



# ФИЗИКА

Лекция № 3

# ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

# Тепловое излучение

Тепловое излучение происходит благодаря хаотическим тепловым колебаниям молекул или атомов, из которых состоит любое вещество.

Тепловое излучение происходит за счет энергии теплового движения, т.е. за счет внутренней энергии тела.

Тепловое излучение наблюдается при температуре тела  $T > 0$  К.

При температуре тела  $T > 900$  К излучение становится видимым.

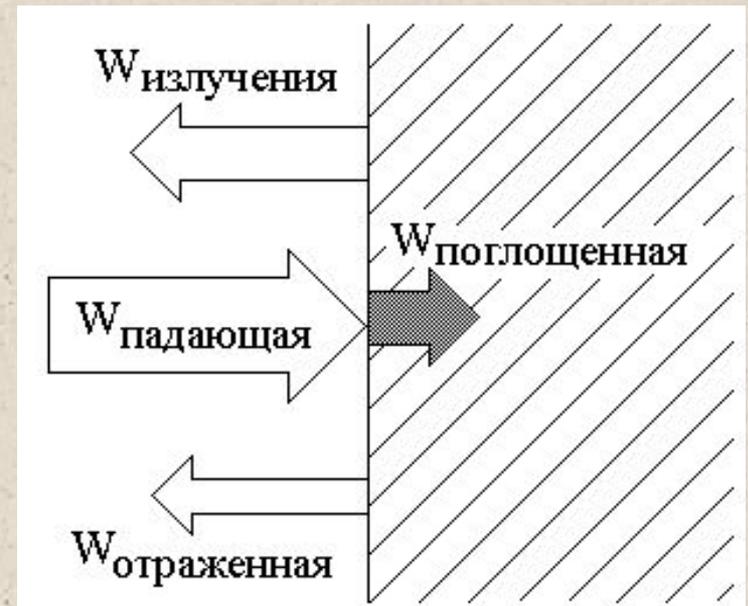
При излучении температура тела понижается.  
При поглощении энергии температура тела повышается.

Эти противоположные процессы приводят к состоянию термодинамического равновесия: тело излучает столько энергии, сколько поглощает за тот же промежуток времени.

Тепловое излучение – равновесное излучение.

В состоянии термодинамического равновесия

$$W_{\text{изл}} = W_{\text{погл}}$$



# Характеристики теплового излучения

## Испускательная способность

$$r_{\nu, T} = \frac{dW_{\text{изл}}}{d\nu} \quad \text{или} \quad r_{\lambda, T} = \frac{dW_{\text{изл}}}{d\lambda}$$

$dW_{\text{изл}}$  - энергия, излучаемая телом за единицу времени с единицы площади поверхности в интервале частот от  $\nu$  до  $(\nu + d\nu)$  при данной температуре  $T$ .

## Энергетическая светимость

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu, T} d\nu = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda$$

– это энергия, излучаемая телом за единицу времени с единицы площади поверхности во всем диапазоне частот (или длин волн) при данной температуре  $T$ .

**Полная энергия излучения** с поверхности  $S$  за время  $t$  при данной  $T$

$$W_{\text{изл}} = R_e St .$$

**Коэффициент поглощения**

$$\alpha_{\nu, T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} ,$$

$dW_{\text{погл}}$  - энергия, поглощенная телом;  $dW_{\text{пад}}$  - энергия, падающая на тело.

Величина  $\alpha_{\nu, T}$  (или  $\alpha_{\lambda, T}$ ) показывает, какая доля падающей энергии поглощается телом.

$$0 \leq \alpha_{\nu, T} \leq 1 .$$

# Абсолютно чёрное тело

– это тело, поглощающее при любой температуре **всю** энергию падающего на него излучения.

Для абсолютно черного тела (АЧТ) при любой температуре

$$\alpha^*_{\nu, T} = \alpha^*_{\lambda, T} = 1$$

Для всех реальных тел  $\alpha < 1$ .

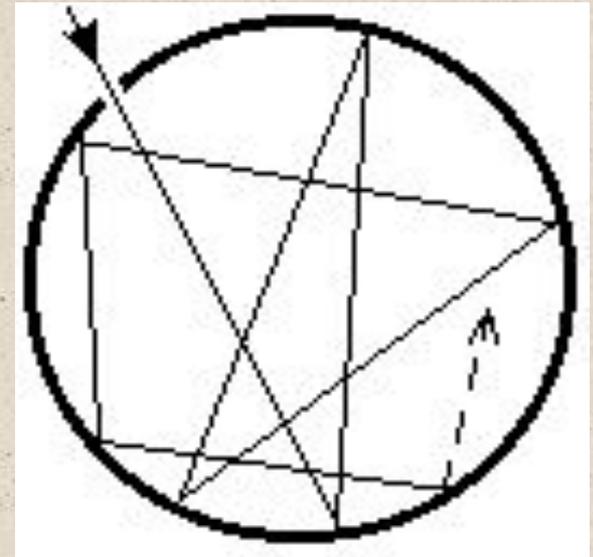
*Например:*

*для сажи  $\alpha = 0,95$ ;*

*для алюминия  $\alpha = 0,1$ ;*

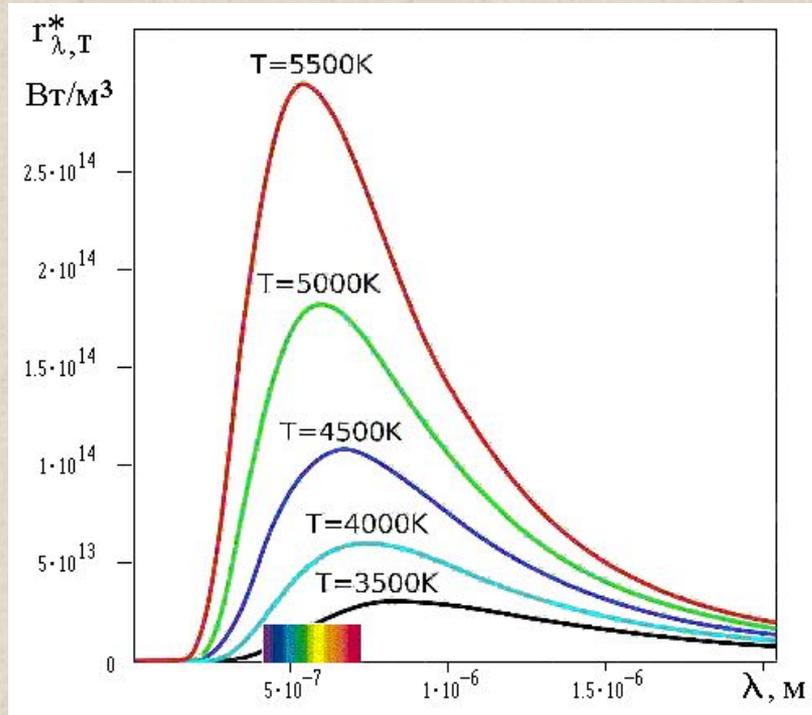
*для меди  $\alpha = 0,5$ ;*

*для воды  $\alpha = 0,67$ .*



**АЧТ не только поглощает, но и излучает энергию.**

# Законы теплового излучения абсолютно черного тела



**Экспериментальные спектры излучения абсолютно черного тела для различных температур**

**Экспериментальные спектры излучения АЧТ для различных температур**

1. Распределение энергии по спектру неоднородное и оно зависит от температуры.
2. Площадь под кривой (т.е. энергетическая светимость) существенно зависит от температуры.
3. Максимум излучения с повышением температуры смещается в сторону коротких длин волн.

