

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 λ	Частота волны, Гц ν
<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>γ-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

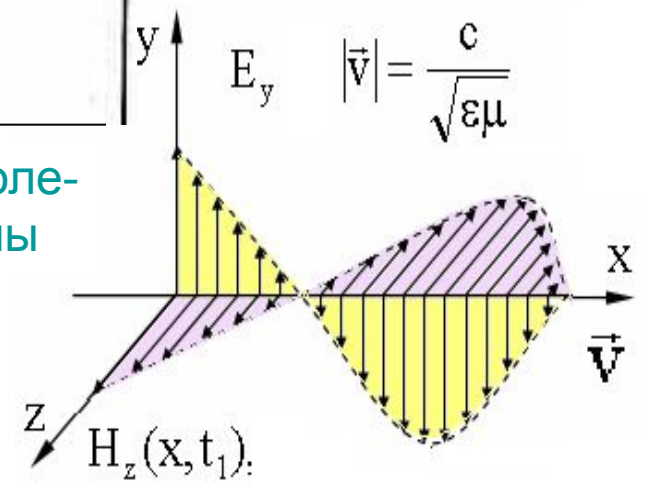
Скорость света в среде:

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

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.

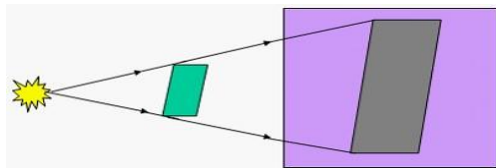
1. Закон прямолинейного распространения света:

свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно.

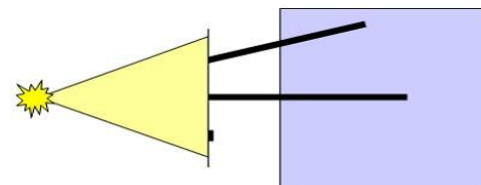
2. Закон независимости световых пучков:

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

1.



2.



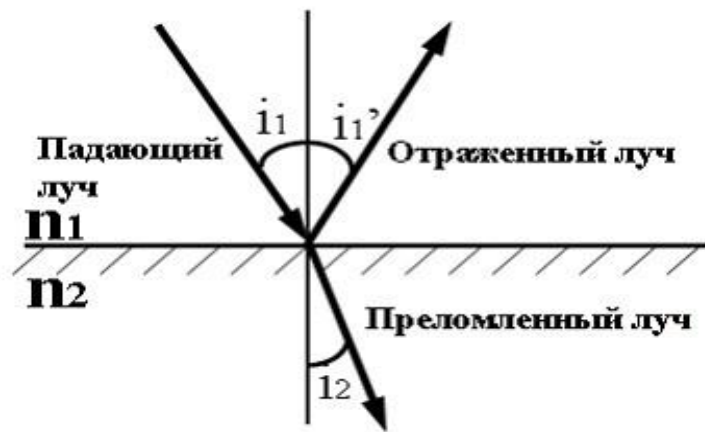
3. Закон отражения света:

$$i_1' = i_1$$

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:

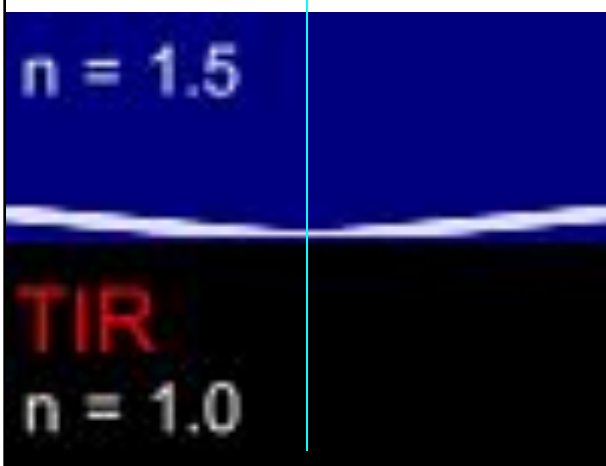
$$n = c / v$$

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*.

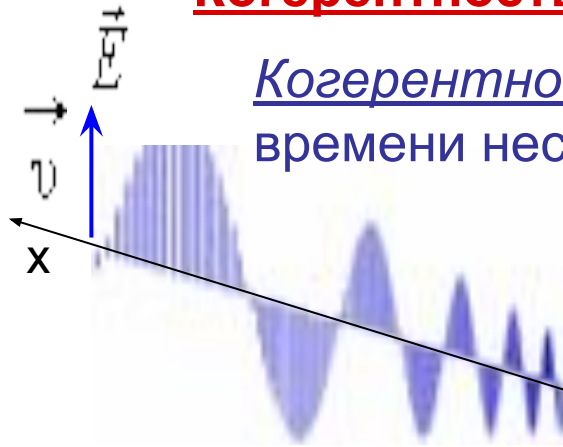
При взаимодействии света с веществом основное действие – физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое – оказывают колебания вектора напряженности электрического поля E .



