

§13. Уравнение Шрёдингера. Волновая функция: физический смысл и свойства

Уравнение Шрёдингера не выводится, а постулируется (1926 г.) и носит характер закона природы

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(x, y, z, t) \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad (1)$$

где $\hbar = h/(2\pi)$, m – масса частицы, Δ – оператор

$$\Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}, \quad i - \text{мнимая}$$

единица, $U(x, y, z, t)$ – потенциальная функция частицы в силовом поле, в котором она движется, $\Psi(x, y, z, t)$ – искомая волновая функция частицы.

Описание состояния микрообъекта с помощью волновой функции имеет статистический, вероятностный характер. Физический смысл имеет не сама Ψ -функция, а квадрат её модуля $|\Psi|^2$, определяющий вероятность нахождения частицы в момент времени t в области с координатами x и $x+dx$, y и $y+dy$, z и $z+dz$. Квадрат модуля волновой функции даёт плотность вероятности нахождения частицы в соответствующем месте пространства:

$$\frac{dP}{dV} = |\Psi|^2 = \Psi \cdot \Psi^*.$$

Уравнение (1) справедливо для любой частицы, движущейся со скоростью $v \ll c$. Для того, чтобы волновая функция являлась объективной характеристикой состояния микрочастиц, она должна обладать рядом свойств или удовлетворять ряду ограничительных условий:

1) волновая функция должна быть **конечной** (вероятность не может быть больше единицы), **однозначной** (вероятность не может быть неоднозначной величиной) и **непрерывной** (вероятность не может изменяться скачком);

2) производные $\frac{\partial \Psi}{\partial x}, \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \frac{\partial \Psi}{\partial t}$ должны быть непрерывны;

3) функция $|\Psi|^2$ должна быть **интегрируема**; это условие в простейших случаях сводится к **условию нормировки вероятностей**

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dV = 1, \quad (2)$$

где данный интеграл вычисляется по всему бесконечному пространству, т. е. по координатам x, y, z от $-\infty$ до ∞ . Это означает, что частица при данном условии находится где-то в пространстве.

Волновая функция Ψ позволяет вычислять средние значения физических величин, характеризующих данный микрообъект. Например, среднее расстояние $\langle r \rangle$ электрона от ядра вычисляют по формуле

$$\langle r \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} r |\Psi|^2 dV.$$

Уравнение (1) является уравнением Шрёдингера, зависящим от времени. Для многих физических явлений, происходящих в микромире, уравнение (1) можно упростить, исключив зависимость Ψ от времени, иными словами, найти уравнение Шрёдингера для **стационарных состояний** – состояний с фиксированными значениями энергии. Это возможно, если силовое поле, в котором движется частица, стационарно, т. е. функция $U=U(x, y, z)$ не зависит явно от времени и имеет смысл потенциальной энергии. В данном случае решение уравнения Шрёдингера может быть представлено в виде произведения двух функций, одна из которых есть функция только координат, другая – только времени, причём зависимость от времени выражается множителем $e^{-i\omega t} = e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}\right)t}$, так что

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}\right)t}, \quad (3)$$

где E – полная энергия частицы, постоянная в случае стационарного поля. Подставляя (3) в (1), получим

$$-\frac{\hbar^2}{2m} e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}\right)t} \Delta \psi + U \psi e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}\right)t} = i\hbar (-iE/\hbar) \psi e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}\right)t};$$

откуда после деления на общий множитель $e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}\right)t}$ и соответствующих преобразований придём к уравнению

$$\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0, \quad (4)$$

которое называется **уравнением Шрёдингера для стационарных состояний**. В это уравнение в качестве параметра входит полная энергия E частицы.

§14. Атом водорода по теории Шрёдингера

Рассмотрим **квантовомеханическую теорию** атомов, гораздо более полную, чем старая теория Бора. Она сохраняет некоторые аспекты старой теории. Например, электроны могут находиться в атоме только в дискретных состояниях с определенной энергией; при переходе электрона из одного состояния в другое испускается (или поглощается) фотон. Но **квантовая механика** – не просто обобщение теории Бора. Она представляет собой гораздо более глубокую теорию и рисует совершенно иную картину строения атома. Согласно квантовой механике, не существует вполне определённых круговых орбит электронов, как в теории Бора. В силу волновой природы электрон «размазан» в пространстве, подобно «облаку» отрицательного заряда.

Электронное облако в основном состоянии водорода сферически-симметрично, как показано на **рис. 1**. Электронное облако грубо характеризует «размеры» атома, но, поскольку облако может не иметь чётко выраженной границы, атомы также не имеют ни точной границы, ни строго определённого размера.

Строчной греческой буквой ψ мы обозначили волновую функцию как функцию только положения. Если имеется зависимость от времени, то, как и прежде, волновую функцию будем обозначать прописной греческой буквой $\Psi(r, t)$.

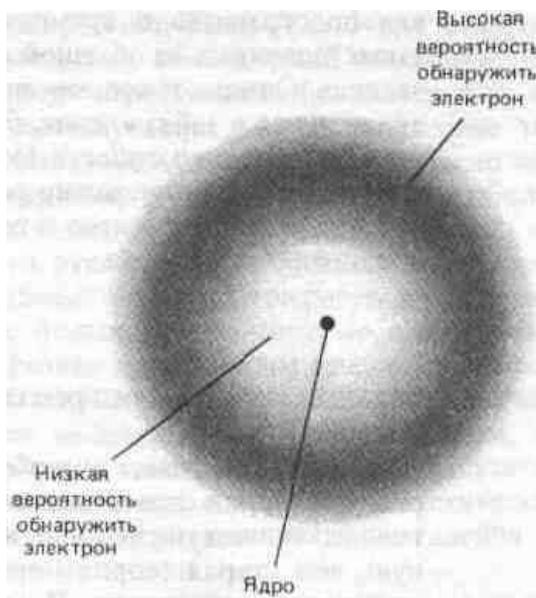


Рис. 1. Электронное облако, или распределение вероятности, для основного состояния атома водорода. Облако плотнее всего (что свидетельствует о наибольшей вероятности) на расстоянии $0,53 \cdot 10^{-10}$ м от ядра. Именно это значение модель Бора предсказывает для радиуса первой орбиты. Но в отличие от модели Бора квантовая механика утверждает, что электрон в любой момент времени может находиться и ближе к ядру, и дальше от ядра.

