

## **Квантовая природа излучения.**

*Квантовая оптика — раздел оптики, занимающийся изучением явлений, в которых проявляются квантовые свойства света.*

### **Виды оптических излучений.**

Колебания электрических зарядов, входящих в состав вещества, обуславливают электромагнитное излучение, которое сопровождается потерей энергии веществом.

При рассеянии и отражении света формирование вторичных световых волн и продолжительность излучения веществом происходит за время, сравнимое с периодом световых колебаний.

Если излучение продолжается в течение времени, значительно превышающем период световых колебаний, то возможны два типа излучения:

#### **1) тепловое излучение и 2) люминесценция.**

Равновесным состоянием системы тело-излучение является состояние, при котором распределение энергии между телом и излучением остается неизменным для каждой длины волны. Единственным видом излучения, которое может находиться в равновесии с излучающим телом, является *тепловое излучение — свечение тел, обусловленное нагреванием.*

**Люминесценцией** называется неравновесное излучение, избыточное при данной температуре над тепловым излучением тела и имеющее длительность, большую периода световых колебаний.

**Тепловое излучение** совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества (внутренней энергии) и свойственно всем телам при температурах выше 0 К.

Тепловое излучение равновесно — тело в единицу времени поглощает столько же энергии, сколько и излучает.

Интегральная энергетическая светимость: 
$$R = \int_0^{\infty} R_{\nu, T} d\nu$$



Тело, способное поглощать при любой температуре всё падающее на него излучение любой частоты называется **абсолютно черным телом (АЧТ)**.

**Спектральная поглотительная способность** черного тела для всех частот и температур тождественно равна единице:

$$A_{\nu,T}^c \equiv 1$$

Абсолютно черных тел в природе нет, однако такие тела, как сажа и черный бархат в определенном интервале частот близки к ним.

**Закон Кирхгоффа**  $\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}$

Отношение испускательной и поглотительной способностей тела не зависит от природы тела и является универсальной для всех тел функцией частоты и температуры .

**Закон Стефана Больцмана** – энергетическая светимость серого тела определяется по формуле

$$R_T = \int_0^{\infty} A_{\nu,T} r_{\nu,T} d\nu = A_T R_e$$

$$R_e = \sigma T^4$$

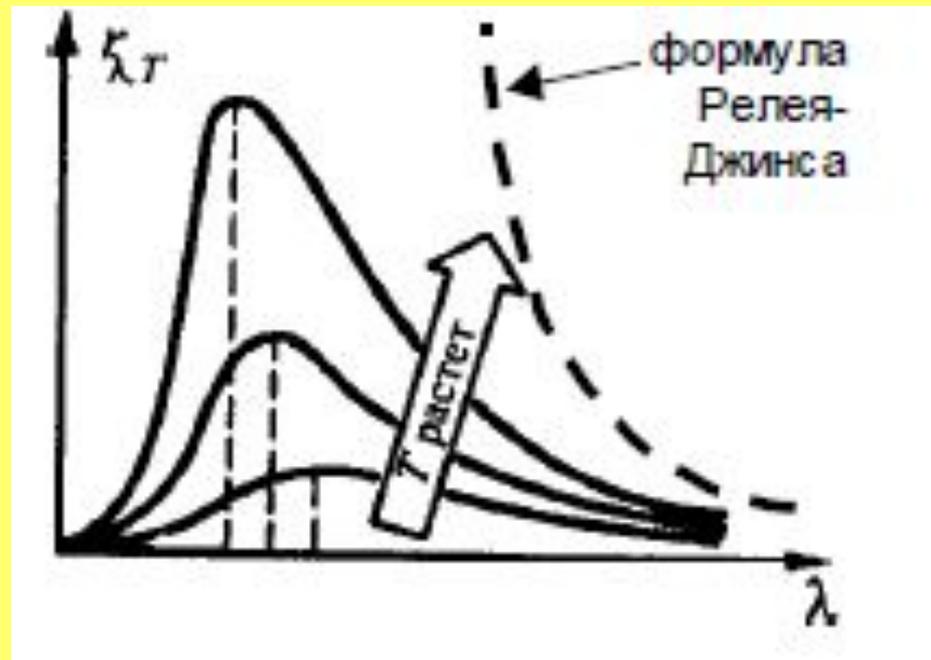
$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$$

## Закон смещения Вина.

Длина волны, при которой излучательная способность черного тела максимальна, обратно пропорционально его термодинамической температуре.

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

$$b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ мК}$$



## Квантовая Гипотеза Планка.

Макс Планк предположил, что теория классического гармонического осциллятора неприменима к атомным осцилляторам;  
атомные осцилляторы излучают энергию не непрерывно, а определенными порциями — квантами.

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

$$h = 2\pi\hbar = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Поскольку энергия излучается порциями, то энергия осциллятора может принимать лишь определенные дискретные значения, кратные целому числу квантов:

$$E = n h \nu \quad (n = 1, 2, \dots)$$

## **Фотоэффект**

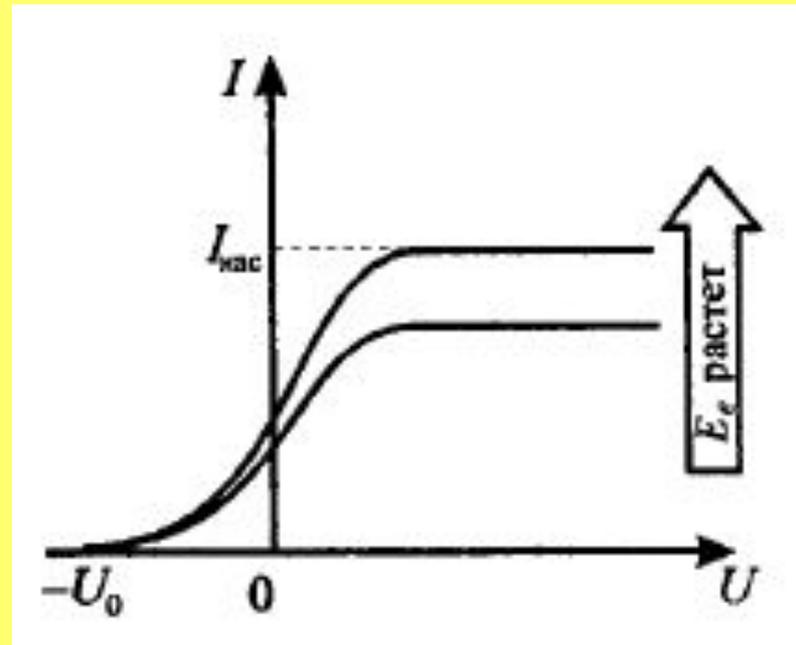
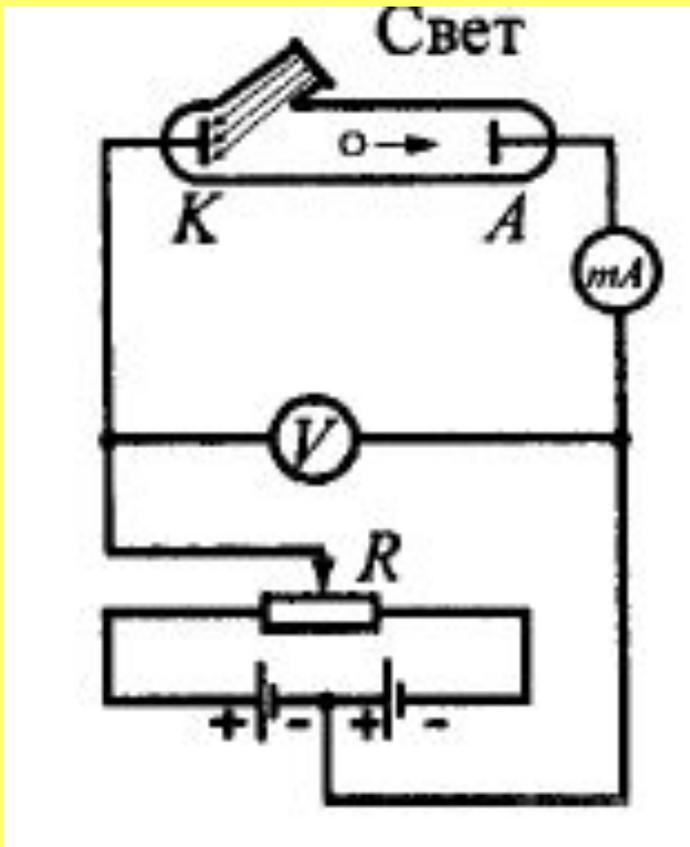
**Фотоэффектом** – называется высвобождение электронов под действием электромагнитного излучения.