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 (ω , ν , λ 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

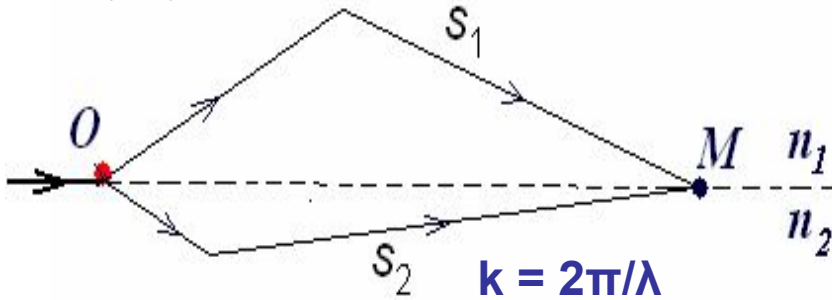


Интерференция света – явление перераспределения светового потока в пространстве при сложении когерентных волн, в результате которого образуется устойчивая во времени картина максимумов и минимумов интенсивности, называемая интерференционной.

Когерентные световые волны получают, разделяя излучаемую

источником волну в точке O на две волны: $E(x,t) = E_0 \cdot \text{Cos}(\omega t - kx + \phi_0)$

(двухлучевая интерференционная схема)



λ - 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: $E_0^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2 \cdot E_{10} E_{20} \cdot \text{Cos}(\phi_2 - \phi_1)$

Учтем:

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

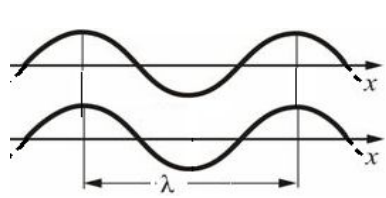
$$I \sim E_0^2$$

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



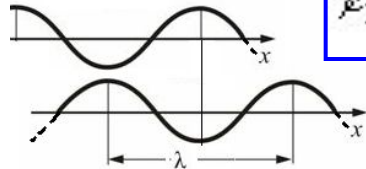
$$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$$

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

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 (Θ) на расстоянии l от щелей.

Максимумы

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

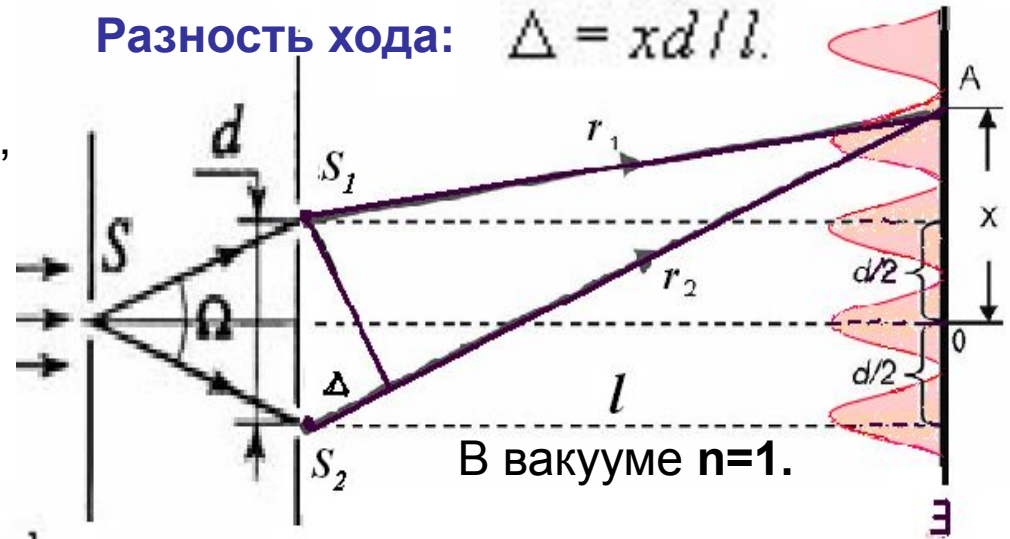
интенсивности:

Минимумы

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

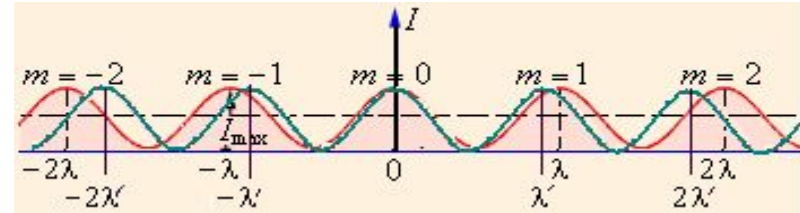
интенсивности:

Разность хода: $\Delta = x d / l$.



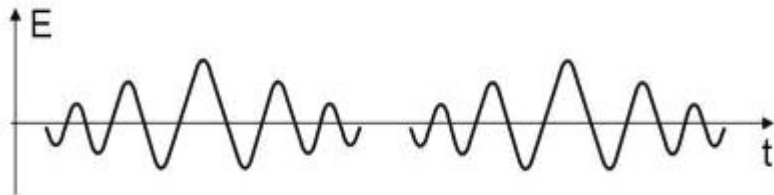
$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ порядок интерференции

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



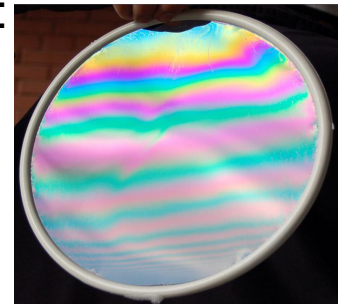
Свет реальных источников - последовательность немонахроматических волновых цугов (отрезков волны с $\omega \pm \Delta\omega$ или $\lambda \pm \Delta\lambda$).

Средняя длина цуга называется длиной когерентности.