Как мы увидим ниже, не все электронные облака сферически-симметричны. Обратите внимание на то, что, хотя функция $\psi(r)$ при больших r , как следует из приведённого выше выражения, сильно убывает, она не обращается в нуль на конечных расстояниях. Так $\psi \rightarrow 0$ только при $r \rightarrow \infty$.

Электронное облако можно интерпретировать как с корпускулярной, так и с волновой точек зрения. Напомним, что под частицей мы понимаем нечто локализованное в пространстве: в любой момент времени частица занимает вполне определённое положение в пространстве. Волна же размыта в пространстве. Следовательно, размытое в пространстве электронное облако как на **рис. 1**, является результатом волновой природы электронов. Электронное облако можно также интерпретировать как **распределение вероятностей** для данной частицы. Если измерить положение электрона (как частицы) 500 раз, то большинство результатов измерений соответствовало бы точкам, в которых вероятность велика (более тёмная область на **рис. 1**), хотя электрон случайно может оказаться и там, где вероятность мала. Мы не можем предсказать траектории, по которой будет двигаться электрон. После измерения его положения точно предсказать, где будет электрон находиться в последующие моменты времени, невозможно. Мы можем лишь вычислить вероятность обнаружить электрон в различных точках. Ясно, что подобная ситуация в корне отличается от классической ньютоновской физики.

Рассмотрим теперь более подробно, что даёт квантовая механика в случае атома водорода.

Для атома водорода квантовая механика предсказывает точно те же энергетические уровни (**рис.2**), что и теория Бора, т. е.

$$E_n = -\frac{13,6\text{эВ}}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где n – целое число. В упрощённой теории Бора существовало только одно квантовое число n . В квантовой механике, чтобы задать каждое состояние атома, необходимы **четыре различных квантовых числа**.

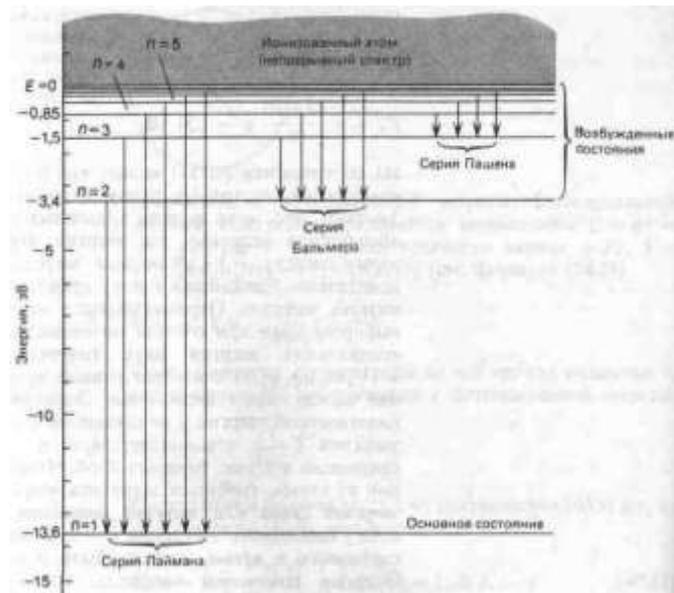


Рис. 2. Схема уровней энергии в атоме водорода, объясняющая происхождение спектральных линий в сериях Лаймана, Бальмера и Пашена.

Квантовое число n из теории Бора сохраняется и в квантовой механике под названием **главное квантовое число**. Оно может принимать любое целочисленное значение от 1 до ∞ . Как было показано выше, от n зависит полная энергия состояния атома водорода.

Орбитальное квантовое число l связано с моментом импульса электрона. Оно может принимать целочисленные значения от 0 до $n - 1$. В основном состоянии с $n = 1$ орбитальное квантовое число l может быть только равно нулю, но, например, при $n = 3$ оно может принимать значения 0, 1 и 2. Величина момента импульса L связана с квантовым числом l соотношением

$$L = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi}.$$

В атоме водорода полная энергия не зависит от значения l , а зависит только от n . Но в атомах с двумя и большим числом электронов энергия зависит от l так же, как и от n .

Магнитное квантовое число m_l характеризует ориентацию момента импульса и может принимать целочисленные значения от $-l$ до $+l$. Например, если $l = 2$, то m_l может быть равно -2, -1, 0, +1 или +2. Так как момент импульса – вектор, не удивительно, что он квантуется по величине и по направлению. При $l = 2$ возможны пять различных ориентации, условно изображенных на **рис. 3**.

В квантовой механике ориентацию момента импульса обычно задают, указывая его компоненту вдоль оси z . Эта компонента L_z связана с m_l соотношением

$$L_z = m_l \frac{h}{2\pi}.$$

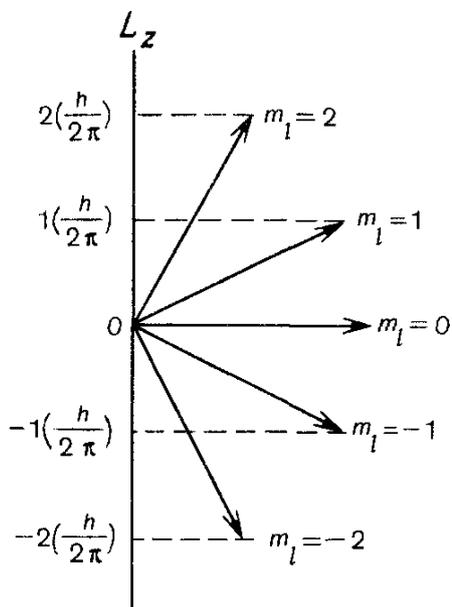


Рис. 3. Квантование направления углового момента при $l=2$

Название магнитного квантового числа m_l заимствовано не из теории (которая устанавливает его связь с L_z), а из эксперимента: было обнаружено, что при газовом разряде спектральные линии расщепляются в магнитном поле на несколько линий, расположенных близко друг к другу. (Это расщепление называют **эффектом Зеемана**). Отсюда следует, что энергетические уровни расщепляются (рис. 4), т. е. энергия состояния при наличии внешнего магнитного поля зависит не только от n , но и от m_l . Отсюда и название – «магнитное квантовое число».

