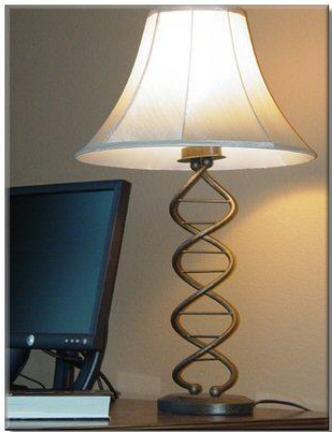


Лекция 2 (3сем).

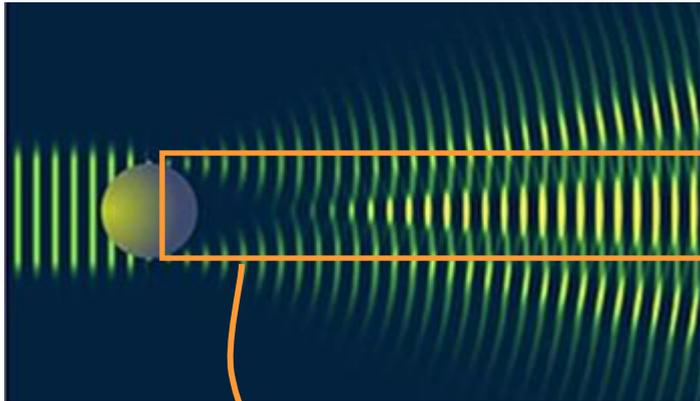
Оптика-2



1. Явление дифракции волн. Виды дифракции света. Метод Гюйгенса-Френеля расчета дифракции. Зоны Френеля.
2. Дифракция Фраунгофера на одной щели. Дифракционная решетка.
3. Поляризация света. Виды поляризации света. Закон Брюстера.
4. Двойное лучепреломление. Призма Николя. Закон Малюса.
5. Поглощение света. Закон Бугера-Ламберта.

1. Явления дифракции света

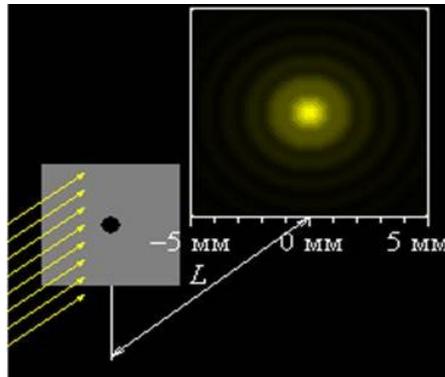
- **Определение 1: Дифракция света** - **рассеяние** светового потока **на телах и препятствиях** размером сравнимых с длиной волны падающего света.
- **Определение 2: Дифракция света** - **отклонение света от прямолинейного направления распространения** при прохождении вблизи препятствий, т.е. **свет огибает препятствия**.



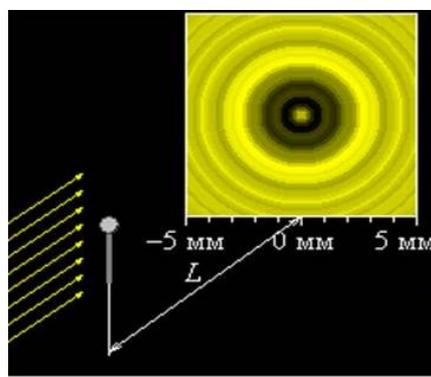
область геометрической тени

- Как показывает опыт, свет при определенных условиях может заходить в **область геометрической тени**.
- Если на пути параллельного светового пучка расположено **круглое препятствие** (круглый диск, шарик или круглое отверстие в непрозрачном экране), то на экране, расположенном на достаточно большом расстоянии от препятствия, появляется **дифракционная картина** – система чередующихся светлых и темных **колец**.
- Если препятствие имеет **линейный характер** (щель, нить (игла), край экрана), то на экране возникает система **параллельных дифракционных полос**.

Круглое препятствие

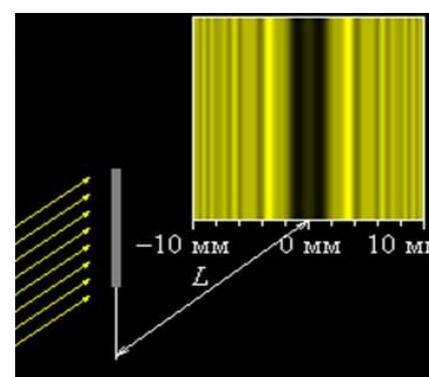


Круглое отверстие

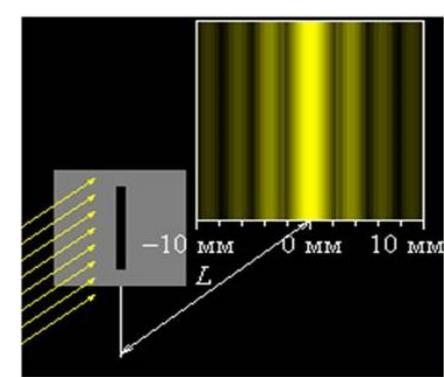


Шарик

Линейное препятствие



Игла

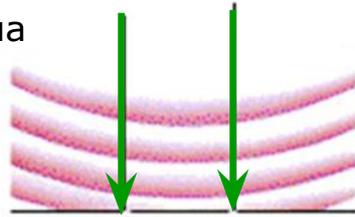


Щель

Условия наблюдения дифракции

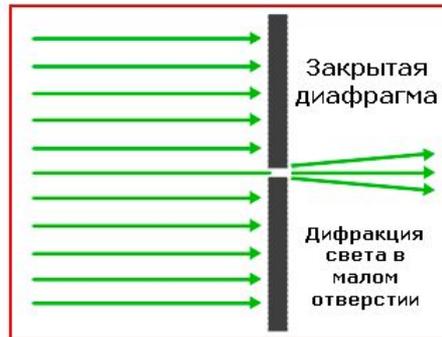
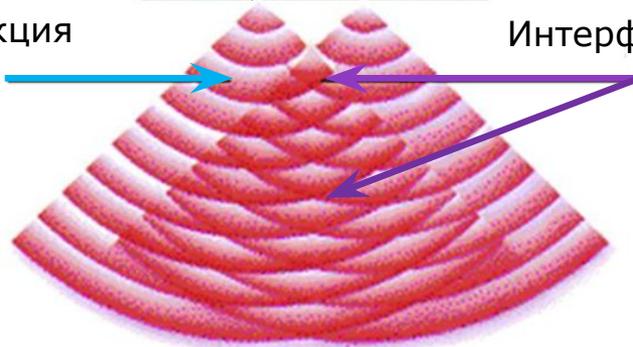
□ Узкие щели

Световая волна



Дифракция

Интерференция



- Между интерференцией и дифракцией нет существенного отличия.
- Оба явления – суть перераспределения волновой энергии в пространстве в результате суперпозиции волн.
- Перераспределение интенсивности I , возникающее в результате **суперпозиции конечного числа** когерентных волн называется **интерференцией волн**.
- Перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых когерентными источниками, **расположенными непрерывно**, называют **дифракцией**.
- Наблюдать дифракцию света нелегко, т.к. **волны отклоняются** от прямолинейного распространения **на заметные углы** на препятствиях, размеры которых сравнимы с длиной волны λ , а длина световой волны очень мала.
- **Количественный критерий дифракции** равен λD , где λ – длина волны, D – **характерные размеры препятствия**.
- Если $\lambda D \rightarrow 0$ – дифракционной картины не будет, дифракцией можно пренебречь,
- Если $\lambda D \rightarrow 1$ – явление дифракции необходимо учитывать, дифракционная картина будет наблюдаться.

Принцип Гюйгенса – Френеля

- **Вывод:** дифракционные эффекты в наибольшей степени проявляются при размерах неоднородностей, сравнимых с длиной волны.
- **При размерах неоднородностей**, существенно превышающих длину волны (на 3–4 порядка и более), явлением дифракции, как правило, можно пренебречь. При этом распространение волн с высокой степенью точности описывается законами геометрической оптики.
- Если же размер неоднородностей среды много меньше длины волны, то дифракция проявляется в виде эффекта рассеяния волн.

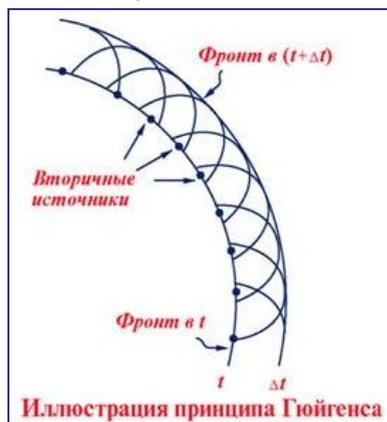
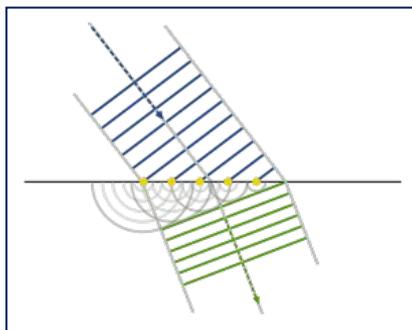


Иллюстрация принципа Гюйгенса

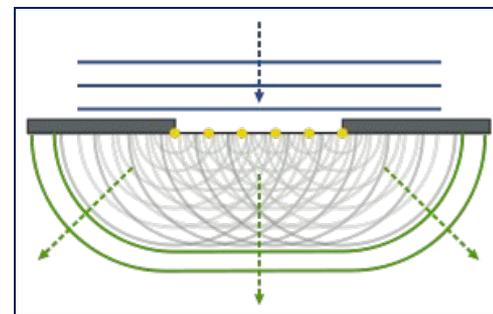
Принцип Гюйгенса:

каждая точка волновой поверхности является источником вторичных сферических волн.