### **Закон Стефана-Больцмана:**

*энергетическая светимость АЧТ пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры*

$$R_e^* = \sigma T^4,$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$  – постоянная Стефана-Больцмана.

### **Закон смещения Вина:**

*длина волны  $\lambda_m$ , соответствующая максимум излучения АЧТ, обратно пропорциональна его термодинамической температуре*

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

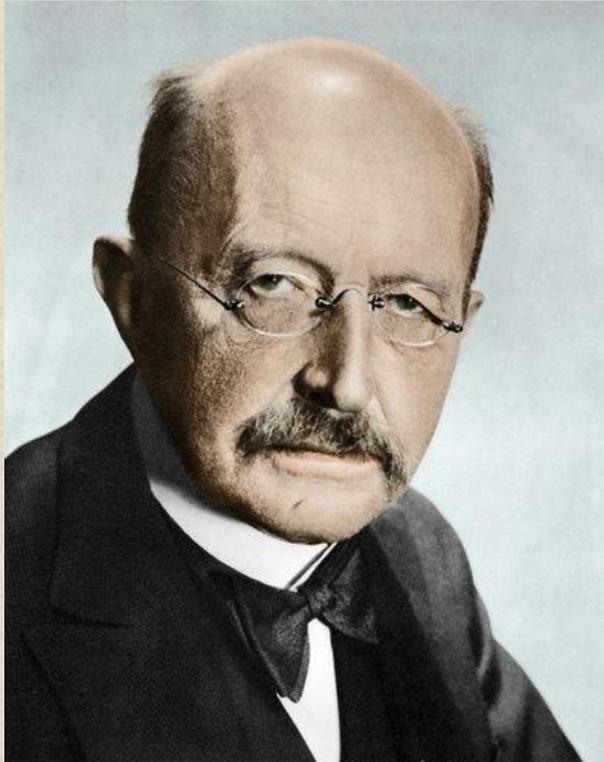
где  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянная Вина.

### **Закон Кирхгофа:**

*отношение энергетической светимости тела к его коэффициенту поглощения не зависит от материала тела и равно энергетической светимости АЧТ*

$$\frac{r_{\nu, T}}{\alpha_{\nu, T}} = r_{\nu, T}^*$$

# Формула Планка для излучения АЧТ



Макс Планк  
1858 - 1947

По классическим законам каждый осциллятор может иметь **любое** значение энергии, пропорциональное квадрату амплитуды колебаний. Следовательно, и излучать такой осциллятор может также любое значение энергии.

На основе таких представлений Релей и Джинс, а позже и Планк пришли к результату

$$r_{\nu, T}^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT.$$

Данная формула удовлетворительно описывает спектр излучения при низких частотах. Но при больших частотах формула приходила в явное противоречие с действительностью.

Макс Планк предложил совершенно иной подход к решению этой проблемы.

## Планк предположил:

1. Атомный осциллятор имеет не любую величину энергии, а только такую, в которой содержится целое число элементарных порций энергии  $h \nu$ .
2. Осциллятор излучает такими же порциями.
3. Распределение осцилляторов по возможным значениям энергии подчиняется распределению Больцмана

$$n = n_0 \exp(-h \nu / kT).$$

## Формула Планка для испускательной способности АЧТ

$$r_{\lambda, T}^* = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc / \lambda kT) - 1}$$

**Эта формула блестяще согласуется с экспериментальным спектром излучения АЧТ во всем интервале частот и температур.**

**Из этой формулы можно получить и закон Стефана-Больцмана, и закон смещения Вина.**

**Идея Планка о квантовой природе излучения положила начало новому разделу науки – квантовой физике.**

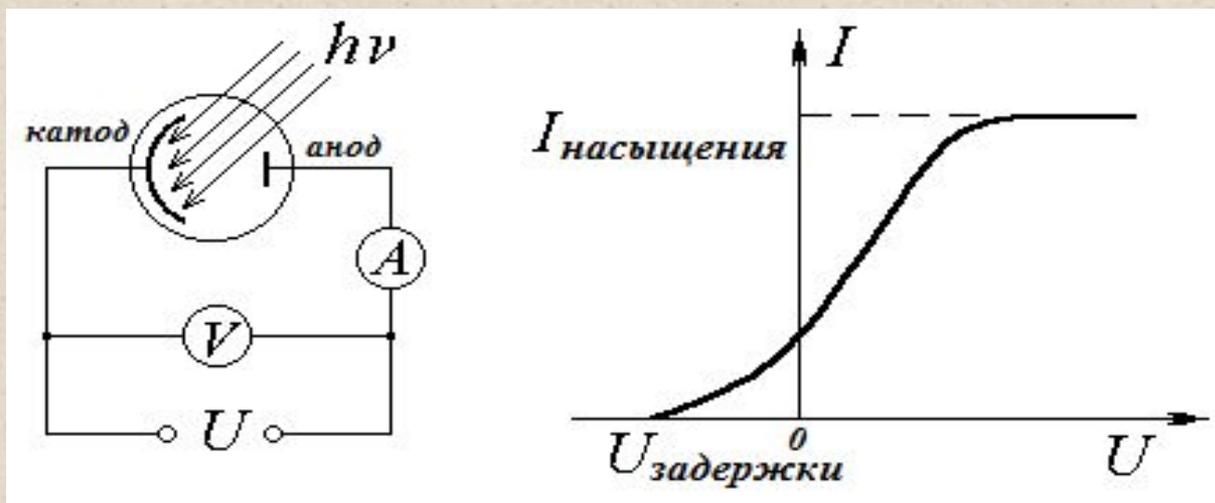
***Законы теплового излучения используются для бесконтактного определения высоких температур:***  
***радиационная пирометрия;***  
***яркостная пирометрия;***  
***по длине волны максимума излучения.***

# ***Внешний фотоэффект***

***Внешний*** фотоэффект – это испускание (эмиссия) электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Внешний фотоэффект наблюдается для твердых тел и в газах (фотоионизация).

***Внутренний*** фотоэффект наблюдается в полупроводниках и приводит к увеличению их электропроводности.

***Вентильный*** фотоэффект наблюдается в неоднородных полупроводниках и приводит к появлению ЭДС.



**Ток насыщения** соответствует условию, при котором все испущенные из вещества электроны собираются на аноде:

$$I_{\text{нас}} = en,$$

где  $e$  – заряд электрона,  $n$  – число электронов, вырванных из катода за 1 с.

Ток насыщения пропорционален освещенности катода.

**Задерживающее напряжение** – это обратное напряжение, при котором полностью прекращается фототок.

По величине задерживающего напряжения можно судить о **максимальной кинетической энергии испущенных электронов**:

$$eU_{\text{зад}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = W_{\text{к}}^{\text{max}}.$$

# Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

Согласно Эйнштейну свет излучается, распространяется и поглощается веществом отдельными порциями – квантами. Кванты движутся со скоростью света, не делясь на части, а также испускаются и поглощаются только как целое. Энергия одного кванта  $\varepsilon = h \nu$ .

При поглощении света веществом энергия фотона расходуется на совершение работы выхода электрона и сообщение ему кинетической энергии:

$$h \nu = A + \frac{m v_{\max}^2}{2}$$

$m$  – масса электрона;  $v_{\max}$  – максимальная скорость испущенного электрона.

Это уравнение выражает закон сохранения энергии при фотоэффекте.