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

Пример:



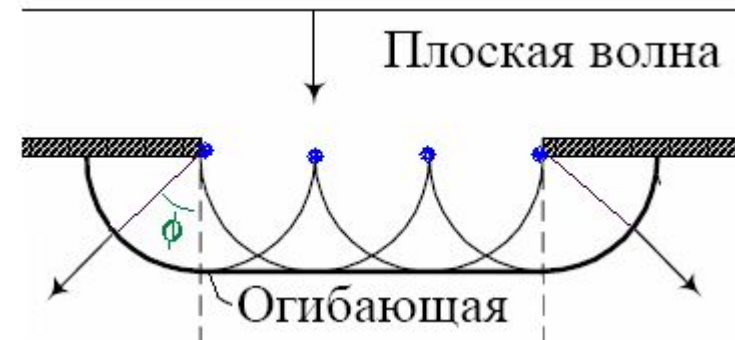
Интерференция наблюдается только при разностях хода меньших длины когерентности

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. ϕ – 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 φ (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**

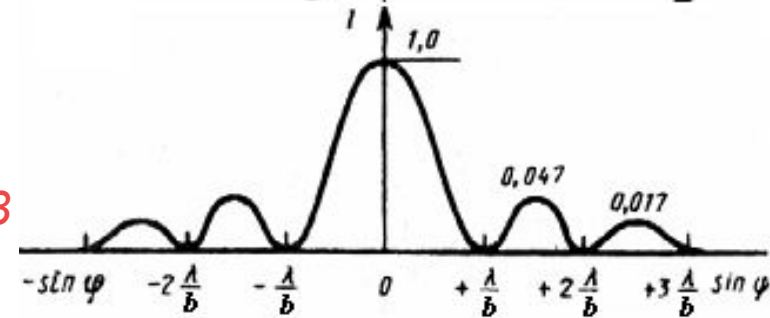
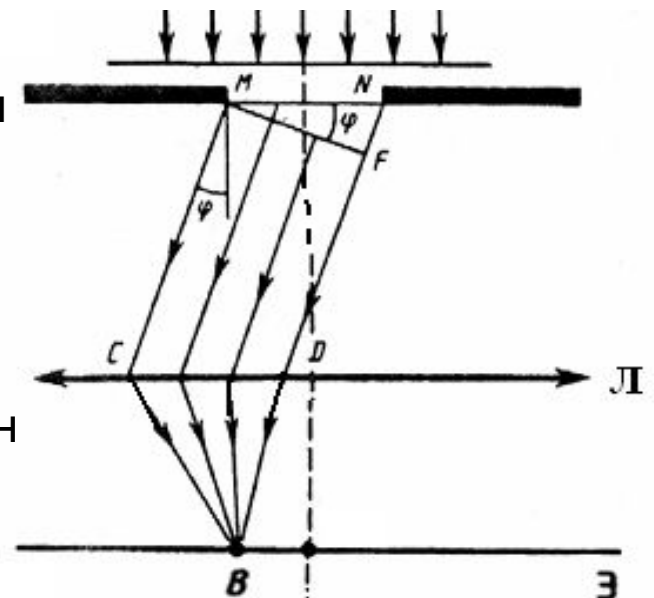
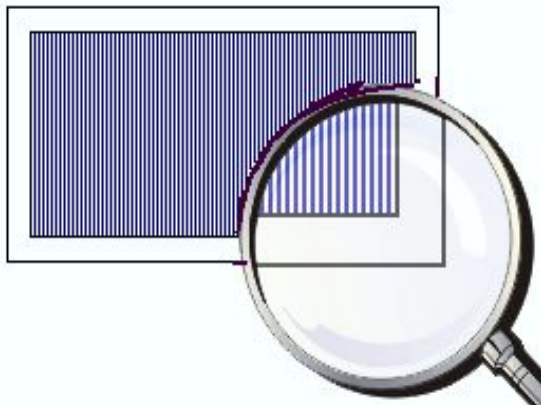


График интенсивности $I_p(\sin \varphi)$



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 φ от соответственных точек соседних щелей найдем из

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

Условия максимума: $\Delta = m\lambda$

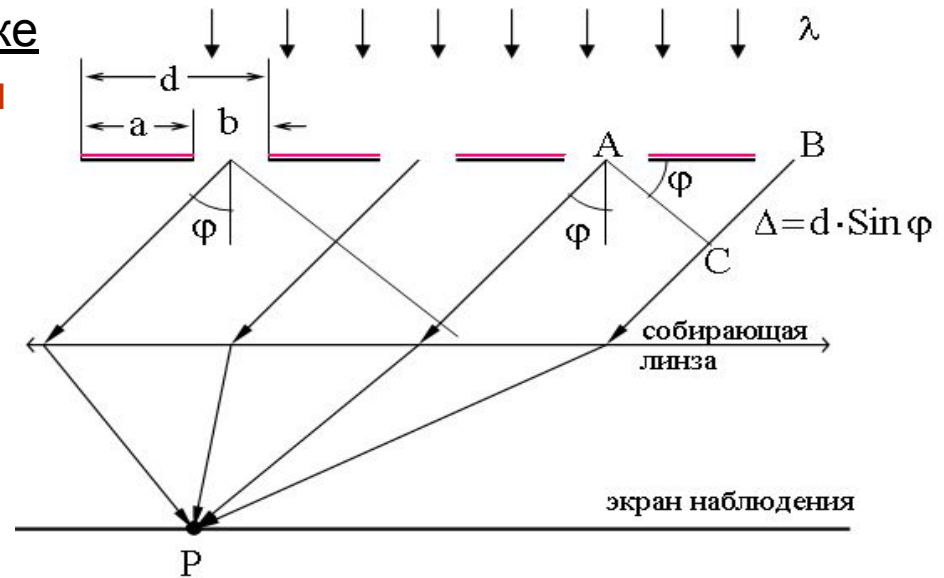
Условие главных максимумов от дифракционной решетки :

Целое число m - порядок дифракционного максимума.