- **Принцип Гюйгенса-Френеля:** каждая точка волновой поверхности является источником вторичных сферических волн которые интерферируют между собой.

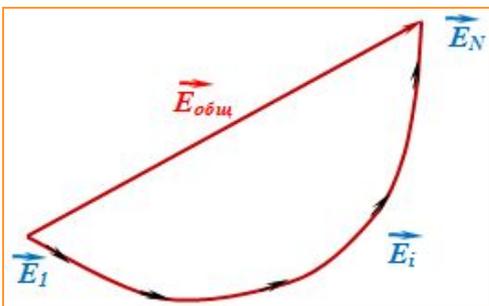


□ На границе двух сред

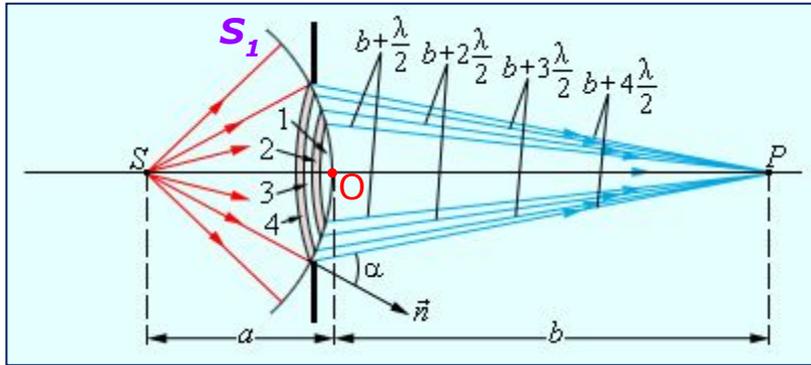


□ На щели или отверстиях

- **Вывод:** для определения колебания в точке, лежащей перед некоторой волновой поверхностью, надо найти колебания, приходящие в эту точку от всех элементов волновой поверхности и затем сложить их с учетом амплитуд и фаз.
- Принцип Гюйгенса-Френеля можно представить с помощью векторной диаграммы.
- Результирующая амплитуда колебаний $E_{общ}$ представлена как векторная сумма амплитуд E_i колебаний в точке от N различных элементов волновой поверхности с учетом их фаз, т. е. углов между ними.

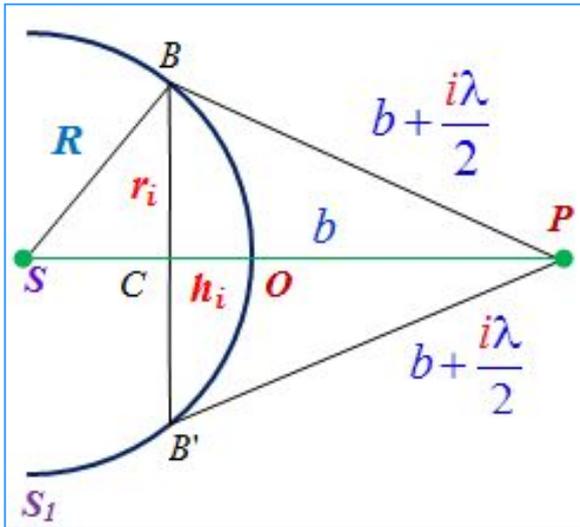


2. Метод зон Френеля



- Исходя из принципа Гюйгенса – Френеля, можно получить закон прямолинейного распространения света в свободной от препятствий однородной среде.
- Пусть **S** – точечный источник света, **P** – произвольная точка, в которой нужно найти амплитуду колебаний **A**.
- Построим сферическую волновую поверхность, радиус **R** которой меньше расстояния **SOP** на величину **OP = b**, причем $b \gg \lambda$ и $R = a \gg \lambda$ (λ – длина волны света).
- Искомая амплитуда **A** зависит от результата интерференции вторичных волн, излучаемых всеми участками **dS** поверхности **S₁**.
- Аналитическое решение этой задачи достаточно сложно, так как амплитуды и начальные фазы вторичных волн зависят от расположения соответствующих им источников **dS** по отношению к точке **P**.
- Поэтому **Френель предложил оригинальный метод разбиения** волновой поверхности **S** на зоны, позволивший сильно упростить решение (**метод зон Френеля**).
- **Принцип построения зон Френеля:** границей первой (центральной) зоны служат точки поверхности, находящиеся на расстоянии $b + \lambda/2$ от точки **P**. Точки сферы, находящиеся на расстояниях $b + 2\lambda/2$, $b + 3\lambda/2$ и т. д. от точки **P**, образуют границы 2-й, 3-й зон Френеля и т. д.
- Очевидно, что колебания, возбуждаемые в точке **P** двумя соседними зонами, противоположны по фазе, так как разность хода от сходственных точек этих зон до точки **P** равна $\lambda/2$.
- **При наложении они попарно ослабляют друг друга.**
- Следовательно, если A_1, A_2 и т. д. – амплитуды колебаний, возбуждаемых в точке **P** порознь 1-й, 2-й зонами и т. д., то **амплитуда результирующих колебаний** равна $A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots + A_n$.

Определим радиус i -й зоны



- Величина A_i зависит от площади dS_i **i -й зоны** и угла между внешней нормалью к поверхности зоны в какой-либо ее точке и прямой, направленной из этой точки в точку P .
- На рисунке справа точки B и B' соответствуют внешней границе **i -й зоны**; $BC = r_i$ – внешний радиус i -й зоны, а $CO = h_i$ – высота шарового сегмента **BOB'** .
- Из прямоугольных треугольников **SBC** и **PBC_i** :

$$r_i^2 = R^2 - (R - h_i)^2 = \left(b + \frac{i\lambda}{2}\right)^2 - (b + h_i)^2 \quad \rightarrow$$

Так как $L \gg \lambda$, то получим:

$$2(R + b)h_i = i\lambda b + \left(\frac{i\lambda}{2}\right)^2 \quad \rightarrow$$

$$h_i = \frac{i\lambda b}{2(R + b)} \quad \rightarrow$$

$$r_i = \sqrt{2Rh_i} = \sqrt{\frac{i\lambda Rb}{R + b}}$$

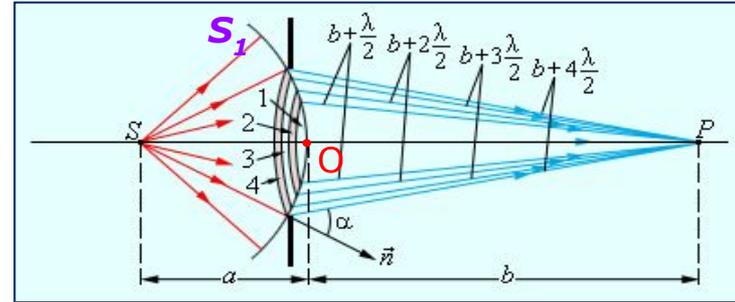
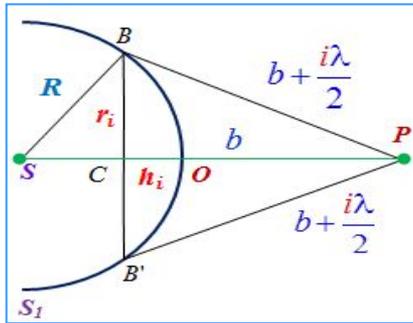
Радиус i -й зоны Френеля

- Тогда **боковая поверхность шарового сегмента BOB'** , представляющая собой сумму площадей всех **i зон**, начиная с первой:

$$dS_1 + dS_2 + \dots + dS_i = 2\pi R h_i = \frac{\pi\lambda R b}{R + b} i \quad \rightarrow \quad dS_1 = dS_2 = dS_i = \frac{\pi\lambda R b}{R + b} \quad \xrightarrow{R=a} \quad dS_i = \frac{\pi\lambda a b}{R + b}$$

Вывод: все зоны Френеля равновелики по площади

Дифракционная теория прямолинейного распространения света



- Общее число N зон Френеля, уместающихся на всей поверхности сферы, обращенной к точке P (треугольник SBC прямоугольный) очень велико:

$$b + N \frac{\lambda}{2} = \sqrt{(b + R)^2 - R^2}$$



$$N = \frac{2}{\lambda} \left[\sqrt{(b + R)^2 - R^2} - b \right]$$

$R = a$

- Если $R = a = 10 \text{ см}$, пусть $a = b$, а $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, то $N \approx 3 \cdot 10^5$.
- Вывод:** можно считать, что в пределах не слишком больших изменений i зависимость A_i от i является линейной, а именно:

$$\left. \begin{aligned} A_i &= a - bi \\ A_{i-1} &= a - b(i-1) \\ A_{i+1} &= a - b(i+1) \end{aligned} \right\}$$



$$A_i = \frac{A_{i-1} + A_{i+1}}{2}$$

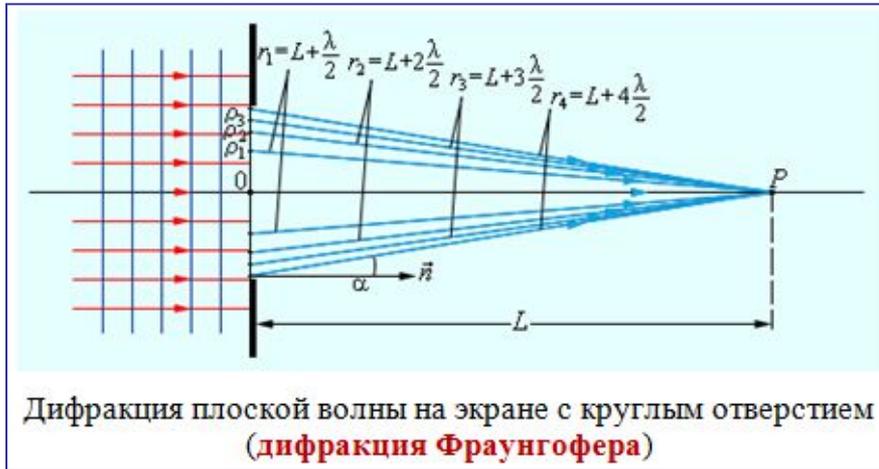
Как видим, все выражения, стоящие в скобках, равны нулю

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots = \frac{A}{2}$$

- Вывод:** формула показывает, что результирующее действие в точке P полностью открытого фронта световых волн, возбуждаемых источником S , равно половине действия одной только центральной зоны Френеля, радиус которой сравнительно мал. Например, при $R = L = 10 \text{ см}$ и $\lambda = 500 \text{ нм}$, $r_1 = 0,16 \text{ мм}$.
- Следовательно, с достаточно большой точностью можно считать, что в свободном пространстве свет от источника S в точку P распространяется прямолинейно, в пределах малого пространства, т.е. в виде луча. Это вывод дифракционной теории прямолинейного распространения света.