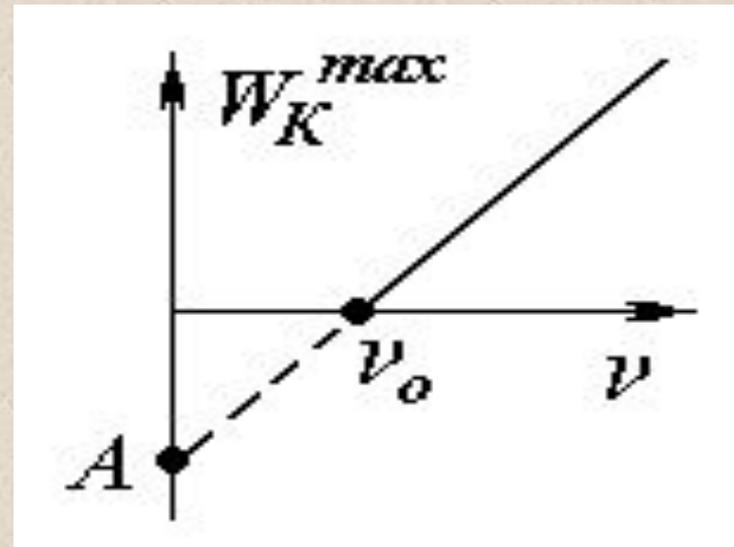
**Работа выхода** – это минимальная энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы он покинул вещество.

Если  $\varepsilon > A$ , то испущенный электрон имеет кинетическую энергию

$$W_K^{\max} = \varepsilon - A = h\nu - A.$$

Величина  $W_K^{\max}$  находится экспериментально по величине задерживающего напряжения:

$$eU_{\text{зад}} = W_K^{\max}.$$



Если энергия фотона  $\varepsilon < A$ , то фотоэффект не наблюдается, т.е. электроны не покидают вещество.

Если  $\varepsilon = A$ , то  $W_k^{\max} = 0$  и  $h\nu_0 = A$ .

Граничная частота  $\nu_0 = \frac{A}{h}$ , ниже которой фотоэффект не происходит, называется **красной границей фотоэффекта**.

### Применение фотоэффекта:

- звуковое кино,
- системы автоматики,
- солнечные батареи,
- TV и видеозаписывающая техника.

# Масса фотона

Согласно квантовой теории свет испускается, распространяется и поглощается дискретными порциями энергии (квантами) – фотонами.

Энергия фотона  $\varepsilon = h\nu$ .

Фотон, как частица, обладает массой и импульсом.

Масса фотона определяется непосредственно из связи массы и энергии  $E = mc^2 \implies$

$$m = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Масса фотона существенно отличается от массы других микрочастиц тем, что масса покоя фотона  $m_0 = 0$ .

При поглощении фотон полностью отдает свою энергию.

**Фотон существует только в движении!**

# Импульс фотона

Выражение для импульса фотона можно получить из связи между энергией и импульсом релятивистской частицы:

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2.$$

Так как для фотона  $m_0 = 0$ , то  $\varepsilon^2 = p_\phi^2 c^2 \Rightarrow$

$$p_\phi = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Выражения для массы и импульса фотона связывают корпускулярные характеристики ( $\varepsilon$ ,  $m$ ,  $p$ ) с волновыми характеристиками ( $\nu$ ,  $\lambda$ ) фотона. Этим подчеркивается двойственность свойств света – **корпускулярно-волновой дуализм: свет одновременно и волна, и частица.**

# Давление света

Фотон обладает импульсом, поэтому свет, падающий на какое-то тело, оказывает на него давление.

Пусть за единицу времени на единицу площади поверхности падает  $N$  фотонов. Если коэффициент отражения поверхности  $\rho$ , то отразится  $\rho N$  фотонов, а  $(1-\rho)N$  фотонов поглотится.

Каждый поглощенный фотон передает поверхности импульс  $p_\phi = \frac{h\nu}{c}$ , а каждый отраженный  $2p_\phi = \frac{2h\nu}{c}$ .

Общий импульс, получаемый поверхностью от  $N$  фотонов

$$p = \frac{2h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1-\rho)N = (1+\rho) \frac{h\nu N}{c}.$$

Но  $h\nu N = E_e$  - энергия, падающая на единицу поверхности за единицу времени. Тогда

$$p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho).$$

# Эффект Комптона:

при столкновении (рассеянии) фотона на свободных электронах длина волны электромагнитного излучения увеличивается.

Если до столкновения электрон неподвижен, а импульс фотона  $\vec{p}_\phi$ , то согласно закону сохранения импульса (а этот закон действует и в микромире!)

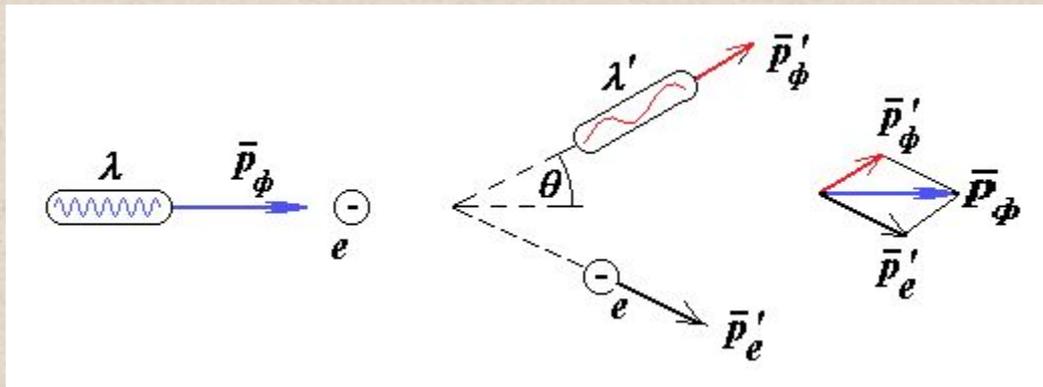
$$\vec{p}_\phi = \vec{p}'_\phi + \vec{p}'_e$$

Используя закон сохранения энергии, можно получить

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

где  $m_0$  - масса покоя электрона;  $\theta$  - угол рассеяния фотона.

Эффект Комптона не только подтверждает квантовые свойства ЭМИ, но и (еще раз) указывает на его корпускулярно-волновой дуализм.

