

1 задание: Законы теплового излучения

Тепловым называется электромагнитное излучение, которое обусловлено тепловым движением атомов и молекул вещества (то есть его внутренней энергией) и зависит только от температуры и оптических свойств этого вещества.

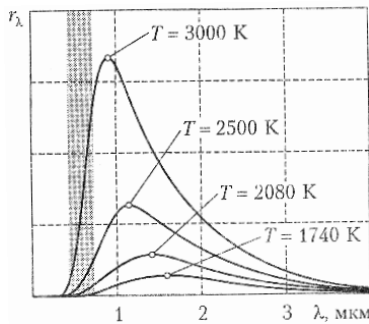
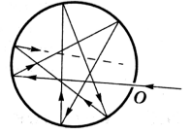
Абсолютно чёрным телом называется тело, которое при любой температуре полностью поглощает всё падающее на него тепловое излучение ($a_{\nu,T} = 1$).

Серым телом называется тело, коэффициент поглощения которого меньше единицы, но одинаков для всех частот при одной и той же температуре ($a_{\nu,T} < 1$).

Реальным телом называется тело, коэффициент поглощения которого $a_{\nu,T}$ меньше единицы, но зависит от частоты и температуры тела.

Реальные тела можно рассматривать как серое тело лишь в определённых интервалах частот $\Delta \nu$, где коэффициент поглощения $a_{\nu,T}$ приблизительно одинаков.

Идеальной моделью абсолютно чёрного тела является замкнутая полость с небольшим отверстием О, внутренняя поверхность которой зачернена. Луч света, попавший вовнутрь такой полости, после нескольких отражений полностью поглощается стенками полости.



Кривые теплового излучения абсолютно чёрного тела

Наблюдения показывают что:

1. Тепловое излучение абсолютно чёрного тела имеет сплошной спектр и его интенсивность зависит от температуры тела.
2. С увеличением температуры тела максимум интенсивности теплового излучения смещается в сторону более коротких длин волн.
3. С увеличением температуры тела резко возрастает максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости $r_{\nu,T}^{\max}$.

Основные законы теплового излучения

Закон Кирхгофа для теплового излучения

Отношение спектральной плотности энергетической светимости любого тела $r_{\nu,T}$ к его коэффициенту поглощения $a_{\nu,T}$ не зависит от вещества тела и равно спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела $r_{\nu,T}^{AЧТ}$, являющейся функцией только частоты и температуры.

$$\frac{r_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} = r_{\nu,T}^{AЧТ}$$

Закон Стефана – Больцмана для абсолютно чёрного тела

Энергетическая светимость абсолютно чёрного тела R_T прямо пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры T .

$$R_T = \sigma T^4$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$ - постоянная Стефана-Больцмана

Закон смещения Вина

Длина волны $\lambda_{\max}$, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуры T .

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

где $b = 2.9 \cdot 10^{-3} м \cdot К$ - постоянная Вина

Второй закон Вина

Величина максимальной спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda,T}^{\max}$ абсолютно чёрного тела прямо пропорциональна пятой степени его абсолютной температуры T .

$$r_{\lambda,T}^{\max} = CT^5$$

где $C = 1.3 \cdot 10^{-5} \frac{Вт}{м^3 К^5}$ - постоянная Вина

Гипотеза Макса Планка (1900 г)

Планк предложил следующую гипотезу: атомы вещества излучают электромагнитную энергию не непрерывно, как предполагали Вин и Релей, а порциями, то есть квантами с энергией $E_{\phi} = h\nu$.

(На основании своей гипотезы он вывел уравнение, которое хорошо описывает все закономерности теплового излучения и как следствие содержит в себе все основные законы теплового излучения абсолютно чёрного тела)

Закон Планка для теплового излучения абсолютно чёрного тела

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

2 задание: Внешний фотоэффект

Фотоэффектом называется явление вырывания электронов из атомов вещества под действием электромагнитного излучения (открыто в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем).

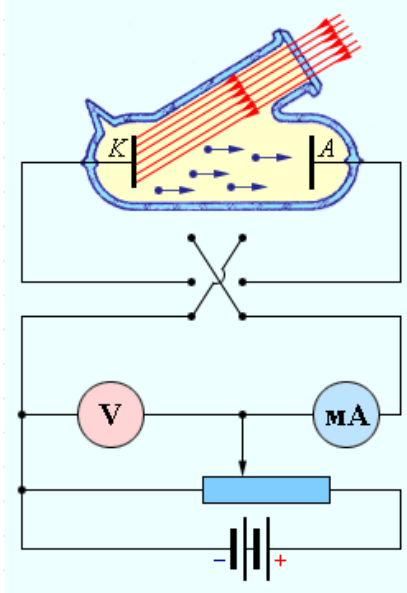
Внутренним фотоэффектом называется явление вырывания электронов из атомов вещества под действием электромагнитного излучения без вылета их за пределы вещества.

(при этом происходит перераспределение электронов по энергетическим состояниям внутри вещества в результате их перехода из связанных с атомами состояний в свободные).

Внешним фотоэффектом называется явление вылета электронов с поверхности твёрдых и жидких веществ под действием электромагнитного излучения.

(при этом вещество электризуется, приобретая положительный заряд).

Законы внешнего фотоэффекта



1. Максимальная начальная скорость вылетающих фотоэлектронов $v_{\max}$ прямо пропорциональна частоте падающего на вещество света ν и не зависит от его интенсивности I .

2. При фиксированной частоте ν падающего на вещество света, величина фототока (то есть число вылетающих из вещества за единицу времени электронов) прямо пропорциональна интенсивности света.

3. Для каждого вещества существует, так называемая, красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота (или максимальная длина волны) падающего на вещество света, при которой еще возможен фотоэффект.

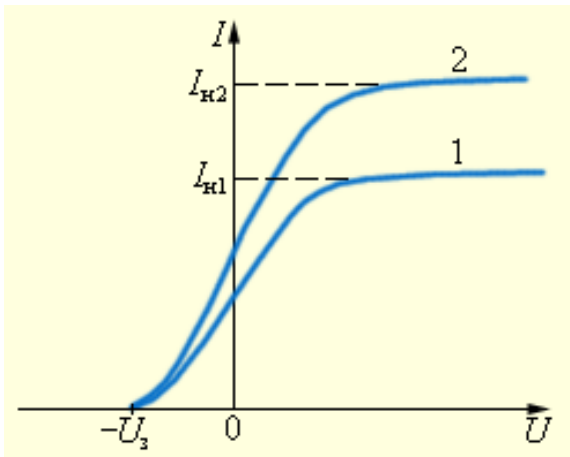
4. Фотоэффект – явление безинерционное, то есть вылет электронов с поверхности вещества происходит сразу после поглощения веществом света.