Бывает внутренний, вентильный и внешний.

**Внутренний фотоэффект** — это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу. В результате концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению **фотопроводимости** — повышению электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении.

**Вентильный фотоэффект** (разновидность внутреннего фотоэффекта) — возникновение ЭДС (фото-ЭДС) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля). Вентильный фотоэффект используется в солнечных батареях для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.

**Внешним фотоэффектом** (фотоэлектронной эмиссией) называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.



Уравнение Эйнштейна

$$E = h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

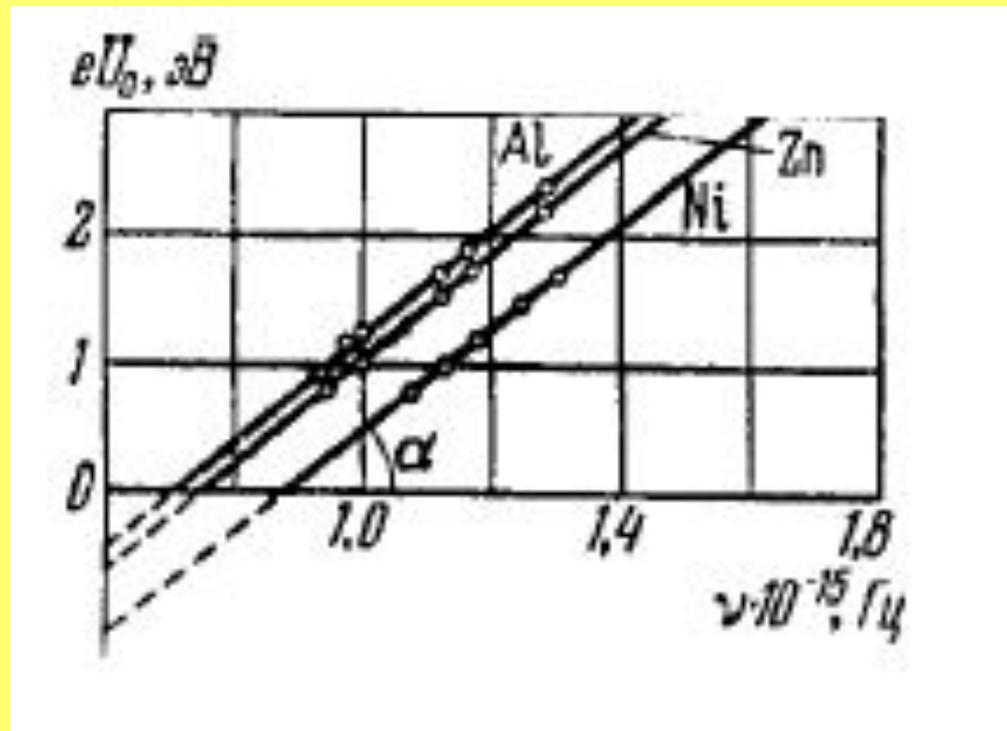
Закон Столетова.

- 1) При фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов испускаемых фотокатодом в единицу времени пропорционально интенсивности света.
- 2) Максимальная начальная скорость фотоэлектрона не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой.
- 3) Для каждого вещества существует **красная граница фотоэффекта** минимальная частота (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности) ниже которой фотоэффект невозможен.

$$\nu = \frac{A}{h}$$

Уравнение Эйнштейна

$$eU_0 = h(\nu - \nu_0)$$



## Масса и импульс фотона.

Единство корпускулярных и волновых свойств света.

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

$$E = m_\gamma c^2$$

$$E = h\nu \qquad m_\gamma = \frac{h\nu}{c^2}$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Эти соотношения связывают квантовые (*корпускулярные*) характеристики фотона — массу, импульс и энергию — с *волновой характеристикой* света — его частотой.

Давление света.

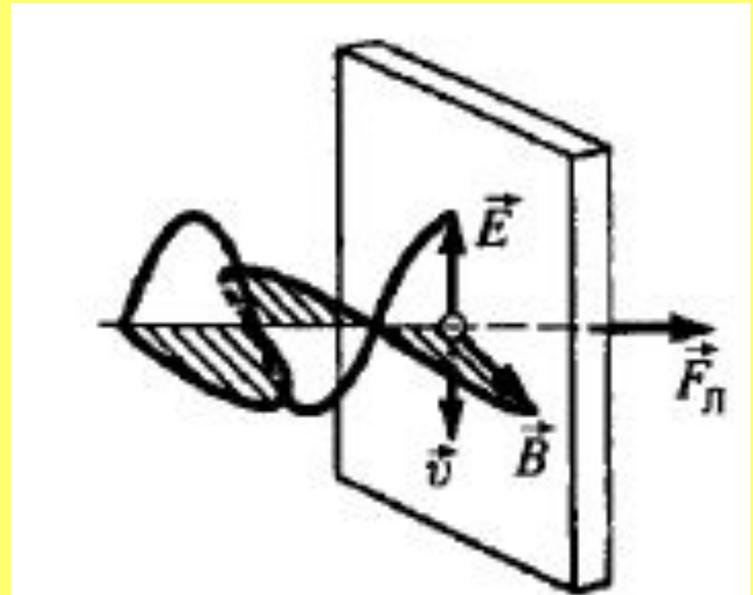
$$p = (1 + \rho) \frac{h\nu}{c} N \qquad p = \frac{E}{c} (1 + \rho)$$

Энергетическая освещенность поверхности:  $Nh\nu = E$

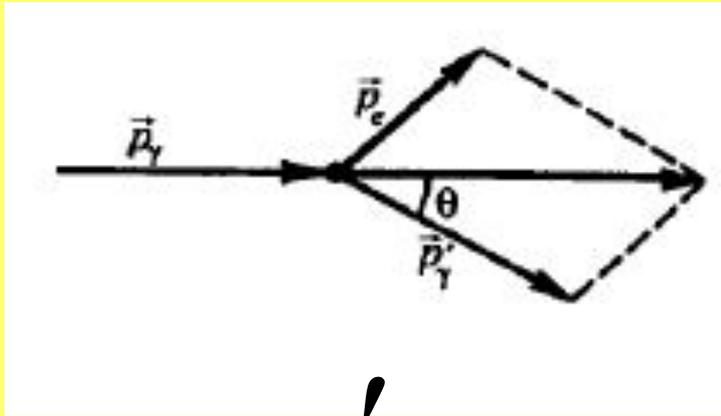
(энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени).

Объемная плотность энергии излучения:  $w = \frac{E}{c}$

$$p = \frac{E}{c} (1 + \rho) = w(1 + \rho)$$



**Эффект Комптона** – это упругое рассеивание коротковолнового электромагнитного излучения на свободных электронах вещества сопровождающиеся увеличением длины волны.



