

# Лекция

## ОПТИКА. АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА.

# Оптика – раздел физики, изучающий закономерности излучения, поглощения и распространения света

## Шкала электромагнитных волн

$$\lambda = c/\nu$$

Вид излучения	Длина волны, м $\lambda$	Частота волны, Гц $\nu$
<u>Радиоволны</u>	$10^3 - 10^{-4}$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{12}$
<u>Световые волны:</u> инфракрасное излучение	$5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$ воспринимается глазом человека	$6 \cdot 10^{11} - 3,75 \cdot 10^{14}$
видимый свет	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$
ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$
<u>Рентгеновское излучение</u>	$2 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}$
<u><math>\gamma</math>-Излучение</u>	$< 6 \cdot 10^{-12}$	$> 5 \cdot 10^{19}$

В 70-х годах XIX века Максвелл создает электромагнитную теорию света:  
Свет – электромагнитные волны с  $\lambda=380-770$  нм,  
создаваемые движением зарядов, входящих в состав атомов и молекул.

в вакууме ( $\epsilon = \mu = 1$ )  
скорость света:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с

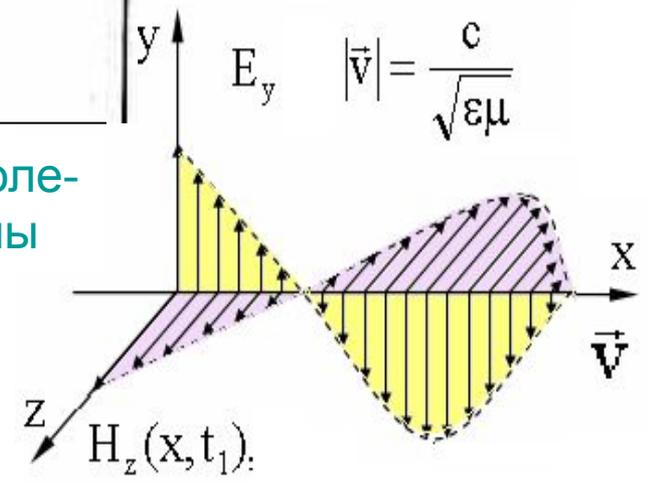
Скорость света в среде:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Волна поперечная колебания  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  синфазны

Интенсивность:

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_0^2$$



# Основные законы геометрической оптики.

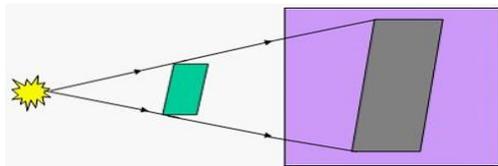
## 1. Закон прямолинейного распространения света:

свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно.

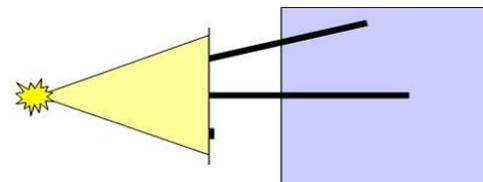
## 2. Закон независимости световых пучков:

эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они устранены.

1.



2.



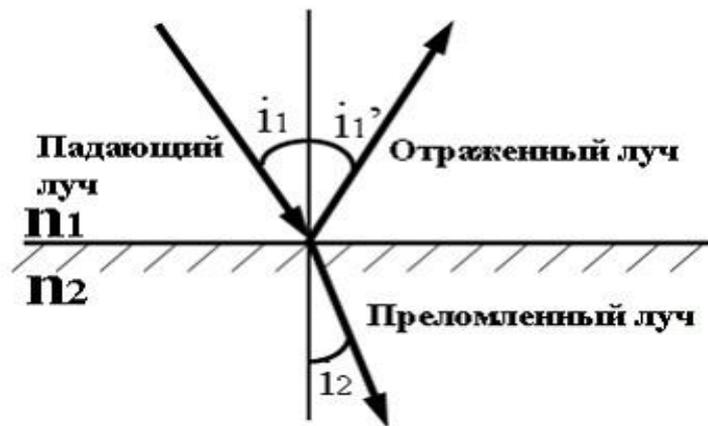
## 3. Закон отражения света:

$$i_1' = i_1$$

## 4. Закон преломления света:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12}$$

$n_{12}$  - относительный показатель преломления второй среды относительно первой



Абсолютным показателем преломления среды называется величина, равная отношению скорости света в вакууме к их фазовой скорости в среде:

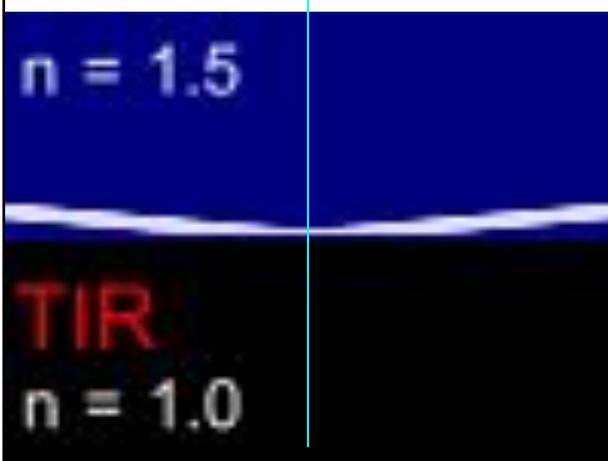
$$n = c / v$$

Абсолютный показатель преломления характеризует оптическую плотность среды

Формула тонкой линзы:

$$1/a + 1/b = 1/f$$

$f$  - фокусное расстояние линзы,  $a$  и  $b$  — расстояния от линзы до предмета и изображения



Если свет распространяется из среды с большим показателем преломления  $n_1$  в среду с меньшим  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ), например из стекла в воздух, то

При углах падения  $i_1 \geq i_{pr} \leq i_1 < \pi/2$  весь падающий

свет отражается в первую среду – Явление полного внутреннего отражения.

Для угла падения  $i_{pr}$  (называемого **предельным**) угол преломления  $i_2 = \pi/2$ .

$\sin(\pi/2) = 1$  для  $i_{pr}$  справедливо:  $\sin i_{pr} = n_2/n_1$

Используется в *призмах полного отражения*, в *световодах*, *рефрактометрах*.

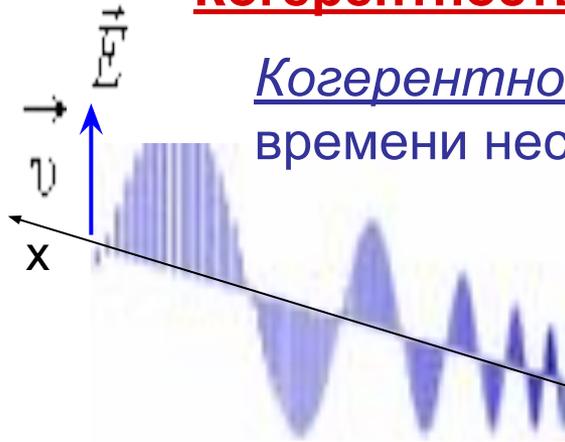
При взаимодействии света с веществом основное действие – физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое – оказывают колебания вектора напряженности электрического поля  $E$ .



$E$  - световой вектор. В оптике в электромагнитной волне рассматривают изменения вектора  $E$ .

## Когерентность волн. Интерференция.

Когерентность - согласованное протекание в пространстве и времени нескольких колебательных или волновых процессов.



Модель световых волн – монохроматические волны ( $\omega$ ,  $\nu$ ,  $\lambda$  постоянны).

$$E(x,t) = E_0 \cdot \text{Cos}(\omega t - kx + \alpha)$$

Фаза  $\omega t - kx + \alpha$  меняется от точки к точке.

Монохроматические волны одной строго постоянной частоты, поляризации и постоянной во времени разности фаз являются **когерентными**.

**Когерентность волн - необходимое условие интерференции.**

усиливаются      гасятся

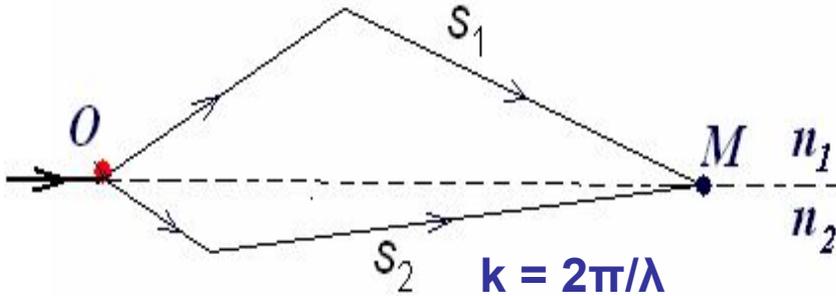


Интерференция света – явление перераспределения светового потока в пространстве при сложении когерентных волн, в результате которого образуется устойчивая во времени картина максимумов и минимумов интенсивности, называемая интерференционной.