(эти закономерности можно объяснить только исходя из квантовых представлений света, так как волновая теория света даёт совершенно другие закономерности при фотоэффекте)

Вольт – амперные характеристики вакуумного фотоэлемента

(это зависимость силы тока I в фотоэлементе от напряжения U на его электродах)

Анализ вольт - амперных характеристик показывает следующие закономерности:

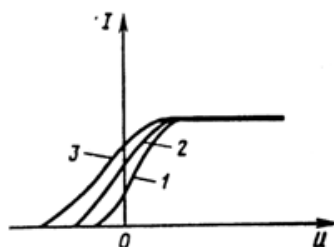


1. При любой освещённости существует ток насыщения I_n , то есть максимальная величина тока при данной интенсивности света. (это объясняется тем, что анода достигают все фотоэлектроны, которые возникают при фотоэффекте за одно и то же время)

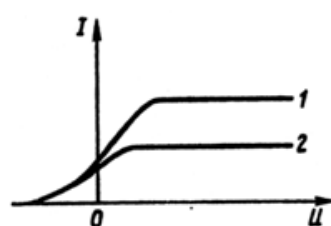
2. При $U = 0 \text{ В}$ наблюдается небольшой фототок. (это объясняется тем, что некоторая часть фотоэлектронов обладает достаточной скоростью и направлением движения, чтобы самостоятельно долететь до анода)

3. Чтобы прекратить фототок, необходимо на катод подать обратное напряжение (то есть подать более высокий потенциал по отношению к аноду). Это напряжение называется задерживающим или запирающим U_z .

ВАХ вакуумного фотоэлемента



$$E = \text{const}, \quad \nu_3 > \nu_2 > \nu_1$$



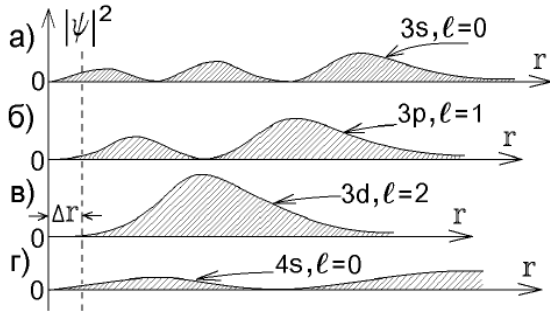
$$\nu = \text{const}, \quad E_1 > E_2$$

где E - освещённость фотокатода, ν - частота падающего на фотокатод света

3 задание: Уравнения Шрёдингера

Уравнение Шрёдингера является основным уравнением нерелятивистской квантовой механики, описывающее движение элементарных частиц, имеющих скорость v много меньшую скорости света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$, и учитывающее их волновые свойства.

Уравнение Шрёдингера позволяет получить вид волновой функции Ψ (пси) частицы в зависимости от ситуации, в которой она находится.



Волновая функция Ψ учитывает волновые свойства частиц, поэтому так и называется, и является величиной комплексной. Физический смысл имеет не сама волновая функция, а квадрат её модуля $|\Psi|^2 = \Psi \cdot \Psi^*$, где Ψ^* - комплексно сопряжённая функция. Величина $|\Psi|^2$ имеет смысл **плотности вероятности** (то есть определяет вероятность $d\omega$ обнаружить частицу в данной точке пространства dV с координатами x, y, z в момент времени t):

$$d\omega = |\Psi|^2 dV = |\Psi(x, y, z, t)|^2 dx dy dz$$

- **Временное (или нестационарное) уравнение Шрёдингера:**

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

(является основным уравнением нерелятивистской механики, из которого можно получить все остальные частные случаи движения частиц). Называется временным из-за того, что в нём содержится частная производная волновой функции частицы

по времени $\frac{\partial \Psi}{\partial t}$, где $\Psi = \Psi(x, y, z, t)$ - волновая функция, описывающая состояние микрочастицы; $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ - постоянная

Дирака, $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$, $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка; m - масса микрочастицы;

Δ - оператор Лапласа, ($\Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}$); $i = \sqrt{-1}$ - мнимая единица; $U = U(x, y, z, t)$ - потенциальная функция

(описывает воздействие на частицу внешнего силового поля, в котором она движется).

- **Стационарное уравнение Шрёдингера:**

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

(оно описывает состояние микрочастицы, когда потенциальная функция U не зависит от времени, то есть $U = U(x, y, z)$).

В этом случае вид волновой функции тоже не зависит от времени, то есть $\psi = \psi(x, y, z)$ и состояния микрочастицы также не меняются с течением времени),

где $\psi = \psi(x, y, z)$ - волновая функция, не зависящая от времени; E - полная механическая энергия микрочастицы;

U - потенциальная энергия микрочастицы.

- **Стационарное уравнение Шрёдингера для движения свободной частицы:**

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0$$

(**свободной** называется частица, на которую не действуют внешние поля, то есть $U = U(x, y, z, t) = 0$).

- **Стационарное уравнение Шрёдингера для одномерного гармонического осциллятора** $\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{m\omega_0^2 x^2}{2} \right) \psi = 0$.

(описывает движение частицы в потенциальном поле вида $U = \frac{kx^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 x^2}{2}$ под действием квазиупругой силы вида

$\vec{F} = -k \vec{x}$, например, малые колебания атома в кристаллической решётке), E - полная механическая энергия электрона;

ω_0 - собственная циклическая частота колебаний; x - отклонение колеблющейся частицы от положения равновесия.

Осциллятором называется система способная совершать колебания.

Гармоническими называются колебания, происходящие по закону синуса или косинуса.

- **Стационарное уравнение Шрёдингера для электрона в водородоподобном атоме** $\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0$

(в этом случае потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром имеет вид $U = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ и описывает движение

электрона в водородоподобном атоме, E - полная механическая энергия электрона; Z - зарядовое число ядра (показывает число протонов в ядре); $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ - заряд электрона; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ - электрическая постоянная;

r - расстояние от электрона до ядра)

4 задание: Квантовые числа

Из анализа уравнения Шрёдингера для электрона в атоме водорода следует, что физические величины, описывающие его состояние (энергия, импульс, орбитальный момент импульса и собственный момент импульса) могут принимать не любые значения, а лишь строго определённый дискретный набор значений. В этом случае говорят, что они **квантуются**. Такое поведение электрона в атоме является следствием того, что электрон может находиться только в таких состояниях, при которых одновременно выполняются все фундаментальные законы природы: закон сохранения энергии, закон сохранения импульса и закон сохранения момента импульса.

Таким образом, оказалось, что для полного описания состояния электрона в атоме необходимо ввести 4, так называемых, **квантовых числа**.

Квантовыми числами называется набор чисел, которые однозначно описывают состояние электрона в атоме, молекуле или кристалле.

- **Главное квантовое число** n (эн) (совпадает с порядковым номером орбиты электрона, определяет величину полной механической энергии E электрона в атоме и характеризует размер электронного облака).