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$\lambda$  - длина волны рассеянного излучения

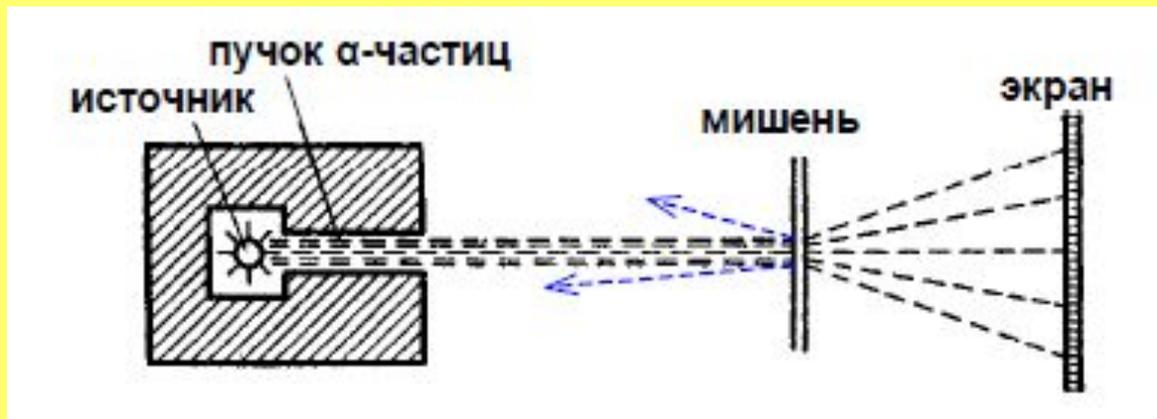
$\lambda_c$  - комптоновская длина волны

Эффект Комптона не может наблюдаться в видимой области спектра, поскольку энергия фотона видимого света сравнима с энергией связи электрона с атомом, при этом даже внешний электрон атома нельзя считать свободным.

Эффект Комптона, излучение черного тела и фотоэффект служат доказательством квантовых (корпускулярных) представлений о свете как о потоке фотонов.

## Строение атома.

Дж. Дж. Томсон предложил модель строения атома, согласно которой атом представляет собой непрерывно заряженный положительным зарядом шар в который "вкраплены" электроны ("как изюм в пудинг").



Резерфорд предложил **планетарную модель атома**. Согласно Резерфорду, атом представляет собой систему зарядов, в центре которой расположено положительное ядро с зарядом  $Ze$ , размером  $10^{-15} - 10^{-14}$  м и массой, практически равной массе атома, а вокруг ядра, в области с линейными размерами  $10^{-10}$  м, по замкнутым орбитам движется  $Z$  электронов, образуя электронную оболочку атома.

## Второй закон Ньютона

$$F_{\kappa} = \frac{eZ_e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = ma = m \frac{v^2}{r}$$

$$a = \frac{v^2}{r}$$

$$\frac{eZ_e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

Согласно классической электродинамике, ускоренно движущиеся электроны должны излучать электромагнитные волны и вследствие этого непрерывно терять энергию.

В результате электрон будет приближаться к ядру и в конечном счете *упадет на ядро*.

Кроме того, классическая планетарная модель атома *не объясняет линейчатого спектра атомов*.

## Линейчатый спектр атома водорода

Линейчатый спектр атома водорода часто описывается в видимой серии

формулой **Бальмера**

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R = 3,29 \cdot 10^{15} \left[ \frac{1}{c} \right] \quad \text{- постоянная Ридберга}$$

$$n = 3, 4, 5, \dots$$

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad R' = \frac{R}{c} = 1,1 \cdot 10^7 \frac{1}{m}$$

- В ультрафиолетовой области серия **Лаймана**

$$\nu = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

- В инфракрасной области

- Серия **Пашена**

$$\nu = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

- Серия **Брэкета**

$$\nu = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 5, 6, 7, \dots$$

- Серия **Пфунда**

$$\nu = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 6, 7, 8, \dots$$

- Серия **Хемфри**

$$\nu = R \left( \frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 7, 8, 9, \dots$$

Обобщенная формула Бальмера

$$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  – серия

$n = m + 1, m + 2, \dots$  – отдельные линии в серии

## Постулаты Бора.

- 1. Существуют стационарные состояния атомов, находясь в которых он не излучает энергию. В стационарном атоме соответствующие стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Каждое стационарное состояние соответствует определенным (дискретным) значением энергии.
- Правило квантования орбит Бора – в стационарном состоянии атомов электрон, двигаясь по круговой орбите должен иметь квантованные значения момента импульса.

$$m_e v r_n = n \hbar \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

- 2. При переходе атома из одного состояния в другое испускается или поглощается 1 фотон с энергией

$$h\nu = E_n - E_m$$

равной разности энергии стационарных состояний.

Излучение происходит при переходе атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией (при переходе к орбите более удаленной от ядра к ближней)

$$E_m < E_n$$

Набор всевозможных дискретных частот

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h} \quad \text{определяет линейчатый спектр атома}$$

## Спектр атома водорода по Бору.

$$m_e r_n v = n \hbar \quad - \text{условие квантования момента импульса}$$

$$\frac{Ze \cdot e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r} \quad - \text{второй закон Ньютона}$$

$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{m_e Ze^2} \quad - \text{второй закон Ньютона}$$

$$r_1 = a = \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{m_e e^2} = 5,28 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

## Спектр атома водорода по Бору.

$$m_e v_n r_n = n \hbar$$

$$\frac{z_e e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

$$n_r = n^2 \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{mze^2}$$

$$r_1 = a = \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{me^2} = 5,28 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

- Полная энергия электрона в водородоподобной системе складывается из кинетической и потенциальной энергии.

$$E_k = \frac{mv^2}{2} - \frac{z_e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{1}{2} \frac{z_e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$E_n = -\frac{1}{n^2 8h^2 \epsilon_0^2}$$

- $n=1,2,3\dots$
- Знак минуса означает, что электрон находится в связанном состоянии.
- Целое число  $n$  определяющее энергетический уровень атома называется главным квантовым числом. Энергетический уровень с  $n=1$  называется основным или нормальным, а соответственно уровни с  $n>1$  и соответствующие им состояния называются возбужденными.

- Минимальная энергия водорода – 13,5эВ, максимальная при  $E_{\infty} = 0$
- называется энергией ионизации. При этом происходит отрыв электрона от атома.
- Корпускулярно-волновой дуализм.
- Вещества предположения Луи Де-Бройля. Так же как свету присуще свойство частицы (корпускулы) и волны так и электроны и любые другие частицы материи на ряду с корпускулярными обладают волновыми свойствами.

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

- Пусть движение частиц со скоростью  $v$  и массой  $m$  тогда фазовая скорость

$$v_{\text{фаз}} = \frac{\omega}{R} = \frac{h\omega}{\hbar R} = \frac{E}{p} = \frac{mc^2}{mv} = \frac{c^2}{v}$$

$$E = \hbar\omega$$

$$R = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Фазовая скорость волны Де-Бройля может быть больше скорости света.

$$U = \frac{d\omega}{dR} = \frac{d(\hbar\omega)}{d(\hbar R)} = \frac{dE}{dP}$$

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$$

$$U = \frac{dE}{dP} = \frac{pc^2}{\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}} = \frac{pc}{E} = \frac{mvc^2}{mc^2} = v$$

- Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
- Невозможно одновременно точно определить координату и импульс частицы поскольку каждой частице соответствует волновой процесс то неопределенность ее «местоположения» порядка длины волны Де-Броиля. И классическое понятие траектории теряет смысл.
- Микрочастица не может иметь одновременно определенную координату и определенную проекцию импульсов.

$$\Delta x = \lambda$$

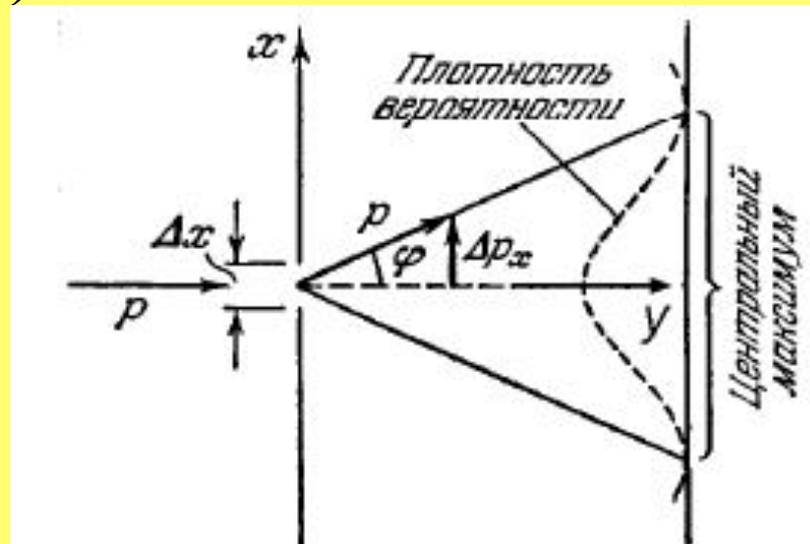
$$(x, y, z)$$

$$(p_x, p_y, p_z)$$

$$\Delta x \Delta p_x \geq h$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq h$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq h$$



- До прохождения частицы через щель составляющей ее импульса  $\Delta p_x = 0$

и координата ее была неопределенной.