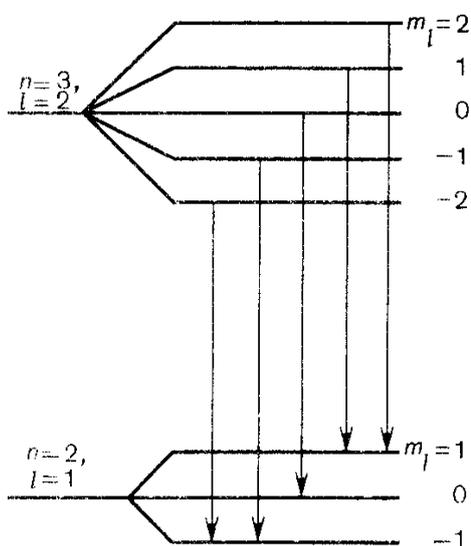


Рис. 4. Во внешнем магнитном поле уровень энергии $n=3$, $l=2$ расщепляется на пять отдельных уровней, соответствующих пяти значениям m_l (2, 1, 0, -1, -2). Уровень $n=2$, $l=1$ расщепляется на три уровня ($m_l=1, 0, -1$). Между уровнями могут происходить переходы (не все из которых показаны) с испусканием фотонов, соответствующих нескольким частотам, незначительно различающимся между собой.

Наконец, существует **спиновое квантовое число** m_s , которое принимает только два значения $m_s = +1/2$ и $m_s = -1/2$. Существование этого квантового числа в отличие от квантовых чисел n , l и m_l , не следовало

из первоначального варианта теории Шрёдингера. Позднее П. А. М. Дирак модифицировал теорию Шрёдингера, показав, что спиновое квантовое число является релятивистским эффектом. Указание о необходимости введения m_s , впервые было получено из эксперимента. Тщательное исследование спектральных линий водорода показало, что каждая линия в действительности состоит из двух (или большего числа) близких линий. Это явление получило название **тонкой структуры**. Сначала было высказано предположение о том, что тонкое расщепление энергетических уровней может быть вызвано моментом импульса, связанным со спином электрона; электрон, обращаясь вокруг атомного ядра, одновременно вращается вокруг собственной оси подобно тому, как Земля, двигаясь вокруг Солнца, одновременно вращается вокруг своей оси. Взаимодействие слабого тока, создаваемого вращающимся электроном, с магнитным полем, обусловленным движением заряда по орбите вокруг ядра, и вызывает наблюдаемое тонкое расщепление энергетических уровней. (Таким образом, существует слабая зависимость энергии от m_l и m_s .)

Представление об электроном, вращающемся вокруг своей оси, ныне полностью отброшено. Мы не можем представлять электрон как локализованный объект, тем более вращающийся вокруг своей оси. Важно лишь, что электрон может находиться в двух различных состояниях, отвечающих присущей ему характеристике, которую мы (возможно, не совсем удачно) называем «спином». Эти два возможных значения спинового квантового числа m_s ($+1/2$ и $-1/2$) часто характеризуют как «**спин вверх**» и «**спин вниз**», имея в виду два возможных направления спинового момента импульса.

Допустимые значения всех четырёх квантовых чисел электрона в атоме водорода представлены в табл. 1.

Таблица 1. Квантовые числа электрона

Название	Обозначение	Разрешённые значения
Главное	n	1, 2, 3, ..., ∞
Орбитальное	l	При заданном n величина l может принимать значения 0, 1, 2, ..., $n-1$
Магнитное	m_l	При заданных n и l величина m_l может принимать значения $l, l-1, \dots, 0, \dots, -l$
Спиновое	m_s	Для любого набора n, l и m_l величина m_s может принимать значения $+1/2$ или $-1/2$

Хотя энергетические уровни в атоме водорода слабо зависят от l и m_l эти квантовые числа влияют на функцию распределения (вероятностей) электрона в пространстве. При $n=1$ (основное состояние) l и m_l могут принимать только нулевые значения. Функция распределения для этого случая изображена на рис. 1. При $n=2$ квантовое число l может быть равно 0 или 1. Функция распределения для случая $n=2, l=0$ изображена на рис. 5, а. Видно, что она отличается от распределения в основном состоянии, хотя и сохраняет сферическую симметрию. При $n=2, l=1$

распределение перестает быть сферически-симметричным и по форме напоминает гантель (рис. 5, б). Это распределение соответствует какому-то одному значению m_l , например $m_l=1$. При $m_l=0$ и $m_l=-1$ распределения будут также иметь вид гантелей, но симметричных относительно других осей.

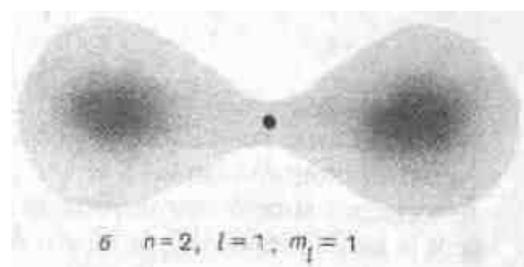
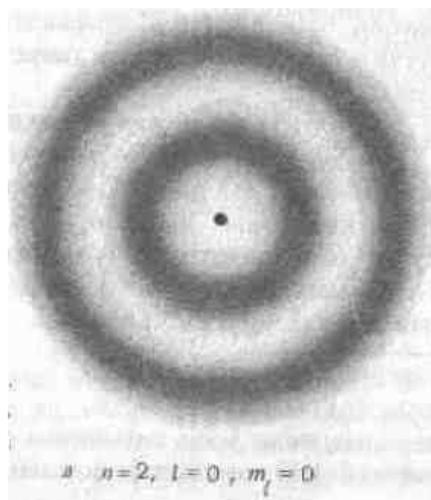


Рис. 5. Электронное облако (или распределение вероятности) для состояний $n=2$ в атоме водорода

Хотя функцию распределения электрона в пространстве можно вычислить для различных состояний, измерить её экспериментально довольно трудно. Большую часть экспериментальной информации о строении атома получают в результате тщательного изучения спектров испускания в различных условиях.

§15. Принцип запрета Паули. Распределение электронов в атоме по энергетическим уровням

Рассмотрим строение более сложных атомов с двумя и большим числом электронов. Энергетические уровни таких атомов можно определить экспериментально по спектрам испускания. Число электронов в нейтральном атоме называется **атомным номером** Z . Число Z равно также числу протонов ядра и определяет свойства атома.