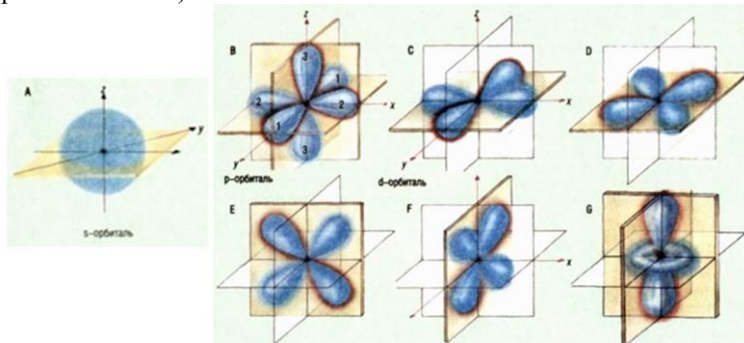
Чем больше номер n , тем больше размер электронного облака.

Энергию электрона в атоме водорода на орбите с номером n можно определить по формуле:
$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0 h^2},$$

где n - номер орбиты электрона (он совпадает с главным квантовым числом); $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ - масса электрона;

$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ - заряд электрона; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ - электрическая постоянная; $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка.

- **Орбитальное квантовое число** l (эль) (определяет величину орбитального момента импульса L электрона в атоме и характеризует форму электронного облака).



Величину орбитального момента импульса электрона в атоме можно определить по формуле:
$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)},$$

где L - орбитальный момента импульса электрона в атоме, $\text{Дж} \cdot \text{с}$; $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Дирака;

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка; l - орбитальное квантовое число, $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ (всего n значений, где n - главное квантовое число).

- **Магнитное квантовое число** m (определяет величину проекции механического орбитального момента импульса L_z электрона в атоме на направление внешнего магнитного поля, в котором находится атом (либо внутреннего магнитного поля, создаваемого всеми электронами атома, кроме рассматриваемого) и характеризует ориентацию электронного облака в пространстве).

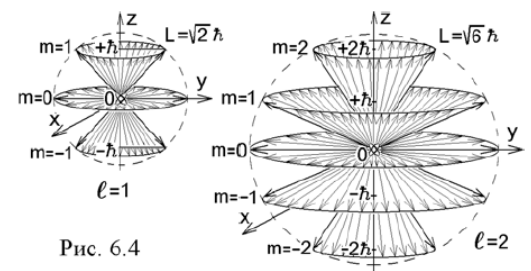


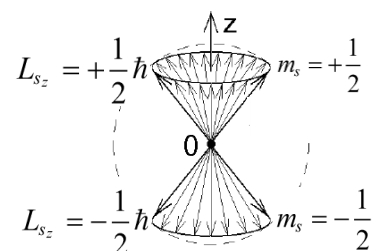
Рис. 6.4

Величину проекции механического орбитального момента импульса L_z

электрона в атоме на направление внешнего магнитного поля можно определить по формуле:
$$L_z = m\hbar,$$

где L_z - величина проекции механического орбитального момента импульса L_z электрона в атоме на направление внешнего магнитного поля, $\text{Дж} \cdot \text{с}$; m - магнитное квантовое число; $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ (всего $2l+1$ значение, где l - орбитальное квантовое число); $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Дирака.

- **Спиновое квантовое число** m_s (определяет величину проекции собственного механического момента импульса электрона L_{sz} (то есть спина) в атоме на направление внешнего магнитного поля в котором находится атом (либо внутреннего магнитного поля, создаваемого всеми электронами атома, кроме рассматриваемого) и характеризует ориентацию спина электрона в пространстве).



$$L_{sz} = m_s \hbar,$$
 где для электрона m_s может принимать только два значения $m_s = \pm \frac{1}{2}$

Правила отбора для орбитального и магнитного квантовых чисел: $\Delta l = \pm 1$ и $\Delta m = 0, \pm 1$.

5 задание: Планетарная модель атома водорода по Бору. Постулаты Бора

Согласно планетарной модели атома водорода по Бору (1913):

1. в центре атома водорода находится положительно заряженное ядро малых размеров ($\approx 10^{-15} \text{ м}$), в котором сосредоточено 99,9% процентов массы атома, вокруг которого по круговой орбите с постоянной скоростью движется отрицательно заряженный электрон,
2. Заряд ядра в точности равен заряду электрона, поэтому атом в целом электрически нейтрален.

Для объяснения стационарности атома и существования у атома водорода спектральных линий излучения, Нильс Бор предложил два постулата.

Постулаты Бора для атома водорода (1913 г)

1) постулат стационарных состояний:

Существуют стационарные состояния атома, находясь в которых он не излучает электромагнитную энергию. Эти стационарные состояния удовлетворяют следующему условию квантования:

Орбитальный момент импульса электрона в атоме $L = m v_n r_n$ **должен быть кратен постоянной Планка** h

$$m v_n r_n = n \frac{h}{2\pi},$$

где m - масса электрона,

v_n - скорость электрона на орбите с номером n ,

r_n - радиус орбиты электрона с номером n , n – номер орбиты,

$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка.

2) Правило частот:

При переходе электрона с более высокой орбиты с энергией E_2 на орбиту с меньшей энергией E_1 , излучается фотон с энергией, равной разности энергий соответствующих состояний атома

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad \text{или} \quad \frac{hc}{\lambda} = E_2 - E_1$$

При обратном переходе квант с такой же энергией поглощается.

Таким образом, набор всевозможных дискретных частот $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$, определяет линейчатый спектр излучения или поглощения атома.

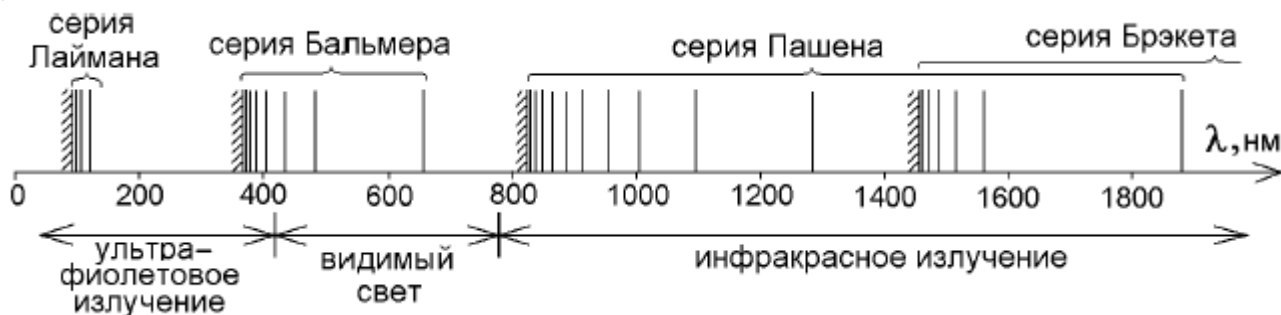
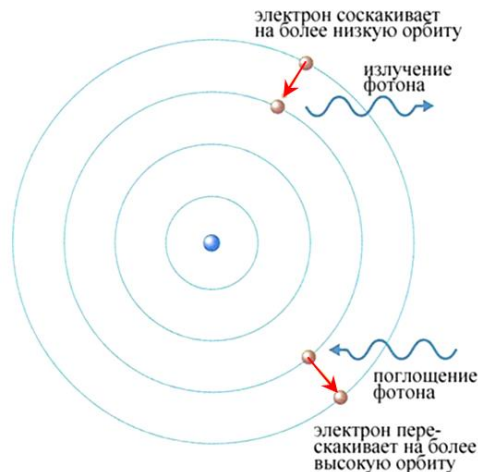


Рис. 1

На рис. 1 представлены спектральные серии излучения атома водорода, которые возникают при переходе электрона с более высокой орбиты с энергией E_2 на более низкую с энергией E_1 .