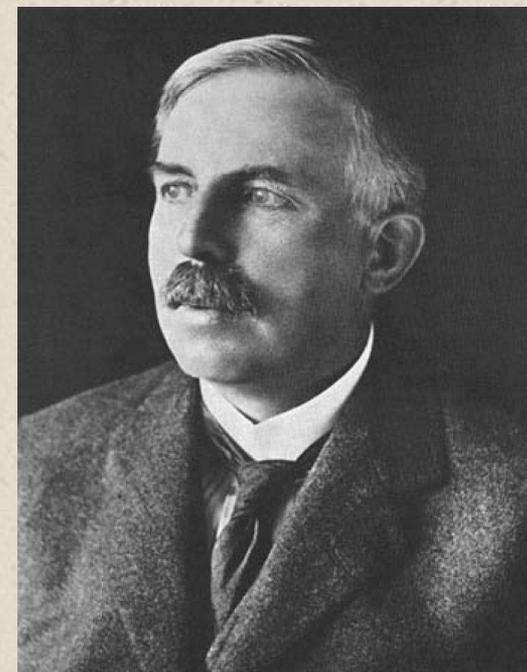


# Планетарная модель атома

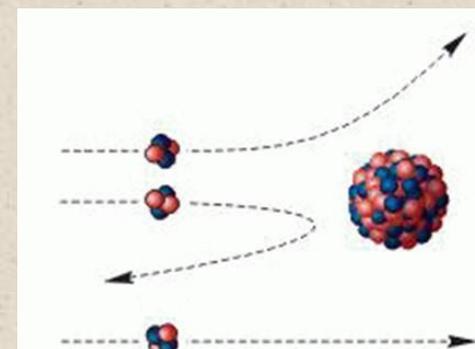
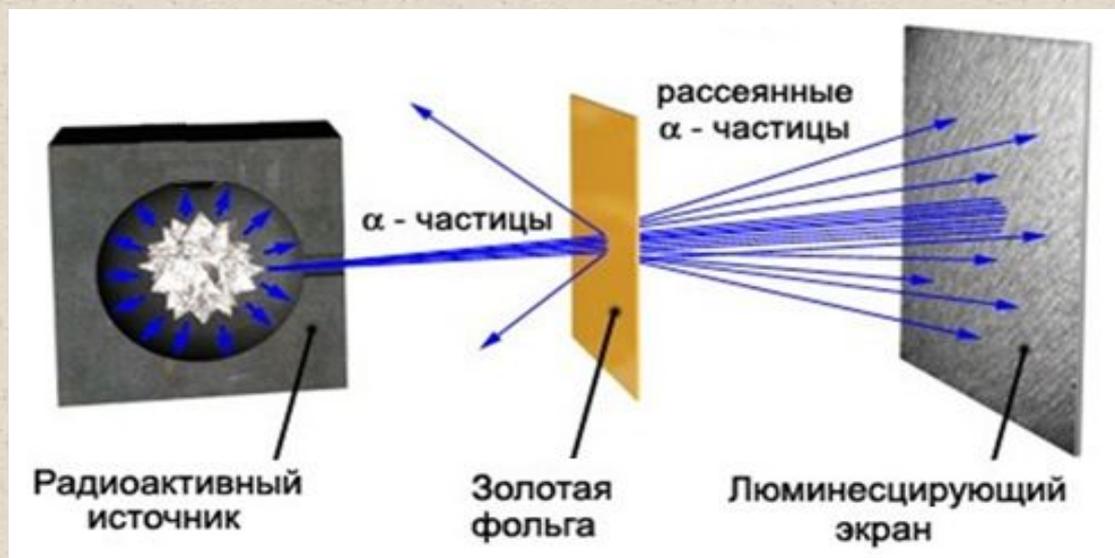
На основании исследования прохождения  $\alpha$ -частиц через тонкие пленки золота Э. Резерфорд пришел к выводу, что **положительный** заряд атома сосредоточен в очень небольшом объеме, который он назвал ядром. Линейные размеры атома  $\sim 10^{-10}$  м, размер ядра  $\sim 10^{-15}$  м.

В атоме есть и **отрицательный** заряд – это электроны, которые движутся вокруг ядра.

В целом атом электрически нейтрален.



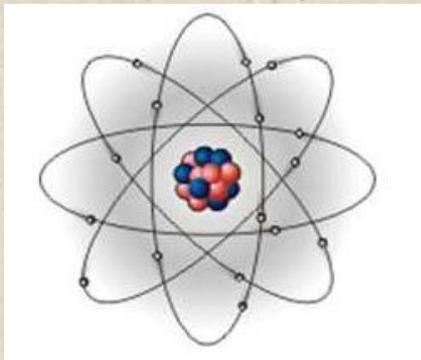
Эрнест Резерфорд  
1871-1937



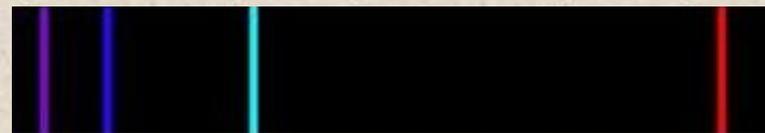
Резерфорд предложил планетарную модель атома: в центре атома находится ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома, вокруг ядра по круговым орбитам вращаются электроны (как планеты вокруг Солнца).

Планетарная модель строения атома очень наглядна, но она не может объяснить ряд известных фактов.

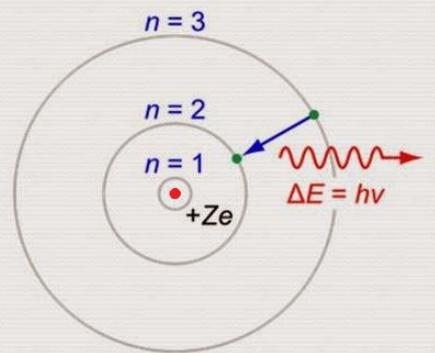
- Электрон, имеющий заряд, должен за счет кулоновских сил притяжения «упасть» на ядро. На самом деле атом — это устойчивая система.
- При движении по круговой орбите электрон имеет центростремительное ускорение. Согласно теории Максвелла заряд, движущийся с ускорением, излучает электромагнитные волны. При излучении энергия электрона должна уменьшаться, и электрон по мере приближения к ядру должен был бы излучать волны всевозможных частот, т. е. излучение имело бы непрерывный (сплошной) спектр. На самом деле атом излучает линейчатый спектр.