Хотя для описания сложных атомов делались попытки модифицировать теорию Бора, развитие квантовой механики после 1925 г. оказалось значительно более успешным. Однако математический аппарат при этом существенно усложнился, так как в многоэлектронных атомах каждый электрон не только притягивается ядром, но и отталкивается другими электронами.

Простейший подход был основан на предположении, что каждый электрон в атоме находится в состоянии, которое характеризуется квантовыми числами n , l , m_l и m_s . Но для объяснения возможных конфигураций электронов в атоме оказался необходимым новый

принцип. Такой принцип был введен Вольфгангом Паули (1900-1958) и получил название **принцип запрета Паули**. Этот принцип гласит: **два электрона не могут находиться в атоме в одном и том же квантовом состоянии**. Иначе говоря, два электрона не могут иметь одинакового набора квантовых чисел n , l , m_l и m_s .

Рассмотрим теперь строение некоторых простых атомов в основном состоянии. Следующий за атомом водорода атом гелия имеет два электрона. Оба электрона могут иметь главное квантовое число $n=1$, так как спин одного из них может быть направлен вверх ($m_s=+1/2$), а другого – вниз ($m_s=-1/2$), и принцип Паули не будет нарушен. Разумеется, так как $n=1$, квантовые числа l и m_l должны быть равны нулю (табл. 14.1). Следовательно, в основном состоянии атома гелия электроны имеют квантовые числа, приведённые в табл. 14.2.

У лития три электрона, два из которых могут находиться в состоянии с $n=1$. Но у третьего электрона главное квантовое число n не может быть равно 1, так как в этом случае нарушился бы принцип Паули. Следовательно, третий электрон должен иметь $n=2$.

Так как уровень с $n=2$, $l=0$ имеет более низкую энергию, чем уровень $n=2$, $l=1$, квантовые числа электронов в основном состоянии будут такими, как показано в табл. 14.2. Разумеется, квантовые числа третьего электрона могли быть и другими, например 3, 1, -1, 1/2, но атом лития в этом случае оказался бы в возбуждённом состоянии с более высокой энергией. Поэтому он спустя короткое время перешел бы в основное состояние с испусканием фотона.

Таблица 14.2

Гелий, $Z=2$			
n	l	m_l	m_s
1	0	0	1/2
1	0	0	-1/2
Литий, $Z=3$			
n	l	m_l	m_s
1	0	0	1/2
1	0	0	-1/2
2	0	0	1/2
Натрий, $Z=11$			
n	l	m_l	m_s
1	0	0	1/2
1	0	0	-1/2
2	0	0	1/2
2	0	0	-1/2
2	1	1	1/2
2	1	1	-1/2
2	1	0	1/2
2	1	0	-1/2
2	1	-1	1/2
2	1	-1	-1/2
3	0	0	1/2

При комнатной температуре, если нет подвода энергии (как в случае разрядной трубки), большинство атомов находится в основном состоянии.

Аналогично можно продолжить перечисление квантовых чисел каждого электрона в основном

состоянии всё более сложных атомов. Результат для натрия с 11 электронами представлен в табл. 14.2.

Об электронах с одинаковым значением n говорят, что они принадлежат одной оболочке. Электроны с $n=1$ принадлежат первой оболочке (называемой К-оболочкой), электроны с $n=2$ – второй оболочке (L-оболочке) и т. д. В каждой из оболочек электроны распределяются по подоболочкам, соответствующим данному l . Об электронах с одинаковым значением l говорят, что они принадлежат одной подоболочке. Часто для обозначения l цифры заменяют буквами:

l	0	1	2	3	4	...
Буквенное обозначение	s	p	d	f	g	...

Таким образом, электроны с $l=0$ образуют s-подоболочку, с $l=1$ – p-подоболочку, с $l=2$ – d-подоболочку; начиная с $l=3$, обозначающие подоболочки буквы следуют в алфавитном порядке: f, g, h, i и т. д. [Первые буквы s, p, d первоначально означали аббревиатуры английских слов «sharp» (резкая), «principle» (главная), «diffuse» (размытая), которые характеризовали особенности линий в экспериментально наблюдаемых спектрах.] Принцип запрета Паули ограничивает число электронов в каждой оболочке и подоболочке. Например, у атома натрия оболочки с $n=1$ и $n=2$ полностью заполнены (как и их подоболочки), и одиннадцатый электрон заполняет оболочку с $n=3$.

Так как энергетические уровни почти полностью определяются значениями n и l , электронная конфигурация обычно задается указанием n и буквенным обозначением l , а число электронов в каждой подоболочке указывают в виде верхнего индекса. При такой записи электронная конфигурация основного состояния натрия выглядит следующим образом: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$.

Максимальное число электронов, находящихся в состояниях, определяемых данным главным квантовым числом (максимальное число электронов в оболочке), равно

$$Z(n) = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2.$$

Поскольку орбитальное квантовое число принимает значения от 0 до $n-1$, число подоболочек равно порядковому номеру n оболочки. Количество электронов в подоболочке определяется магнитным и спиновым квантовыми числами: максимальное число электронов в подоболочке с данным l равно $2(2l+1)$.

§16. Атомное ядро. Состав и характеристика. Изотопы. Ядерные силы

В 1911 г. в результате исследований, проведенных Резерфордом по рассеянию α -частиц при прохождении их через вещество, был открыт протон – ядро атома водорода, который обладает положительным электрическим зарядом, равным по модулю заряду электрона.

Точные измерения электрического заряда атомных ядер были выполнены в 1913 г. английским физиком Генри Мозли. Заряды ядер атомов различных

химических элементов он определил по спектрам рентгеновского излучения, испускаемого атомами при облучении вещества потоком электронов высокой энергии. Мозли установил, что заряд ядра атома $q_{\text{я}}=Z|e|$, где $|e|$ – элементарный электрический заряд, взятый по модулю; Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева, определяет число электронов в атоме. Химические свойства зависят только от зарядового числа Z .

Немецкие учёные В. Боте и Г. Беккер, изучая реакции (1930), происходящие при облучении бериллия α -частицами, обнаружили новое излучение, обладающее очень большой проникающей способностью: ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$.

В 1932 г. английский физик Дж. Чедвик выдвинул гипотезу: бериллиевые лучи состоят из нейтральных частиц, масса которых близка к массе протона. Их назвали нейтронами. Дальнейшие исследования показали, что нейтрон – нестабильная частица: свободный нейтрон за время ≈ 15 мин. распадается на протон, электрон и антинейтрино – частицу, лишённую массы покоя: ${}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}$.