## Когерентные световые волны получают, разделяя излучаемую

источником волну в точке O на две волны:  $E(x,t) = E_0 \cdot \text{Cos}(\omega t - kx + \varphi_0)$

(двухлучевая интерференционная схема)



$\lambda$  - длина волны.

$k = 2\pi/\lambda$  - волновое число

До точки M разделенные волны проходят разные геометрические пути  $s_1$  и  $s_2$  в средах с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$

Пусть в т.О фаза колебаний =  $\omega t + \phi_0$

Фазы двух волн в т.М будут:

$$\omega t - \phi_1 = \omega t - k_1 s_1 + \phi_0$$

$$\omega t - \phi_2 = \omega t - k_2 s_2 + \phi_0$$

Разность фаз в т.М будет:

$$\phi_2 - \phi_1 = k_2 s_2 - k_1 s_1 = 2\pi s_2 / \lambda_2 - 2\pi s_1 / \lambda_1 = (2\pi/\lambda) \cdot (n_2 s_2 - n_1 s_1)$$

*Произведение геометрической длины пути световой волны на абсолютный показатель преломления называется оптической длиной пути:*  $L = ns$

Величина  $\Delta = (L_2 - L_1)$  - оптическая разность хода волн.

**Связь между разностью фаз и разностью хода**

$$\phi_2 - \phi_1 = (L_2 - L_1) 2\pi/\lambda = (2\pi/\lambda)\Delta = k \Delta$$

Накладываясь, две волны, возбуждают в точке M колебание:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$

С амплитудой:  $E_0^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2 \cdot E_{10} E_{20} \cdot \text{Cos}(\varphi_2 - \varphi_1)$

Учтем:

Усредняя по времени:  $\langle E_0^2 \rangle = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \cos \Delta \varphi dt$

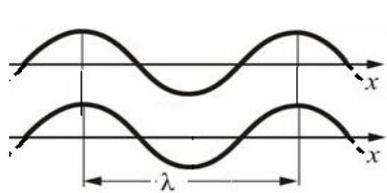
$$I \sim E_0^2$$

**Если волны когерентны**,  $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$  имеет постоянное во времени (свое для каждой точки) значение, **интенсивность результирующей волны**

Так как  $I \sim \langle E^2 \rangle$ , получим:  
 $I_1$  и  $I_2$  - интенсивности волн

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

**Условие интерференционного максимума**  $I_{\text{макс}} = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2}$  при



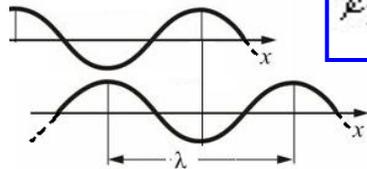
$$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2m\pi, \quad \Delta = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

При  $I_1 = I_2 = I_0$  интенсивность в максимумах  $I_{\text{макс}} = 4I_0$

**Условие интерференционного минимума**  $I_{\text{мин}} = I_1 + I_2 - 2 \sqrt{I_1 I_2}$  при

$$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$$



$$\varphi_2 - \varphi_1 = (2m + 1)\pi, \quad \Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

При  $I_1 = I_2 = I_0$  интенсивность  $I_{\text{мин}} = 0$

**При наложении некогерентных световых волн**  $\langle \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \rangle = 0$  и

результующая интенсивность  $I = I_1 + I_2$  всюду одинакова.

При  $I_1 = I_2 = I_0$  интенсивность  $I = 2I_0$ .

**Закон независимости сложения световых пучков в геометрической оптике.**

Первый опыт по интерференции осуществил Юнг (1802 г.)

## Опыт Юнга.

От источника  $S$  волна падает на 2 равноудаленные узкие щели  $S_1$  и  $S_2$ ,  $S_1$  и  $S_2$  - когерентные источники. Интерференционную картину наблюдаем на экране ( $\Theta$ ) на расстоянии  $l$  от щелей.

**Максимумы**

$$x_{\max} = m \lambda l / d$$

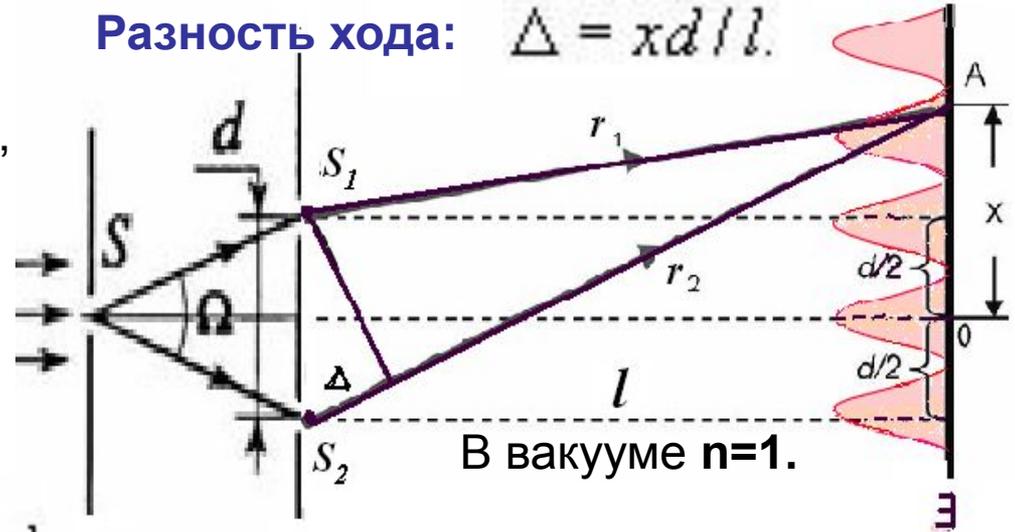
**интенсивности:**

**Минимумы**

$$x_{\min} = \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda l / d$$

**интенсивности:**

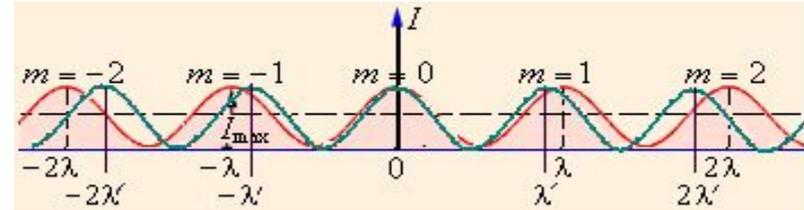
Разность хода:  $\Delta = x d / l$ .



В вакууме  $n=1$ .

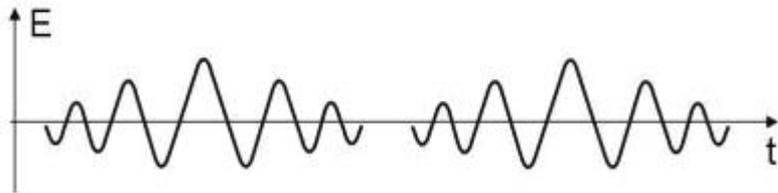
$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  порядок интерференции

Если свет источника  $S$  немонахроматический,  
то картина расплывается при  $m \geq \dots$



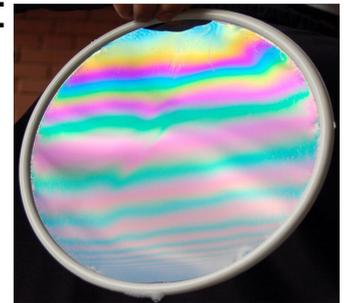
Свет реальных источников - последовательность немонахроматических волновых цугов (отрезков волны с  $\omega \pm \Delta\omega$  или  $\lambda \pm \Delta\lambda$ ).