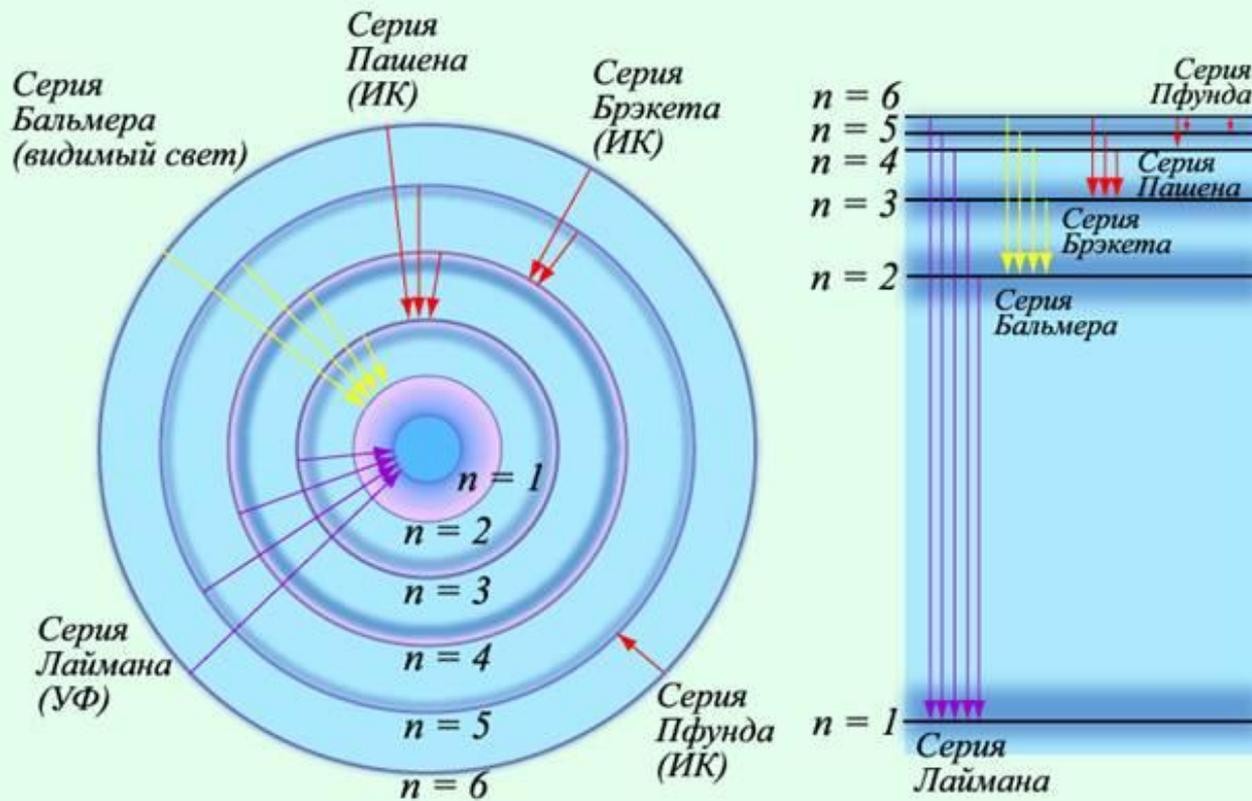
Сплошной спектр



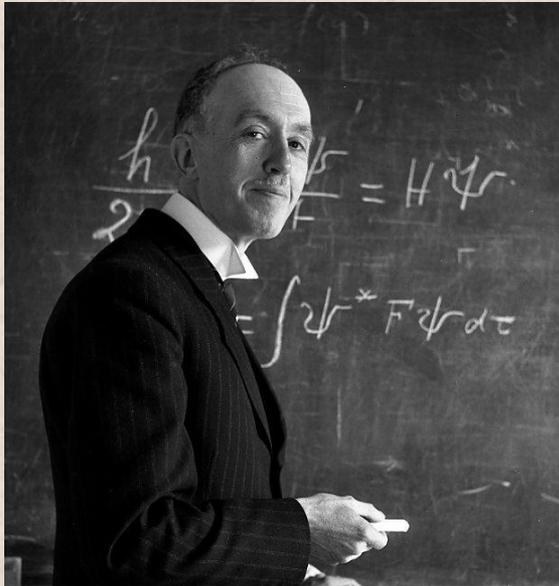
Линейчатый спектр излучения атома водорода



# Атом водорода по Бору. Спектральные линии.



# Волна де Бройля



**Луи де Бройль**  
Лауреат Нобелевской  
премии по физике  
1892 - 1987

Луи де Бройль высказал предположение, **что двойственность свойств присуща не только фотонам (квантам электромагнитного излучения), но и любым частицам вещества.**

Причем количественные соотношения между волновыми и квантовыми свойствами частиц такие же, как и для фотонов:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{и} \quad \nu = \frac{\varepsilon}{h}$$

Подтверждением гипотезы де Бройля явился опыт по дифракции (*явно волновое явление!*) электронов на кристалле никеля.

Впоследствии опыты были проведены с нейтронами, протонами, атомами и молекулами. Всюду гипотеза де Бройля блестяще подтвердилась.

Присущи ли волновые свойства макрообъектам? Считают, что макрообъекты проявляют только корпускулярные свойства, а волновые свойства выражены крайне слабо.

# Соотношение неопределенностей

Двойственная корпускулярно-волновая природа частиц вещества ставит вопрос о границах применимости классической физики: до каких пор можно пользоваться классическими представлениями и учитывать только корпускулярные свойства тел?

Вернер Гейзенберг пришел (1927 г.) к выводу, что объект микромира нельзя одновременно с любой высокой точностью характеризовать его координатой и импульсом:  
***произведение неопределенностей координат на соответствующие неопределенности импульса не может быть меньше постоянной Планка  $h$***

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h \quad \Delta y \cdot p_y \geq h \quad \Delta z \cdot p_z \geq h$$

Это соотношение необходимо для понимания многих особенностей микромира.



**Вернер Гейзенберг**

1901–1976

Соотношение неопределённостей приводит к важному следствию:

**микрочастицы не могут покоиться!** Поэтому:

- в атомах и молекулах при температуре 0 К сохраняется движение электронов около ядра и ядер относительно друг друга (нулевые колебания);
- чем меньше область пространства, в которой находится частица, тем большая энергия требуется для ее удержания.

**Соотношение неопределённостей для энергии и времени:**

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

т.е. разброс значений энергии  $\Delta E$  возрастает с уменьшением среднего времени жизни  $\Delta t$  частицы.

*Например*, по ширине спектральной линии можно оценить время нахождения атома в возбужденном состоянии.

**Существенно, что невозможность одновременно точного определения координат и импульса или энергии и времени не есть следствие несовершенства измерительной техники. Это принципиальная невозможность, отражающая двойственную природу микрочастиц.**

# Физический смысл волн де Бройля

Сравним дифракцию световых волн и микрочастиц.

При дифракции **световых волн** происходит перераспределение энергии волны, в результате на экране наблюдаются участки различной **интенсивности**. С точки зрения квантовой теории интенсивность света больше там, куда больше попало фотонов, т.е. где больше **вероятность** попадания фотонов. Можно сделать вывод, что **интенсивность световой волны в разных точках экрана пропорциональна вероятности попадания фотона в эту точку пространства.**

Дифракционная картина, наблюдаемая для **микрочастиц**, также характеризуется неодинаковым распределением числа частиц по разным направлениям. Можно утверждать, что **вероятность попадания микрочастицы в ту или другую точку пространства пропорциональна интенсивности волн де Бройля.**

**Вероятностный подход к описанию микрочастиц – важнейшая особенность квантовой теории.**

# Волновая функция

Для описания движущихся микрочастиц в квантовой теории разработан некий математический формализм, суть которого в следующем.

Каждой микрочастице ставится в соответствие некоторая функция, значение которой зависит от координат и времени  $\Psi(x, y, z, t)$  - это так называемая пси-функция.

Формально пси-функция обладает свойством классической волны, поэтому ее часто называют **волновой функцией**.

Волновая функция является основным носителем информации о волновых и квантовых свойствах частиц и полностью описывает их состояние.

Квадрат модуля волновой функции  $|\Psi(x, y, z, t)|^2$  пропорционален вероятности обнаружить частицу в момент времени  $t$  в элементе объема  $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ :

$$dw = |\Psi|^2 dV .$$

**Величина  $|\Psi|^2$  определяет интенсивность волн де Бройля.**

Вероятность обнаружить частицу в момент времени  $t$  в конечном объеме  $V$

$$w = \int_V dw = \int_V |\Psi|^2 dV .$$

Пси-функция удовлетворяет **условию нормировки**

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

т.е. обнаружить частицу где-нибудь в бесконечном объеме есть достоверное событие.

Пси-функция является объективной характеристикой состояния микрочастицы, поэтому она **конечна** ( $w \leq 1$ ), **однозначна** и **непрерывна**.

# Уравнение Шрёдингера

– это уравнение движения микрочастиц в силовых полях:

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

$$\hbar = \frac{h}{2\pi};$$

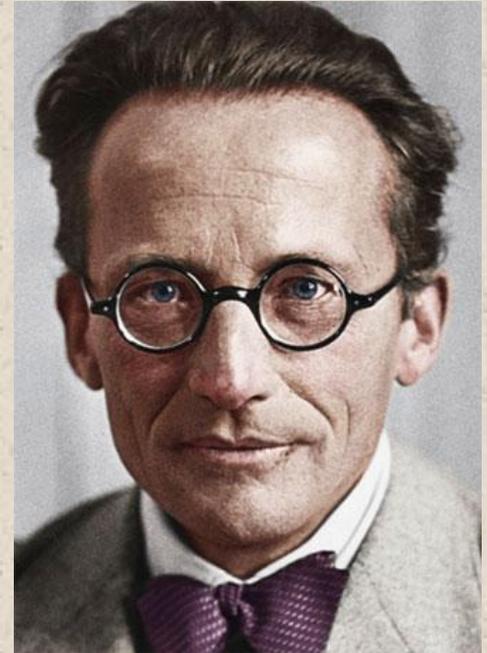
$m$  - масса частицы;

$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  - оператор Лапласа;

$i = \sqrt{-1}$  - мнимая единица;

$U(x, y, z, t)$  - потенциальная энергия частицы  
в силовом поле, в котором она движется;

$\Psi(x, y, z, t)$  - искомая волновая функция.



Эрвин Шрёдингер  
1887 - 1961

Уравнение Шредингера в квантовой механике играет такую же роль, что и уравнение Ньютона в классической механике. Как и другие фундаментальные законы физики, оно не выводится, а постулируется. Правильность его подтверждается опытом, что и придает ему статус закона природы.

