



Кафедра медицинской и биологической физики

Тема: Волновая оптика

*Лекция №8 для студентов 1 курса специальности
стоматология*

Д.ф.-м.н., зав.каф., Салмин Владимир Валерьевич

План лекции

1. Интерференция света
2. Дифракция света
3. Поляризация света

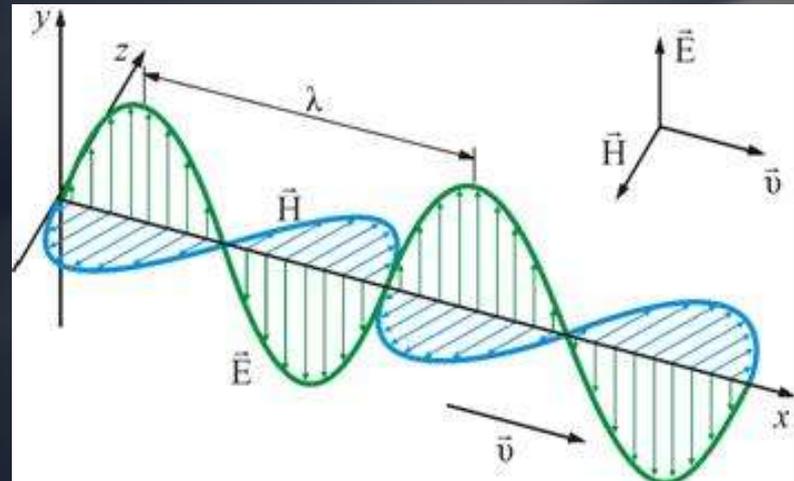
Плоская электромагнитная волна

В **интерференции и дифракции** проявляются волновые свойства света. Раздел оптики изучающий эти явления называется «**Волновая оптика**». В описании этих явлений основным понятием является «**световая волна**».

$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \\ \vec{H} = \vec{H}_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \end{cases}$$

Плоская монохроматическая линейно поляризованная волна электромагнитная волна, распространяющаяся в направлении волнового вектора \vec{k} с частотой ω

$$\begin{cases} \vec{k} \times \vec{H} = -\frac{\omega}{c} \varepsilon \vec{E} \\ \vec{k} \times \vec{E} = \frac{\omega}{c} \mu \vec{H} \end{cases}$$



$$\vec{k}^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\omega) \mu$$

Дисперсионное соотношение

Интерференция света

Интерференционное поле от двух точечных источников – сложение колебаний

$$a = E_1 \cos(\omega t + \alpha_1);$$

$$b = E_2 \cos(\omega t + \alpha_2);$$

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

$$I \sim E^2$$

$$I = I_1 + I_2; I_{\max} = 2I$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