**Средняя длина цуга называется длиной когерентности.**



Для солнечного света:  $l_{\text{КОГ}} = 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}$

Пример:



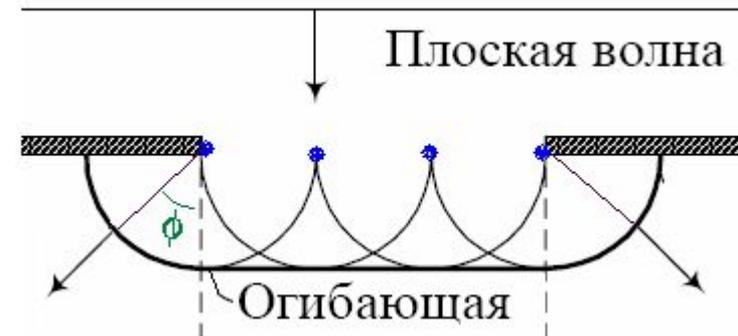
Интерференция наблюдается только при разностях хода меньших длины когерентности

**в тонких плёнках**

**Дифракцией** называется огибание волнами препятствий, отклонение распространения волн вблизи препятствий от законов геометрической оптики.

**Принцип Гюйгенса:** Каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени

**Из принципа Гюйгенса:** фронт волны за щель – огибающая вторичных волн, заходит в область геометрической тени.  $\phi$  – угол дифракции.



**Принцип Гюйгенса — Френеля:** Световую волну от источника  $S$  можно представить как результат *интерференции когерентных вторичных волн*, «излучаемых» фиктивными источниками  $dS$  – бесконечно малыми элементами любой волновой поверхности, охватывающей источник света.

**Дифракция – интерференция волн от бесконечно большого числа когерентных непрерывно распределенных в пространстве источников.**

Для оценки результата дифракции **используют метод зон Френеля:**

Фронт волны разбивается на зоны, так чтобы **расстояния от краев зоны до точки наблюдения  $P$  отличались на половину длины волны  $\lambda/2$** . Колебания от соседних зон приходят в  $P$  в противофазе, при наложении ослабляя друг друга.

**Дифракция Фраунгофера на одной щели** – дифракция плоских световых волн, наблюдается когда источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от преграды.

**Число зон на ширине щели =  $b \cdot \sin \varphi : (\lambda/2)$**

Амплитуды результирующих колебаний от всех зон Френеля под углом  $\varphi$  (в т.В) равны между собой.

**Колебания соседних зон Френеля полностью взаимно гасятся**

Если число зон Френеля четное - в точке В наблюдается **дифракционный минимум**

Если число зон Френеля нечетное - в точке В наблюдается **дифракционный максимум**

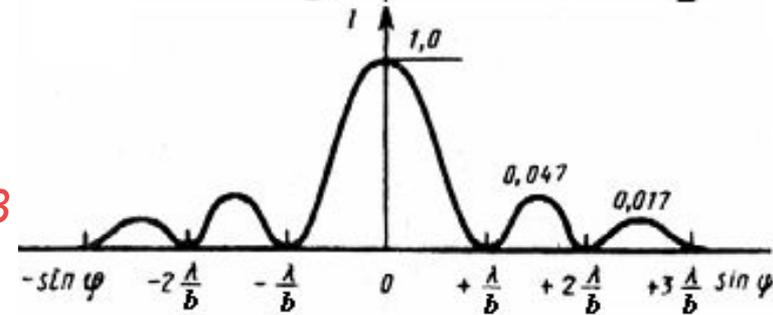
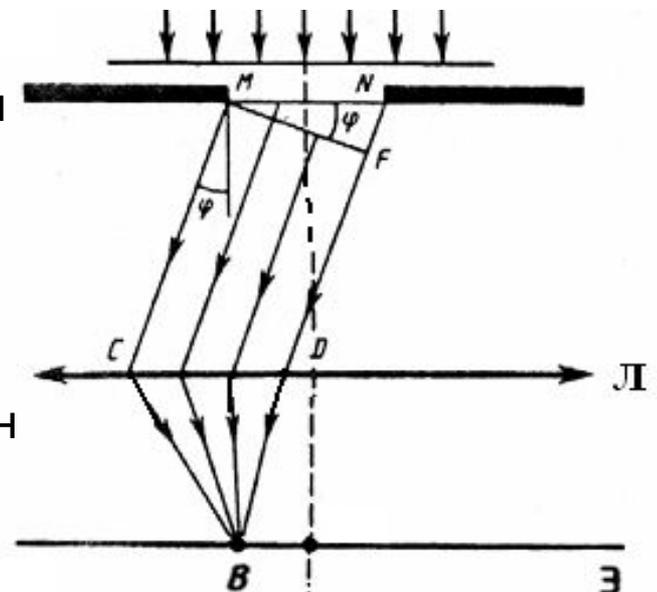
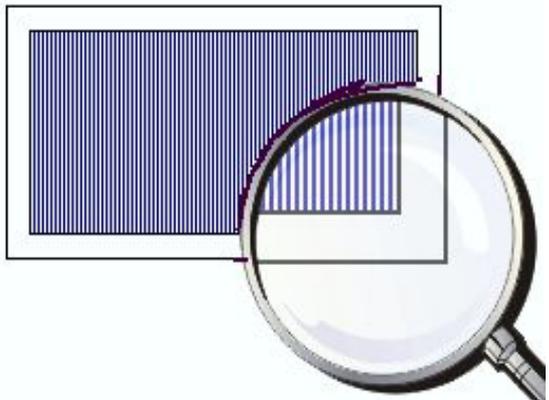


График интенсивности  $I_p(\sin \varphi)$



## Дифракционная решетка

- это совокупность большого числа одинаковых щелей, отстоящих друг от друга на одно и то же расстояние.

Расстояние  $d$  между соответственными точками соседних щелей называется **периодом решетки**:

$$d = a + b \quad (b - \text{ширина щели, } a - \text{расстояние между щелями)}$$

## Дифракция Фраунгофера на решетке

Амплитуда результирующего колебания в точке **P** – результат многолучевой интерференции вторичных волн.

Разность хода лучей, идущих под углом  $\varphi$  от соответственных точек соседних щелей найдем из

треугольника **ABC**:  $\Delta = d \cdot \sin \varphi$

Условия максимума:  $\Delta = m\lambda$

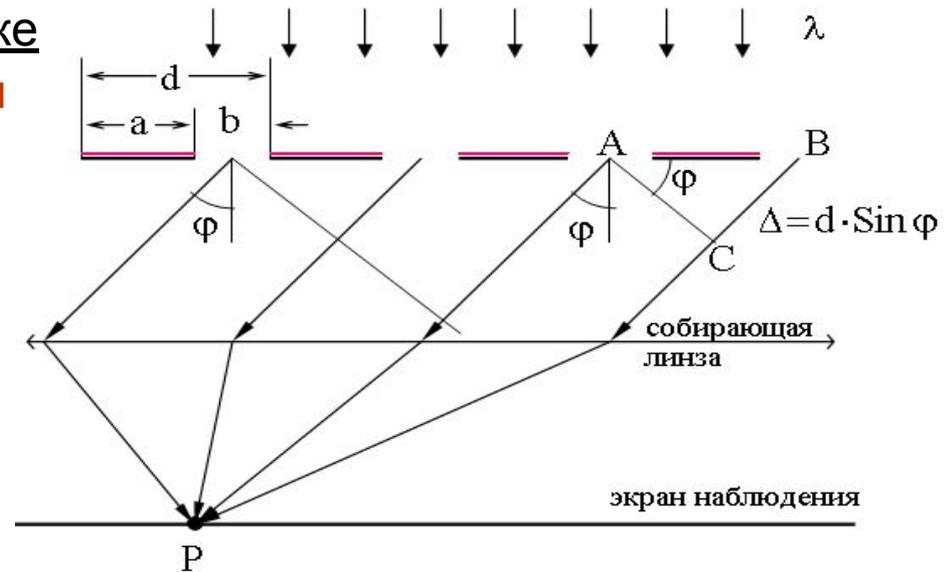
Условие главных максимумов от дифракционной решетки :

Целое число  $m$  - порядок дифракционного максимума.

