{-23}$ с. Резонансы распадаются в результате сильного взаимодействия, «стабильные» адроны распадаются в результате слабого или электромагнитного взаимодействия.

Адроны, обладающие целыми спинами, называются **мезонами** и относятся к бозонам. Адроны, имеющие полуцелые спины, называются **барионами** и относятся к фермионам.

Бывают стабильные мезоны и стабильные барионы, а также мезонные резонансы и барионные резонансы. Для характеристики этого различия вводят физическую величину, аналогичную лептонному заряду – **барионный** заряд B . По определению у всех барионов $B = +1$, у всех антибарионов $B = -1$, у всех прочих частиц (в том числе и у мезонов) $B = 0$. При всех взаимопревращениях элементарных частиц выполняется закон **сохранения барионного заряда**. Его можно продемонстрировать на примере β -распада:

$$n \rightarrow P + e^- + \tilde{\nu}_e;$$

$$B \rightarrow 1 = 1 + 0 + 0.$$

или на примере аннигиляции протона и антипротона:

$$\tilde{P} + P \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

$$B \rightarrow -1 + 1 = 0 + 0 + 0 + 0 + 0.$$

Следует отметить, что элементарным частицам соответствует еще ряд характеристик: изоспин, странность, четность и т.д. Им отвечают соответствующие законы сохранения. Чем интенсивнее взаимодействие, тем больше ему присуще законов сохранения.

Во всех взаимодействиях сохраняются безоговорочно только энергия, импульс, момент импульса и электрический заряд. В слабом взаимодействии выполняются только эти универсальные законы сохранения. В процессах с сильным взаимодействием сохраняются также

изоспин и его проекция, странность, четность, очарование и многие другие физические величины.

2.4. Кварки

В настоящее время уровень элементарных частиц расщеплен на уровень адронов и уровень фундаментальных частиц. К числу последних относятся фотон, лептоны и кварки.

Адроны, согласно современным воззрениям, являются составными частицами (состоят из кварков). По мере накопления экспериментальных данных теория кварков развивается.

Согласно модели Гелл-Манна–Цвейга все известные в то время (60-ые годы) адроны можно было построить, постулировав существование трех типов кварков: u, d и S (от up – «верхний», down – «нижний» и strong – «странный») и соответствующих антикварков (\bar{u} , \bar{d} , \bar{S}). Им приписывались характеристики, указанные в таблице 2 (в том числе дробные электрические и барионные заряды). Самое удивительное (почти невероятное) свойство кварков связано с их электрическим зарядом, поскольку никто не находил частиц с дробным значением элементарного электрического заряда. Спин кварка равен $1/2$, поскольку только из фермионов можно «сконструировать» как фермионы (нечетное число фермионов), так и бозоны (четное число фермионов).

Таблица 2.

Кварк (антикварк)	Электрический заряд в единицах e	Барионное число B	Спин в единицах \hbar	Странность
$u(\bar{u})$ верхний (up)	$+2/3(-2/3)$	$+1/3(-1/3)$	$1/2$	0
$d(\bar{d})$ нижний (down)	$-1/3(+1/3)$	$+1/3(-1/3)$	$1/2$	0
$s(\bar{s})$ «странный» (strange)	$-1/3(+1/3)$	$+1/3(-1/3)$	$1/2$	-1 (+1)
$c(\bar{c})$ «очарованный» (charm)	$+2/3(-2/3)$	$+1/3(-1/3)$	$1/2$	-1 (+1)
$t(\bar{t})$ «истинный» (truth)	$+2/3(-2/3)$	$+1/3(-1/3)$	$1/2$	0
$b(\bar{b})$ «преlestный»	$-1/3(+1/3)$	$+1/3(-1/3)$	$1/2$	0

(beauty)				
----------	--	--	--	--

Адроны состоят из кварков следующим образом: мезоны из пары кварк – антикварк, барионы – из трех кварков (антибарионы – из трех антикварков). Так например, пион π^+ имеет кварковую структуру $u\bar{d}$, пион π^- – $\bar{u}d$, каон K^+ – $\bar{d}s$, протон – uud , нейтрон – udd , Σ^+ – гиперон – uus , Σ^0 – гиперон – uds и т. д.

Чтобы теория кварков удовлетворяла принципу Паули (для фермионов), пришлось предположить, что каждый кварк (антикварк) обладает специфической квантовой характеристикой – цветом: «желтым», «синим» и «красным». Развитие модели кварков привело к увеличению их количества (см. таблицу 2).