3. Дифракция в сходящихся лучах (дифракция Френеля) и дифракция в параллельных лучах (дифракция Фраунгофера)

- Различают два вида дифракции: Френеля и Фраунгофера.
- Если источник света **S** и точка наблюдения **P** расположены от препятствия достаточно далеко: так, что лучи, падающие на препятствие, и лучи, идущие в точку **P**, можно считать параллельными, говорят о **дифракции Фраунгофера**.
- В противном случае имеем **дифракцию Френеля**.



- **Определение: Дифракция Френеля** – дифракция, в которой нельзя пренебрегать кривизной волновых поверхностей (**дифракция сферических волн**).
- **Определение: Дифракция Фраунгофера** – дифракцию, наблюдающуюся на бесконечно удаленном расстоянии от препятствия, на которое падает свет бесконечно удаленного источника (**дифракция плоских волн**).

□ **Вывод:** формула таким образом мы разбирали понятие зон Френеля на основе дифракции Френеля.

$$r_i = \sqrt{\frac{i\lambda Rb}{R+b}}$$

Радиус ***i*-й зоны** Френеля

Радиус ***m*-й зоны** Френеля

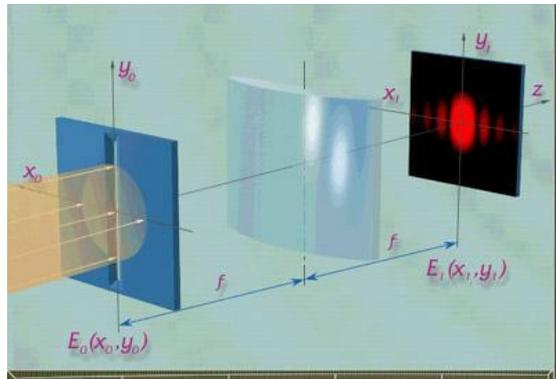
$$r_m = \sqrt{m\lambda \frac{ab}{a+b}}$$

Если падающая волна является плоской, т.е. когда $R=a \rightarrow \infty$:

$$r_m = \sqrt{m\lambda b}$$

8
+9

Дифракция Фраунгофера от одной щели

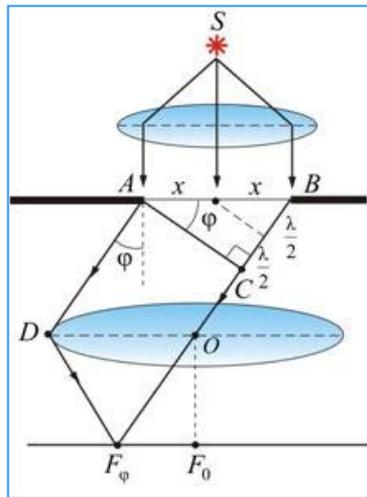


- Рассмотрим дифракцию Фраунгофера от бесконечно длинной щели (длина щели много больше ее ширины).
- Пусть плоская монохроматическая световая волна падает нормально на плоскость узкой щели шириной $a = |AB|$.
- Оптическая разность хода между лучами, идущими от краев щели под углом φ :

$$\Delta = |BC| = a \sin \varphi$$

где точка C – основание перпендикуляра, опущенного из точки A

- Разобьем открытую в плоскости часть волновой поверхности на зоны Френеля, имеющие вид полос параллельных ребру щели.
- Причем разобьем щель на зоны Френеля так, чтобы оптическая разность хода между лучами, идущими от соседних зон, была равна $\lambda/2$.
- Если на ширине щели укладывается четное число таких зон, то в точке F_φ (**побочный фокус** линзы) будет наблюдаться минимум интенсивности, а если нечетное число зон, то максимум интенсивности:

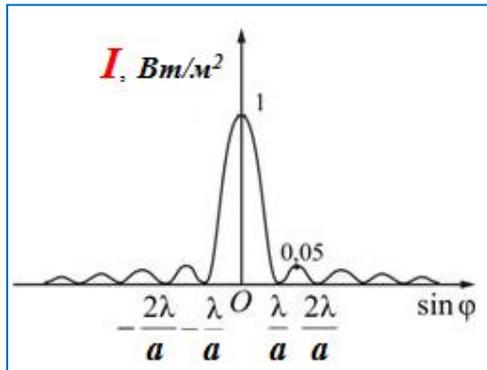


Условие минимума

$$a \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \quad (*)$$

Условие максимума

$$a \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$



- Картина будет симметричной относительно **главного фокуса** точки F_0 . Знак плюс и минус соответствует углам, отсчитанным в ту или иную сторону.
 - Как видно из рисунка, центральный максимум по интенсивности превосходит все остальные.
 - **Рассмотрим влияние ширины щели.** Т.к. условие минимума имеет вид (*), то:

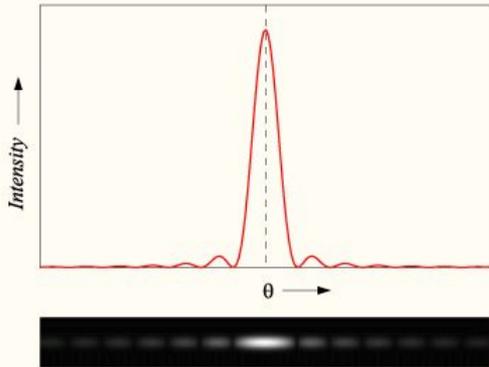
$$\sin \varphi = \frac{\pm m \lambda}{a}$$

Дифракция Фраунгофера от набора щелей (дифракционной решетки)

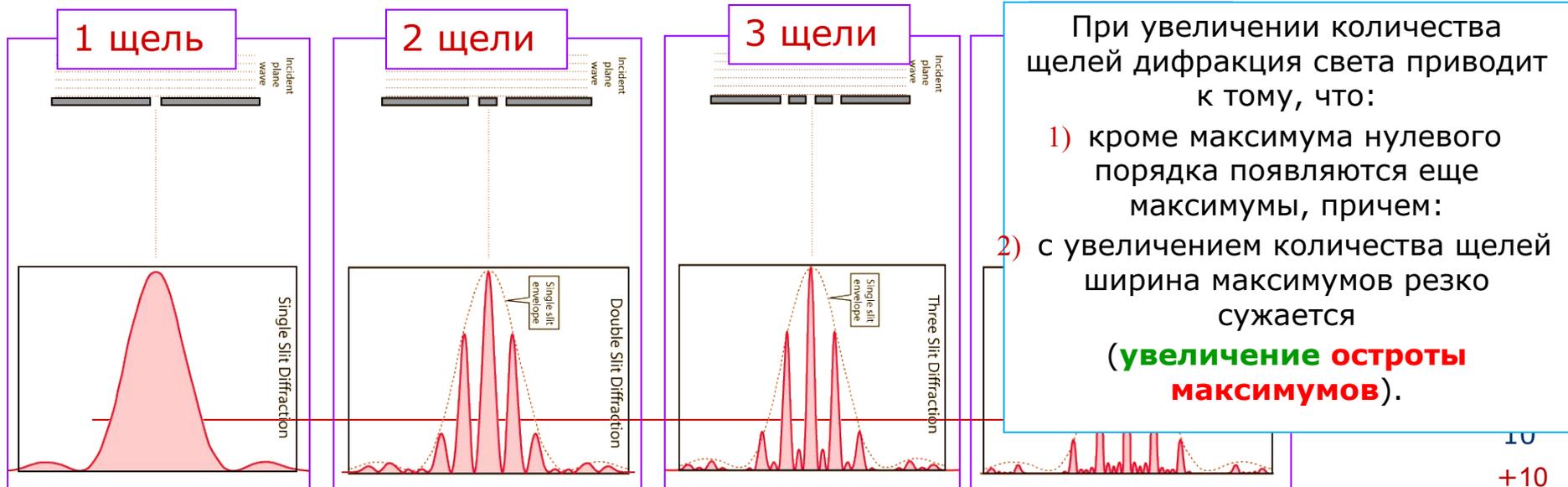
$$\sin \varphi = \frac{\pm m \lambda}{a}$$

- Из этой формулы видно, что с увеличением ширины щели a положения минимумов сдвигаются к центру, центральный максимум становится резче.
- При уменьшении ширины щели a вся картина расширяется, расплывается, центральная полоска тоже расширяется, захватывая всё большую часть экрана, а интенсивность ее уменьшается.