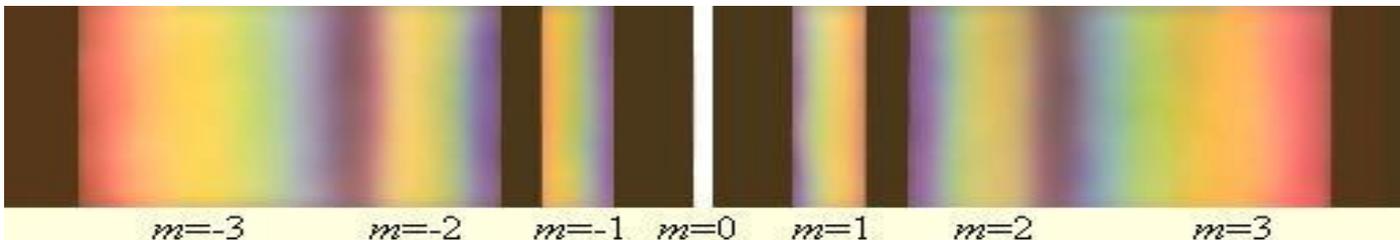
Так как модуль  $\sin \varphi \leq 1$ , то из условия главных максимумов следует, что число наблюдаемых главных максимумов  $m \leq d/\lambda$ .

Положение главных максимумов (кроме нулевого) зависит от  $\lambda$ .

Решетка способна разлагать **немонохроматическое излучение** в спектр.



$$d \cdot \sin \varphi = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



Разложение белого света в спектр с помощью дифракционной решетки

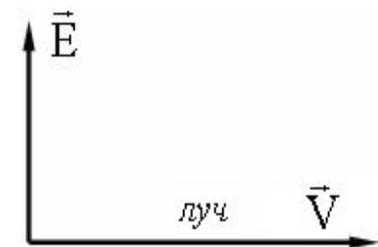
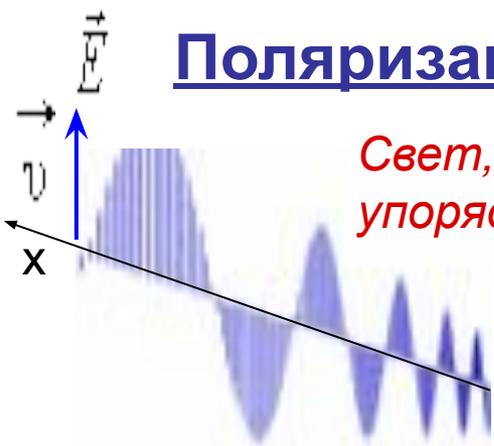
# Поляризация света.

**Световые волны – поперечн**  $\vec{E} \perp \vec{v}$

*Свет, у которого направления колебаний вектора  $E$  упорядочены каким-то образом, называется поляризованным.*

**Электромагнитная волна, у которой вектор  $\vec{E}$  колеблется в одной фиксированной плоскости, называется *плоско (линейно) поляризованной*.**

Плоскость, образованная векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{v}$  называется **плоскостью поляризации**.



$E \parallel$  плоскости рисунка



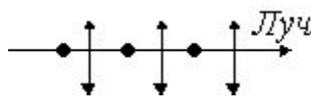
$E \perp$  плоскости рисунка



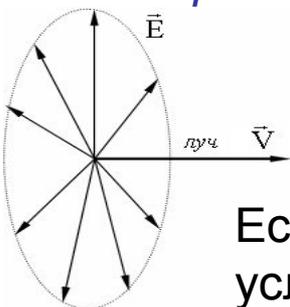
Свет обычных источников - сумма независимых излучений множества атомов – сумма множества независимых цугов вол, в которых направления векторов  $E$  различны – цуг, в котором любое направление  $E$  равновероятно.

Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора  $E$  называется **естественным** или **неполяризованным** (от ламп накаливания, солнца).

Естественный свет условно обозначают:



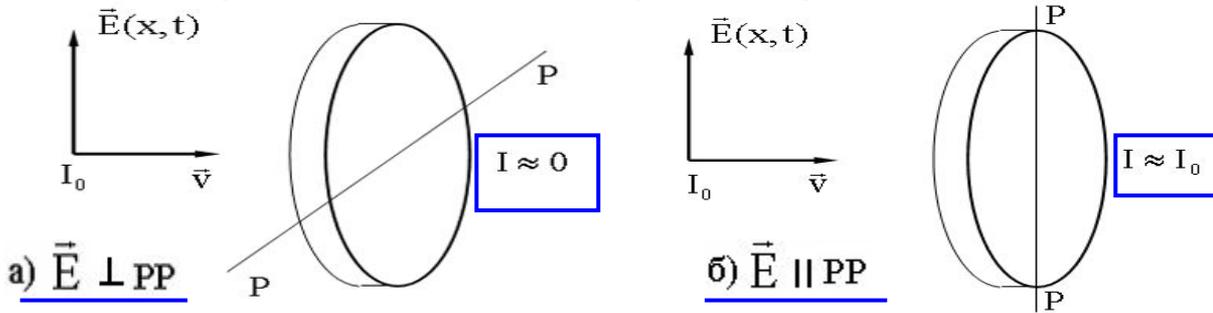
$$E_{\parallel} = E_{\perp} \quad I_{\parallel} = I_{\perp} = \frac{1}{2} I_0$$



Если в результате внешних воздействий существует преимущественное направление колебаний  $\vec{E}$ , то свет - **частично поляризованный** .

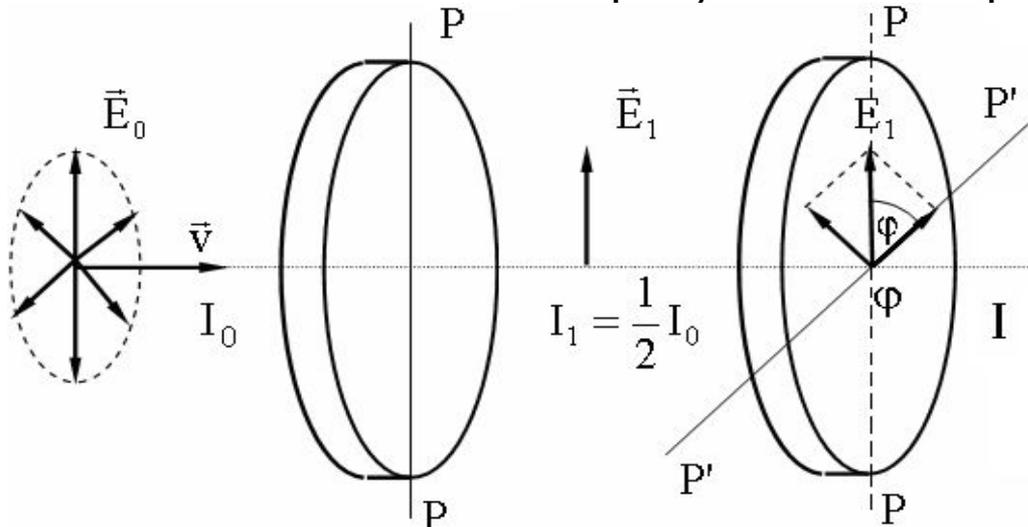
Оптические устройства, преобразующие естественный свет в плоскополяризованный, называются поляризаторами.

**Поляризаторы** пропускают колебания  $\vec{E}$  только одного направления. Это направление в поляризаторе называется осью пропускания (PP).



**Поляризаторы, используемые для анализа поляризации света, называются анализаторами.**

**Закон Малюса** Оси пропускания поляризаторов развернуты на угол  $\varphi$ .



После первого поляризатора свет стал плоско поляризованным

$$\vec{E}_1 \parallel PP.$$

Второй поляризатор пропустит  $\vec{E}_{11} \parallel P'P'$

$$E_{\parallel} = E_1 \cos \varphi$$

Т.к.  $I \sim E^2$ , то:

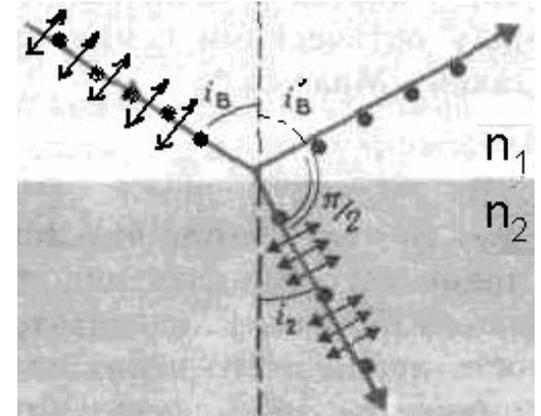
$$I = I_1 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \varphi$$

# Способы получения поляризованного света

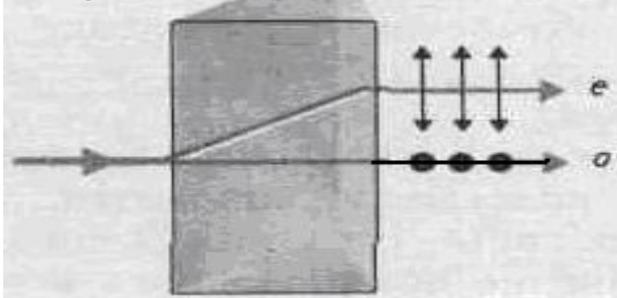
## 1) Поляризация света при отражении и преломлении.