Модель кварков оказалась плодотворной. Она позволила определить почти все квантовые числа адронов, предсказала возникновение новых частиц, которые были впоследствии обнаружены экспериментально.

Попытки непосредственного обнаружения, регистрации кварков оказались безуспешными. Существует точка зрения, что кварки в принципе не могут существовать в свободном состоянии, а могут находиться лишь внутри адронов. Энергия взаимодействия между кварками с увеличением расстояния между ними не убывает, а возрастает. Принципиальная справедливость общих концепций теории кварков сейчас не вызывает сомнений. Кварки несомненно существуют, но только в связанном состоянии. Поэтому сам термин «существование» обрел в физике микромира несколько неожиданную трактовку, и он требует даже философского переосмысления.

2.5. Переносчики фундаментальных взаимодействий

Крупнейшим достижением физики 70-х годов XX века явилось расщепление единого ранее уровня элементарных частиц на уровень адронов (составных частиц) и уровень фундаментальных частиц. Не менее крупное ее достижение – установление единства механизмов фундаментальных взаимодействий: **все фундаментальные взаимодействия имеют обменный характер.**

Переносчиками электромагнитного взаимодействия являются нейтральные ($q = 0$) безмассовые ($m = 0$) фотоны γ . В нем участвуют все кварки (а значит все адроны) и заряженные лептоны (а также переносчики слабого взаимодействия – промежуточные бозоны W^+ и W^- ;

см. ниже). Разумеется, в электромагнитном взаимодействии участвуют и сами фотоны.

Переносчиками сильного взаимодействия являются восемь электрически нейтральных ($q = 0$) и безмассовых ($m = 0$) глюонов g , (glue (англ.) – клей). Кварк, входящий в состав адрона, испускает глюон, в силу чего состояние движения адрона изменяется. Этот глюон поглощается кварком, входящем в состав другого адрона и меняет состояние его движения. В результате возникает взаимодействие адронов друг с другом.

Переносчиками слабого взаимодействия являются **промежуточные бозоны** W^+ , W^- , Z^0 , которые имеют электрический заряд ($q = \pm 1$) и обладают большими массами:

$$m_W \approx 81 \text{ ГэВ}, \quad m_Z \approx 93 \text{ ГэВ}.$$

Промежуточные бозоны могут испускаться и поглощаться как кварками, так и лептонами. Поэтому в слабом взаимодействии участвуют практически все частицы (кроме фотона и гравитона). Сами они, конечно, участвуют в слабом взаимодействии (и гравитационном), а частицы W^+ и W^- также в электромагнитном взаимодействии, но сильному взаимодействию промежуточные бозоны не подвержены. Адекватная теория слабого взаимодействия создана только в 70-е годы XX века, и большинство ее весьма неочевидных предсказаний уже подтверждено на опыте. В частности – существование самих промежуточных бозонов.

Переносчиками гравитационного взаимодействия являются нейтральные ($q = 0$) безмассовые ($m = 0$) гравитоны G , имеющие спин $J = 2$. Это взаимодействие универсально в том смысле, что в нем участвуют все частицы. Экспериментально гравитоны не обнаружены. Квантовая теория в стадии разработки и перед ней много проблем. Общепринятой классической (не квантовой) теорией гравитационного взаимодействия является эйнштейновская общая теории относительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.3. М.: Наука, 1989.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Академия, 2003.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2003.
4. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика. Ч.2. М.: Наука, 1986.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	3
1. Атомное ядро	5
1.1. Состав и характеристики атомного ядра	5
1.2. Масса и энергия связи	6
1.3. Модели атомного ядра	8
1.4. Ядерные силы	8
1.5. Радиоактивность	10
1.6. Гамма-излучение. Доза излучения	12
1.7. Закон радиоактивного распада	14
1.8. Активность радиоактивного вещества	15
1.9. Ядерные реакции	15
1.10. Вынужденное деление тяжелых ядер	16
1.11. Реакция синтеза атомных ядер	17
2. Элементарные частицы	18
2.1. Общие свойства элементарных частиц	18
2.2. Фундаментальные взаимодействия	21
2.3. Классификация элементарных частиц	24
2.4. Кварки	27
2.5. Переносчики фундаментальных взаимодействий	29
Библиографический список	30