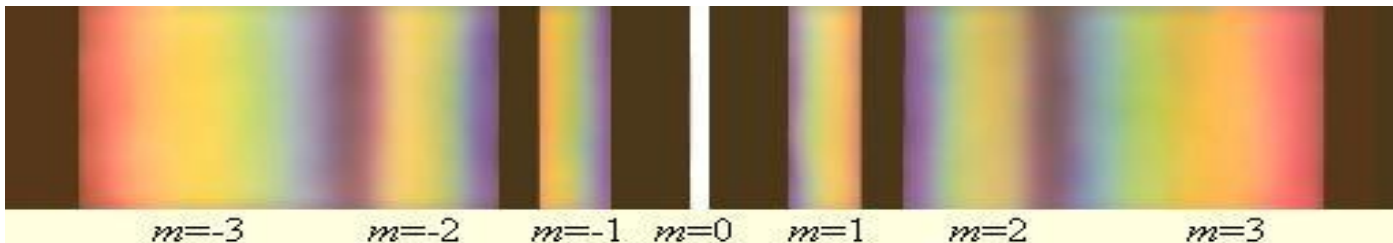
Так как модуль $\sin \varphi \leq 1$, то из условия главных максимумов следует, что число наблюдаемых главных максимумов $m \leq d/\lambda$.

Положение главных максимумов (кроме нулевого) зависит от λ .

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

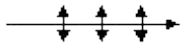
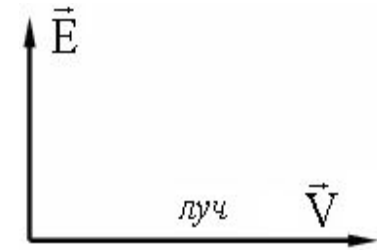
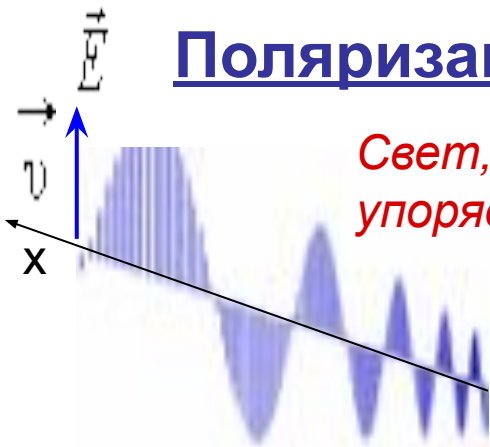
Поляризация света.

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



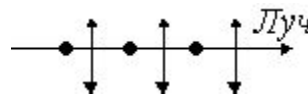
$E \perp$ плоскости рисунка



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.

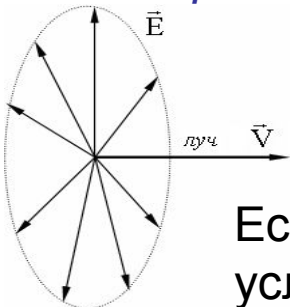
Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора E называется **естественным** или **неполяризованным** (от ламп накаливания, солнца).

Естественный свет условно обозначают:



$$E_{\parallel} = E_{\perp}$$

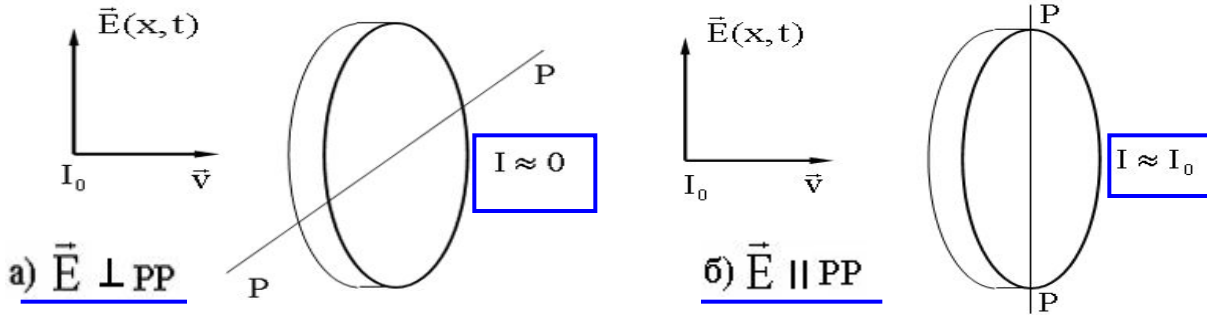
$$I_{\parallel} = I_{\perp} = \frac{1}{2} I_0$$