Если силовое поле стационарно, т.е. не зависит от времени, то  $U(x, y, z)$  имеет смысл потенциальной энергии, и решение уравнения Шрёдингера можно представить в виде произведения двух функций: только координат и только времени

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

где  $E = W_K + W_P$  – полная энергия частицы, не зависящая от времени. В этом случае имеет место **стационарное уравнение Шрёдингера**

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

Разность  $(E - U)$  является **кинетической энергией частицы**.

# Свободная частица

Частица называется свободной, если на нее ничто не действует. В этом случае потенциальная энергия частицы  $U = 0$ , а ее полная энергия равна кинетической энергии.

Пусть частица движется вдоль оси  $X$ , тогда уравнение Шредингера

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2mE}{\hbar^2} \psi = 0.$$

Решением данного уравнения является плоская монохроматическая волна

$$\psi = A e^{-i(\omega t - kx)},$$

где волновое число  $k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} = \frac{mv}{\hbar} = \frac{p}{\hbar} \Rightarrow p = \hbar k$ .

Так как  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , то  $\lambda = \frac{h}{p}$  – это волна де Бройля.

Таким образом, свободная частица в квантовой механике описывается плоской монохроматической волной де Бройля. Этому соответствует не зависящая от времени вероятность обнаружить частицу в данной точке пространства, причем одинаковая в любой точке  $|\Psi|^2 = \Psi \cdot \Psi^* = A^2$ .

# Частица в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками

Примером такой ситуации может служить свободный электрон в металле: вне металла потенциальная энергия электрона  $U = 0$ , а внутри металла она отрицательна и численно равна работе выхода из металла. То есть в металле движение свободного электрона ограничено потенциальным барьером со стенками конечной высоты. Яма с бесконечно высокими стенками более проста.

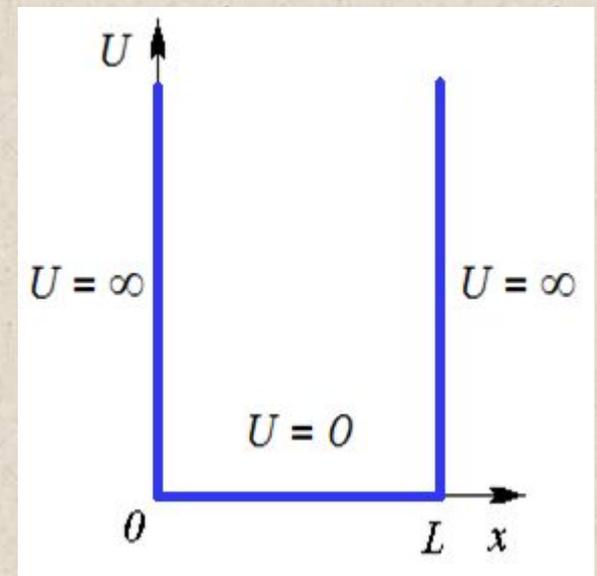
Пусть частица движется вдоль оси  $X$ .

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & x < 0 \\ 0, & 0 \leq x \leq L \\ \infty, & x > L \end{cases}$$

где  $L$  – ширина потенциальной ямы.

Для такой одномерной задачи уравнение Шрёдингера принимает вид

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



Так как высота стенок бесконечна, то вероятность обнаружить частицу за пределами ямы равна нулю, т.е.  $\psi = 0$ .

В силу непрерывности волновой функции граничные условия

$$\psi(0) = 0; \quad \psi(L) = 0.$$

В пределах ямы ( $0 < x < L$ ) уравнение Шредингера

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + k^2 \psi = 0,$$

где 
$$k^2 = \frac{2m}{\hbar^2} E. \quad (*)$$

Общее решение этого дифференциального уравнения

$$\psi(x) = A \sin kx + B \cos kx.$$

По первому граничному условию  $\psi(0) = 0$ , поэтому  $B = 0$ .

Из второго граничного условия  $\psi(L) = 0$ , то есть

$$\psi(L) = A \sin kL = 0.$$

Это возможно, если  $kL = n\pi$ , где  $n = 1, 2, \dots$ . Из выражения (\*) следует, что

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$$

**Это собственные значения энергии частицы в потенциальной яме.**

Только при таких значениях  $E_n$  уравнение Шредингера имеет решение. То есть энергия частицы в прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками имеет **дискретный ряд значений**, энергия квантована.

Существенное отличие квантовой теории от классической состоит в том, что квантовая теория предсказывает существование **минимальной энергии** частицы.

Для данного случая

$$E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}.$$

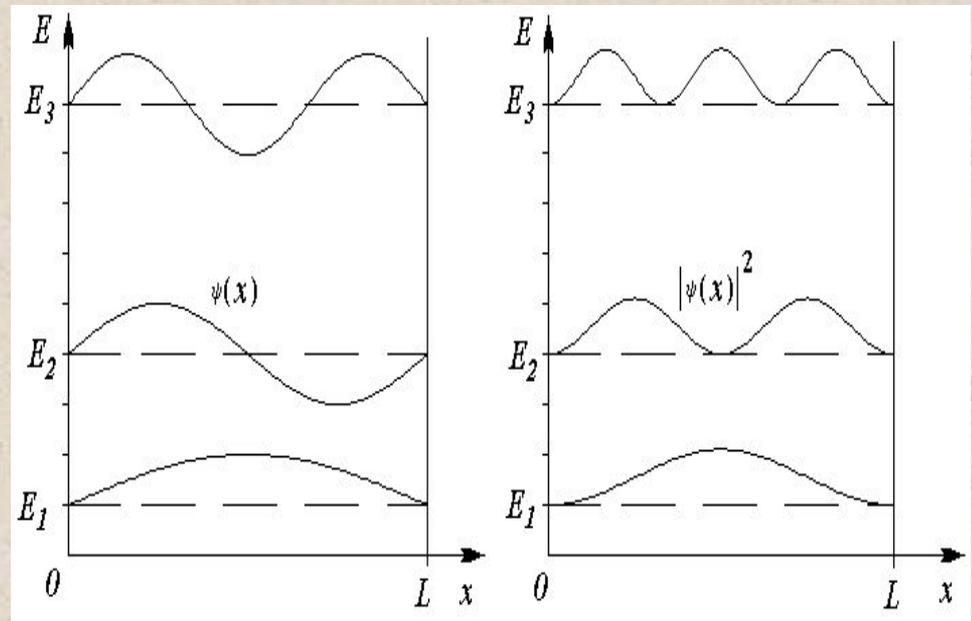
Значение амплитуды волны определяется из условия нормировки

$$A^2 \int_0^L \sin^2\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx = 1.$$

Откуда  $A = \sqrt{\frac{2}{L}}$ .

Тогда **собственные функции** имеют вид

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi}{L} x$$



# Частица в сферически симметричном поле

Решение этой задачи позволяет описать состояния электрона в атоме водорода и в водородоподобных системах ( $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{++}$  ...).

Потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром

$$U(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

$r$  – расстояние между электроном и ядром;

$Ze$  – заряд ядра (для водорода  $Z = 1$ ).