$$I_{\max} = 4I$$

Две монохроматические волны с одинаковой частотой

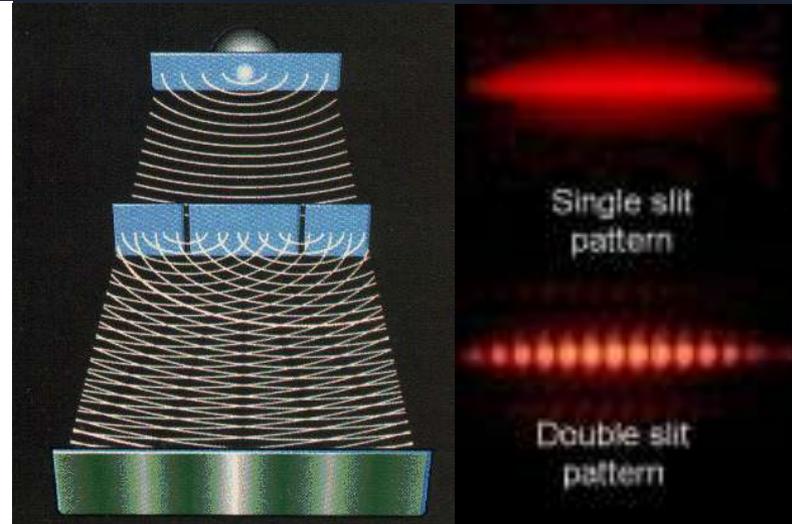
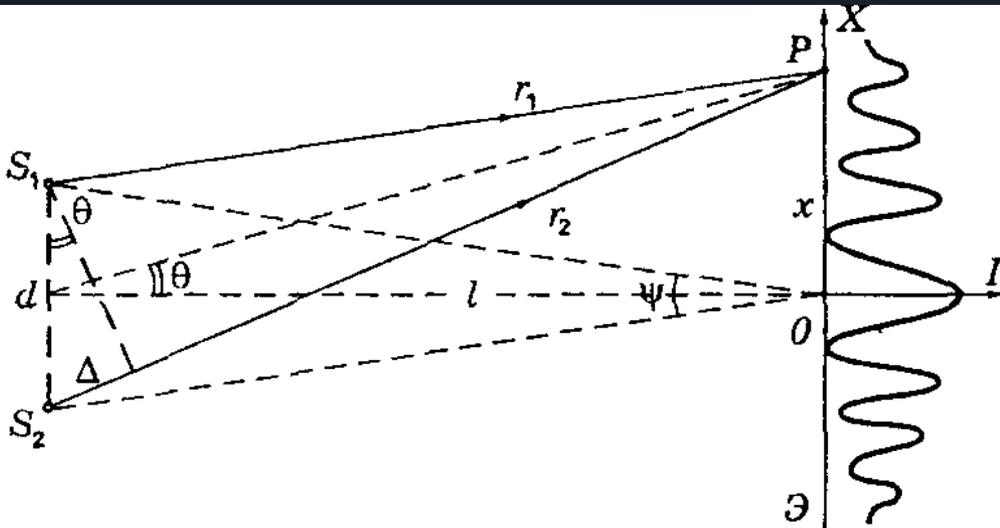
Сложение волн

Интенсивность света и амплитуда волны

Сложение некогерентных волн (среднее от разности фаз равно нулю)

Сложение когерентных волн (разность фаз постоянна). Интерференционный член

Опыт Юнга



$$\Delta = r_2 - r_1$$

$$\Delta = n(r_2 - r_1)$$

$$\Delta = m\lambda, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

примем $\theta \ll 1$

$$x_m = \frac{m\lambda l}{d}$$

$$\Delta x = \frac{\lambda l}{d}$$

Оптическая разность хода в вакууме

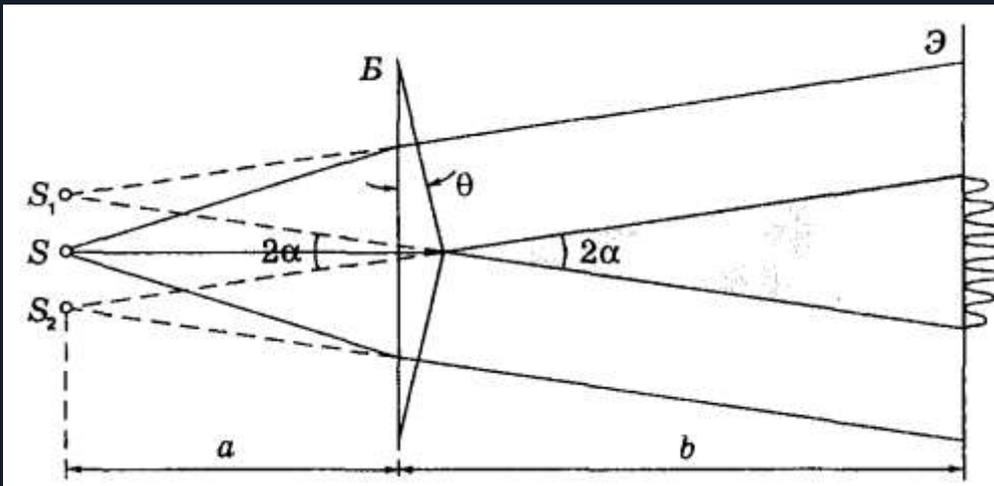
Оптическая разность хода в среде с показателем преломления n

Условие интерференционного максимума. m -порядок интерференционного максимума или порядок интерференции.