После открытия нейтрона физики Д. Д. Иваненко и В. Гейзенберг выдвинули гипотезу о протонно-нейтронном строении ядра.

Таким образом, атомное ядро состоит из нуклонов – p (положительно заряженных протонов ${}^1_1\text{p}$) и не имеющих заряда нейтронов n (${}^1_0\text{n}$). Количество p в ядре равно Z . Количество n в ядре равно N . Общее число нуклонов в ядре $A=Z+N$, где A – массовое число ядра, т. е. масса ядра с точностью до целых, выраженная в атомных единицах массы (а. е. м.). В качестве единицы массы используется атомная единица массы, равная $\frac{1}{12}$ массы атома углерода ${}^{12}_6\text{C}$:

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} \cdot m_{\text{C}} = \frac{1}{12} \frac{\mu}{N_A} = \frac{1}{12} \frac{0,012}{6,02 \cdot 10^{23}} \cong 1,66 \cdot 10^{-27}$$

кг. Масса нейтрона $m_n=1838,6$ электронных масс, масса протона $m_p=1836,1$ электронных масс ($m_n > m_p$ приблизительно на 2,5 массы электрона).

Изотопы – ядра с одинаковым числом протонов, но различным числом нейтронов. Например, изотопы урана ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$, изотопы водорода ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$ (где верхний индекс – A , а нижний – Z). Изотопы имеют одинаковые химические свойства, что обусловлено одинаковым электрическим зарядом ядра, но разные физические свойства, обусловленные массой.

Силы притяжения, связывающие протоны и нейтроны в ядре, называются ядерными силами.

Свойства ядерных сил:

- 1) являются только силами притяжения;
- 2) во много раз больше кулоновских сил;
- 3) независимы от наличия заряда (зарядовая независимость);
- 4) взаимодействуют с ограниченным числом нуклонов;
- 5) короткодействующие (радиус действия $r \approx 2,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}$);
- 6) не являются центральными.

§17. Масса и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Нуклоны прочно связаны в ядре атома ядерными силами. Для разрыва этой связи, т. е. для полного разобщения нуклонов, необходимо затратить некоторое количество энергии.

Энергия, необходимая для разобщения нуклонов, составляющих ядро, называется энергией связи ядра. Величину этой энергии связи можно определить на основе закона сохранения энергии и закона пропорциональности массы и энергии.

Согласно закону сохранения энергии, энергия нуклонов, связанных в ядре, должна быть меньше энергии разобщённых нуклонов на величину энергии связи ядра ΔE . Одновременно, согласно закону пропорциональности массы и энергии, изменение энергии системы ΔE сопровождается пропорциональным изменением массы системы Δm и $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$, где c – скорость света в вакууме. Так как в рассматриваемом случае ΔE есть энергия связи ядра, то масса ядра должна быть меньше суммы масс нуклонов, составляющих ядро, на величину Δm , которая называется «дефектом массы» ядра. Таким образом, «дефект массы» атомного ядра равен

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}$$

и, соответственно энергия связи ядра равна

$$\Delta E = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}] \cdot c^2,$$

где

$$M_{\text{я}} = M_a - Zm_e - \text{масса ядра,}$$

$$M_a - \text{масса нейтрального атома (табл. значение).}$$

Примечание. В ядерной физике энергия выражается через атомную единицу энергии (а. е. э.), которая соответствует одной атомной единице массы (а. е. м.):

$$1 \text{ а. е. э.} = 1 \text{ а. е. м.} \cdot c^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} \approx 931 \text{ МэВ.}$$

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон в ядре, т. е. энергия, которую необходимо затратить, чтобы удалить из ядра один нуклон, называется удельной энергией связи $\Delta E_{\text{уд}}$:

$$\Delta E_{\text{уд}} = \frac{\Delta E}{A}, \quad [\Delta E_{\text{уд}}] = \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}.$$

$\Delta E_{\text{уд}}$ используется для характеристики прочности ядра.

Особенности $\Delta E_{\text{уд}}$ различных ядер (рис. 15.1):

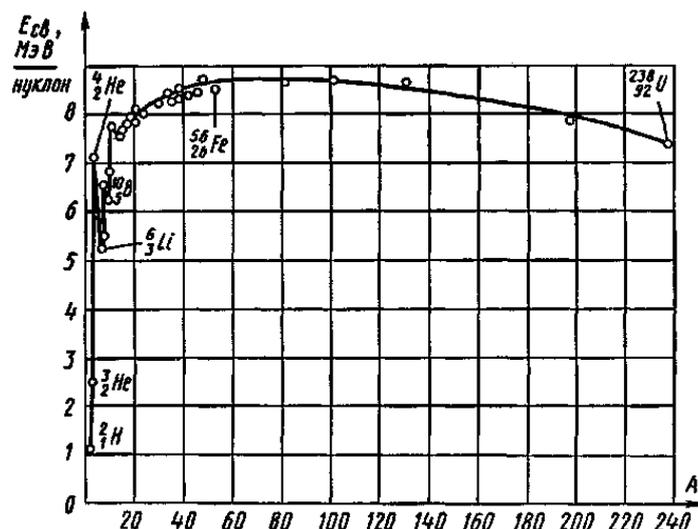


Рис. 15.1

1) у ядер средней части периодической системы Менделеева с массовым числом $40 \leq A \leq 100$ $\Delta E_{\text{уд}}$ максимальна;

2) у ядер, для которых $A > 100$, $\Delta E_{\text{уд}}$ плавно убывает;

3) у ядер, для которых $A < 40$, $\Delta E_{\text{уд}}$ скачкообразно убывает;

4) максимальной $\Delta E_{\text{уд}}$ обладают ядра, у которых число протонов и нейтронов чётное (${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$), а минимальной – ядра, у которых число протонов и нейтронов нечётное (${}^6_3\text{Li}$, ${}^{14}_7\text{N}$).

Ядерные реакции

Взаимодействие частицы с атомным ядром, приводящее к превращению этого ядра в новое ядро с выделением вторичных частиц или γ -квантов, называется ядерной реакцией.

Первая ядерная реакция была осуществлена Резерфордом в 1919 г. Он обнаружил, что при столкновениях α -частиц с ядрами атомов азота образуются быстро движущиеся протоны. Это означало, что ядро азота ${}^{14}_7\text{N}$ в результате столкновения с α -частицей ${}^4_2\text{He}$ превращалось в ядро изотопа кислорода ${}^{17}_8\text{O}$:



Ядерные реакции могут протекать с выделением или поглощением энергии.