- Если электрон переходит на орбиту с номером $n = 1$, то излучается **серия Лаймана**;
- если электрон переходит на орбиту с номером $n = 2$, то излучается **серия Бальмера**;
- если электрон переходит на орбиту с номером $n = 3$, то излучается **серия Пашена**;
- если электрон переходит на орбиту с номером $n = 4$, то излучается **серия Брэкета**.



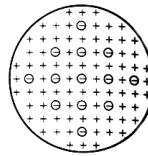
При переходе электронов с одних энергетических уровней атома на другие изменяются их квантовые числа. Наблюдения показывают, что переходы возможны только на такие уровни, для которых выполняются следующие правила отбора:

- орбитальное квантовое число электрона может измениться только на $\Delta l = \pm 1$;
- магнитное квантовое число электрона может измениться только на $\Delta m = 0, \pm 1$.

Модели атома Томсона и Резерфорда

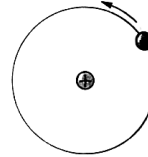
Модель атома Томсона

Атом представляет собой непрерывно заряженный положительным зарядом шар радиуса порядка 10^{-10} м, внутри которого около своих положений равновесия колеблются электроны. Суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду шара, поэтому атом в целом нейтрален.



Модель атома Резерфорда (ядерная (планетарная) модель атома)

Вокруг положительного ядра, имеющего заряд Ze , размер 10^{-15} — 10^{-14} м и массу, практически равную массе атома, в области с линейными размерами порядка 10^{-10} м по круговым (или эллиптическим) орбитам под действием сил электростатического притяжения движутся электроны (подобно тому как планеты обращаются вокруг Солнца под действием сил гравитационного притяжения). Заряд ядра равен суммарному заряду электронов, так как атомы нейтральны.



[Z — порядковый номер элемента в системе Менделеева; e — элементарный заряд (масштаб не выдержан)]

Современные представления о строении атома

1. Атом состоит из тяжёлого ядра радиусом $\approx 10^{-15}$ м из Z положительно заряженных протонов p и определённого числа не имеющих заряда нейтронов n , которые окружены Z отрицательно заряженных электронов (так что в целом атом электрически нейтрален).
2. Размеры атомов определяются размерами их электронных оболочек, которые не имеют строго определённых границ. Линейные размеры атомов $\approx 10^{-10}$ м.
3. Энергия электронов в атоме может принимать лишь ряд дискретных значений, что является следствием волновых свойств электронов.
4. Движение электронов в атоме рассматривается как сложный колебательный процесс, напоминающий стоячие волны.
5. Состояние электрона в атоме характеризуется распределением в пространстве его электрического заряда, то есть распределением его электронной плотности. То есть электрон в атоме рассматривается как «размазанный» в пространстве и образующий вокруг ядра электронное облако определённой конфигурации. Наибольшая электронная плотность из всех возможных соответствует основному состоянию атома.
6. В многоэлектронных атомах электроны группируются в электронные оболочки, окружающие ядро на различных расстояниях и характеризующиеся определёнными значениями электронной плотности.
7. Все электроны в атоме подчиняются принципу Паули, согласно которому **в любом квантовом состоянии может находиться не более одного электрона, то есть каждый электрон в атоме отличается от другого хотя бы одним квантовым числом.**
(принцип Паули позволил объяснить таблицу Менделеева, то есть существование периодичности в химических свойствах элементов).

6 задание: Волны де Бройля. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

В 1924 г. французский физик **Луи де Бройль** выдвинул гипотезу о том, что корпускулярно-волновыми свойствами обладают не только кванты электромагнитного излучения, но и все элементарные частицы. В зависимости от условий взаимодействия частиц с веществом, они в одних случаях могут вести себя как поток корпускул, а в других случаях проявлять волновые свойства.

В 1927 году эта гипотеза де Бройля была экспериментально подтверждена при рассеянии пучка электронов на кристалле никеля. При этом была обнаружена дифракция электронов на кристаллической решётке никеля. Дифракция является чисто волновым свойством.

В 1948 г. опытным путём была обнаружена дифракция отдельных электронов. В настоящее время экспериментально доказаны волновые свойства у нейтронов, протонов и даже некоторых отдельных атомов и молекул. Все эти опыты свидетельствуют о том, что корпускулярно-волновой дуализм является универсальным свойством всех элементарных частиц.

Таким образом, с любой движущейся частицей можно сопоставить волновой процесс с длиной волны $\lambda = \frac{h}{p}$, (1)

где $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка, а p - импульс частицы.

Если частица классическая (то есть её скорость много меньше скорости света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$), то импульс находится по классической формуле $p = mv$.

Если частица релятивистская (то есть её скорость сравнима со скоростью света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$), то импульс

находится по релятивистской формуле

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Из уравнения (1) следует, что макроскопические частицы, а тем более обычные тела из-за их большой массы, будут иметь очень маленькую длину волны де Бройля.

Например, пылинка массой всего 1 мг, движущаяся со скоростью 1 м/с, имеет длину волны де Бройля

$$\lambda = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{10^{-6} \text{ кг} \cdot 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 6.62 \cdot 10^{-28} \text{ м}.$$

Такую маленькую длину волны обнаружить не возможно, поэтому в обычных условиях даже такие маленькие объекты волновые свойства не проявляют и ведут себя как обычные частицы.

По современным представлениям волновые свойства частиц объясняются взаимодействием их с виртуальными частицами физического вакуума, чем легче и медленнее частица, тем сильнее на неё это влияние. Кроме того такое поведение элементарных частиц указывает на то, что их нельзя рассматривать как частицы в привычном для нас смысле, то есть их физическая природа значительно сложнее.

Соотношения неопределённостей Гейзенберга

При изучении движения микрочастиц приходится учитывать их волновые свойства. Это накладывает ряд ограничений на точность одновременного определения некоторых физических величин.

В 1927 г. Гейзенберг показал, что эти ограничения имеют следующий вид:

1. Невозможно одновременно точно определить координаты микрочастицы (x, y, z) и соответствующие им проекции импульсов (p_x, p_y, p_z) , причём неопределённость этих величин удовлетворяют следующим условиям:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar; \quad \Delta y \Delta p_y \geq \hbar; \quad \Delta z \Delta p_z \geq \hbar,$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Дирака.