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

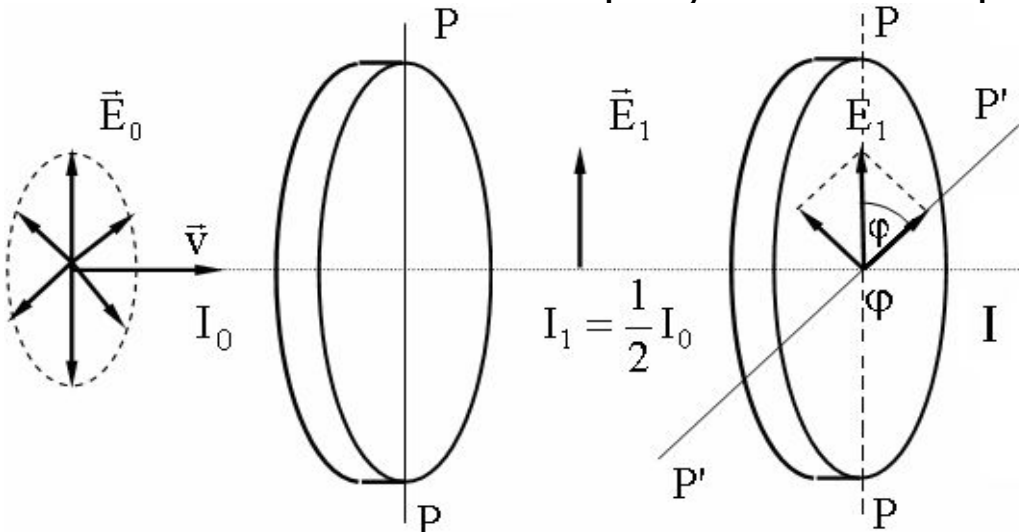
Оптические устройства, преобразующие естественный свет в плоскополяризованный, называются поляризаторами.

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 φ .



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:

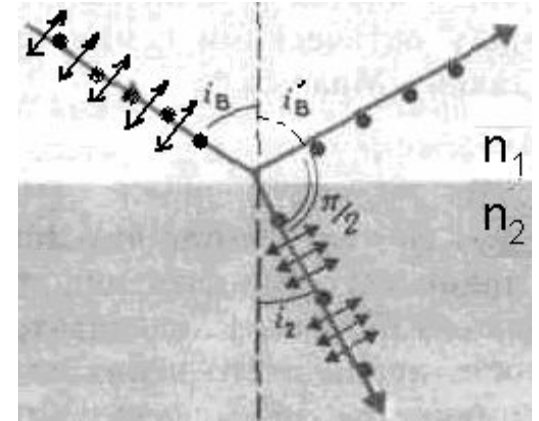
$$I = I_1 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \varphi$$

Способы получения поляризованного света

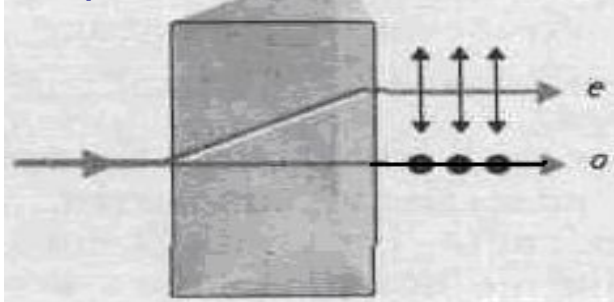
1) Поляризация света при отражении и преломлении.

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°** .



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 λ 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 λ 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:

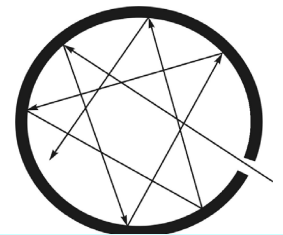
(для электромагнитных волн с любыми частотами)

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

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.

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

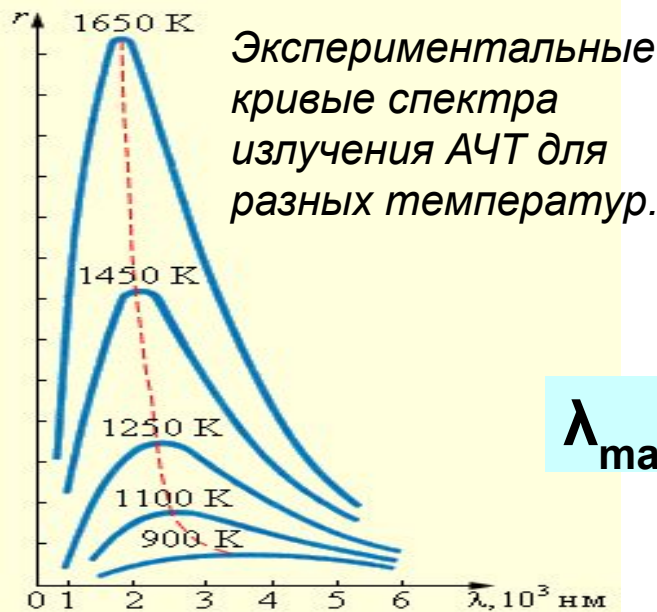
Закон Стефана – Больцмана: Энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры.

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

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

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

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



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_λ 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

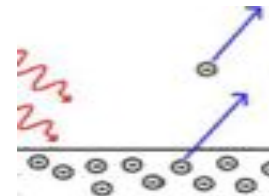
Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения (света).

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 .