При падении **естественного света** на границу раздела двух прозрачных диэлектриков (воздух-стекло) отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными.

**Закон Брюстера** (1781 — 1868) : *Отраженный свет полностью линейно поляризован при угле падения  $i_{Br}$ , удовлетворяющем условию  $tg i_{Br} = n_2/n_1$*   
Преломленный луч при угле падения  $i_{Br}$  поляризуется максимально, но не полностью, и **угол между отраженным и преломленным лучами =  $90^\circ$** .



нормальное падение



## 2) Двойное лучепреломление

Все **анизотропные кристаллы** показывают **двойное лучепреломление** – **раздваивание падающего светового луча на два преломленных луча, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях.**

**Обыкновенный (o)**- (продолжение первичного пучка, подчиняется закону преломления) и **необыкновенный (e)** – (отклоняется, не следует закону преломления) отличаются скоростью распространения в кристаллах в разных направлениях.

**Если один из двух лучей полностью поглощается дwoякопреломляющим кристаллом (герапатит) – явление дихроизма.**

## Квантовая оптика

## Тепловое излучение и его характеристики

Испускание электромагнитных волн за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества называют **тепловым** (инфракрасным) **излучением** (свойственно всем телам при температуре  $T > 0\text{K}$ ).

Тепловое излучение и поглощение тел характеризуют :

**Энергетическая светимость** – мощность излучения с единицы площади поверхности тела:

$$R_T = \frac{W}{t S} = \frac{\Phi_T}{S}$$

**Спектральная плотность энергетической светимости**

— мощность излучения с единицы площади поверхности в интервале длин волн единичной ширины:

$$r_{\lambda, T} = \frac{dW^{\text{изл}}_{\lambda, \lambda+d\lambda}}{dt ds d\lambda}$$

$dW^{\text{изл}}_{\lambda, \lambda+d\lambda}$  — энергия излучения в интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ .

**Спектральная поглощательная способность** – отношение энергии, поглощаемой единицей площади поверхности тела в единицу времени, к энергии падающих на нее волн с длиной волны от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ .

$$a_{\lambda, T} = \frac{dW^{\text{погл}}_{\lambda, \lambda+d\lambda}}{dW^{\text{пад}}_{\lambda, \lambda+d\lambda}}$$

**Интегральная поглощательная способность:**

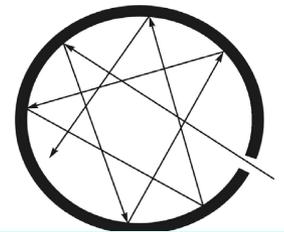
(для электромагнитных волн с любыми частотами)

$$A_T = \frac{dW^{\text{погл}}}{dW^{\text{пад}}}$$

**Тело, поглощающее при любой температуре все падающее на него излучение любой частоты - абсолютно черное тело**

Для АЧТ:  $a^r_{\nu, T} = A^r_T = 1$

**Модель АЧТ** – замкнутая полость с отверстием



Серое тело:  $a^c_{\nu, T} = A^c_T = \text{const} < 1$

Белое тело:  $a^b_{\nu, T} = A^b_T = 0$

**Свойство АЧТ:** при заданной  $T$  равновесное тепловое излучение АЧТ имеет тот же спектр, что и окружающее равновесное излучение.

## Законы теплового излучения (установлены опытным путем)

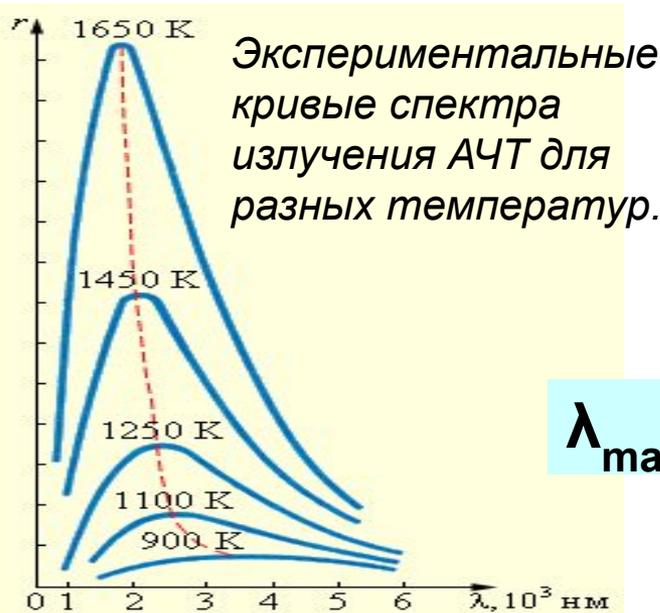
**Закон Кирхгофа:** Отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела и является для всех тел универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры, равной спектральной плотности энергетической светимости АЧТ.

$$\frac{r'_{\nu,T}}{a'_{\nu,T}} = \frac{r''_{\nu,T}}{a''_{\nu,T}} = \frac{r'''_{\nu,T}}{a'''_{\nu,T}} = \dots = r'_{\nu,T}$$

**Закон Стефана – Больцмана:** Энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры.

$$R_T^r = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 К^4} \quad \text{— постоянная Стефана-Больцмана}$$



**Закон смещения Вина** (1893 г.):  $\lambda_{\max}$ , соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости  $r_{\lambda,T}$  АЧТ, обратно пропорциональна его термодинамической температуре.

$$\lambda_{\max} = b / T \quad b = 2,9 \cdot 10^{-3} м \cdot К \quad \text{- постоянная Вина}$$

В рамках классической физики не удалось объяснить спектр АЧТ

Гипотеза Планка (1900 г.): Атомные осцилляторы излучают эл. маг. энергию не непрерывно, а определенными порциями – квантами. Энергия кванта пропорциональна частоте колебаний.

$$\varepsilon_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка.

$r_\lambda$  для АЧТ

**Закон излучения Планка:**

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

согласуется с экспериментом

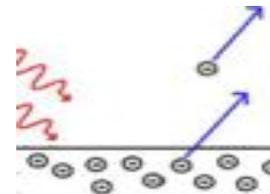
Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения (света).

Столетов (1888 – 1890), Ленард и Томсон (1898 - 1900) – Экспериментальные законы фотоэффекта противоречили классической электродинамике

А. Эйнштейн (1905), предложил, что: Свет испускается, распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями.

Свет не непрерывный волновой процесс, а поток локализованных в пространстве дискретных квантов – фотонов

фотоэффект



**Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта - закон сохранения энергии:** Энергия падающего фотона  $h\nu$  расходуется на совершение электроном работы выхода  $A$  из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии ( $mv_{max}^2/2$ ).

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

*Квантовая теория объяснила законы фотоэффекта:*

**Закон Столетова:** ток насыщения  $I_{\text{нас}} \sim E_e$  (освещенности катода)

Число фотоэлектронов, покидающих поверхность катода за 1 с, пропорционально числу фотонов, падающих на нее за то же время .

**II закон** **Линейная зависимость максимальной кинетической энергии электронов от частоты** следует из уравнения Эйнштейна. Тангенс угла наклона прямой равен постоянной Планка  $h$ .

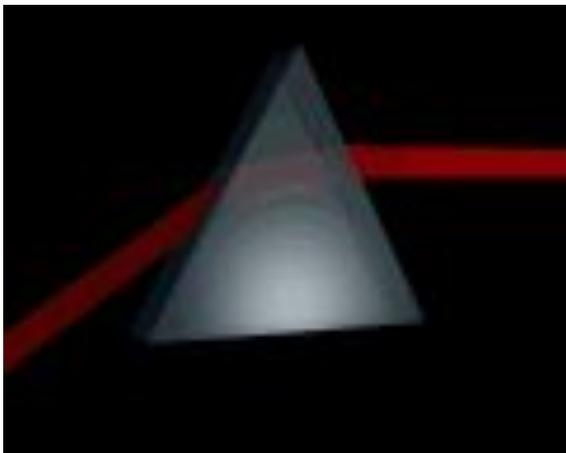
**III закон** **Наличие красной границы фотоэффекта** . Только если  $h\nu \geq A$ , электрон, получивший энергию от фотона, сможет совершить работу выхода и вырваться из металла.

$$E_K = h\nu - A, \quad E_K = 0, \quad \nu_{\text{кр}} = A/h \quad \lambda_{\text{кр}} = hc/A$$

**IV закономерность** **Безынерционность фотоэффекта** – скорость света очень велика и передача энергии при столкновении фотона с электроном происходит почти мгновенно.