Ядерные реакции, протекающие с выделением энергии, называются экзотермическими, а ядерные реакции, протекающие с поглощением энергии, называются эндотермическими. Используя закон взаимосвязи массы и энергии, энергетический выход ΔW ядерной реакции можно определить, найдя разность масс частиц и ядер Δm , вступающих в реакцию и продуктов реакции:

$$\Delta W = \Delta m \cdot c^2, \quad \Delta W = W_2 - W_1,$$

где W_1 – суммарная энергия покоя ядер и частиц до реакции, W_2 – суммарная энергия покоя ядер и частиц после реакции.

Если же необходимо получить энергетический выход ядерной реакции в МэВ (мегаэлектронвольтах), то предыдущая формула примет вид:

$$\Delta W = 931 \Delta m,$$

где $[\Delta W] = \text{МэВ}$, $[\Delta m] = \text{а. е. м.}$ (массы ядер и частиц измерены в атомных единицах массы).

§18. Радиоактивность. Виды радиоактивных излучений. Период полураспада. Закон радиоактивного распада

В 1896 г. французский физик А. Беккерель, изучая явление люминесценции солей урана, установил, что урановая соль испускает лучи неизвестного типа, которые проходят через бумагу, дерево, тонкие металлические пластины, ионизируют воздух.

В 1898 г. Мария Склодовская-Кюри, исследуя урановые руды, обнаружила новые химические элементы: полоний, радий.

Радиоактивностью называют превращение одних атомных ядер в другие, которое сопровождается испусканием частиц и излучением энергии.

Явление самопроизвольного превращения неустойчивых изотопов в устойчивые, сопровождающееся испусканием частиц и излучением энергии, называется **естественной радиоактивностью** (наблюдается у ядер, существующих в природных условиях).

Радиоактивность ядер, полученных посредством ядерных реакций, называется **искусственной**. Между искусственной и естественной радиоактивностью нет принципиального различия. Процесс радиоактивного превращения в обоих случаях подчиняется одинаковым законам.

В 1898 г., подвергая радиоактивное излучение действию магнитного поля (рис. 15.2), Э. Резерфорд выделил два вида лучей: α -лучи – тяжёлые положительно заряженные частицы (ядра атомов гелия) и β -лучи – лёгкие отрицательно заряженные частицы (тождественны электронам). Два года спустя П. Виллард открыл γ -лучи (см. рис. 15.2) – нейтральное излучение, где масса покоя равна нулю (аналогично квантам света, но $v_\gamma \gg v_{св}$).

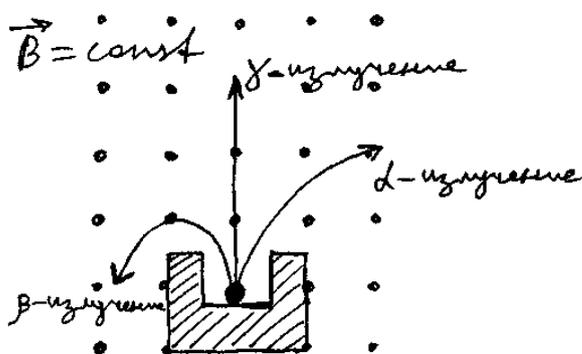


Рис. 15.2

Итак,

α -лучи представляют собой поток ядер гелия (сильно ионизируют воздух, проходят несколько сантиметров воздуха, $v_\alpha \approx 10^7$ м/с);

β -лучи являются потоком быстрых электронов (слабо ионизируют воздух, проходят в алюминиевой пластинке несколько миллиметров, $v_\beta \approx 10^8 - 0,999c$,

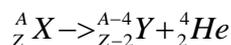
β -частицы бывают и медленные, например, при распаде трития в гелий-3);

γ -лучи представляют собой электромагнитное излучение высокой энергии (плохо ионизируют воздух, обладают большой проникающей способностью, проходят в алюминиевой пластинке десятки сантиметров). Это электромагнитное излучение с длиной волны приблизительно 10^{-12} м и соответственно частотой около 10^{20} Гц. Оно не отклоняется электрическими и магнитными полями.

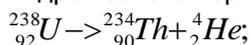
Радиоактивные излучения обладают химическим действием, вызывают ионизацию газов и возбуждают люминесценцию.

Правила смещения ядер при радиоактивных распадах:

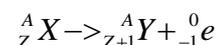
при α -распаде



происходит перемещение химического элемента на две клетки влево; например, продуктом α -распада изотопа урана-238 является ядро изотопа тория-234:



при β -распаде



происходит перемещение химического элемента на одну клетку вправо.

Гамма-излучение не сопровождается образованием новых элементов.

Закон радиоактивного распада

В процессе радиоактивного распада количество исходного элемента непрерывно уменьшается. Время $T_{1/2}$, за которое распадается половина исходного количества ядер N_0 , называется **периодом полураспада**. Каждый элемент таблицы Менделеева имеет свой период полураспада, величину которого можно определить с помощью справочника. Например, для полония-210 $T_{1/2} = 138$ сут (α), для урана-238 $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ лет (α).

Величина a , равная количеству ядер, распадающихся за единицу времени, называется **активностью радиоактивного элемента**. Если в начальный момент времени имелось N_0 ядер данного радиоактивного элемента, а по прошествии промежутка времени Δt их осталось N , то активность может быть определена выражением

$$a = -\frac{N - N_0}{\Delta t} = -\frac{\Delta N}{\Delta t},$$

где $\Delta N = N - N_0$.

Активностью a радиоактивного вещества называется число распадов в секунду:

$$a = -\frac{dN}{dt}.$$

Единица СИ активности: $[a] = \text{беккерель (Бк)} = 1/\text{с}$.

Примечание. Единица, допускавшаяся к применению до 1980 г.: кюри (Ки) = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Число N оставшихся через время t ядер данного элемента можно определить по **закону радиоактивного распада**

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad \text{или} \quad N = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где N_0 – число ядер в момент времени $t=0$ и $T_{1/2}$ – период полураспада данного элемента, $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ –

постоянная распада.

Активность радиоактивного препарата в процессе распада ядер непрерывно уменьшается по закону, аналогичному закону радиоактивного распада,

$$a = a_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad \text{или} \quad a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = a_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где $a_0 = \lambda N_0$ – активность в начальный момент времени $t=0$, a – активность через время t .