Уравнение Шредингера в данном случае

$$\nabla^2\psi + \frac{2m}{\hbar^2}\left(E + \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}\right)\psi = 0.$$

Уравнение имеет решение, если значения энергии

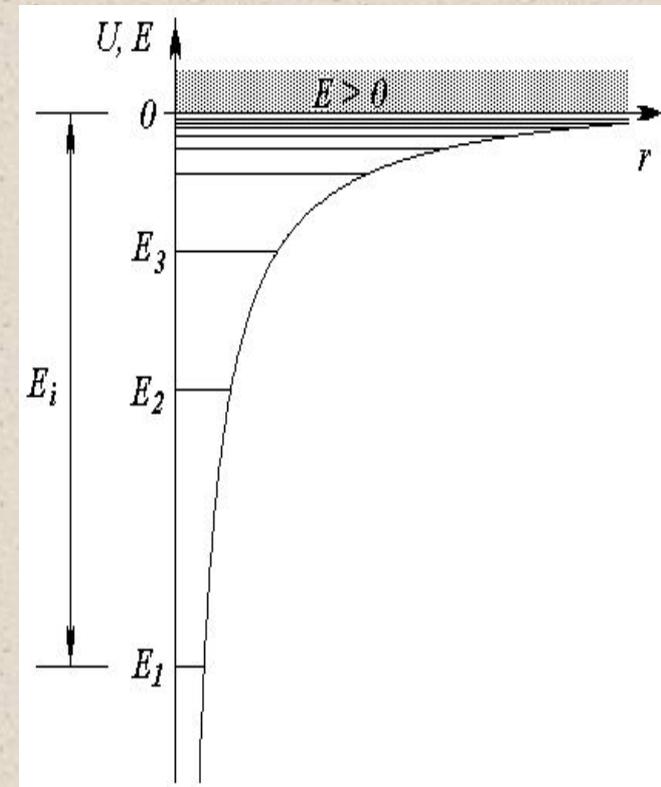
$$E_n = -\frac{Z^2 m e^4}{8n^2 \hbar^2 \epsilon_0^2}, \quad \text{где } n = 1, 2, \dots$$

Уровень  $E_1$ , соответствующий минимальной энергии, называется **основным**; остальные – **возбужденными**.

Пока  $E < 0$ , электрон находится в гиперболической потенциальной яме и является связанным.

При  $E > 0$  электрон становится свободным, и он может уйти в бесконечность. В таком состоянии электрон имеет непрерывный спектр энергии.

**Энергия ионизации**  $E_i = -E_1$ .

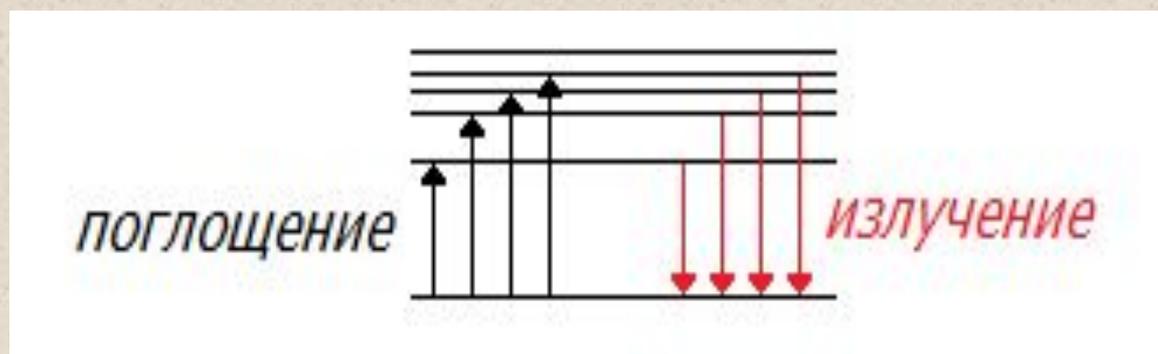


Поглощая энергию извне, электрон переходит в возбуждённое состояние, которому соответствует большее значение энергии. Возвращаясь в стационарное состояние, электрон излучает квант, энергия которого равна разности энергий возбужденного  $E_m$  и стационарного  $E_n$  состояний:

$$\varepsilon = h \nu_{mn} = \frac{hc}{\lambda_{mn}} = E_m - E_n = E_{mn} .$$

Каждый атом характеризуется определенным набором уровней разрешенной энергии.

В зависимости от случайных обстоятельств возникают самые различные энергетические переходы.



# Спектр атома водорода

Переходя после возбуждения на нижележащий уровень, электрон излучает квант, энергию которого для атома водорода можно рассчитать по формуле

$$\varepsilon = h \nu_{mn} = h \frac{c}{\lambda_{mn}} = hcR \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

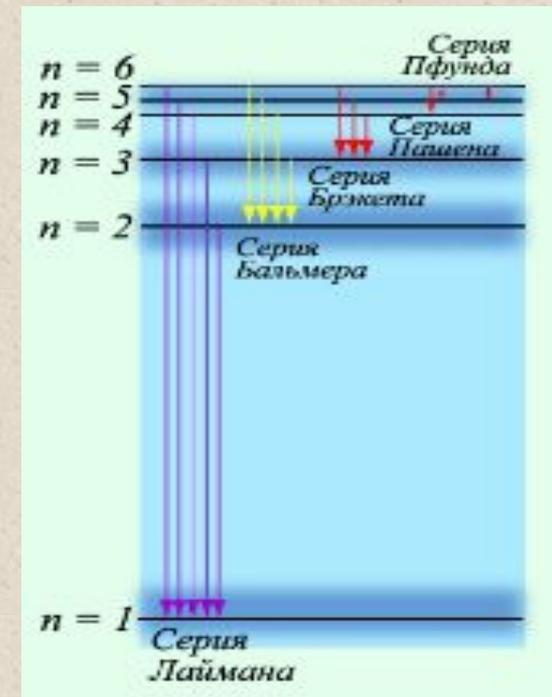
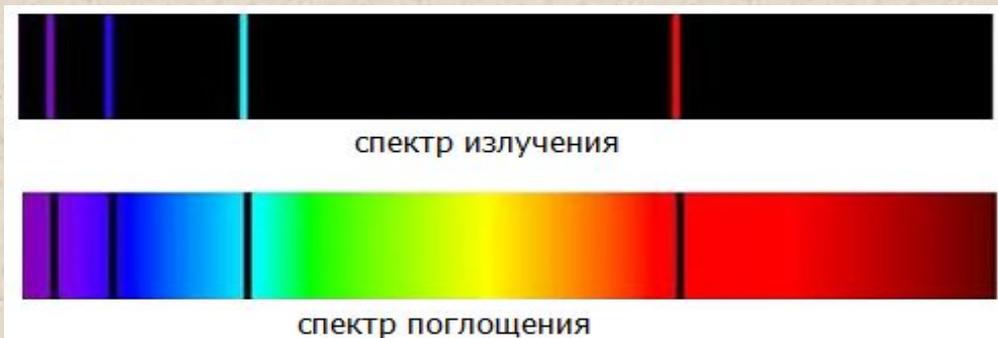
где  $m$  определяет номер уровня, с которого электрон переходит,  $n$  – на который;  
 $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  - постоянная Ридберга.

Такие переходы могут происходить «прыжками» через различное число ступеней. Поэтому спектр излучения состоит из набора некоторого числа линий – это **линейчатый спектр излучения**.

В зависимости от значения числа  $n$  различают спектральные серии:

- серия Лаймана ( $n = 1; m = 2, 3, 4, \dots$ ),
- серия Бальмера ( $n = 2; m = 3, 4, 5, \dots$ ),
- серия Пашена ( $n = 3; m = 4, 5, 6, \dots$ ),
- серия Пфунда ( $n = 4; m = 5, 6, 7, \dots$ ) ...

Первые четыре линии серии Бальмера лежат в видимой области спектра.



# Квантовые числа

Уравнению Шредингера удовлетворяют собственные функции  $\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi)$ , которые определяются тремя квантовыми числами:  $n$ ,  $l$  и  $m$ .