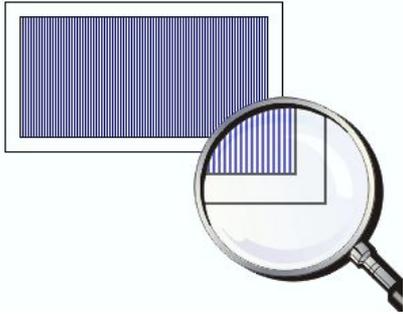
Single-slit diffraction pattern



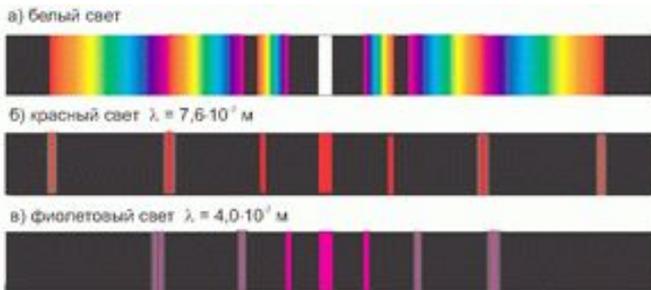
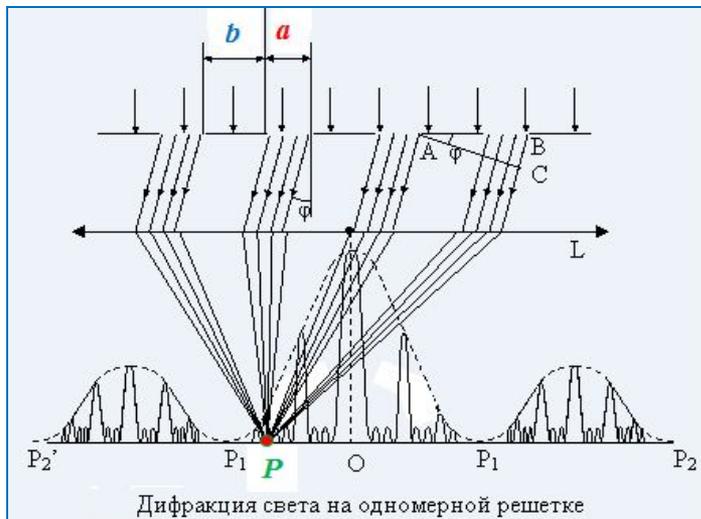
- В середине **симметричной дифракционной картины** при $\varphi=0$, состоящей из чередующихся светлых и темных полос, при дифракции Фраунгофера **всегда образуется максимум**, который называют **центральным дифракционным максимумом**.
- Основная часть световой энергии, проходящей через щель, сосредоточена в центральном максимуме.
- Интенсивности максимумов первого и второго порядка составляют приблизительно **5%** и **2%** от интенсивности центрального максимума, соответственно.
- **Распределение интенсивности на экране**, получаемое вследствие дифракции, приведено на графике слева.



5. Дифракционная решетка

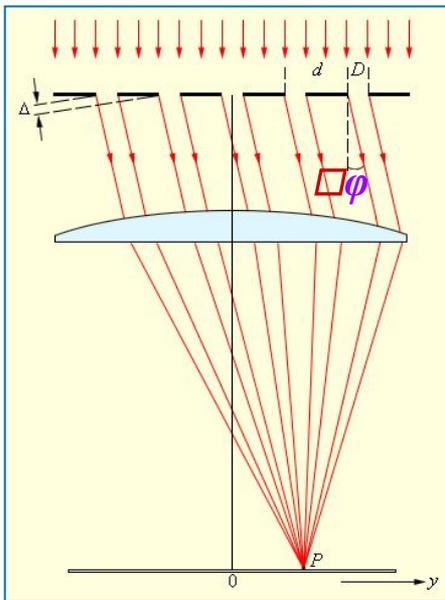


- **Дифракционная решетка** представляет собой стеклянную или металлическую пластинку, на которую нанесено очень много (иногда до сотен тысяч) прямых равноотстоящих штрихов одинаковой конфигурации.
- Она является важнейшим **спектральным прибором**, предназначенным для разложения света в спектр и измерения длин волн.
- Дифракционная решетка представляет собой **систему параллельных щелей** равной ширины a , лежащих в одной плоскости и разделенных равными b по ширине **непрозрачными промежутками**.



- Величина $d = a + b$ называется **постоянной (периодом) дифракционной решетки**, где a — ширина щели; b — ширина непрозрачной части
- У хороших решеток параллельные друг другу штрихи имеют длину порядка **10 см**, а **на каждый миллиметр приходится до 2000 штрихов (1/2000)**.
- При этом общая длина решетки достигает **10–15 см**.
- Изготовление таких решеток требует применения самых высоких технологий.
- На практике применяются также и более грубые решетки с **50 – 100 штрихами на миллиметр**, нанесенными на поверхность прозрачной пленки.
- В качестве дифракционной решетки может быть использован кусочек компакт-диска или даже осколок граммофонной пластинки.
- Дифракционная картина на решетке определяется **как результат интерференции волн**, идущих от всех щелей, т. е. в решетке реализуется **многолучевая интерференция волн**, исходящих из щелей решетки при ее освещении.
- Практически дифракционную картину наблюдают в фокальной плоскости объектива.

Дифракционная решетка: минимумы



- **Интерференционные минимумы.** В тех направлениях, в которых ни одна из щелей не распространяет свет, он не будет распространяться и в дифракционной решетке.
- Поэтому минимумы интенсивности будут наблюдаться в направлениях определяемых **условием минимумов для одной щели**:

$$a \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} = \pm m \lambda$$

где a — ширина щели

$$m = 1, 2, 3 \dots \leftrightarrow m \in \mathbb{N} \quad \square \text{натуральные числа}$$

- Кроме того, вследствие взаимной интерференции световых лучей, исходящих от щелей, в некоторых направлениях они будут гасить друг друга, т. е. **возникнут дополнительные минимумы**.

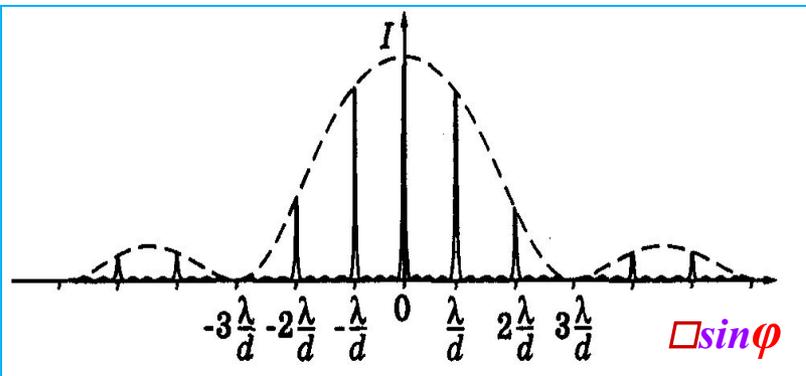
- **Условие дополнительных минимумов** имеет вид:

$$d \sin \varphi = \pm \frac{m'}{N} \lambda$$

□ (**)

□ где d — период дифракционной решетки

- где m' может принимать все целочисленные значения **кроме 0, N, 2N, ...** (т.е. можно числа **1, 2, ..., N-1, N+1, ..., 2N-1, 2N+1, ...**), т. е. кроме тех, при которых условие (***) переходит в условие (*).

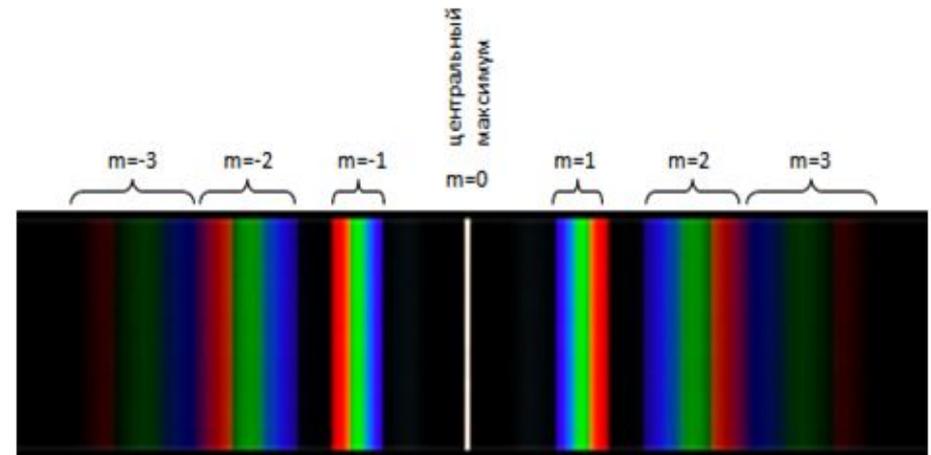
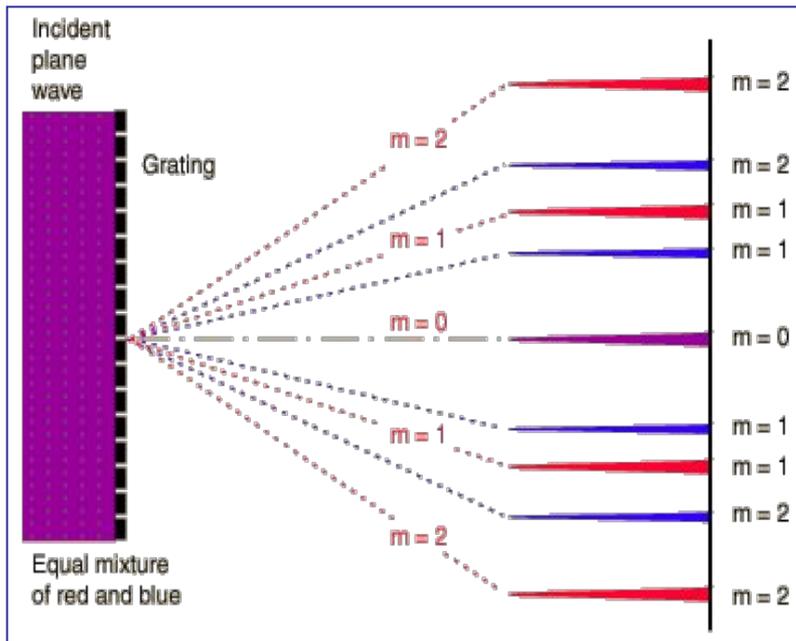


- **Вывод:** в случае N щелей **между двумя главными максимумами** располагается $N - 1$ **дополнительных минимумов**.
- А между последними, в свою очередь, — **дополнительные максимумы**, **интенсивность** которых при достаточно большом числе щелей **пренебрежимо мала** (она составляет **не более 5%** от интенсивности главных максимумов).
- На рисунке слева представлена зависимость интенсивности дифракционной картины от угла дифракции φ .