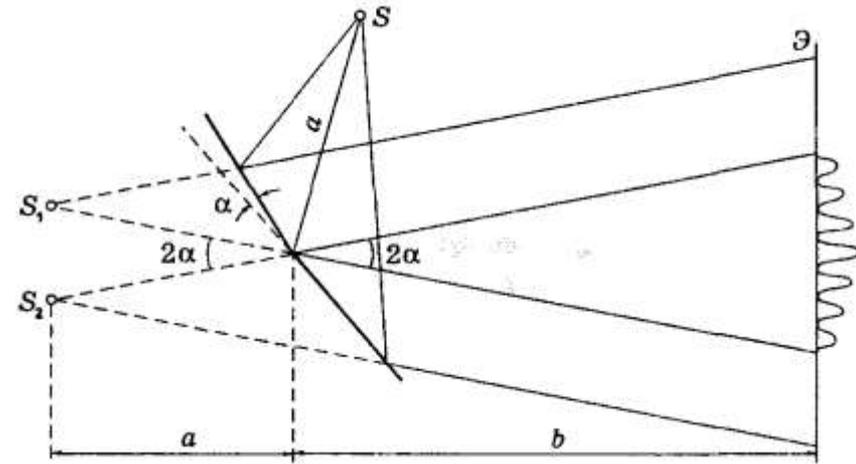
Положение максимумов на экране

Ширина интерференционной полосы

Опыт Юнга – интерференционные схемы



Бипризма Френеля



Бизеркало Френеля

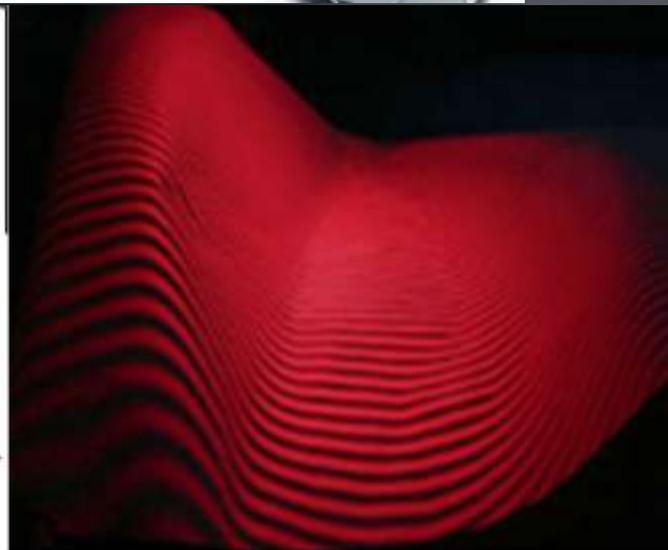
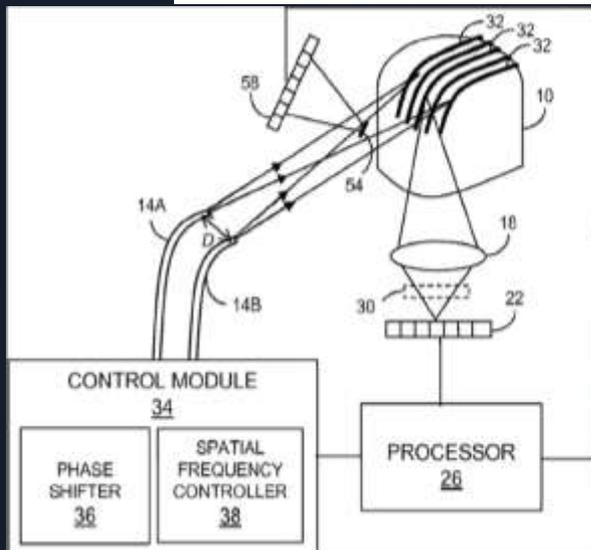
$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\alpha} \left(1 + \frac{b}{a} \right)$$