"Аргументы и факты" №49, 2006 г., с. 9.

Комментарий специалиста

Заведующий радиоизотопной лабораторией Института ядерных исследований РАН Борис Жуков:

– Полоний – радиоактивный элемент, который в природе содержится в урановых рудах. У него семь изотопов, но наиболее распространён полоний-210. Главное его свойство – испускание альфа-частиц. В микроскопических и безопасных дозах полоний есть в воздухе и воде. Сразу скажу, что наш институт не производит полоний-210, но в своё время я достаточно много работал с ним. Никаких свинцовых контейнеров для его хранения и транспортировки не нужно, достаточно герметичной капсулы: альфа-частицы не проникают даже сквозь лист бумаги. Но при нарушении герметичности сразу возникает риск отравления – его частицы могут попасть в лёгкие вместе с воздухом. Чтобы убить человека, необходимо ввести в организм 0,2 микрограмма этого вещества. Смерть наступает через 10-30 дней от лучевой болезни. Противоядия не существует.

§19. Четыре фундаментальных типа взаимодействия. Антчастицы. Аннигиляция. Антивещество

Четыре фундаментальных типа взаимодействия

В природе можно выделить **четыре основных** или **фундаментальных типа взаимодействия**: 1) гравитационное; 2) слабое; 3) электромагнитное; 4) сильное (ядерное). **Фундаментальными** называются такие взаимодействия, которые не могут быть сведены к другим, более простым видам взаимодействия.

Гравитационное взаимодействие описывается законом всемирного тяготения. Гравитационные силы действуют между любыми телами, в том числе и между элементарными частицами. Однако в физике элементарных частиц, массы которых ничтожно малы, гравитационные силы никакой роли не играют. Лишь у космических объектов (планеты, звёзды и т. п.) с их колоссальными массами гравитационные поля оказываются достаточно сильными, так что в небесной механике и астрофизике гравитационные силы играют решающую роль.

В **электромагнитном взаимодействии** участвуют любые электрически заряженные частицы и тела, а также фотоны – кванты электромагнитного поля. Электромагнитное взаимодействие ответственно за существование атомов и молекул, обуславливая взаимодействие в них положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов.

В **слабом взаимодействии** участвуют любые элементарные частицы, кроме фотонов. Слабое взаимодействие по величине значительно меньше всех взаимодействий, кроме гравитационного. Радиус слабого взаимодействия очень мал ($\sim 10^{-18}$ м).

Гравитационные и электромагнитные силы являются **дальнодействующими**, а остальные (слабые и сильные) являются **короткодействующими**. Нуклоны удерживаются в ядре за счёт взаимодействия между ними. Такое взаимодействие получило название **сильного взаимодействия**. Его можно описать с помощью поля ядерных сил. Отличительные особенности этих сил состоят, в частности, в следующем:

1. Ядерные силы являются короткодействующими. Их радиус действия имеет порядок 10^{-15} м. На расстояниях, существенно меньших 10^{-15} м, притяжение нуклонов сменяется отталкиванием.

2. Ядерные силы, действующие между двумя протонами, между протоном и нейтроном, имеют одинаковую величину. Это свойство называется зарядовой независимостью ядерных сил.

3. Ядерные силы обладают свойством насыщения. Это означает, что каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом нуклонов.

На расстоянии свыше 10^{-14} м ядерные силы не проявляются. Именно ядерные силы скрепляют ядро, несмотря на сильное электростатическое отталкивание между протонами.

Антчастицы. Аннигиляция. Антивещество

Из релятивистской квантовой теории следует существование **антчастиц**. Антчастица должна иметь в точности ту же массу, что и соответствующая ей частица, но противоположный, электрический заряд. Кроме того, антчастица может **аннигилировать** (взаимоуничтожаться) с соответствующей частицей.

Первой антчастицей, с которой довелось познакомиться человеку, был **позитрон**, открытый с помощью камеры Вильсона при регистрации космических лучей в 1933 г. Позитрон является антчастицей электрона и обозначается e^+ . Тормозясь в веществе, позитрон быстро аннигилирует с электроном, превращаясь в два фотона

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma.$$

Позитроны легко возникают в так называемом процессе рождения пар (при соударении с ядром фотон с высокой энергией превращается в пару электрон-позитрон):

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

И позитроны, и электроны могут возникать в результате β -распада с одновременным образованием еще одной элементарной частицы — нейтрино (ν), антчастицей которой является антинейтрино ($\bar{\nu}$).

Антчастица протона называется **антипротоном** или отрицательным протоном \bar{p} , который был впервые экспериментально обнаружен в 1955 г. на ускорителе частиц (синхротроне) в Беркли (США) при обстреле протонами ядер мишени – меди, в результате которого рождалась пара $p - \bar{p}$. Через год (1956) на том же ускорителе был открыт **антинейтрон** \bar{n} . Поскольку нейтрон электрически нейтрален, нейтральным должен быть и антинейтрон. Однако он быстро аннигилирует либо с нейтроном, либо с протоном.

Возникает вопрос: почему все атомы водорода построены из положительных протонов и отрицательных электронов, а не из отрицательных протонов (антипротонов) и положительных электронов (позитронов)? Такой «обращённый» атом водорода называется антиводородом. Вещество, построенное из антинуклонов и орбитальных позитронов, называется **антивеществом**. Из общих соображений симметрии следовало бы ожидать, что половина атомов во Вселенной должна бы представлять собой антивещество. С другой стороны, если бы на Земле или даже в нашей Галактике имелось бы антивещество, то оно не могло бы просуществовать очень долго. Антивещество довольно быстро бы аннигилировало, при этом выделялась бы энергия, почти в 1000 раз более эффективно, чем при взрыве водородной бомбы. В настоящее время имеются предположения о том, что некоторые галактики, возможно, состоят из антивещества, однако в пользу этого не получено достаточных доказательств.

Исторически первыми экспериментально обнаруженными элементарными частицами были электрон, протон, а затем нейтрон. Казалось, что этих частиц и фотона (кванта электромагнитного поля) достаточно для построения известных форм вещества – атомов и молекул. При таком подходе вещество строилось из протонов, нейтронов и электронов, а фотоны осуществляли взаимодействие между ними. Однако вскоре выяснилось, что мир устроен значительно сложнее. Было установлено, что каждой частице соответствует своя антчастица, отличающаяся от неё лишь знаком заряда. Для частиц с нулевыми значениями всех зарядов антчастица совпадает с частицей (например, фотон). По мере развития экспериментальной ядерной физики к этим частицам добавились ещё свыше 300 частиц.