Разложение белого света в спектр на дифракционная решетке

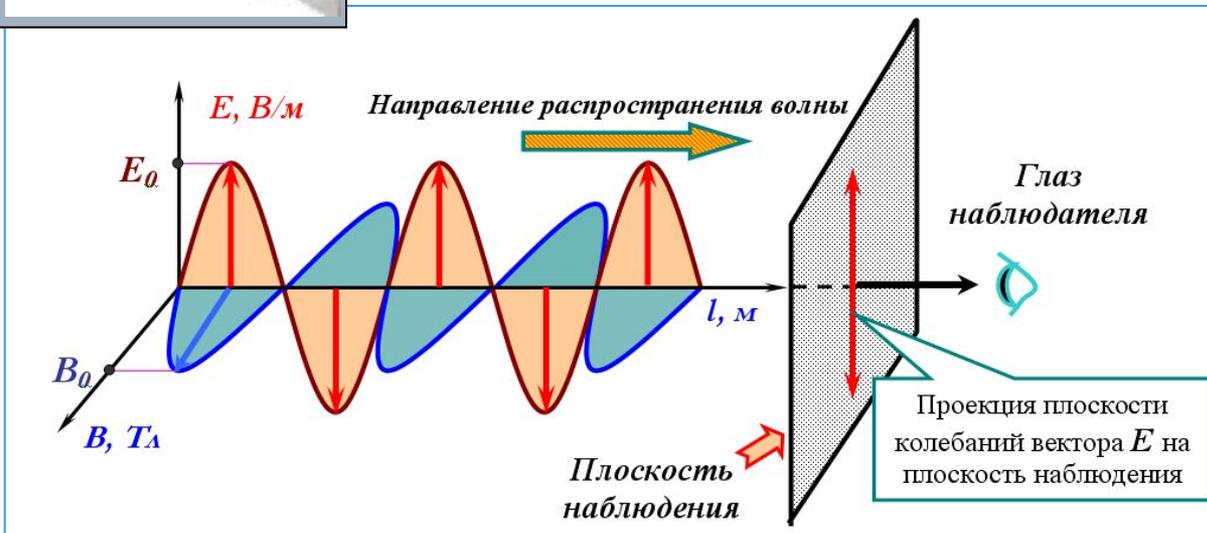
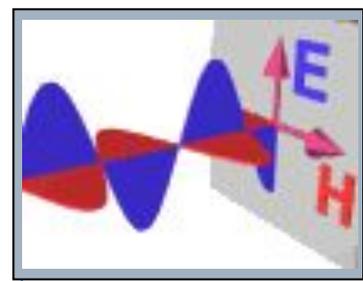
$$d \sin \varphi = \pm m \lambda$$

- Из формулы видно, что положения главных максимумов зависят от длины световой волны λ .
- Поэтому **при пропускании через решетку белого света** все максимумы, кроме центрального ($m=0$), **разложатся в спектр**.
- **Наибольшее отклонение** в каждом порядке испытывает **красная часть** спектра (**более длинноволновая**).



Вывод: возможность разлагать падающий свет в спектр позволяет использовать дифракционную решетку как **главную часть спектральных приборов**

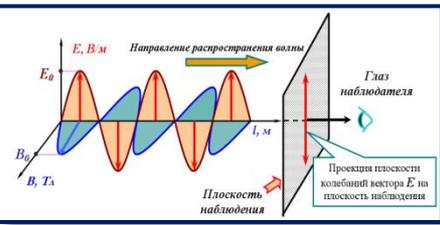
1. Световой вектор волны



- Любая электромагнитная волна является **поперечной**.
- Магнитный вектор B и электрический вектор E волны **описывают одинаковые по форме синусоиды** в плоскостях, перпендикулярных друг другу.

- **Световой вектор волны** – электрический вектор E волны, т.к. **воздействие** электромагнитной волны на **глаз и фотоприемники** **оказывает только он**.
- **Плоскость поляризации** - это плоскость, в которой колеблется световой вектор E .
- **Плоскость наблюдения** - это плоскость, **перпендикулярная**:
 - 1) направлению распространения волны (вектору l) и
 - 2) плоскости поляризации, причём свет должен распространяться **к наблюдателю**.
- Проекция вектора E на плоскость наблюдения в этом случае будет иметь **вид отрезка** прямой линии (смотри рисунок).

На рисунке изображено **испускание электромагнитной волны** **одним элементарным источником света** (атомом или молекулой светящегося вещества).



Поляризация электромагнитных волн

- **Поляризация** – это явление, при котором электрический вектор **E** всех электромагнитных волн колеблется **в одной плоскости**, перпендикулярной **плоскости наблюдения**.
- Такой свет называется **полностью поляризованным** или **плоскополяризованным**.

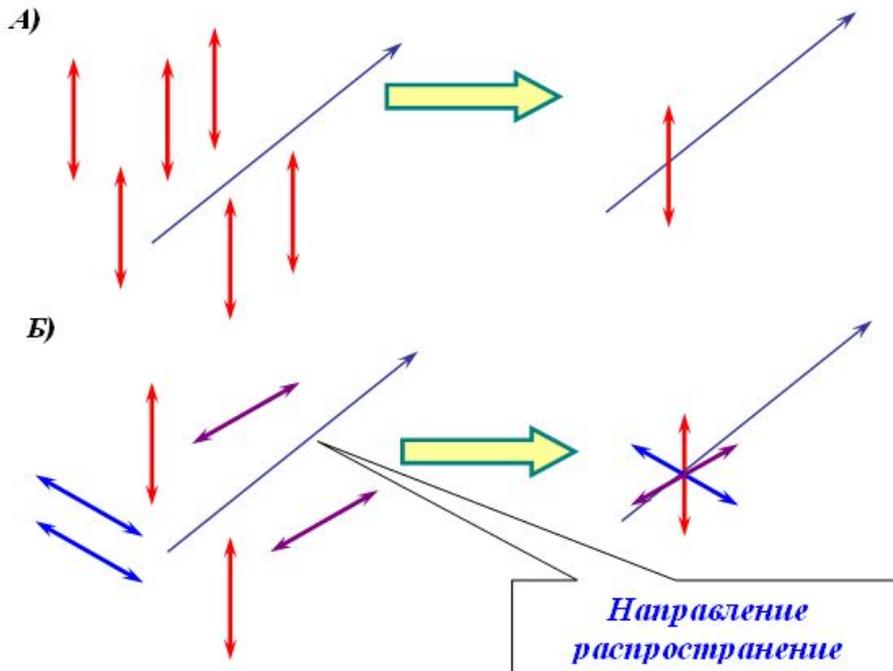


Рис.4. Полностью поляризованный свет (А) и неполяризованный (естественный) свет (Б). Двухнаправленными стрелками изображена ориентация плоскости поляризации волн отдельных элементарных источников.

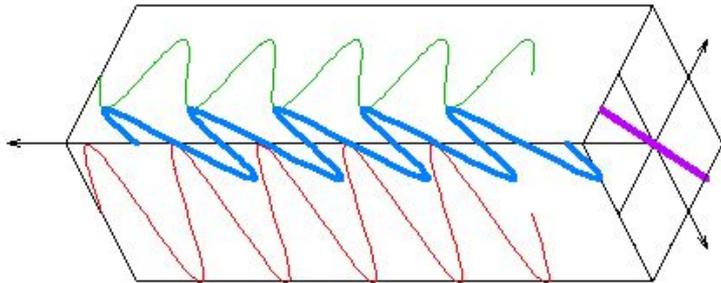
Любой источник света - сумма огромного числа быстро высвечивающихся (время жизни τ ("тау") порядка $10^{-10}-10^{-9}$ с) элементарных источников.

Плоско поляризованный (полностью поляризованный) свет – свет, у которого все элементарные источники имеют **одинаковую ориентацию плоскости поляризации** в каждый момент времени (рис.4, А).

Виды плоско поляризованной волны

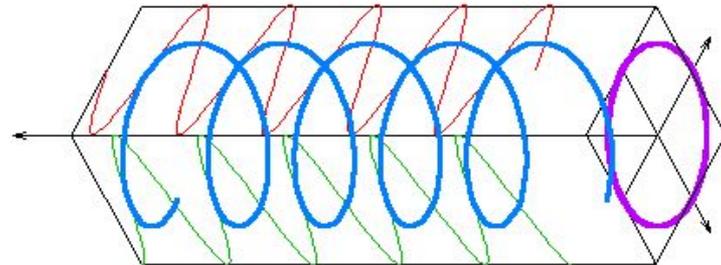
Плоско поляризованный (полностью поляризованный) свет – свет, у которого все элементарные источники имеют одинаковую ориентацию плоскости поляризации в каждый момент времени.