Ширина интерференционной полосы

$$N_{\text{макс}} = \frac{4\alpha^2}{\lambda} \frac{ab}{a+b}$$

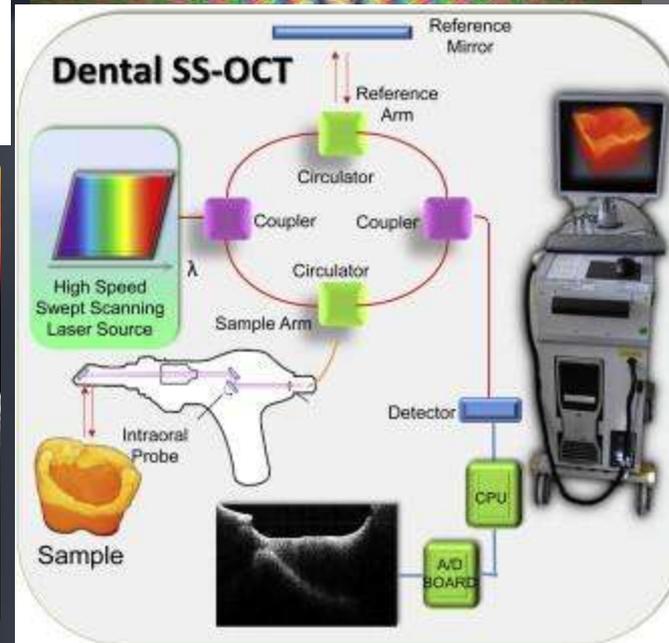
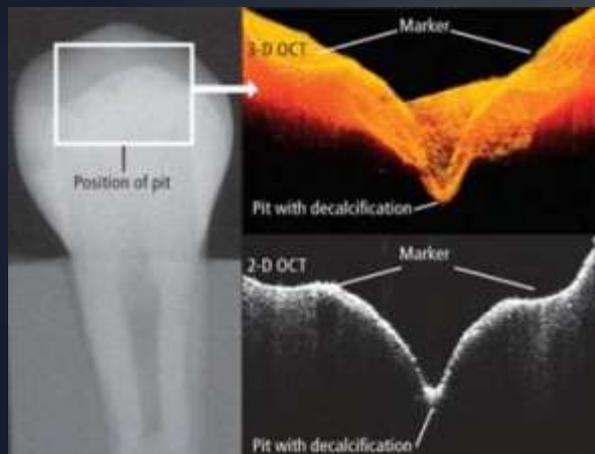
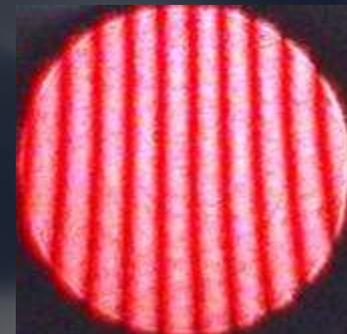
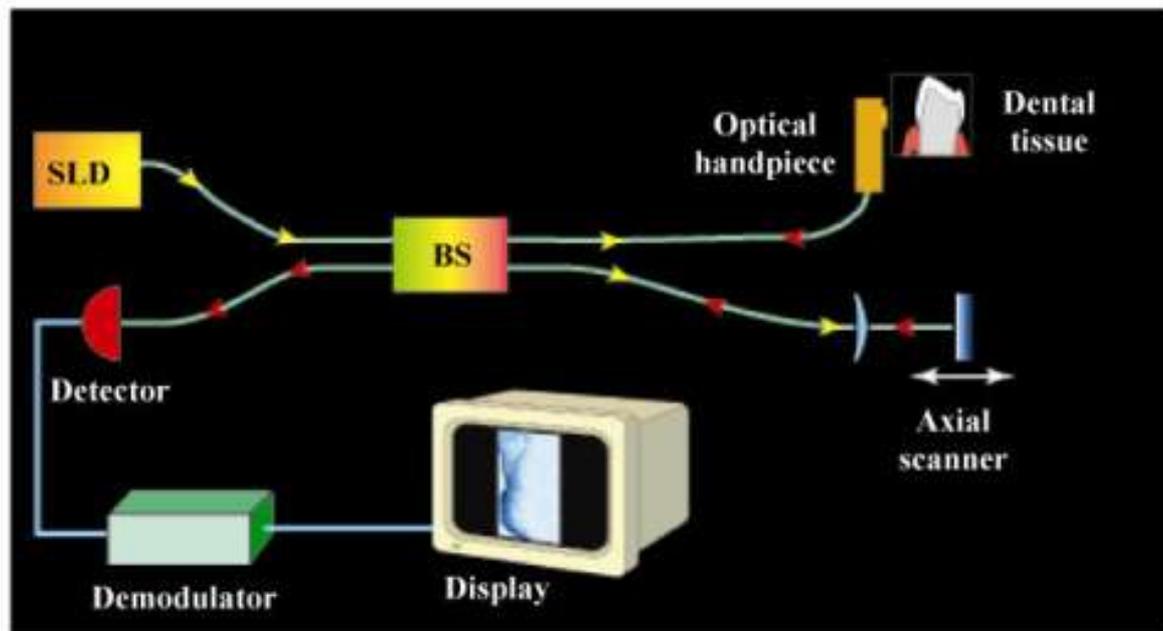
Число интерференционных полос