§20. Группы элементарных частиц. Теории и модели, описывающие и объясняющие фундаментальные взаимодействия

Элементарные частицы и их античастицы принято подразделять на **три группы** (см. [таблицу](#)).

Первая – **фотоны**. Эта группа, состоящая только из одной частицы – фотона – кванта электромагнитного взаимодействия, охватывающего в той или иной степени все частицы, как заряженные, так и нейтральные (кроме нейтрино).

Вторая – **лептоны** (от греческого «лептос» – легкий), участвующие в электромагнитном и слабом взаимодействиях. К группе лептонов относятся электрон (e^-), мюон (μ^-), таон (τ^-), соответствующие им нейтрино (электронное ν_e , мюонное ν_μ и таонное ν_τ), которые участвуют только в слабом взаимодействии.

Третья – **адроны** – (от греческого «адрос» – крупный, сильный), которые составляют основную часть элементарных частиц. Эта группа состоит из подгруппы **мезонов** (от греческого «мезос» – средний: пионы π , каоны K , эта-мезон η) и **барионов** (от греческого «барис» – тяжёлый: нуклоны, гипероны). Адроны участвуют в сильном взаимодействии наряду с электромагнитным и слабым.

Для всех типов взаимодействий элементарных частиц выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса и заряда.

Переносчиком электромагнитного взаимодействия выступает фотон. Теория электромагнитного взаимодействия представлена **квантовой электродинамикой**, созданной в середине XX в. Это продуманная до мельчайших деталей и оснащённая совершенным математическим аппаратом теория взаимодействия между собой заряженных элементарных частиц (прежде всего, электронов или позитронов) посредством обмена фотонами. В этой теории для описания электромагнитного взаимодействия использовано понятие **виртуального фотона**. Виртуальными называются частицы, которые не могут быть обнаружены за время их существования. **Квантовая электродинамика** удовлетворяет основным принципам как квантовой теории, так и теории относительности.

В 60-е годы XX в. разработана **кварковая модель адронов**, согласно современному варианту которой все адроны рассматриваются как комбинации шести фундаментальных частиц – кварков и соответственно шести антикварков в состояниях с определенным моментом импульса. Смелым шагом в теории явилось, в частности, предположение о дробном электрическом заряде кварков. Самое необычное свойство состоит в том, что кварки существуют только внутри адронов и не наблюдаются как изолированные объекты. В составе протона и нейтрона, например, присутствуют два сорта кварков: u и d ; u кварк имеет электрический заряд $(+2/3)|e|$ и d -кварк соответственно $(-1/3)|e|$, где $|e|$ – заряд электрона, взятый по модулю. Нейтрон состоит из трёх кварков (u, d, d), а протон также состоит из трёх кварков, но с другой комбинацией (u, u, d). Переносчиками сильного взаимодействия между кварками являются **глюоны**, связывающие кварки попарно или тройками. Область физики элементарных частиц, изучающая взаимодействие кварков и глюонов, носит название квантовой хромодинамики. **Квантовая хромодинамика** – теория сильного взаимодействия.

Переносчиками слабого взаимодействия являются три частицы – W^+ , W^- и Z^0 -бозоны. Они были открыты в 1983 г.

Высказывается мнение, что возможно существование и переносчика гравитационного поля – **гравитона**. Спин гравитона равен 2. Так как гравитационное взаимодействие очень слабое и в квантовых процессах практически не проявляется, то непосредственно зафиксировать гравитоны очень сложно и пока не удалось.

Способность элементарных частиц к взаимным превращениям с соблюдением законов сохранения позволяет предполагать наличие единого общего поля, различными «квантовыми состояниями» которого и являются эти частицы. В 70-е годы XX в. была создана единая теория слабых и электромагнитных взаимодействий (**теория электрослабого взаимодействия**). С созданием квантовой хромодинамики и теории электрослабого взаимодействия появилась надежда на построение единой теории всех (или хотя бы трёх из четырёх) фундаментальных взаимодействий. Модели, единым образом описывающие хотя бы три из четырёх фундаментальных взаимодействий, называются моделями **Великого объединения**. Теоретические схемы, в рамках которых объединяются все известные типы взаимодействий (сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное) называются моделями **супергравитации**. Новое поколение физиков надеется, что объединённая теория объяснит известные типы взаимодействий с позиций единства мироздания.

Группа	Название частицы	Символ		Заряд, ед. e	Масса покоя, ед. m_e	Спин, ед. \hbar	Изоспин, I	Лептонное число, L	Барионное число, B	
		частицы	античастицы							
Фотоны	Фотон	γ		0	0	1	—	0	0	
Лептоны	Электрон	e^-	e^+	1	1	$1/2$	—	+1	0	
	Электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	$1/2$	—	+1	0	
	Мюон	μ^-	μ^+	1	206,8	$1/2$	—	+1	0	
	Мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	$1/2$	—	+1	0	
	Тау-лептон	τ^-	τ^+	1	3487	$1/2$	—	+1	0	
	Таонное нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	$1/2$	—	+1	0	
Адроны	Мезоны	Пионы	π^0	0	264,1	0	1	0	0	
			π^+ π^-	1	273,1	0	1	0	0	
		Каоны	K^0 \bar{K}^0	0	974,0	0	$1/2$	0	0	
			K^+ K^-	1	966,2	0	$1/2$	0	0	
		Эта-мезон	η^0	1	1074	0	—	0	0	
	Барионы	Протон	p	\bar{p}	1	1836,2	$1/2$	$1/2$	0	+1
		Нейтрон	n	\bar{n}	0	1838,7	$1/2$	$1/2$	0	+1
		Гипероны:								
		лямбда	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	0	2183	$1/2$	0	0	+1
		сигма	Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	0	2334	$1/2$	1	0	+1
		Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	1	2328	$1/2$	1	0	+1	
		Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	1	2343	$1/2$	1	0	+1	
кси	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	0	2573	$1/2$	$1/2$	0	+1		
	Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	1	2586	$1/2$	$1/2$	0	+1		
омега	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	1	3273	$3/2$	0	0	+1		