1. Линейно-поляризованный свет



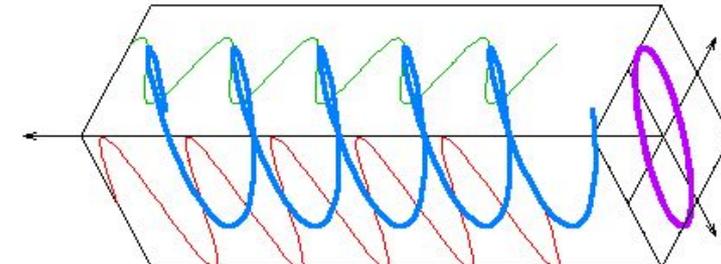
Плоскость поляризации **не поворачивается** - видна наблюдателю в плоскости наблюдения как отрезок прямой линии, **изменяющий длину**, но **не макс. длину** и **не направление**

2. Циклически-поляризованный свет



Плоскость поляризации **поворачивается** - видна наблюдателю в плоскости наблюдения как отрезок прямой линии, **изменяющий направление**, но **не макс. длину**

3. Эллиптически-поляризованный свет



Плоскость поляризации **поворачивается** - видна наблюдателю в плоскости наблюдения как отрезок прямой линии, **изменяющий макс. длину** и **направление**

Это виды полностью поляризованного света!

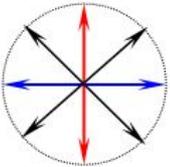
2. Неполяризованная и частично поляризованная волна

Обычные источники света содержат огромное число элементарных источников с разной ориентацией светового вектора E .

$$I = kE^2$$

Естественный или полностью неполяризованный свет – свет, в плоскости наблюдения которого все направления световых векторов E равноправны.

- **Примеры:** солнце, лампы освещения и т.д.

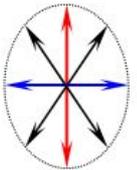


$$I_{max} = I_{min}$$

Здесь I_{max} и I_{min} - интенсивности линейно поляризованных волн вдоль большой и малой осей эллипса.

Частично поляризованный свет – свет, в котором больше волн с какой-то одной плоскостью поляризации, но другие плоскости тоже есть.

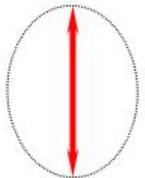
- **Пример - отражённый свет:** отражение в зеркале, воде, зеркальной поверхности, отражённый свет луны и т.д.



$$I_{max} > I_{min}$$

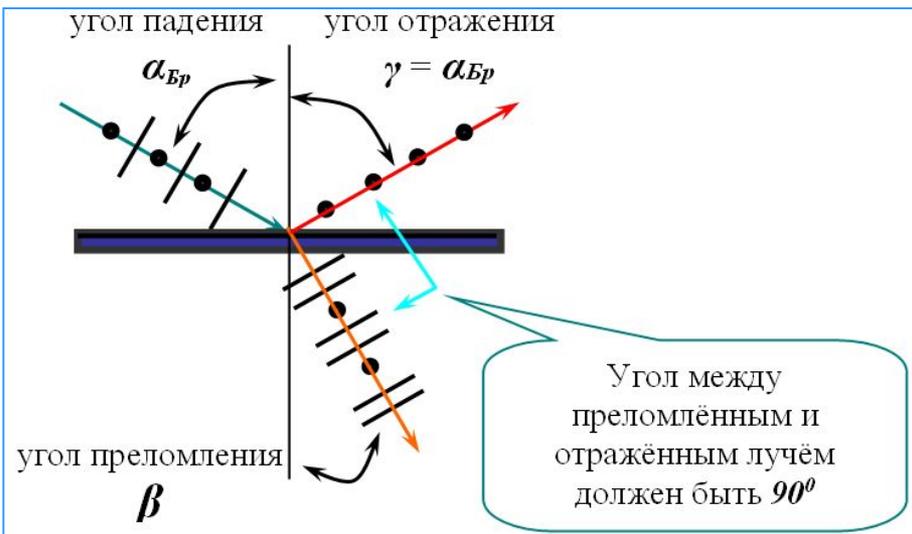
Плоскополяризованный свет в природе встречается чрезвычайно редко, и получить его можно только с помощью специальных приборов (поляризаторов).

Поэтому иногда говорят: **Поляризация** - получение плоскополяризованного света из естественно поляризованного.

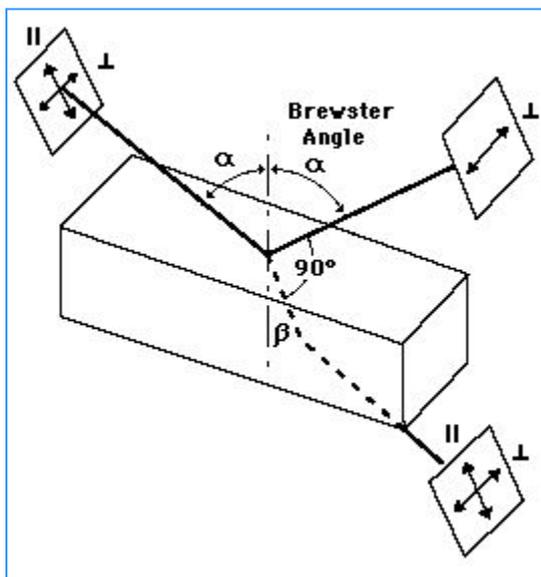


$$I_{min} = 0.$$

Поляризация при отражении от диэлектрика



- При падении света на границу раздела двух диэлектриков возникают **отражённая и преломлённая волны**, подчиняющиеся законам отражения и преломления (смотри рисунок).
- Поляризация этих волн в общем случае будет различной.
- Если падающий свет **естественный** (неполяризованный), то отражённая и преломлённая волны будут поляризованы частично.
- Степень их поляризации p будет зависеть от угла падения α ("альфа"): по мере увеличения α степень поляризации отраженного света **растёт**.



Когда угол падения стал равен α_{Br} - углу Брюстера = углу полной поляризации, то **отраженная волна** будет **полностью поляризована**.

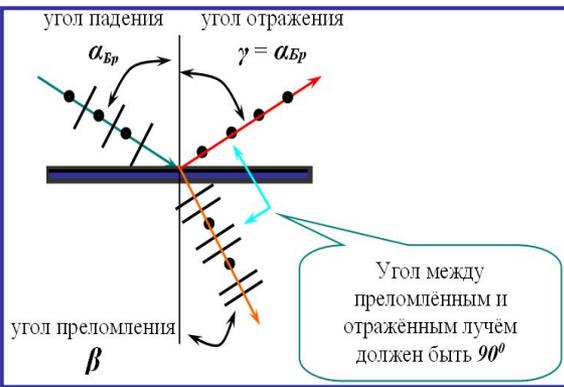
Коэффициент отражения света R – это отношение интенсивности отраженного света $I_{отр}$ к интенсивности падающего света $I_{пад}$ ($R = I_{отр} / I_{пад}$).

Угол Брюстера

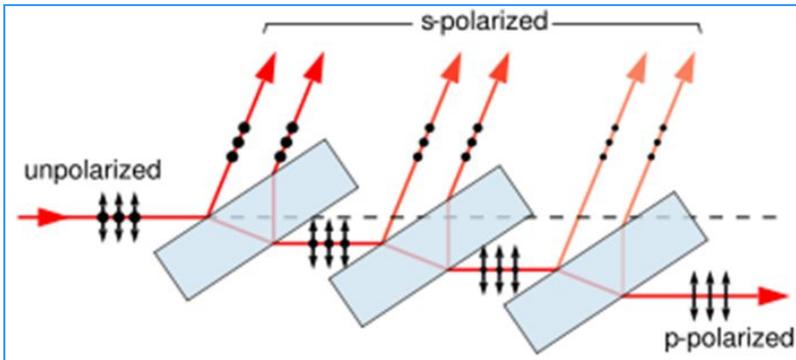
Угол Брюстера находится из соотношения:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = \frac{n_2}{n_1}$$

n_2 – показатель преломления среды, в которую свет **входит**,
 n_1 – среды, из которой свет **падает** на границу раздела.



- **Плоскость падения световой волны** - это плоскость, в которой лежат падающий, преломлённый и отражённый лучи, а также перпендикуляр в точке падения.
 - На рисунке плоскость падения = плоскость экрана.
- **Полностью линейно поляризованная** отражённая от границы двух диэлектриков световая волна имеет **два замечательных свойства**:
 - 1) её электрический вектор **E** перпендикулярен плоскости падения (на рисунке вектор перпендикулярен плоскости рисунка);
 - 2) **отражённый и преломлённый лучи перпендикулярны друг другу.**
- **Преломлённая волна** будет поляризована **только частично**.



Стопка диэлектриков
(стеклянных пластинок)

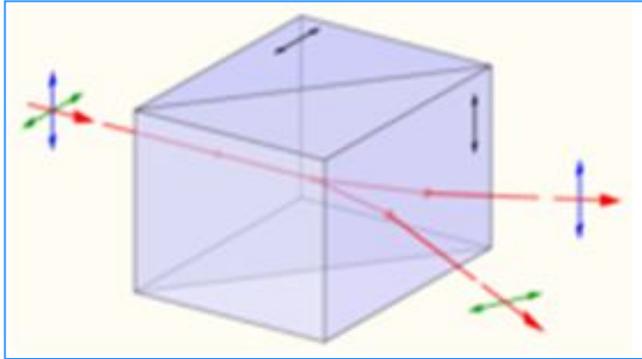
Чтобы **максимально поляризовать** падающую на диэлектрик электромагнитную волну

Нужна стопка плоскопараллельных пластинок

За счёт многократного отражения волны одной поляризации - **максимально возможный выход** линейно поляризованного света (**до 50%**):

Коэффициент отражения света R до 50%

Поляризация при двойном лучепреломлении в кристаллах



Двойное лучепреломление – это **разделение** луча **естественного света** при преломлении на **границе** воздух – кристалл (анизотропная среда) на **два луча**:

1. **обыкновенный** (*ordinary* - обозначается «**o**») и
2. **необыкновенный** (*extraordinary* обозначается «**e**»).