- В момент прохождения через щель неопределенность координаты будет равна.

$$\Delta p_x = p \sin \varphi = \frac{h}{\lambda} \sin \varphi$$

$$\Delta x \sin \varphi = \lambda$$

$$\Delta x \Delta p_x \geq h$$

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

**Волновая функция и ее свойства.**

$$\psi(x, y, z, t)$$

$$dW = (\psi)^2 dv$$

$$W \int_{-\infty}^{\infty} |\psi|^2 dv$$

$$|\psi|^2 = \psi - \psi$$

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

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

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$i = \sqrt{-1}$$

$$U = U(x, y, z)$$

$$\psi(x, y, z, t) = \varphi(x, y, z) \exp(-i \frac{E}{\hbar} t)$$

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

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

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

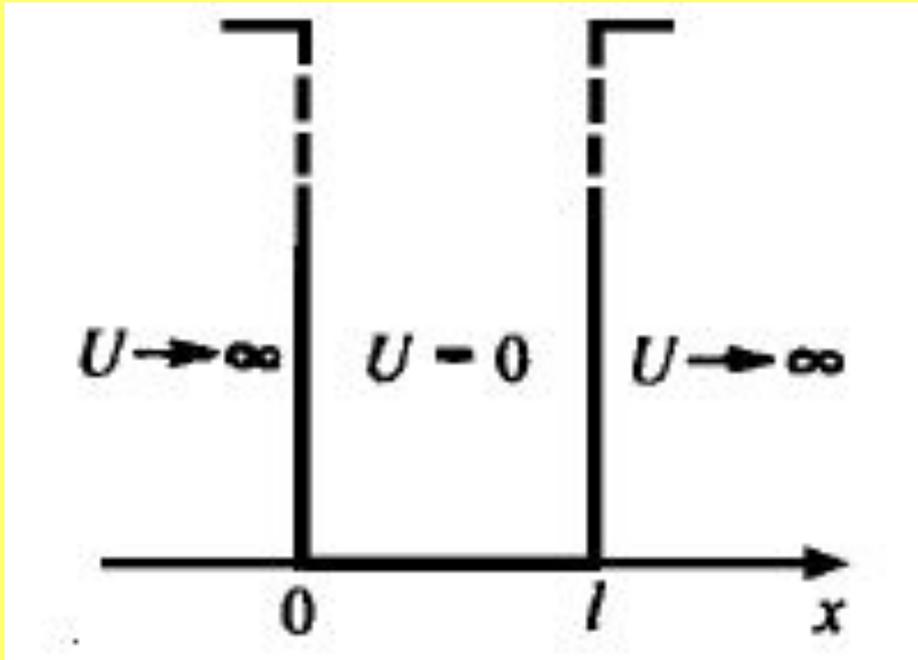
$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0$$

$$\psi(x, t) = A \exp(-i\omega t + ikx) = A \exp\left(-\frac{i(Et - px)}{\hbar}\right)$$

$$\omega = \frac{E}{\hbar}$$

$$k = \frac{p}{\hbar}$$

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{p^2}{2m}$$



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

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + k^2 \psi = 0$$

$$k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$

$$\psi(0) = \psi(l) = 0$$

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

$$k = \frac{h\pi}{l}$$

$$B = 0$$

$$\psi(x) = A \sin \frac{h\pi}{l} x$$

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

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

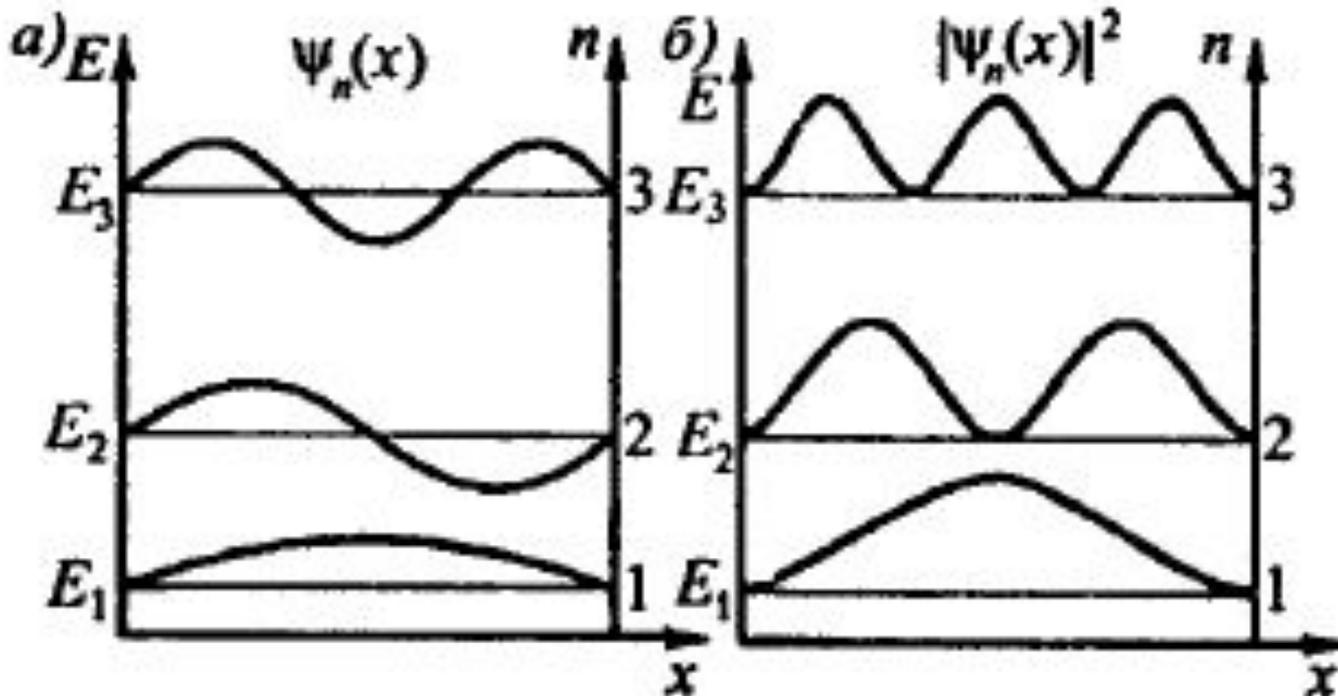
$$E_{\min} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2}$$