2. Если микросистема находится в некотором состоянии с энергией E в течение некоторого промежутка времени Δt , то неопределённость энергии этого состояния ΔE связана с промежутком времени Δt следующим соотношением

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

Из-за малости величины $\hbar$ соотношения неопределённостей Гейзенберга проявляются только для систем атомного размера и массы. При этом следует отметить, что соотношения неопределённостей являются объективным отражением свойств микрочастиц (в частности волновых), а не связаны с несовершенством измерительных приборов или методов измерения, и характеризуют пределы применимости законов классической физики к микрообъектам.

Например, неопределённость положения электрона в атоме определяется размером самого атома, то есть порядка 10^{-10} м , тогда неопределённость в определении его скорости в атоме Δv равна:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar \Rightarrow \Delta x m \Delta v \geq \hbar \Rightarrow \Delta v \geq \frac{\hbar}{m \Delta x} \geq \frac{1.05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 10^{-10} \text{ м}} \geq 10^{-7} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

7 задание: Виды радиоактивного распада

Радиоактивностью называется явление самопроизвольного превращения некоторых атомных ядер в ядра других химических элементов с излучением из ядра атома некоторых видов элементарных частиц.

Виды радиоактивного распада

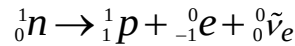
α - распад представляет собой вылет из ядра радиоактивного атома α -частицы, которая представляет собой ядро атома гелия. ($\alpha \equiv {}^4_2\text{He}$).

Виды β - распада :

- **β^-** (представляет собой вылет из ядра радиоактивного атома электрона e^- и электронного антинейтрино $\bar{\nu}_e$).

$$\beta^- \equiv {}^0_{-1}e$$

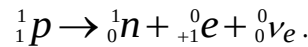
Электронов в ядре нет. Они образуются в результате превращения одного из нейтронов ядра ${}_0^1n$ в протон ${}_1^1p$, электрон ${}_{-1}^0e$ и электронное антинейтрино ${}_0^0\bar{\nu}_e$:



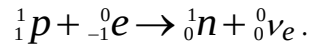
- **β^+** (представляет собой вылет из ядра радиоактивного атома позитрона ${}_{+1}^0e$ (античастицы электрона) и электронного нейтрино ν_e). $\beta^+ \equiv {}^0_{+1}e$

Позитронов в ядре нет. Они образуются в результате превращения одного из протонов ядра ${}_1^1p$

в нейтрон ${}_0^1n$, позитрон ${}_{+1}^0e$ и электронное нейтрино ${}_0^0\nu_e$:



- **K - захват** (представляет собой захват одним из протонов ядра собственного электрона из ближайшей к ядру электронной K - оболочки с превращением протона ядра в нейтрон и вылетом из ядра электронного нейтрино:



γ - излучение (представляет собой электромагнитное излучение, которое не является самостоятельным видом радиоактивного распада, а лишь сопровождает α - и β - распады).

γ - излучение испускается образовавшимся в результате радиоактивного распада дочерним (а не материнским) ядром, при переходе его из возбуждённого в основное энергетическое состояние.

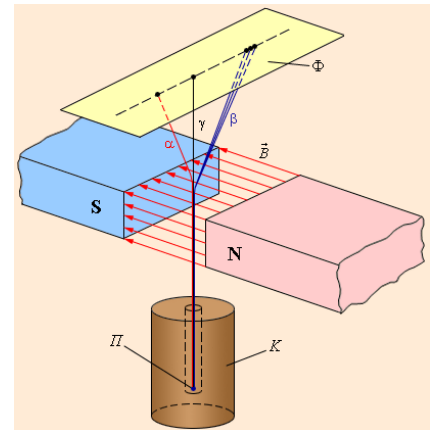
Виды радиоактивных излучений

Радиоактивное излучение бывает трех типов: α -, β - и γ - излучения.

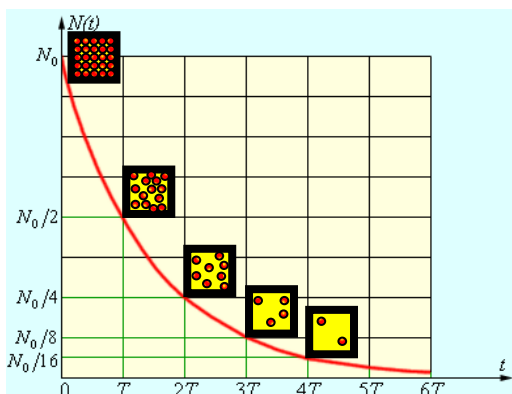
- **α -излучение** отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью (например, поглощается слоем алюминия толщиной примерно 0,05 мм).

- **β -излучение** отклоняется электрическим и магнитным полями, его ионизирующая способность значительно меньше (примерно на два порядка), а проникающая способность гораздо больше (поглощается слоем алюминия толщиной примерно 2 мм), чем у α -частиц.

- **γ -излучение** не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью, но очень большой проникающей способностью (например, проходит через слой свинца толщиной 5 см), при прохождении через кристаллы обнаруживает дифракцию.



Законы радиоактивного распада

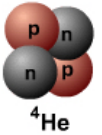


Период полураспада $T_{1/2}$ – это время, за которое распадается половина имеющихся радиоактивных ядер

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

Активность радиоактивного нуклида A - это число радиоактивных распадов за единицу времени

$$A = \lambda N$$



8 задание: Обозначение атомных ядер. Законы сохранения при ядерных реакциях

Основные свойства и строение ядра

Ядром называется центральная часть атома, в которой сосредоточены практически вся масса атома и его положительный электрический заряд.

Все атомные ядра состоят из элементарных частиц - **протонов** p и **нейтронов** n , которые считаются двумя зарядовыми состояниями одной частицы - **нуклона**.

Масса протона p практически равна массе нейтрона (нейтрон немного тяжелее) и главное их отличие заключается в электрическом заряде: протон p имеет положительный электрический заряд $p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, равный по абсолютной величине заряду электрона, а нейтрон n электрического заряда не имеет.

Величина заряда ядра определяется количеством протонов p в его составе.

Зарядом ядра $Q_{\text{ядра}}$ называется величина, равная $Q_{\text{ядра}} = Zp$,

где $p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ - заряд протона, Z - число протонов p в ядре, которое совпадает с порядковым номером химического элемента в периодической системе Менделеева.

Массовым числом ядра A называется общее число нуклонов в ядре: $A = N + Z$.

Нуклонам (протону p и нейтрону n) приписывается массовое число, равное единице ($A=1$),

электрону e - массовое число, равное нулю ($A=0$).

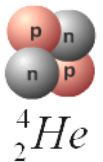
Обозначение атомных ядер

Атомное ядро обозначается символом ${}^A_Z X$,

где X - символ химического элемента,

Z - **зарядовое число ядра** (показывает число протонов p в ядре) и совпадает с порядковым номером химического элемента в таблице Менделеева),

A - **массовое число ядра** (показывает общее число нуклонов, то есть протонов p и нейтронов n , в ядре)



Законы сохранения при ядерных реакциях

Ядерными реакциями называются превращения атомных ядер одного химического элемента в ядра другого химического элемента при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом.