**Главное квантовое число  $n$**  определяет энергию электрона в атоме, и оно может принимать значения

$$n = 1, 2, \dots$$

Момент импульса электрона в атоме может принимать только определенные дискретные значения

$$L_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}.$$

**Орбитальное квантовое число  $l$**  определяет момент импульса электрона в атоме, которое при заданном  $n$  может принимать значения

$$l = 0, 1, \dots, (n-1).$$

Проекция вектора момента импульса электрона на направление внешнего магнитного поля  $B$  также может принимать только дискретные значения, кратные  $\hbar$ :

$$L_{lB} = \hbar m.$$

**Магнитное квантовое число  $m$**  определяет проекцию момента импульса электрона на заданное направление внешнего магнитного поля, которое при заданном  $l$  может принимать значения

$$m = -l, -(l-1), \dots, -1, \dots, (l-1), l.$$

Каждому собственному значению  $E_n$  (кроме  $E_1$ ) соответствует несколько собственных функций  $\psi_{nlm}$ , отличающихся значениями  $l$  и  $m$ . Т.е. атом может иметь одно значение энергии, но находиться в нескольких различных состояниях. Это явление называется **вырождением**. Степень вырождения равна

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

Квадрат модуля волновой функции  $|\psi|^2$  определяет вероятность обнаружить электрон в единице объема. Электрон при своем движении в атоме образует электронное облако, плотность которого характеризует вероятность нахождения электрона в различных точках объема атома. Квантовые числа  $n$  и  $l$  определяют размер и форму электронного облака, а  $m$  – ориентацию облака в пространстве.

Электрон, кроме того, обладает собственным моментом импульса, не связанным с его движением в пространстве – **спином**. Спин электрона квантуется по закону  $L_S = \hbar m_S$ , где  $m_S$  – **магнитное спиновое квантовое число**, которое может принимать только два значения:

$$m_S = \pm \frac{1}{2}.$$

Для полного описания состояния электрона в атоме необходимо задать четыре квантовые числа:  $n, l, m, m_S$ .

Распределение электронов в атоме подчиняется **принципу Паули**: в одном атоме не может быть более одного электрона с одинаковым набором квантовых чисел  $n, l, m, m_S$ . Два электрона, связанные в одном атоме, различаются значением, по крайней мере, одного квантового числа.

Максимальное число электронов, находящихся в состоянии с данным главным квантовым числом  $n$ , равно  $2n^2$ .

При излучении или поглощении света атом переходит из одного состояния в другое, т.е. у волновой функции  $\psi_{nlm}$  изменяется набор индексов  $(nlm)$ .

Возможны не любые переходы, а только удовлетворяющие **правилам отбора**:

$$\Delta l = \pm 1; \Delta m = 0, \pm 1.$$

# Состав ядра

Ядро состоит из протонов и нейтронов. Нуклоны – общее название протонов и нейтронов.

Суммарное число протонов и нейтронов называется массовым числом  $A$ .

Нейтроны электрически нейтральны. Положительный заряд ядра образуют протоны.  $Z$  – зарядовое число ядра, которое равно числу протонов в ядре. Оно совпадает с порядковым номером элемента в таблице Менделеева.

Атом электрически нейтрален, поэтому число электронов в атоме равно числу протон в ядре.

Название ядра совпадает с названием элемента. Обозначение ядра  ${}^A_Z X$ .

Ядро атома при одинаковом числе протонов может содержать различное число нейтронов. Такие атомы называются *изотопами*.

*Например, водород имеет три изотона ( ${}^1_1H$  - протий;  ${}^2_1H$  - дейтерий;  ${}^3_1H$  - тритий).*

Между нуклонами существуют силы притяжения – ядерное взаимодействие, которое превосходит силы кулоновского отталкивания протонов. Это самое мощное из взаимодействий, но оно проявляется лишь на расстояниях, сравнимых с размерами нуклона (коротышка с сильными руками).

# ДЕФЕКТ МАССЫ. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА

Масс-спектрометрические измерения показали, что масса ядра  $m_{\text{я}}$  меньше суммы масс составляющих его нуклонов. Величина

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

называется **дефектом массы ядра**. На эту величину уменьшается масса всех нуклонов при образовании ядра.

Согласно связи массы и энергии  $E = mc^2$  всякому уменьшению массы должно соответствовать изменение энергии, т.е. при образовании ядра должна выделяться определенная энергия. Справедливо и обратное: для разделения ядра на составляющие необходимо затратить такую же энергию. Эта энергия называется **энергией связи ядра**

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

# РАДИАКТИВНОСТЬ

**Радиоактивный распад** — это спонтанное изменение состава (заряда  $Z$ , массового числа  $A$ ) или внутреннего строения нестабильных атомных ядер путём испускания элементарных частиц, гамма-квантов или ядерных фрагментов.

Подобно атомам, ядра могут находиться в основном и возбужденном состояниях. Переходы ядра из возбужденного в основное состояние сопровождаются излучением квантов электромагнитного энергии –  $\gamma$ -квантов. Это излучение с очень короткой длиной волны. В результате наблюдается  **$\gamma$ -радиоактивность**.

При определенных условиях нейтрон может превратиться в протон и электрон. Электрон покидает ядро. Такой процесс называется  **$\beta$ -радиоактивностью**.

Возможна еще  **$\alpha$ -радиоактивность**, при которой из ядра вылетает ядро атома гелия  ${}^4_2\text{He}$  ( $\alpha$ -частица). Это возможно благодаря туннельному эффекту.

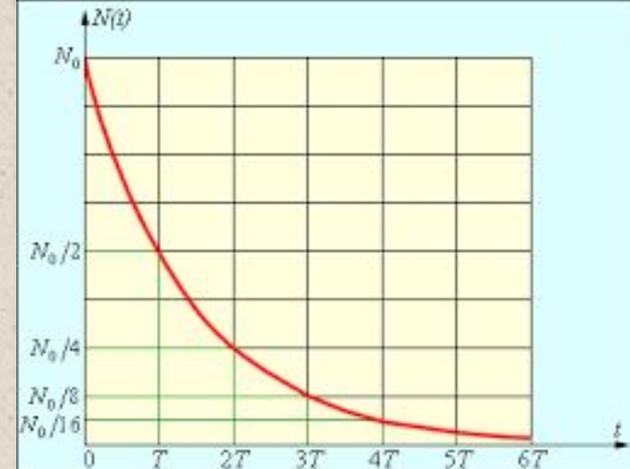
# Закон радиоактивного распада

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

$N_0$  – начальное число ядер ( $t = 0$ );

$N$  – число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ ;

$\lambda$  - постоянная радиоактивного распада.



Стабильность ядер характеризуют **периодом полураспада**  $T_{1/2}$  – это время, за которое распадается половина первоначального числа ядер.

Период полураспада связан с постоянной радиоактивного распада:

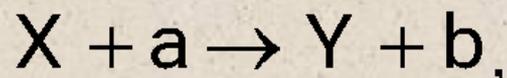
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

**Активностью** радиоактивного источника называется величина

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N.$$

# ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

– это превращения атомных ядер при их взаимодействии с элементарными частицами или с другими ядрами. Схема ядерных реакций

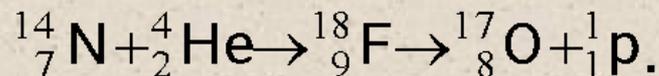


где  $X$  и  $Y$  – исходное и конечное ядра,  $a$  и  $b$  – бомбардирующая и испускаемая в реакции частица.

В любой ядерной реакции выполняются **законы сохранения электрического заряда и массового числа**: сумма зарядов и массовых чисел до и после реакции одинакова.

Выполняются также **законы сохранения энергии, импульса и момента импульса**.

Первая в истории ядерная реакция осуществлена Э. Резерфордом



**Спасибо за внимание!**