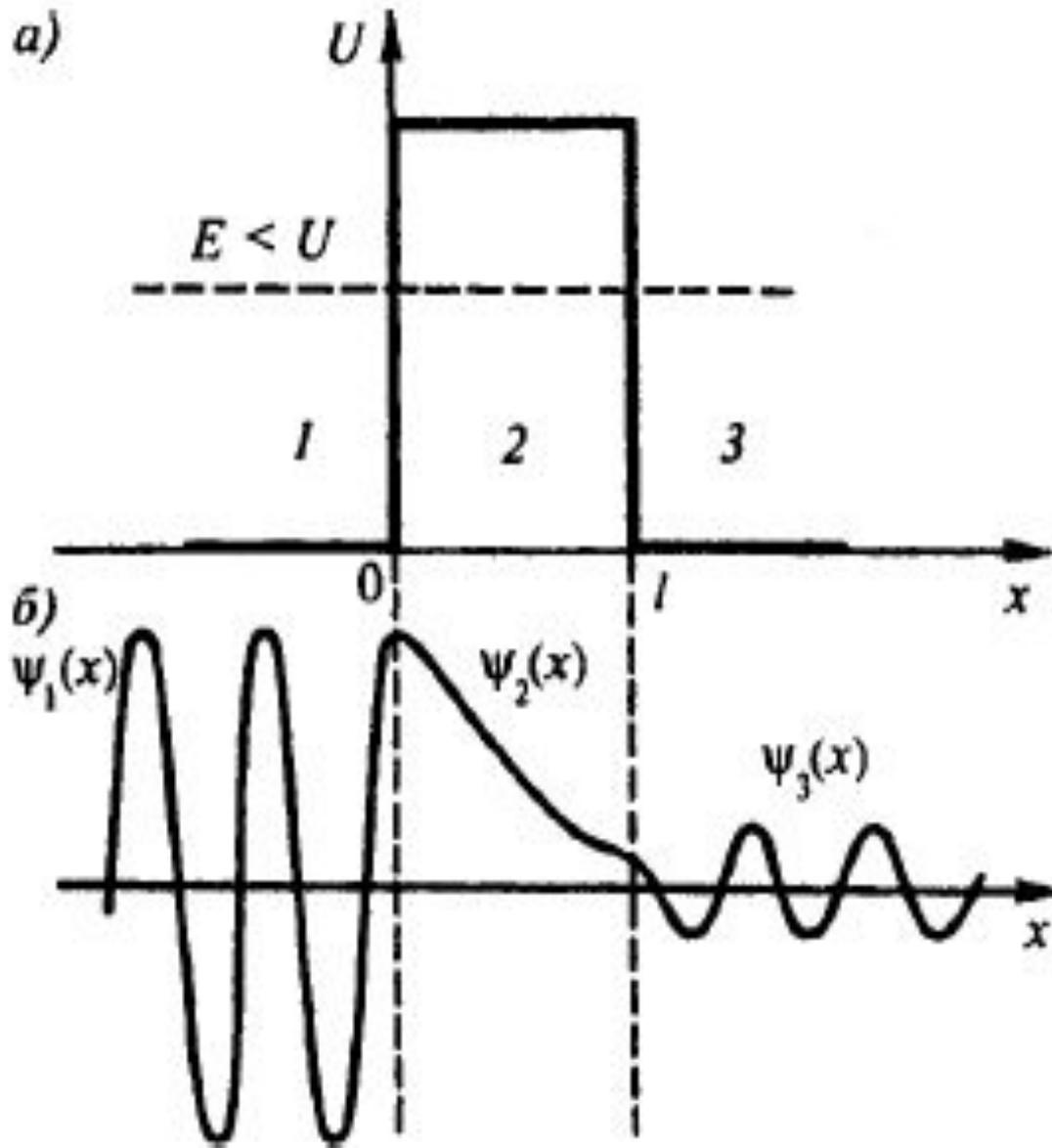
$$\psi(x) = A \sin \frac{n\pi}{l} x$$

$$\int_0^l \psi^2(x) dx = A^2 \int_0^l \sin^2 \frac{n\pi}{l} x dx = 1$$

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

$$n = 1, 2, 3 \dots$$





$$U(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ U; & a \leq x \leq l \\ 0; & x > l \end{cases}$$

меньшей амплитудой.

Об- ласть	Уравнение Шредингера	Общее решение	Решение при $E < U$
1	$\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} + k^2 \psi_1 = 0,$	$\psi_1(x) = A_1 e^{ikx} + B_1 e^{-ikx}$	$\psi_1(x) = A_1 e^{ikx} + B_1 e^{-ikx}$
2	$\frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} + q^2 \psi_2 = 0,$	$\psi_2(x) = A_2 e^{iqx} + B_2 e^{-iqx}$	$\psi_2(x) = A_2 e^{-\beta x} + B_2 e^{\beta x}$
3	$\frac{\partial^2 \psi_3}{\partial x^2} + k^2 \psi_3 = 0,$	$\psi_3(x) = A_3 e^{ikx} + B_3 e^{-ikx}$	$\psi_3(x) = A_3 e^{ikx}$

В области 1 волновая функция представляет собой сумму 2х плоских волн движущихся в сторону барьера и отраженные от барьера. В области в случае когда  $E < U$  вводятся обозначения

$$q = i\beta$$

$$\beta = \frac{\sqrt{2m(U - E)}}{\hbar}$$

В области 3 имеются только волна, прошедшая через барьер которые имеют вид Де-Бройля с той же длиной волны но меньшей амплитудой в этой области

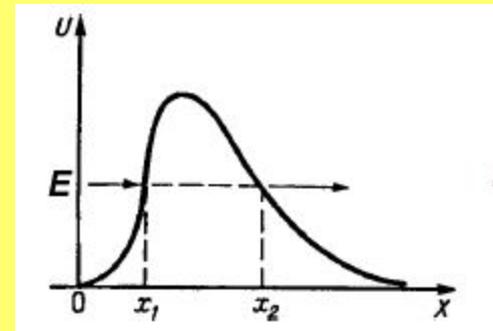
$$k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$

$$q^2 = \frac{2m(E - U)}{\hbar^2}$$

Для описания туннельного эффекта используют понятие коэффициента прозрачности  $D$  определяемого как отношение квадратов модулей прошедшей и подающей волны

$$D = \frac{|A_3|^2}{|A_1|^2} = D_0 \exp\left(-\frac{2l}{\hbar} \sqrt{2m(U - E)}\right)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U - E)} dx\right)$$



## Линейный гармонический осциллятор в квантовой механике.

Это система совершающая одномерное движение под действием квазиупругой силы. Пружинный и математический маятники это примеры классических гармонических осцилляторов.

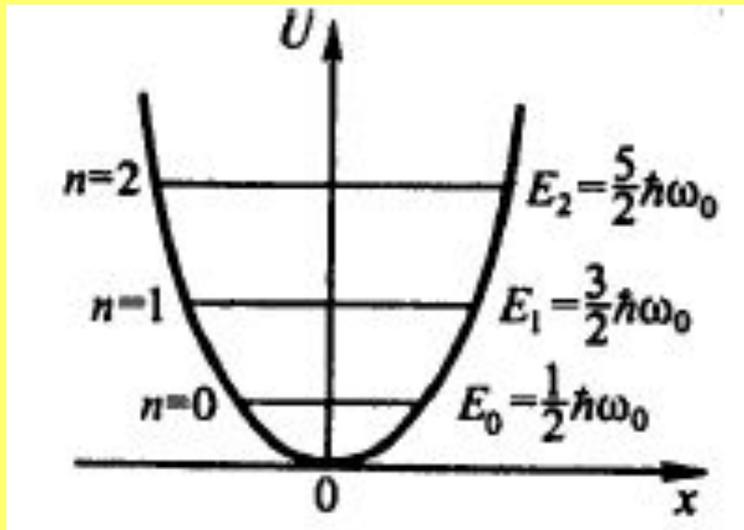
Потенциальная энергия гармонического осциллятора равна:

$$U = \frac{m\omega_0^2 x^2}{2}$$

Классический осциллятор не может выйти за пределы "потенциальной ямы" с координатами

$$-x_{\max} \leq x \leq x_{\max}$$

Уравнение Шредингера для стационарного состояния квантового осциллятора



$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E - \frac{m\omega_0^2 x^2}{2} \right) \psi = 0$$

$$E_n = \left( n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_0$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