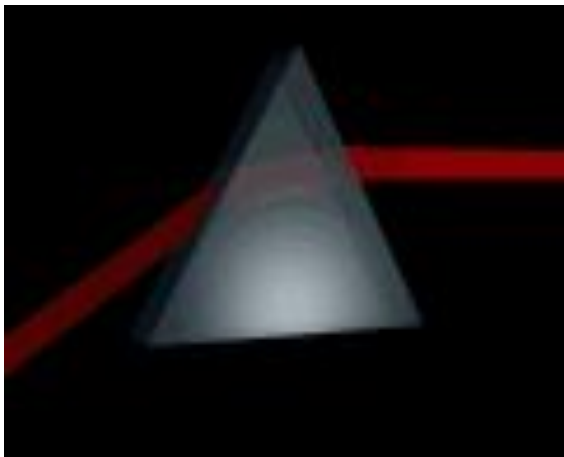
III закон **Наличие красной границы фотоэффекта** . Только если $h\nu \geq A$, электрон, получивший энергию от фотона, сможет совершить работу выхода и вырваться из металла.

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

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 λ света.

Если углы A (преломляющий угол призмы) и α_1 (угол падения) малы, то угол отклонения луча ϕ :

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

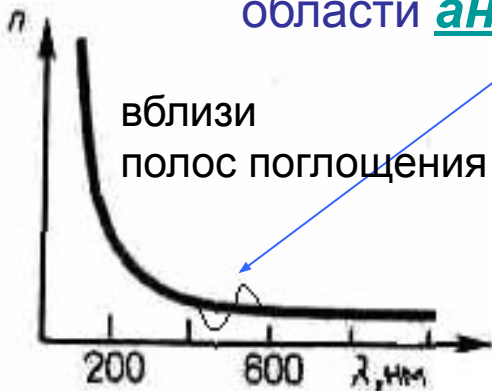
Красные лучи отклоняются призмой слабее, чем фиолетовые, тогда: $n_{\text{кр}} < n_{\text{ф}}$.

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

Для прозрачных неокрашенных веществ n уменьшается с ростом λ .

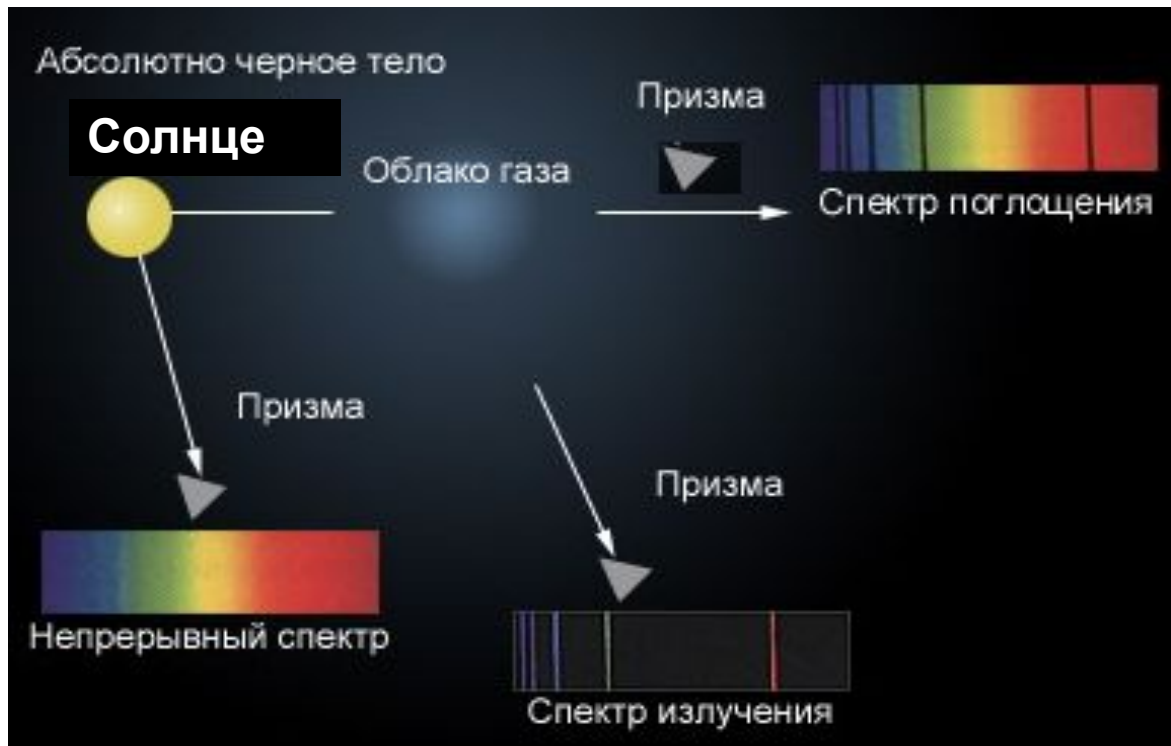
$D = dn/d\lambda < 0$ – нормальная дисперсия.

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**.



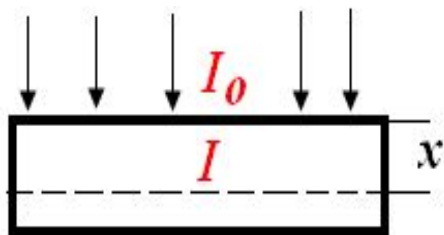
Люминесценция – свечение тел, превышающее их равновесное тепловое излучение.

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

закон Бугера (1698-1758):

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

α - коэффициент поглощения, зависит от λ (или частоты ω), химической природы, состояния вещества и не зависящий от интенсивности света.