(Ядерные реакции лежат в основе развития атомной энергетики)

Термоядерными называются реакции синтеза лёгких атомных ядер в более тяжёлые, происходящие при сверхвысоких температурах (10^7 К и выше).

(термоядерные реакции являются источником энергии Солнца и других звёзд)

При ядерных реакциях и превращениях элементарных частиц выполняются следующие законы сохранения:

Закон сохранения зарядового числа:

Сумма зарядовых чисел взаимодействующих частиц до реакции равна сумме зарядовых чисел взаимодействующих частиц после реакции

$$\left(\sum Z_i \right)_{\text{до реакции}} = \left(\sum Z_i \right)_{\text{после реакции}}$$

Закон сохранения массового числа:

Сумма массовых чисел взаимодействующих частиц до реакции равна сумме массовых чисел взаимодействующих частиц после реакции

$$\left(\sum A_i \right)_{\text{до реакции}} = \left(\sum A_i \right)_{\text{после реакции}}$$

Дефект массы ядра

Наблюдения показывают, что масса атома меньше суммы масс частиц, входящих в его состав.

Дефектом массы Δm называется разность суммарной массы отдельных частиц, входящих в состав атома (ядра) и полной массы атома (ядра):

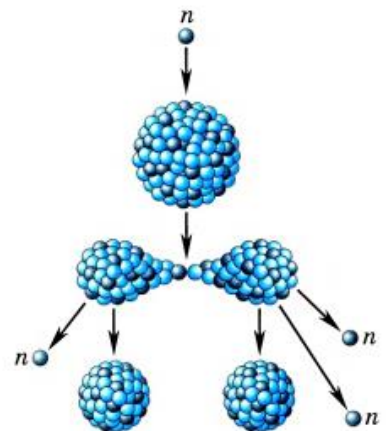
$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m.$$

Дефект массы является проявлением закона взаимосвязи массы и энергии $\Delta E = \Delta mc^2$ и обусловлен выделением энергии $E_{\text{связи}}$ при образовании атомного ядра:

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

где m_p - масса покоя протона, m_n - масса покоя нейтрона, $m_{\text{я}}$ - масса покоящегося ядра,

Z - зарядовое число ядра, A - массовое число



Изотопы радиоактивных ядер

Ядро одного и того же химического элемента с числом протонов Z может иметь различное количество нейтронов.

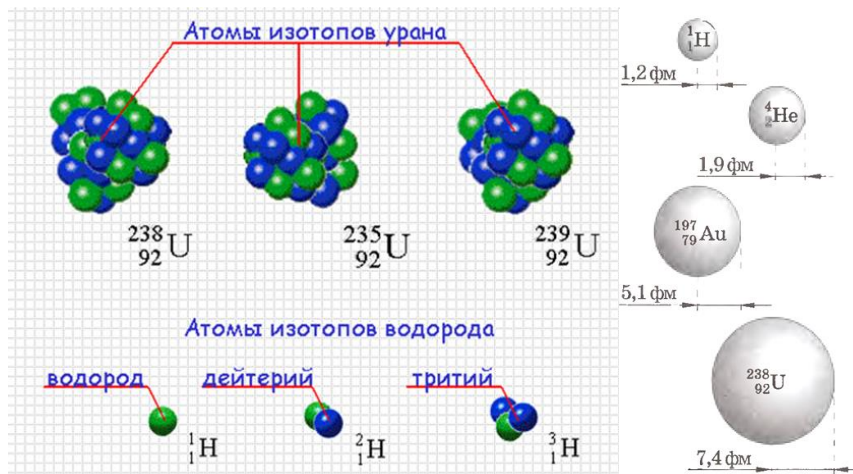
Изотопами называются ядра, имеющие одинаковое число протонов, но разное количество нейтронов N .

Изотопы одного и того же химического элемента имеют одинаковые химические свойства, но разную массу атомных ядер.

Большинство химических элементов представляет собой смесь различных изотопов.

Изотонами называются ядра, имеющие одинаковое число нейтронов N , но разное количество протонов P .

Изобарами называются ядра, имеющие одинаковые массовые числа A .



Размер ядра R можно определить по формуле $R = R_0 \sqrt[3]{A}$, где $R_0 = (1,3 \div 1,7) \cdot 10^{-15} \text{ м}$.

Изотопы урана

Атом	Число протонов	Число нейтронов	Число электронов	Распространенность
$^{234}_{92}\text{U}$	92	142	92	0,0057%
$^{235}_{92}\text{U}$	92	143	92	0,72%
$^{238}_{92}\text{U}$	92	146	92	99,27%

Изобары

Атом	Число протонов	Число нейтронов	Число электронов	Элемент
$^{210}_{81}\text{Pb}$	81	129	81	Таллий
$^{210}_{82}\text{Pb}$	82	128	82	Свинец
$^{210}_{83}\text{Bi}$	83	127	83	Висмут
$^{210}_{84}\text{Po}$	84	126	84	Полоний

Плотность ядерного вещества составляет по порядку величины 10^{17} кг/м^3 и постоянна для всех ядер. Она значительно превосходит плотности самых плотных обычных веществ.

Ядерные силы

Между составляющими ядро нуклонами действуют особые, специфические для ядра силы, значительно превышающие кулоновские силы отталкивания между протонами. Они называются **ядерными силами**.

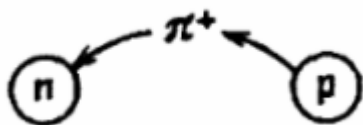
Ядерные силы по величине намного превышают гравитационные, электрические и магнитные силы взаимодействия. Ядерные силы относятся к классу, так называемых, **сильных взаимодействий**. Характерной особенностью этих сил является ограниченный радиус действия. Эти силы возникают лишь между нуклонами, практически находящимися вплотную друг к другу. Поэтому с увеличением количества нуклонов, а значит и размеров ядер, увеличивается разрушающее ядро действие сил электрического отталкивания протонов, так как эти силы не имеют ограничения по расстоянию. Следовательно, тяжелые ядра менее устойчивы, чем легкие.

9 задание: ВИДЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Процессы, в которых участвуют различные элементарные частицы, сильно различаются по характерным временам их протекания и энергиям. Согласно современным представлениям, в природе осуществляется четыре типа взаимодействий, которые не могут быть сведены к другим, более простым видам взаимодействий: **сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное**. Эти типы взаимодействий называют **фундаментальными**.

Фундаментальными взаимодействиями называются взаимодействия, которые не могут быть сведены к другим, более простым видам взаимодействий.

Все процессы и явления в природе происходят в результате этих взаимодействий.

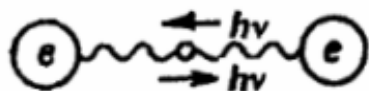


- **Сильное взаимодействие** осуществляется только между адронами и кварками и, в частности, между протонами и нейтронами, обеспечивая устойчивость атомных ядер.