Таким образом энергия квантового осциллятора квантуется (может иметь лишь дискретные значения) уровни энергии расположены на одинаковых расстояниях. Минимальная энергия

$$E_0 = \frac{1}{2} \hbar \omega_0$$

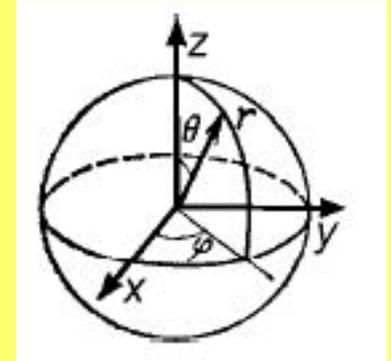
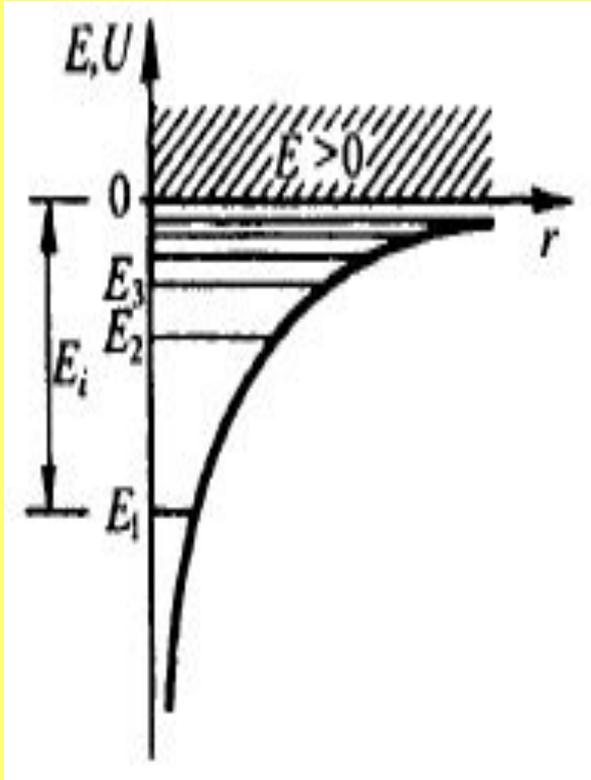
называется энергией нулевых колебаний, это типичный квантовый эффект прямое следствие соотношения неопределенностей.

### **Правилами отбора**

в квантовой механике называется условие накладываемые на изменения квантовых чисел. Для гармонического осциллятора возможны лишь переходы между соседними подуровнями

$$\Delta n = \pm 1$$

## Квантовая физика атомов и молекул.



$$U(r) = \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

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

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{z^2 m e^4}{8\hbar^2 \epsilon_0}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

## Квантовые числа.

Главное квантовое число  $n$  определяет энергетические уровни электронов в атоме  
 $n=1,2,3,4\dots$

Орбитальное квантовое число при заданном  $n$  принимает значение

$$l = 0,1,2,\dots,(n-1)$$

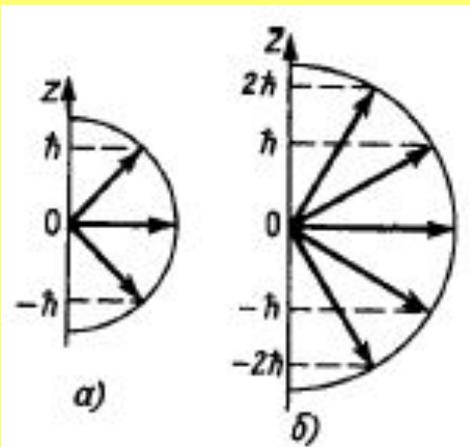
и определяет величину момента импульса (механический орбитальный момент)

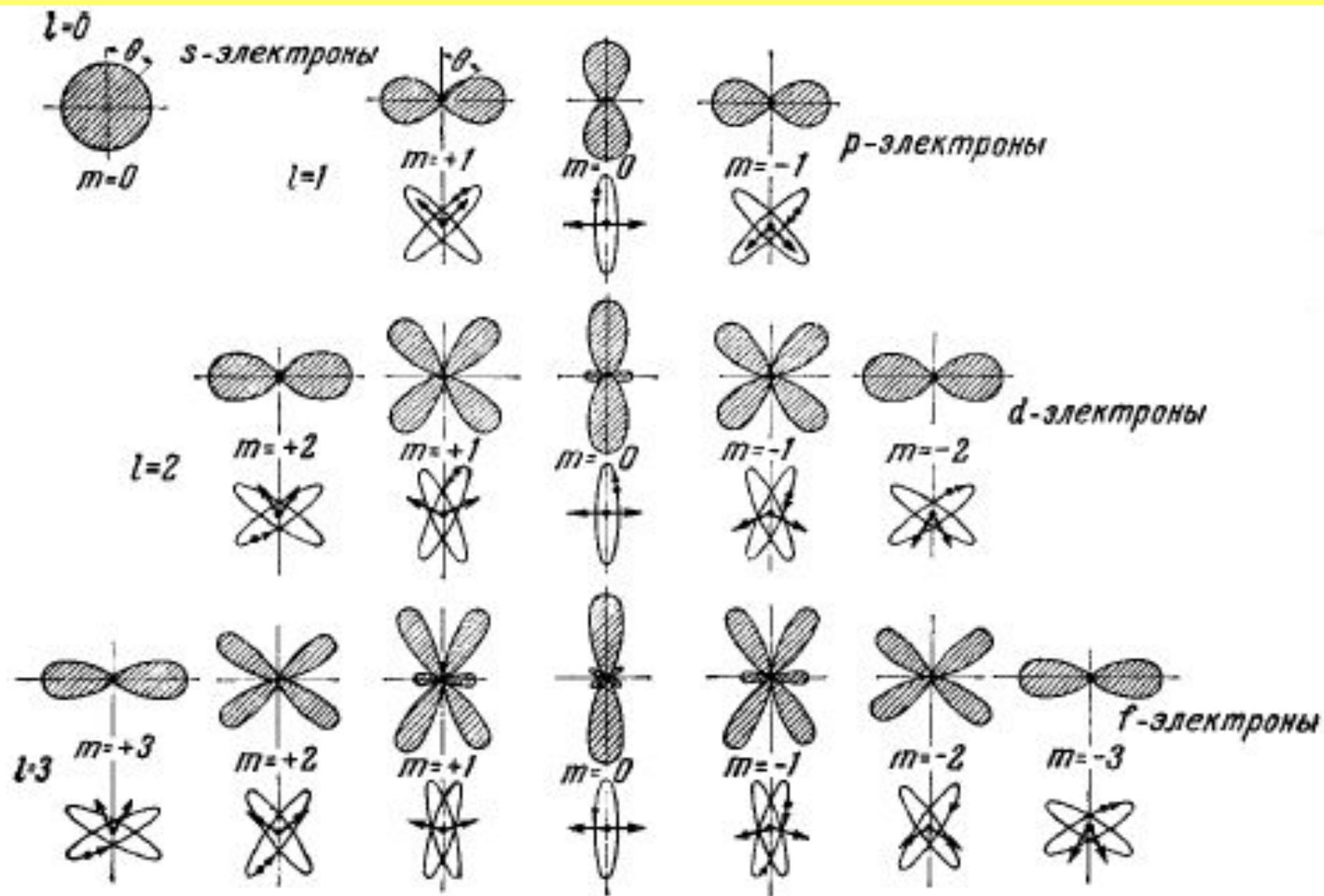
$$L_i = \hbar \sqrt{l(l+1)}$$

Магнитное квантовое число  $m$  при заданном  $l$  может принимать значения

$$m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \pm l$$

и определяет величину момента импульса электрона в заданном направлении





**Правила отбора** – переходы между электронными состояниями возможны если:

1)  $\Delta l = \pm 1$

2)  $\Delta m = 0; \pm 1$

Например: переходы в водороде  $n\text{p} \rightarrow 1\text{s}$ ;  $n=2,3,4$  образуют серию Лаймана.

$n\text{p} \rightarrow 2\text{s}$ ;  $n\text{s} \rightarrow 2\text{p}$ ;  $n\text{d} \rightarrow 2\text{d}$ ;  $n=3,4$  образуют серию Бальмера.