Поглощение как и излучение света для различных веществ различно:

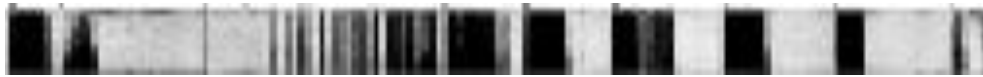
Линейчатый спектр поглощения и излучения:



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



N₂

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

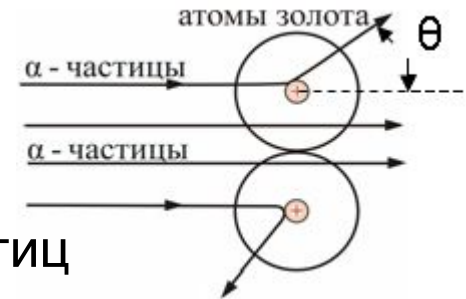
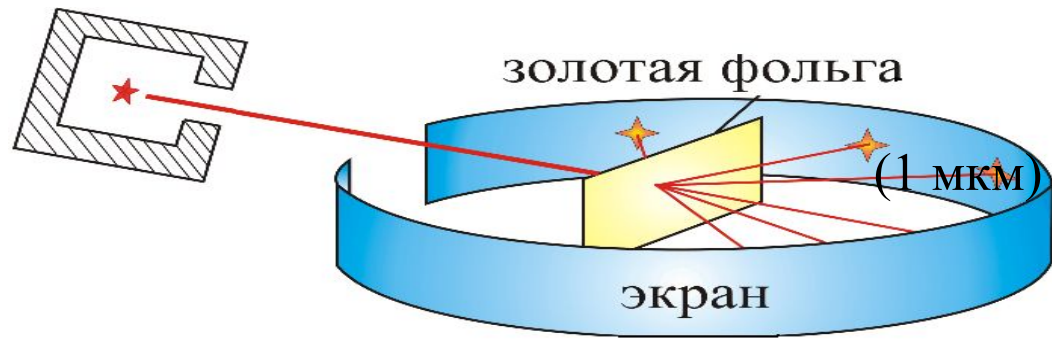
Серия Лаймана Ультрафиолетовая область	$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$k = 1, n = 2, 3, 4, \infty$
Серия Бальмера <u>Видимая область</u>	$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$k = 2, n = 3, 4, 5, \infty$
Серия Пашена Инфракрасная область	$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$k = 3, n = 4, 5, 6, \infty$
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 α -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 θ от 30° до 180° .

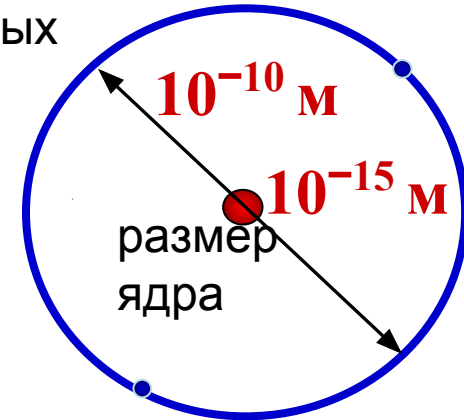


Вывод Резерфорда: Большие углы рассеяния α -частиц обусловлены взаимодействием с положительно заряженным ядром большой массы и малых размеров по сравнению с размером атома **99,95% массы атома сосредоточено в ядре.**

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:

$$m_e v_n r_n = n \hbar$$

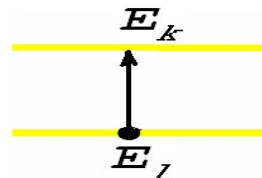
где m_e — масса электрона, v_n — его скорость на n -й орбите радиуса r_n , $\hbar = h/(2\pi)$.
 $n = 1, 2, 3, \dots$ главное квантовое число.