Сильное взаимодействие – это наиболее интенсивное из всех видов взаимодействий. Оно обуславливает исключительно прочную связь между протонами и нейтронами в ядрах атомов, которая лежит в основе существования атомных ядер. Если сильное взаимодействие исчезнет, то произойдет распад атомных ядер, а, следовательно, и всех атомов и молекул.

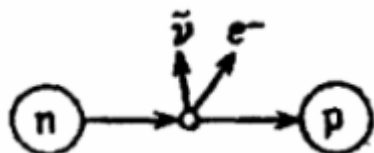
Сильное взаимодействие проявляется на расстояниях порядка 10^{-15} м и обусловлено обменом **пи-мезонами**.

Истинно сильным взаимодействием является взаимодействие между кварками посредством обмена **глюонами**.



Электромагнитное взаимодействие проявляется между любыми заряженными частицами и телами посредством обмена между ними фотонами, представляющими собой кванты электромагнитного поля.

Электромагнитное взаимодействие определяет структуру вещества за пределами радиуса действия сильного взаимодействия. Оно связывает электроны и ядра в атомах и молекулах, объединяет атомы и молекулы в веществе, определяет химические и биологические процессы. Оно определяет многие свойства вещества в твердом, жидком и газообразном состояниях.



Слабое взаимодействие осуществляется между всеми элементарными частицами, кроме фотонов и отвечает за распад элементарных частиц.

Слабое взаимодействие обеспечивает протекание многих ядерных реакций и, в частности, протекание термоядерных реакций в центре Солнца и других звезд.

В соответствии с современным уровнем знаний большинство частиц нестабильны именно благодаря слабому взаимодействию.

Оно обусловлено обменом между частицами, так называемыми, **промежуточными бозонами**.



Гравитационное взаимодействие свойственно всем частицам и телам, но оно самое слабое из всех видов взаимодействий.

Из-за малой массы микрочастиц оно несущественно в процессах микромира.

Гравитационные силы играют решающую роль при взаимодействии космических объектов (звезды, планеты и т. п.) с их огромными массами.

Оно обусловлено обменом между частицами **гравитонами**.

Сильное взаимодействие примерно в 100 раз по интенсивности превосходит электромагнитное и в 10^{14} раз — слабое. Чем сильнее взаимодействие, тем с большей интенсивностью протекают процессы. Так, время жизни частиц, называемых резонансами, распад которых описывается сильным взаимодействием, составляет примерно 10^{-23} с; время жизни π^0 -мезона, за распад которого ответственно электромагнитное взаимодействие, составляет 10^{-16} с; для распадов, за которые ответственно слабое взаимодействие, характерны времена жизни 10^{-10} — 10^{-8} с. Как сильное, так и слабое взаимодействия — короткодействующие. Радиус действия сильного взаимодействия составляет примерно 10^{-15} м, слабого — не превышает 10^{-18} м. Радиус действия электромагнитного и гравитационного взаимодействий практически не ограничен.

Без сильных взаимодействий не существовали бы атомные ядра, а звезды и Солнце не могли бы генерировать за счет ядерной энергии теплоту и свет. Без электромагнитных взаимодействий не было бы ни атомов, ни молекул, ни макроскопических объектов, а также тепла и света. Без слабых взаимодействий не были бы возможны ядерные реакции в недрах Солнца и звезд, не происходили бы вспышки сверхновых звезд и необходимые для жизни тяжелые элементы не могли бы распространиться во Вселенной. Без гравитационного взаимодействия не только не было бы галактик, звезд, планет, но и вся Вселенная не могла бы эволюционировать, поскольку гравитация является объединяющим фактором, обеспечивающим единство Вселенной как целого и её эволюцию.

10 задание: Виды элементарных частиц

Элементарными называются наименьшие частицы, не являющиеся атомами или атомными ядрами и которые невозможно расщепить на составные части.

(В настоящее время вместе с античастицами известно около 400 элементарных частиц)

Размер атомов порядка 10^{-10} м, размер адронов порядка 10^{-15} м, размер лептонов порядка 10^{-18} м.

Основные свойства элементарных частиц

1. малые массы и размеры элементарных частиц обуславливают квантовую специфику в их поведении.
2. наиболее важное свойство элементарных частиц - способность распадаться на более лёгкие элементарные частицы, а также рождаться и уничтожаться (то есть испускаться и поглощаться) при их взаимодействии друг с другом и другими элементарными частицами,
3. вероятностный характер в их поведении (имеют разные схемы распада с разными вероятностями)
4. у всех элементарных частиц проявляются корпускулярно-волновые свойства,
5. наличие почти у всех частиц соответствующих им **античастиц** (они имеют одинаковые с частицами массу, спин, среднее время жизни, но противоположные по знаку электрический, барионный и лептонный заряды, а также магнитный момент).

Античастицы отсутствуют лишь у фотона и двух мезонов (π^0 -мезон и η^0 -мезон), вернее сказать, что они с ними просто тождественно равны. Эти частицы называют **истинно нейтральными**.

6. при соприкосновении частицы с соответствующей ей античастицей происходит процесс **аннигиляции** – превращение частиц и античастиц в фотоны и мезоны больших энергий.

(истинно нейтральные частицы не способны к аннигиляции, но испытывают взаимные превращения).

Основные характеристики элементарных частиц

- **заряд** (различают три вида зарядов элементарных частиц: **электрический**, **барионный** и **лептонный** заряды.

Некоторые частицы нейтральны, другие обладают положительным или отрицательным электрическим зарядом, равным по величине заряду электрона).

- **масса** (отражает инертные и гравитационные свойства частицы и определяет имеющийся в ней запас энергии. Легчайшей частицей, обладающей массой покоя, является электрон ($m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг),

- **спин** (спин частицы каждого вида имеет строго определенное значение: если спин фотона принять за единицу, то все частицы имеют спин 0, $\frac{1}{2}$ или 1 (кроме гиперона Q^- , спин которого равен $3/2$).

- **среднее время жизни** (почти все элементарные частицы нестабильны. В свободном состоянии стабильны только протон, электрон и частицы, не имеющие массы покоя (фотон и нейтрино). Остальные частицы самопроизвольно распадаются, и все, кроме нейтрона, имеют очень непродолжительное среднее время жизни.

В зависимости от среднего времени жизни элементарные частицы подразделяют на:

- **стабильные**

Электрон ($\tau_e > 2 \cdot 10^{22}$ лет), протон ($\tau_p > 2 \cdot 10^{32}$ лет), фотон и нейтрино

Для них не зарегистрированы спонтанные распады

- **квазистабильные**

(к ним относятся частицы, распад которых происходит за счёт слабых и электромагнитных взаимодействий с временем жизни $\tau_e > 10^{-20}$ с)

Пр: нейтрон ($\tau_n = (898 \pm 16) \text{ с}$), а также частицы с $\tau > 10^{-6} \text{ с}$; $\tau > 10^{-8} \text{ с}$; $\tau > 10^{-10} \text{ с}$; $\tau > 10^{-13} \text{ с}$; $\tau > 10^{-20} \text{ с}$

- **нестабильные**

(к ним относятся частицы, распад которых происходит за счёт сильного взаимодействия)

Это, так называемые, резонансы с $\tau > 10^{-24} \text{ с}$.