## Спин электрона

Электрон обладает собственным неуничтожимым механическим моментом импульса не связанным с движением электрона в пространстве. Спин квантуется

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}$$

$m_s$  - магнитное спиновое квантовое число;

$$m_s = \pm \frac{1}{2}$$

Таким образом, *состояние электрона в атоме определяется набором четырех квантовых чисел:*

Главное число:  $n=1,2,3$ .

Орбитальное:  $l=0,1,2\dots n-1$ .

Магнитное:  $m= +l, \dots -l, 0, 1 \dots +l$ .

Магнитное спиновое:  $m_s = \pm \frac{1}{2}$

## Фермионы и бозоны.

Принцип неразличимости тождественных частиц:  
тождественны частицы экспериментально различить невозможно.

$$\left| \Psi(x_1, x_2) \right|^2 = \left| \Psi(x_2, x_1) \right|^2$$

1)  $\Psi(x_1, x_2) = \Psi(x_2, x_1)$  - симметрическая функция

2)  $\Psi(x_1, x_2) = -\Psi(x_2, x_1)$  - антисимметрическая функция

*В молекулярной физике классических систем* распределение частиц идеального газа по энергиям во внешнем потенциальном поле  $W$  при заданной температуре  $T$  описывается *распределением Больцмана*:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{W}{KT}\right)$$

Частицы с полуцелым спином(электроны, протоны, нейтроны) описываются антисимметричными волновыми функциями и подчиняются статистике **Ферми-Дирака** и эти частицы называются фермионами.

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_i - \mu}{KT}\right) + 1}$$

Частицы с нулевым или целочисленным спином( $\Pi$ -мезоны, фотоны) описываются симметрическими волновыми функциями и подчиняются статистике **Бозе - Эйнштейна** и называются бозонами.

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_i - \mu}{KT}\right) - 1}$$

## **Принцип Паули.**

В одном и том же атоме не может быть более одного электрона с одинаковым набором 4 квантовых чисел.

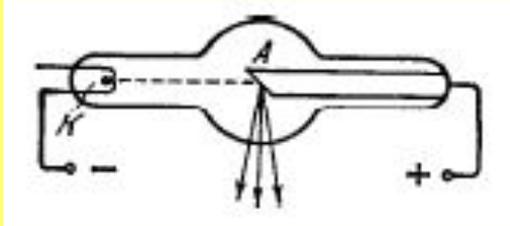
## **Распространение электронов в атоме по состоянию.**

Максимальное число электронов находящихся в состоянии, которые определяются главным квантовым числом:

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

Главное квантовое число	1	2		3			4				5				
Символ оболочки	<i>K</i>	<i>L</i>		<i>M</i>			<i>N</i>				<i>O</i>				
Максимальное число электронов в оболочке	2	8		18			32				50				
Орбитальное квантовое число $l$	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3	0	1	2	3	4
Символ подоболочки	<i>1s</i>	<i>2s</i>	<i>2p</i>	<i>3s</i>	<i>3p</i>	<i>3d</i>	<i>4s</i>	<i>4p</i>	<i>4d</i>	<i>4f</i>	<i>5s</i>	<i>5p</i>	<i>5d</i>	<i>5f</i>	<i>5g</i>
Максимальное число электронов в подоболочке	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	14	18

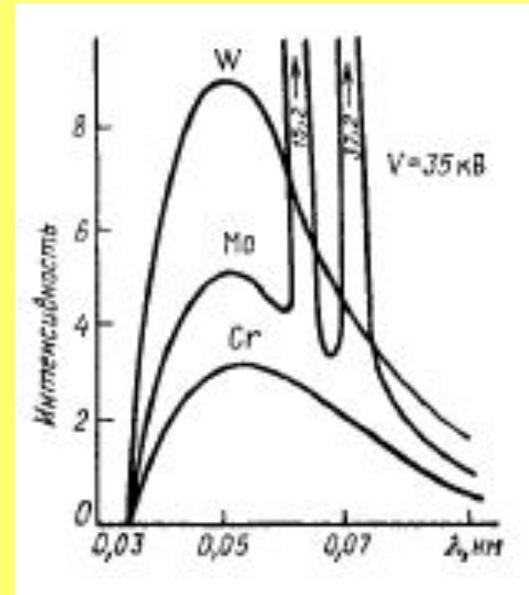
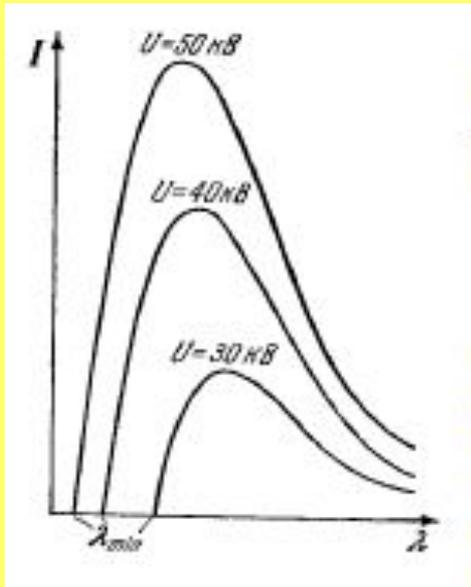
## Рентгеновские спектры.



Рентгеновское излучение, исходящее из анода состоит из: сплошного спектра тормозного излучения возникающего при торможении электронов в аноде.

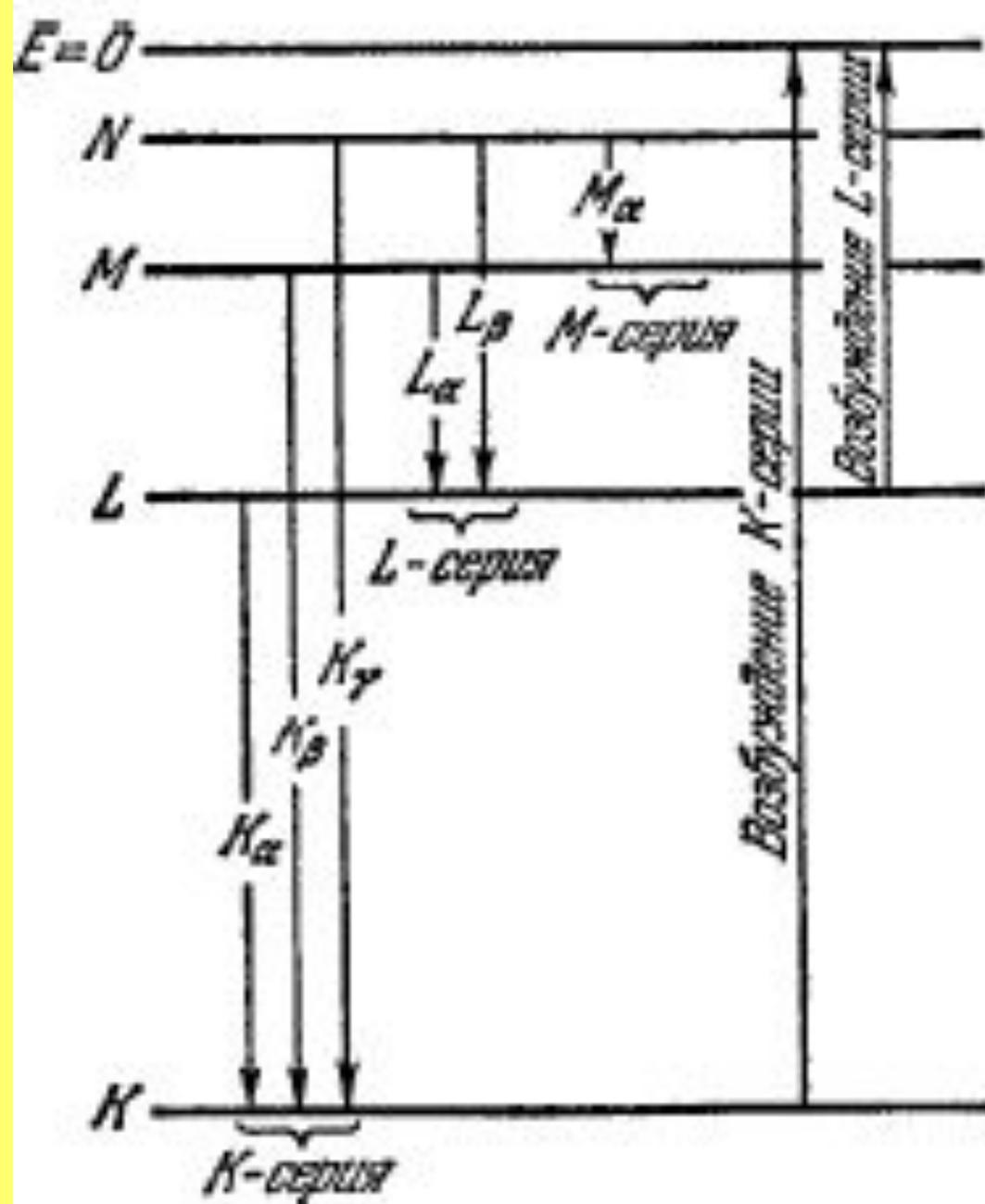
И линейчатого спектра характеристического излучения определяется материалом анода.