Наряду с волновыми явлениями (дифракция, интерференция, поляризация) наблюдаются явления, характеризующие корпускулярную природу света (фотоэффект).

**Корпускулярно-волновой дуализм:** Фотон и электромагнитная волна – две модели одного и того же реально существующего объекта – электромагнитного излучения.



К  
О  
Ж  
З  
Г  
С  
Ф

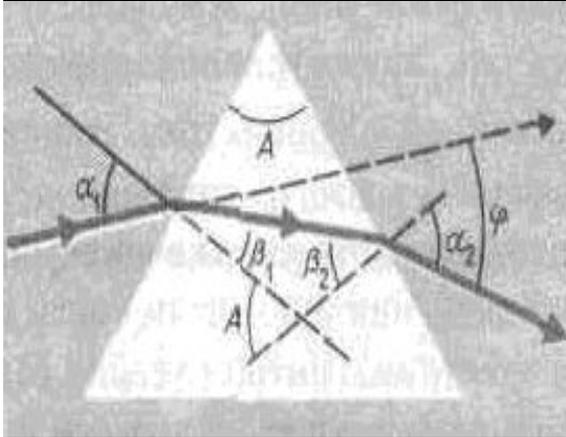
Дисперсией называется зависимость показателя преломления  $n$  вещества от длины волны  $\lambda$  света.

Если углы  $A$  (преломляющий угол призмы) и  $\alpha_1$  (угол падения) малы, то угол отклонения луча  $\phi$  :

$$\phi = A(n-1) \quad \text{Если } n=f(\lambda), \text{ то } \phi = f(\lambda)$$

Красные лучи отклоняются призмой слабее, чем фиолетовые, тогда:  $n_{кр} < n_{ф}$ .

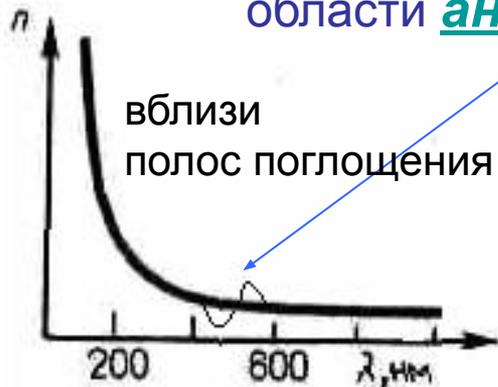
Величина  $D=dn/d\lambda$  - дисперсия вещества, показывает, как быстро изменяется показатель преломления с длиной волны.



Для прозрачных неокрашенных веществ  $n$  уменьшается с ростом  $\lambda$ .

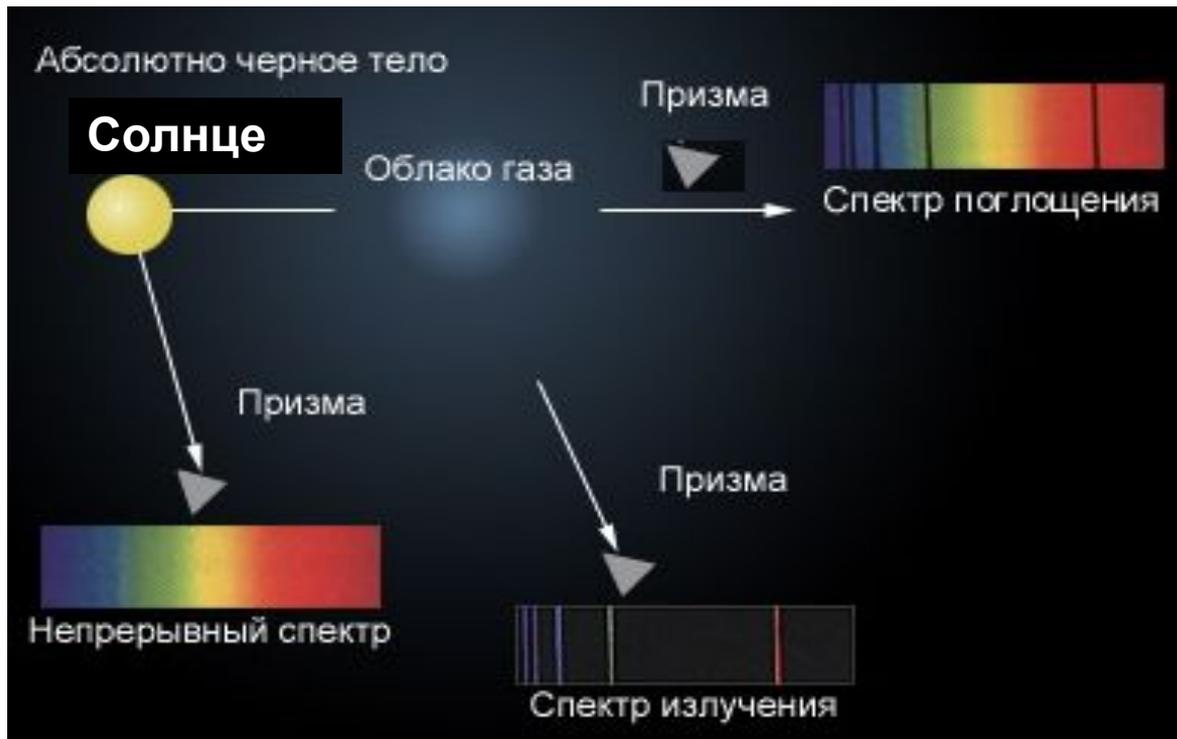
$D=dn/d\lambda < 0$  – нормальная дисперсия.

Для прозрачных окрашенных веществ существуют области аномальной дисперсии –  $D=dn/d\lambda > 0$



Следствие дисперсии - разложение в спектр пучка белого света при прохождении его через призму.

На явлении нормальной дисперсии основано действие **призмных спектрографов**, применяемых в **спектральном анализе**.



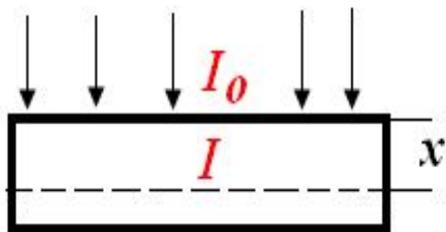
**Люминесценция – свечение тел, превышающее их равновесное тепловое излучение.**

**Поглощение света** - явление потери энергии световой волной при прохождении через вещество, вследствие преобразования ее энергии в другие формы

**закон Бугера (1698-1758):**

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

**$\alpha$  - коэффициент поглощения, зависит от  $\lambda$  (или частоты  $\omega$ ), химической природы, состояния вещества и не зависящий от интенсивности света.**



Поглощение как и излучение света для различных веществ различно:

### Линейчатый спектр поглощения и излучения:



H

Одноатомные газы и пары металлов (атомы изолированы). Линии отвечают частотам собственных колебаний электронов в атомах

### Полосатый спектр поглощения: n-атомные(n>1) газы, молекулярные пары



N<sub>2</sub>

Полосы характеризуют колебания электронов в атомах и атомов в молекулах.

Сплошной спектр поглощения: Для многих диэлектриков широкие полосы перекрываются, образуя сплошные спектры поглощения. Металлы являются непрозрачными для света. Энергия световой волны быстро поглощается, превращаясь в тепловую.

**Линии в линейчатых спектрах расположены не беспорядочно, а сериями.**

Серии атома водорода можно описать обобщенной формулой Бальмера:

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

или

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

(1885г.)