□ Этим двум лучам соответствуют **обыкновенная** и **необыкновенная** световые волны, которые поляризованы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, и распространяются в кристалле с различными скоростями: v_o и v_e .

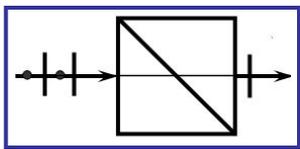
□ Скорость обыкновенной волны v_o **одинакова по всем направлениям** и равна:

$$n_o = \frac{c}{v_o}$$

□ Скорость необыкновенной волны v_e **различна по всем направлениям** и равна:

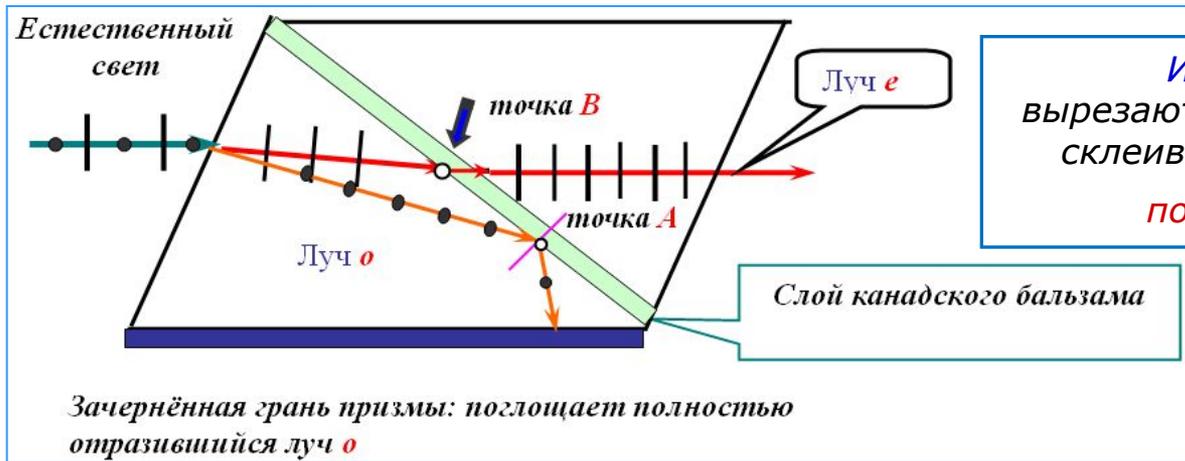
$$n_e = \frac{c}{v_e}$$

□ Из-за различия v_o и v_e показатели преломления n_o и n_e **различаются по величине**.



Призма Николя

Наиболее распространённым поляризатором, основанным на явлении двулучепреломления, является **призма Н_{иколя}** (в просторечье - **Н_{иколь}**)



Из кристалла исландского шпата вырезаются две призмы, диагонали которых склеивают **слоем канадского бальзама c** показателем преломления n_B :

$$n_o > n_B > n_e$$

Важно!

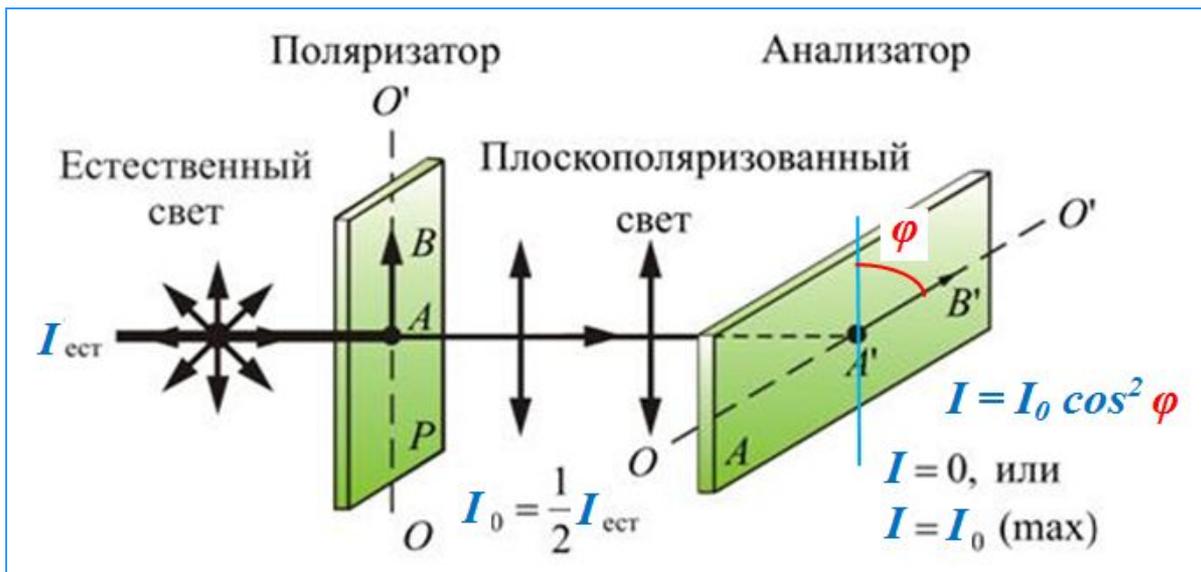
- Углы в призме подобраны так, чтобы **обыкновенный луч** на поверхности канадского бальзама (**точка A**) испытал **полное внутреннее отражение**, т.е. полностью отразился от границы "**1-я призма-канадский бальзам**".
 - Этот **отражённый луч** затем **полностью поглощается зачернённой** нижней гранью.
- **Необыкновенный луч** преломляется в **точке B**, проходит в канадский бальзам, затем снова преломляется на границе "**канадский бальзам-2-я призма**" и выходит из кристалла, практически сохраняя свое прежнее направление: **на выходе получилась линейнополяризованная световая волна**.

Вывод: **призма Н_{иколя}** – это поляризатор, создающий линейно поляризованную волну **при двулучепреломлении в кристалле**.

1. Анализ поляризованного света. Поляриметр

Человек **не различает поляризованного света**, поэтому для изучения поляризованного света используют **два расположенных друг за другом поляризатора**.

Эта система называется **поляриметром**.



Первый поляризатор (П) создаёт из естественного света интенсивностью $I_{\text{пад}}$ **линейно поляризованный свет** и при этом **уменьшает** эту **интенсивность в два раза**:

$$I_0 = I_{\text{пад}} / 2 = I_{\text{ест}} / 2.$$

Второй поляризатор (А) используется

для исследования поляризованного света, поэтому и называется **анализатором**.

Интенсивность I линейно поляризованного света после прохождения **через анализатор** находится **по закону Малюса**:

$I = I_0 \cos^2 \varphi$, где I_0 – интенсивность **поляризованного света, падающего на анализатор**.

φ - ("фи") - угол между **плоскостями поляризации** поляризатора **П** и анализатора **А**.

Уравнение Малюса

Примеры

- Интенсивность I линейно поляризованного света после прохождения **через анализатор** находится по закону Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi$$

где I_0 – интенсивность **поляризованного света**, падающего на анализатор.

- Закон Малюса в таком виде выполняется **только для линейно- поляризованного света**, что и подчёркивается в определении этого закона.
- Однако в задачах **чаще всего** говорится о **естественном (неполяризованном)** свете, пропускаемом через **поляриметр**.

Учитывая, что $I_0 = I_{\text{над}}/2$, формула запишется через интенсивность $I_{\text{над}}$ падающего на **поляриметр** **естественного света** так:

$$I = \frac{I_{\text{над}}}{2} \cos^2 \varphi$$

Закон Малюса в действии

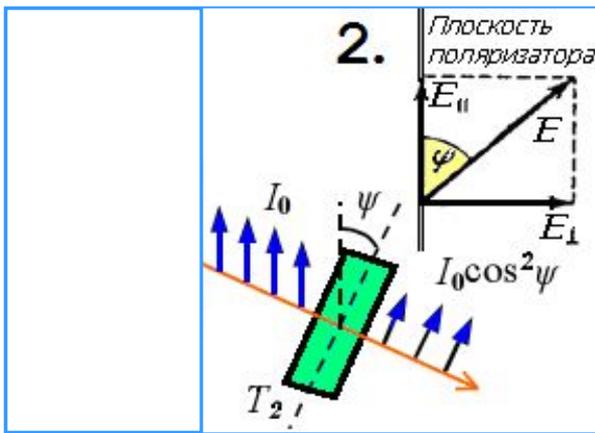


Схема для поляризатора

Схема для поляриметра



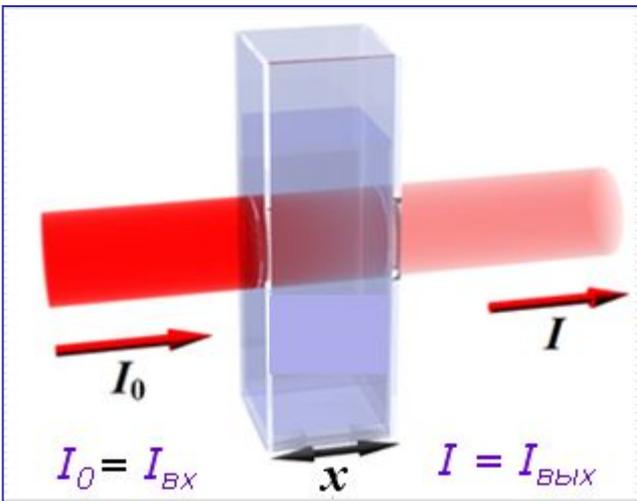
- **1 вариант (закон Малюса для поляризатора):** на поляризатор (тут поляририд) падает **поляризованный свет**.
- **При повороте поляризатора** вокруг своей оси от **0°** до **90°** наблюдается уменьшение интенсивности от максимальной до нуля.
- Если поворачивать далее, то увидим, наоборот, увеличение интенсивности от нуля до максимальной.