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

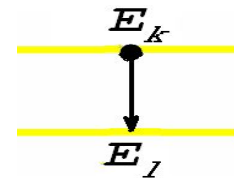
$$h\nu = E_m - E_n$$

Правило частот Бора

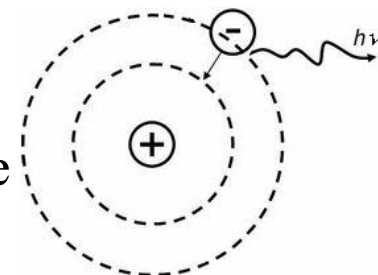
Поглощение
энергии



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**

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

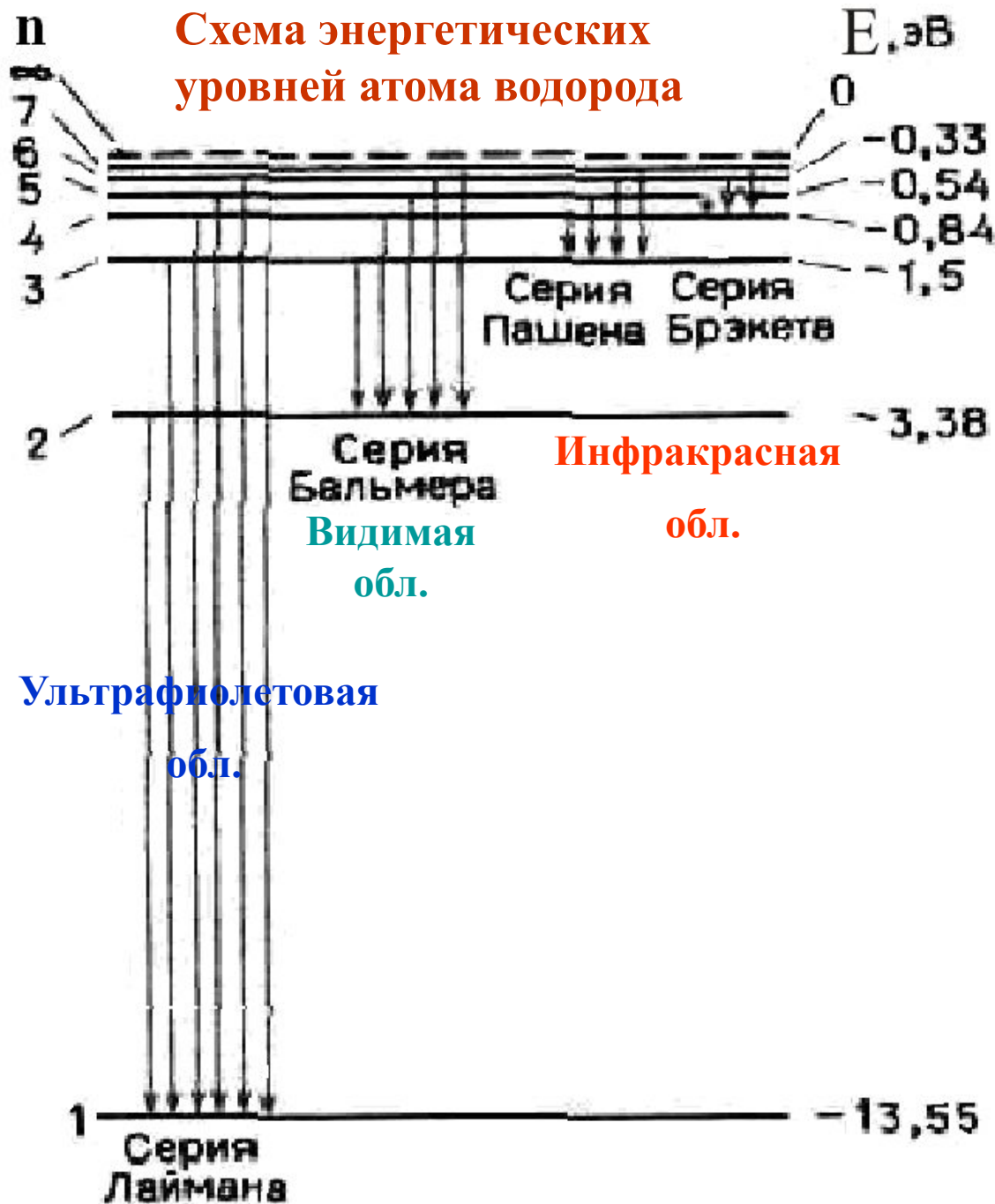
При переходе электрона в атоме водорода из состояния n в состояние k излучается фотон с энергией :

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

Постоянная Ридберга:

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

Теория Бора объяснила структуру линейчатого спектра водорода.



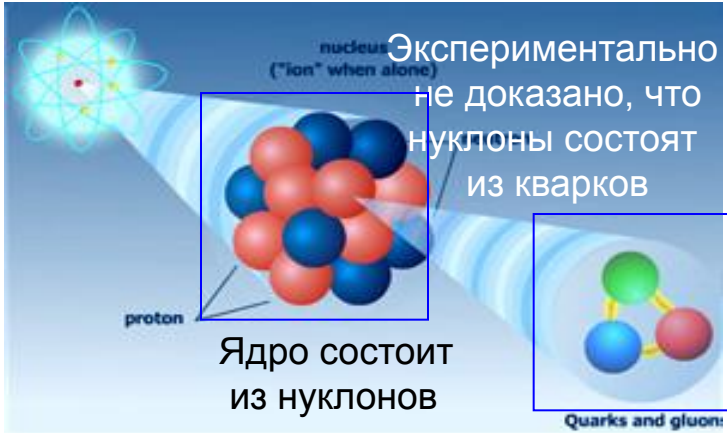
Недостатки теории

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.



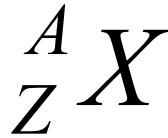
Экспериментально не доказано, что нуклоны состоят из кварков

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.

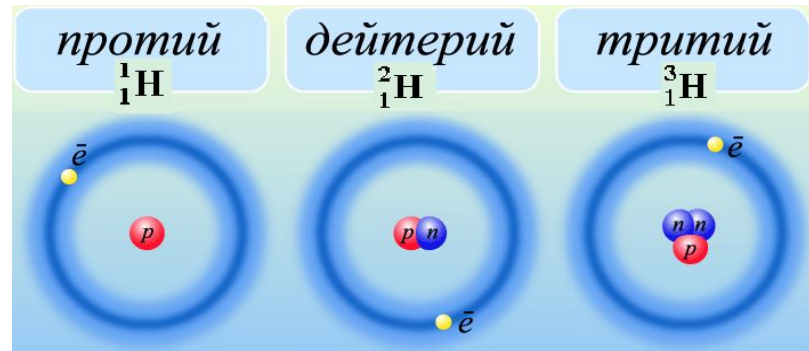
$A = Z + N$, где **N** - число нейтронов в ядре

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: **α -излучение** (поток ядер гелия), **β -излучение** (поток быстрых электронов) и **γ -излучение** (коротковолновое электромагнитное излучение).

Закон радиоактивного распада

Описывает уменьшение во времени числа распадающихся (материнских) ядер.

Закон получен при двух предположениях:

- 1) постоянная распада λ 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) = **λN**

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).