где  $k = 1, 2, 3, \dots$  определяет серию, а  $n = k + 1, k + 2, \dots$  определяет отдельные линии серии  $k$

$R' = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга  $R = R' \cdot c$

## Серии атома водорода

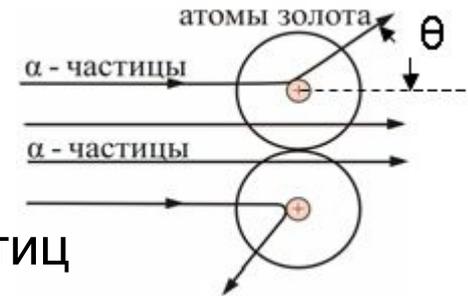
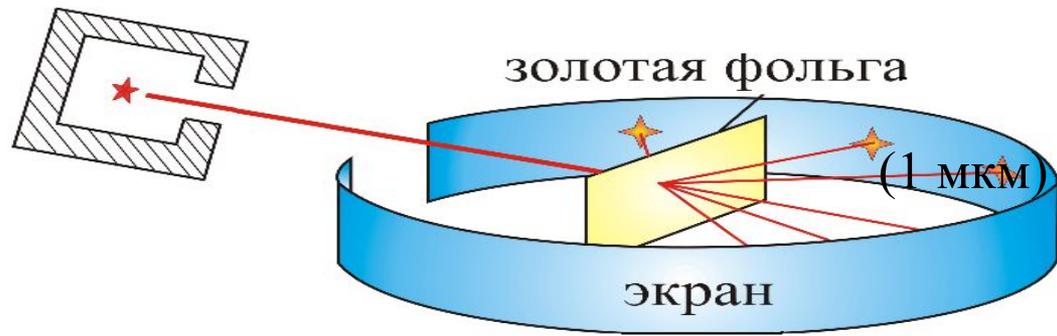
Серия Лаймана Ультрафиолетовая область	$\nu = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$k = 1, n = 2, 3, 4, \infty$
Серия Бальмера Видимая область	$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$k = 2, n = 3, 4, 5, \infty$
Серия Пашена Инфракрасная область	$\nu = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$k = 3, n = 4, 5, 6, \infty$
Серия Брэкета Инфракрасная область	$\nu = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$k = 4, n = 5, 6, 7, \infty$
Серия Пфунда Инфракрасная область	$\nu = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$k = 5, n = 6, 7, 8, \infty$

Дискретность спектров свидетельствует о дискретности процессов, приводящих к их появлению. Противоречит классической эл. маг. теории излучения света атомами.

## Опыт Резерфорда (1911)

Изучение строения атома по рассеянию  $\alpha$ -частиц ( $v=10^7$  м/с,  $q=+2e$ ,  $m=7300m_e$ ) в веществе

Существовали частицы (1 из 20 000), резко отклоняющиеся от первоначального направления: углы рассеяния  $\theta$  от  $30^\circ$  до  $180^\circ$ .

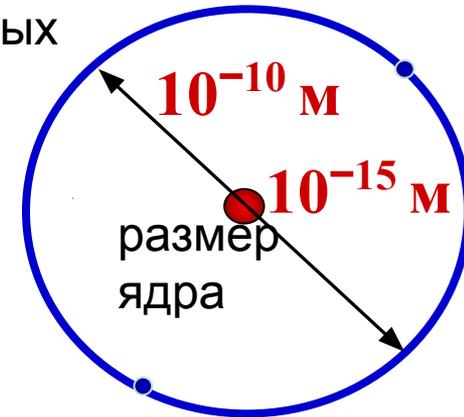


**Вывод Резерфорда:** Большие углы рассеяния  $\alpha$ -частиц обусловлены взаимодействием с положительно заряженным ядром большой массы и малых размеров по сравнению с размером атома **99,95% массы атома сосредоточено в ядре.**

**Модель Резерфорда. Ядерная, планетарная модель атома:**

Вокруг ядра с зарядом  $+Ze$  ( $Z$  - порядковый номер элемента в таблице Менделеева,  $e$  - элементарный заряд), размером  $10^{-15}$  м и массой  $\approx$  массе атома, в области с размерами  $\sim 10^{-10}$  м по замкнутым орбитам движутся  $Z$  отрицательных электронов.

размер атома = размеру электронных оболочек



**Планетарная модель Резерфорда противоречила опыту:**

1. Устойчивости атомов

2. Дискретности оптических спектров атомов

## Квантовая теория атома Бора (1913) исходила из:

1. Модели атома Резерфорда
2. Закономерностей линейчатых спектров
3. Квантового характера излучения и поглощения света.

Теория основана на двух постулатах:

**Первый постулат Бора:** Существуют стационарные состояния атома, в которых он не излучает энергии. Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные орбиты, по которым электроны движутся, не излучая электромагнитных волн.

**Условие стационарности орбит:** Из всех орбит электрона возможны только те, для которых момент импульса электрона, равен целому кратному постоянной Планка:

$$m_e v_n r_n = n \hbar$$

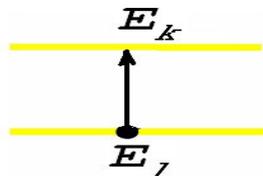
где  $m_e$  — масса электрона,  $v_n$  — его скорость на  $n$ -й орбите радиуса  $r_n$ ,  $\hbar = h/(2\pi)$ .  
 $n = 1, 2, 3, \dots$  главное квантовое число.

**Второй постулат Бора:** При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (поглощается) фотон с энергией равной разности энергий соответствующих стационарных состояний:

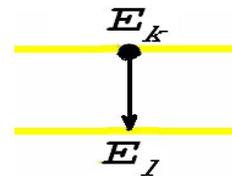
$$h\nu = E_m - E_n$$

**Правило частот Бора**

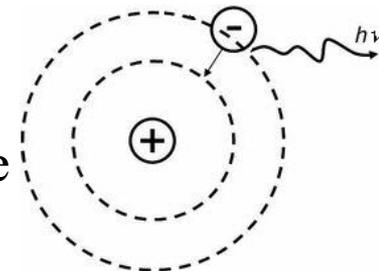
Поглощение  
энергии



если  
 $E_k > E_l$



Излучение  
энергии



## Успехи теории Бора

Теория Бора позволила рассчитать радиусы орбит и энергии стационарных состояний атома водорода ( $Z=1$ )

Радиус первой орбиты атома водорода ( $n=1$ , основное состояние)

$$r_1 = 4\pi\epsilon_0 \frac{h^2}{m_e e^2} = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,529 \text{ \AA}$$

называют **Боровским радиусом**:

**Радиус  $n$ -ой орбиты ( $n>1$ , возбужденные состояния):**  $r_n = r_1 n^2$

При  $n=1$  атом водорода обладает минимальной энергией  $E_1 = -13,55$  эВ и максимальной  $E_\infty = 0$  при  $n=\infty$  (удаление электрона из атома - ионизация атома)

$$E_n = E_1 / n^2$$

Теория Бора позволила рассчитать **постоянную Ридберга и линейчатый спектр атома водорода**