Линии характеристического излучения возникают в результате перехода электронов во внутренних оболочках атома.



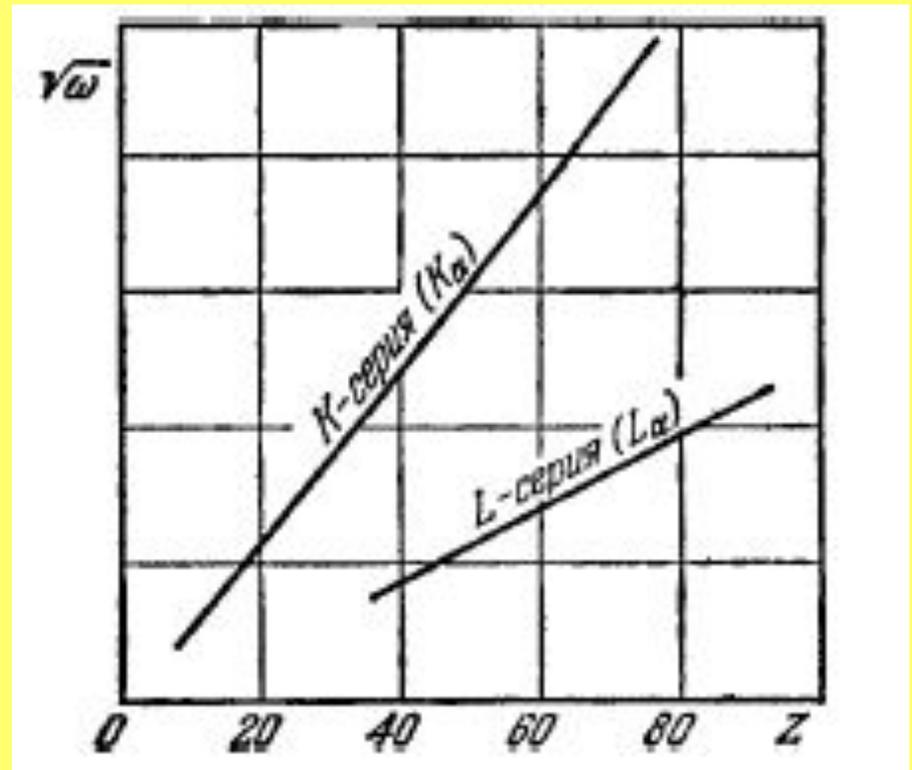
$$E_{\max} = h\nu_{\max} = eU$$

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU} = \frac{ch}{E_{\max}}$$



## Закон Мозли:

$$\nu = R(z - \tau)^2 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$



## Комбинационное рассеяние света

Эффект Рамана:

Если на вещество (газ, жидкость, кристалл) падает строго монохроматический свет, то в спектре рассеянного света наряду с частотой источника будут наблюдаться линии с частотами

$$\nu = \nu_0 \pm \nu_i$$

Линии в спектре комбинационного рассеяния с частотами меньшими частоты падающего света, называются стоксовыми (красными) спутниками.

$$\nu = \nu_0 - \nu_i \quad \text{- стоксовы линии или красными спутниками.}$$

$$\nu = \nu_0 + \nu_i \quad \text{- антистоксовы линии или фиолетовыми спутниками}$$

Это есть процесс неупругого столкновения фотонов с молекулами а котором один фотон поглощается и один фотон испускается.

Если энергии фотонов одинаковы, то в рассеянном свете будет наблюдаться несмещенная линия.

Если молекула под действием света перейдет в возбужденное состояние, то испущенный фотон будет иметь меньшую частоту, возникает стоксов спутник (красный).

Поглощение. Спонтанное и вынужденное излучение.



$$h\nu = E_2 - E_1$$

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \text{ - Закон Бугера}$$

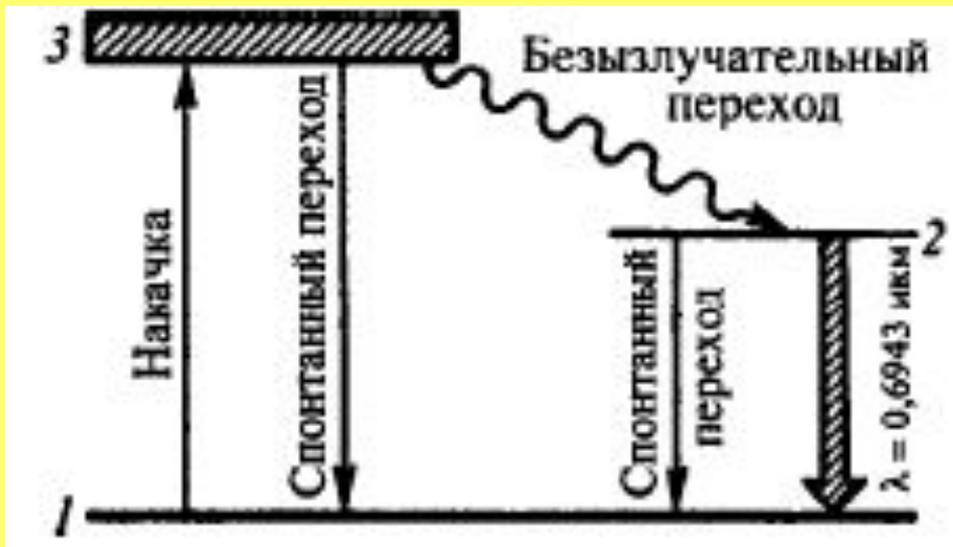
# Лазеры.

Лазеры делятся:

- 1) По типу активной среды: твердотельные, газовые, полупроводниковые, жидкостные.
- 2) По методам накачки: оптические, тепловые, химические, электро-ионизационные.
- 3) По режиму генерации: непрерывного или импульсного действия.

## Рубиновый лазер.

Накачка кристалла рубина ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с примесью III – валентного хрома переводит атомы хрома в возбужденное **КОРОТКОЖИВУЩЕЕ** состояние 3 с которого происходит безизлучательный переход в **ДОЛГОЖИВУЩЕЕ** (метостабильное) состояние 2, происходит «накопление» атомов на уровне 2. При достаточной мощности накачки концентрация на уровне 2 будет больше, чем на уровне 1. Мы получим индуцированное излучение.



## Свойство лазерного излучения:

Временная и пространственная когерентность  $\tau \approx 10^{-3} \text{ с}$   $l = c\tau \approx 10^5$

Строгая монохроматичность  $\Delta\lambda < 10^{-11} \text{ м}$ .

Большая плотность потока энергии  $10^{10} \text{ Вт/м}^2$

Очень малое угловое расхождение пучка (в  $10^4$  меньше, чем у стандартных).