- **схема распада** (все элементарные частицы, кроме стабильных (электрона, протона, фотона и нейтрино) самопроизвольно распадаются через очень маленький промежуток времени, причём одна и та же частица обычно имеет несколько схем распада. Предсказать точно по какой схеме она сейчас распадётся нельзя, можно лишь указать вероятность, с которой это может произойти).

- **магнитный момент** (характеризует магнитные свойства частицы)

Классы элементарных частиц

1. **фотоны** (эта группа состоит из одной частицы – фотона, которая является квантом электромагнитного излучения)

Фотон участвует только в электромагнитном и гравитационном взаимодействиях.

2. **лептоны** (это самые элементарные частицы, у которых не обнаружено наличие внутренней структуры)

Они не участвуют в сильных взаимодействиях и имеют полуцелый спин равный $\frac{1}{2}$, то есть они являются фермионами.

Лептонов всего 12 (вместе с античастицами):

- электрон e (масса $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг), мюон μ (масса $207m_e$), тау-лептон τ (масса $3487m_e$) и их античастицы,

- электронное нейтрино ν_e , мюонное нейтрино ν_μ , таонное нейтрино ν_τ и их античастицы.

Нейтрино являются самыми распространёнными во Вселенной частицами. Их приблизительно в 10^9 раз больше, чем протонов или нейтронов. Они участвуют только в слабом взаимодействии, из-за чего обладают самой большой проникающей способностью из всех элементарных частиц (при энергиях порядка 1 МэВ нейтрино имеют длину свободного пробега в свинце порядка 100 световых лет).

3. **адроны** (это частицы, которые имеют внутреннее строение и состоят из **кварков**)

Адроны участвуют во всех видах фундаментальных взаимодействий: гравитационном, сильном, слабом, электромагнитном. Известно около 300 адронов вместе с их античастицами.

К адронам относятся: - нуклоны, - пионы, - каоны, - мезоны, - гипероны

Группа		Название частицы	Символ		Масса		Электрический заряд	Спин	Время жизни (с)
			Частица	Анти-частица	в электронных массах	в МэВ			
Адроны	Мезоны	Пи-мезоны	π^0		264,1	134,96	0	0	$0,87 \cdot 10^{-16}$
			π^+	π^-	273,1	139,57	1 -1	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$
		К-мезоны	K^+	K^-	966,4	493,67	1 -1	0	$1,24 \cdot 10^{-8}$
			K^0	$\bar{K}^0$	974,1	437,7	0	0	$\approx 10^{-10}$ -10^{-8}
		Эта-нуль-мезон	η^0		1074	548,8	0	0	$\approx 10^{-18}$
	Барионы	Протон	p	$\bar{p}$	1836,1	933,28	1 -1	1/2	Стабилен
		Нейтрон	n	$\bar{n}$	1838,6	939,57	0	1/2	898
		Лямбда-гиперон	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2183,1	1115,6	0	1/2	$2,63 \cdot 10^{-10}$
		Сигма-гипероны	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1189,4	1 -1	1/2	$0,8 \cdot 10^{-10}$
			Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	1192,5	0	1/2	$7,4 \cdot 10^{-20}$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	1197,4	-1 1	1/2	$1,48 \cdot 10^{-10}$
		Кси-гипероны	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	1314,9	0	1/2	$2,9 \cdot 10^{-10}$
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585,6	1321,3	-1 1	1/2	$1,64 \cdot 10^{-10}$
		Омега-минус-гиперон	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	1672,2	-1 1	1/2	$0,82 \cdot 10^{-11}$

18

Мезонами называются адроны, состоящие из **двух** кварков и имеющие целый спин, равный 0 (они являются **бозонами**),

Барионами называются адроны, состоящие из **трех** кварков имеющие полуцелый спин, равный $\frac{1}{2}\hbar$ (они являются

фермионами)

4. **кварки** (это частицы, из которых состоят адроны)

Существует всего 6 видов кварков и 6 видов антикварков.

Характеристики кварков

Кварк	Символ кварка (антикварка)	Электрический заряд [e]	Барионное число B	Спин [h]	Странность S
Верхний (up)	$u(\bar{u})$	$+\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	0
Нижний (down)	$d(\bar{d})$	$-\frac{1}{3}(+\frac{1}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	0
Очарованный (charm)	$c(\bar{c})$	$+\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	-1 (+1)
Странный (strange)	$s(\bar{s})$	$-\frac{1}{3}(+\frac{1}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	-1 (+1)
Истинный (truth)	$t(\bar{t})$	$+\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	0
Прелестный (beauty)	$b(\bar{b})$	$-\frac{1}{3}(+\frac{1}{3})$	$-\frac{1}{3}(+\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	0

Особенность кварков;

- они не обнаружены в свободном состоянии,
- имеют дробный электрический заряд: u и c $+\frac{2}{3}e$, d и s $-\frac{1}{3}e$,

- имеют полуцелый спин $S = \frac{1}{2}\hbar$.

Кварки – фундаментальные частицы, участвующие во всех видах фундаментальных взаимодействий.

Построение некоторых мезонов и барионов из кварков

Мезоны		Барионы	
Каждый мезон строится из одного кварка и одного антикварка		Каждый барион строится из трех кварков	
Частица	Состав	Частица	Состав
π^+	$u\bar{d}$	p	uud
π^-	$\bar{u}d$	$\bar{p}$	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$
K^+	$u\bar{s}$	n	udd
K^-	$\bar{u}s$	$\bar{n}$	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$
K^0	$d\bar{s}$	Σ^+	uus
$\bar{K}^0$	$\bar{d}s$	Σ^-	dds

У лептонов и барионов внутри класса действуют **законы сохранения числа частиц**. Когда, например, исчезает один барион, вместо него появляется другой. Закон сохранения числа барионов делает протон стабильным: он самый легкий барион и поэтому не может самопроизвольно распадаться с образованием другого бариона. Законы сохранения числа барионов и числа лептонов многократно проверены на опыте.

У класса мезонов и фотонов закон сохранения числа частиц не выполняется, и они могут возникать и исчезать в любом количестве.

Все фундаментальные частицы группируют в три поколения, каждое из которых состоит из четырех членов:

- в первом поколении – "верхний" и "нижний" кварки, электрон и электронное нейтрино;
- во втором поколении – "очарованный" и "странный" кварки, мюон и мюонное нейтрино;
- в третьем поколении – "истинный" и "прелестный" кварки и тау-частицы со своим нейтрино.

Все обычное вещество состоит из частиц первого поколения. Все остальные поколения можно создать искусственно на ускорителях заряженных частиц.

Взаимодействие кварков. Глюоны

Сильное взаимодействие между кварками осуществляется при обмене глюонами.

Глюон – бозон со спином 1, переносчик сильного взаимодействия.

Глюон электрически нейтрален и не имеет массы покоя.

Полное число глюонов – 8