$$h\nu = E_n - E_k = E_1/n^2 - E_1/k^2$$

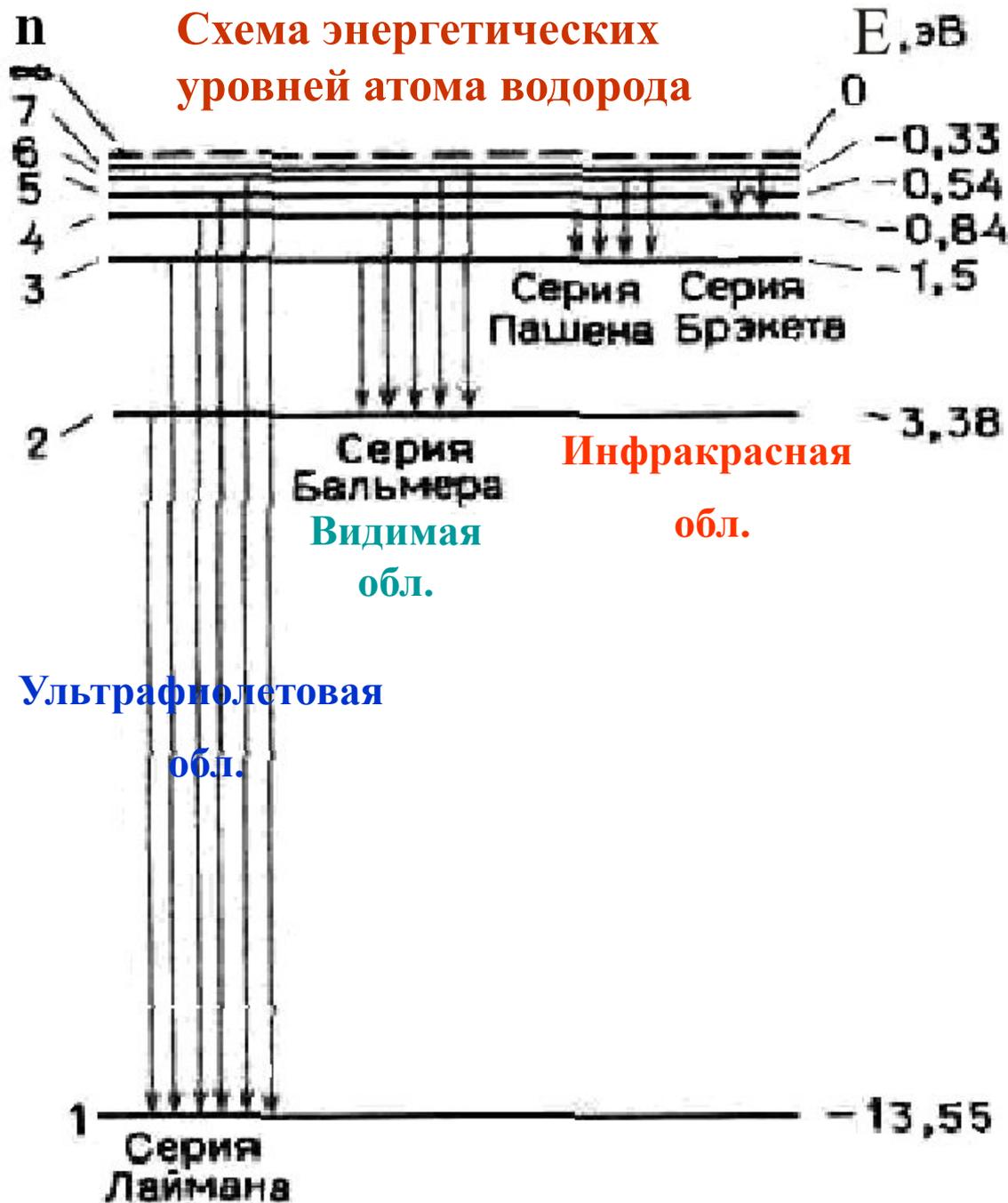
При переходе электрона в атоме водорода из состояния  $n$  в состояние  $k$  излучается фотон с энергией :

$$h\nu = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

Постоянная Ридберга:

$$R' = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c}$$

**Теория Бора объяснила структуру линейчатого спектра водорода.**



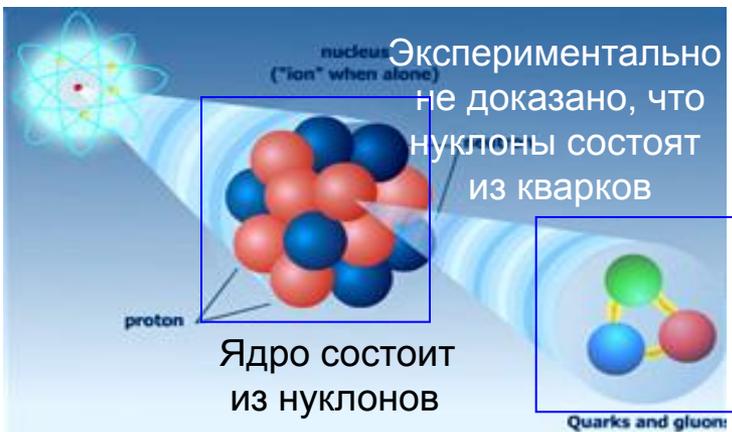
## Недостатки теории

### Бора:

1. Противоречивость теории - механическое соединение классической физики с квантовыми постулатами.
2. Не смогла объяснить интенсивности спектральных линий.
3. Не смогла объяснить спектры атомов с числом электронов более 1.
4. Не смогла объяснить расщепление спектральных линий во внешнем магнитном поле (эффект Зеемана, 1896) и в электрическом поле (эффект Штарка).

Атом состоит из ядра и электронов

## Размер, состав и заряд атомного ядра.



Экспериментально не доказано, что нуклоны состоят из кварков

Исследования радиоактивности и ядерных реакций привели к открытию **элементарных частиц, составляющих ядра атомов (нуклонов): протона** (Резерфорд) и **нейтрона** (Чедвик, 1932).

Нуклон	Масса покоя, кг	Заряд, Кл
Протон	$1,673 \cdot 10^{-27}$	$+1,6 \cdot 10^{-19}$
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	0

**Протонно-нейтронная модель ядра** предложена Д.Д.Иваненко в 1932 г.

**Ядро обозначается символом:**



**X** — символ химического элемента,  
**Z** — зарядовое число, число протонов в ядре  
**A** — массовое число, число нуклонов в ядре.

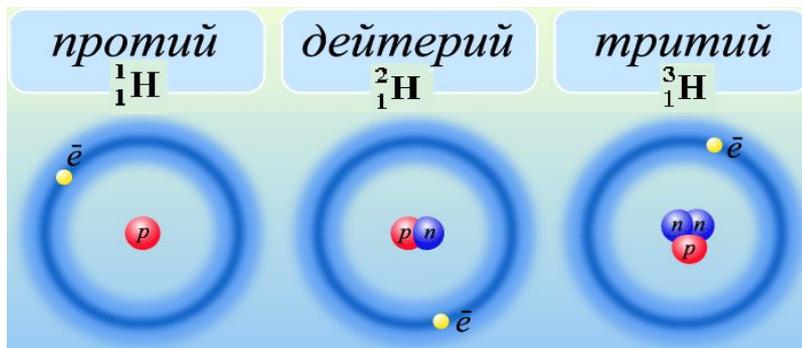
$A = Z + N$ , где **N** - число нейтронов в ядре

Ядра с одинаковым **Z**, но разными **A** называются *изотопами*.

Водород (**Z=1**) имеет три изотопа:

Ядра с одинаковым **A**, но разными **Z** называются *изобарами*.

бериллий  ${}^{10}_4\text{Be}$  бор  ${}^{10}_5\text{B}$  углерод  ${}^{10}_6\text{C}$



## Дефект массы и энергия связи ядра. Устойчивость ядер

Масс-спектрометрические измерения показали, что масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов.

Если ядро массой  $M_{\text{я}}$  образовано из  $Z$  протонов с массой  $m_p$  и из  $(A - Z)$  нейтронов с массой  $m_n$ , то

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}$$
 называется **дефектом массы** ядра.

**Энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны, называется энергией связи ядра (=  $E$ , выделяющейся при образовании ядра).**

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

$c$  – скорость света  
в вакууме

Удельная энергия связи ядра – энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$\delta E_{\text{св}} = E_{\text{св}} / A$$

Чем больше  $\delta E_{\text{св}}$ , тем устойчивее ядро.

Тяжелые и легкие ядра наименее устойчивы

- Энергетически выгодны процессы:
- 1) деление тяжелых ядер на более легкие (деления ядра урана)
  - 2) слияние легких ядер друг с другом в более тяжелые (термоядерный синтез)

Радиоактивность (распад) - способность ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием различных видов излучений и частиц. (1896 г.)

Радиоактивное излучение бывает трех типов:  $\alpha$ -излучение (поток ядер гелия),  $\beta$ -излучение (поток быстрых электронов) и  $\gamma$ -излучение (коротковолновое электромагнитное излучение).

### Закон радиоактивного распада

Описывает уменьшение во времени числа распадающихся (материнских) ядер.

Закон получен при двух предположениях:

- 1) постоянная распада  $\lambda$  не зависит от внешних условий;
- 2) число ядер  $dN$ , распавшихся за интервал времени от  $t$  до  $t+dt$ , пропорционально промежутку времени  $dt$  и числу ядер  $N$ , не распавшихся к моменту времени  $t$ :  $dN = -\lambda N dt$  (« $-$ » соответствует уменьшению числа материнских ядер).

Интегрируя получим:

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

$N$  – число не распавшихся ядер в момент времени  $t$ ,  $N_0$  – число радиоактивных ядер в начальный момент времени  $t = 0$ .

Интенсивность процесса распада и устойчивость ядер характеризуют:

Период полураспада  $T_{1/2}$  — время, за которое исходное число радиоактивных ядер уменьшается вдвое:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Активность препарата (число распадов в единицу времени) =  $\lambda N$

Единица активности в СИ – беккерель (Бк): 1 Бк = 1 распад в 1с, внесистемная единица кюри (Ки): 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

1 Ки соответствует активности 1 г радия (Ra).