- **2 вариант (закон Малюса для поляриметра):** имеем два поляризатора. На 1-й поляризатор (**П**) падает **неполяризованный свет**.
- Мы видим, что **при повороте 2-го поляризатора** (анализатора **А**) вокруг своей оси относительно 1-го поляризатора (**П**) можно добиться ситуации, когда на выходе получаем интенсивность, равную нулю.
- Такое положение поляризаторов называется – «**поляризаторы скрещены**», т.к. плоскости поляризации для них **перпендикулярны (90°)** друг другу.

1. Поглощение света веществом

Проходя через вещество, свет может: 1) поглощаться (энергия световой волны уменьшается) и 2) рассеиваться (световая волна изменяет направление) в веществе.



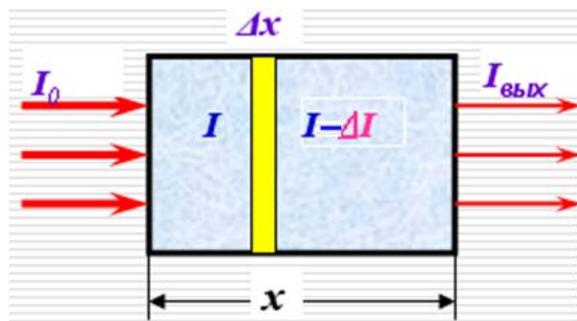
Поглощение света - это **уменьшение** интенсивности света при прохождении через вещество ($I_{\text{вых}} < I_{\text{вх}}$)

Эксперименты показывают:

1. Интенсивность света I , при прохождении через слой Δx , изменяется на величину ΔI и станет $I - \Delta I$.
2. **Изменение интенсивности ΔI прямо пропорционально** толщине Δx этого слоя и интенсивности I **падающего** на этот слой света:

$$\Delta I = -k I \Delta x ,$$

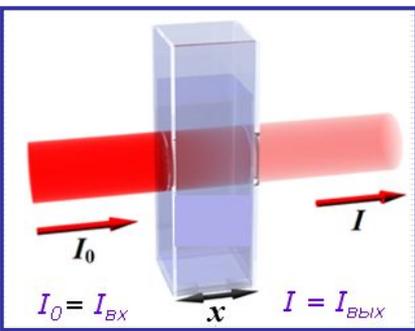
k - коэффициент пропорциональности, а знак « - » указывает на **уменьшение интенсивности** излучения после прохождения через слой.



$$\frac{dI}{I} = -k dx \quad \rightarrow \quad \int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -k \int_0^x dx \quad \Rightarrow \quad \ln I \Big|_{I_0}^I = -k x \Big|_0^x$$

Разделили переменные Определенные интегралы Решили дифференциальное уравнение

Закон поглощения света – закон Бугера



$$\ln I \Big|_{I_0}^I = -k x \Big|_0^x \Rightarrow \ln I - \ln I_0 = \ln \frac{I}{I_0} = -kx \Rightarrow \frac{I}{I_0} = e^{-kx}$$

- **закон Бугера** для:

- 1) прозрачных,
- 2) нерассеивающих и
- 3) нефлюоресцирующих сред любой концентрации

$$I = I_0 e^{-kx}$$

Интенсивность I света, прошедшего через среду:

- 1) прямо пропорциональна интенсивности падающего света I_0 ,
- 2) уменьшается по экспоненте с увеличением толщины среды x

k - **показатель поглощения**, в обратные метрах (м^{-1})

Зависит: 1) от природы вещества и 2) длины волны падающего излучения, но от интенсивности не зависит

Зависимость $k=f(\lambda)$ **индивидуальна** для каждого вещества и определяет его спектр поглощения

Физический смысл **показателя поглощения k** - это величина, обратная толщине вещества x , при которой интенсивность I прошедшего света **уменьшается в e раз**. $e \approx 2,7$

Законы поглощения для слабых растворов

Для химических и медицинских исследований **важно** изучение поглощения света в **слабых** растворах.

$$k = \alpha C$$

□ **Закон Бера** - для слабых растворов показатель поглощения k прямо пропорционален концентрации раствора C :

где α - удельный показатель поглощения в мМ/м или \%/м .

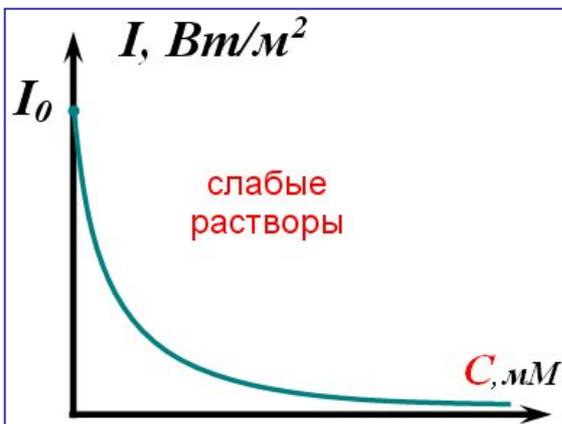
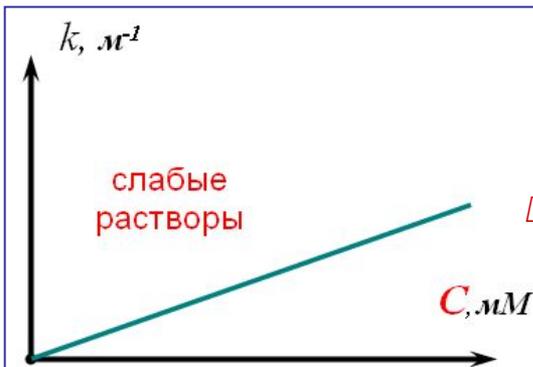
□ Тогда **закон поглощения света** примет вид:

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

– **закон Бугера-Ламберта-Бера**

Интенсивность I света, прошедшего через среду:

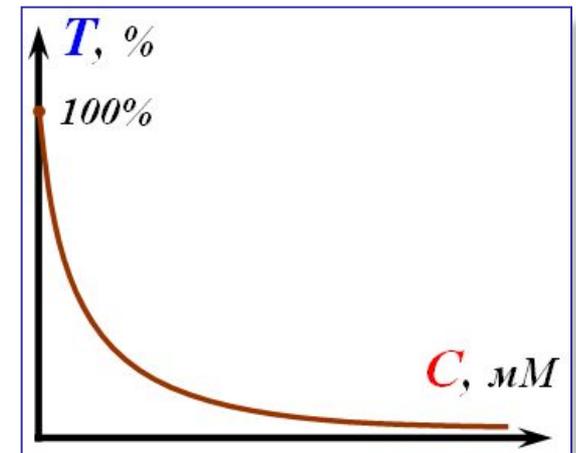
- 1) **прямо пропорциональна** интенсивности падающего света I_0 ,
- 2) **уменьшается по экспоненте** с увеличением толщины среды x
- 3) **уменьшается по экспоненте** с увеличением концентрации C



Характеристики поглощения света веществом

- **Коэффициент пропускания T** - **отношение интенсивности** света I , прошедшего сквозь данное вещество или раствор, **к интенсивности** света I_0 , упавшего на это вещество:

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 e^{-\alpha Cx}}{I_0} = e^{-\alpha Cx}$$

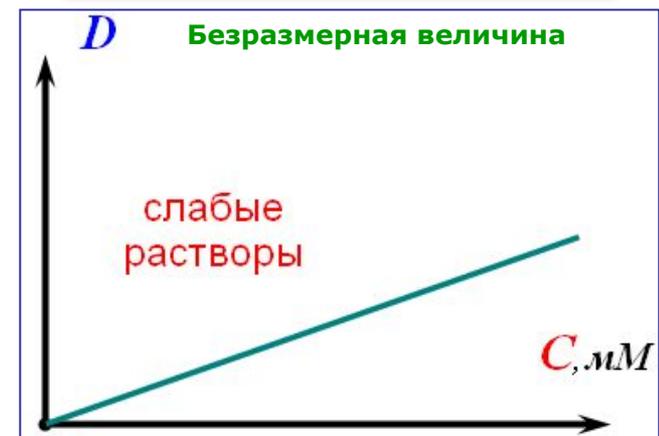


- **Оптическая плотность D** - десятичный логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания:

$$D = \lg \frac{I}{I_0} = \lg \frac{I_0}{I} = \lg \frac{I_0}{I_0 \cdot e^{-\alpha Cx}} = \lg e^{\alpha Cx} = \alpha' \cdot C \cdot x$$

Приведённый удельный $\alpha' = \alpha \lg e = 0,43\alpha$
показатель поглощения

Оптическая плотность раствора **прямо пропорциональна** его концентрации.



Спасибо за внимание!

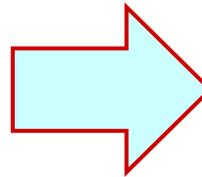


Поляроид – поляризационный фильтр

Фотографии лягушки:



Без поляризационного фильтра



С поляризационным фильтром

Убрали **блики** – паразитное отражение от границы «воздух-вода»