3D –сканеры в стоматологии Active Wavefront Sampling (AWS)



3D –сканеры в стоматологии

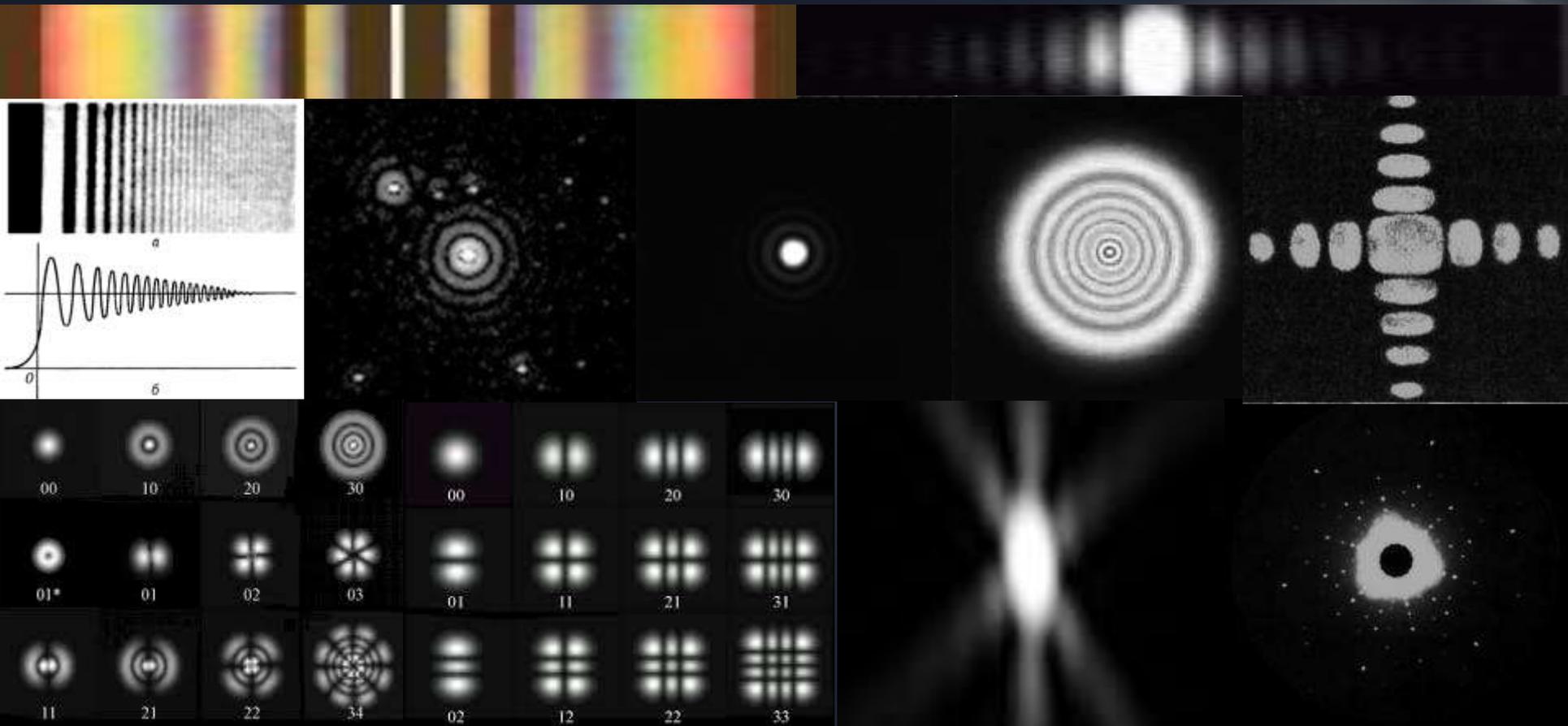
Оптическая когерентная томография



Дифракция света

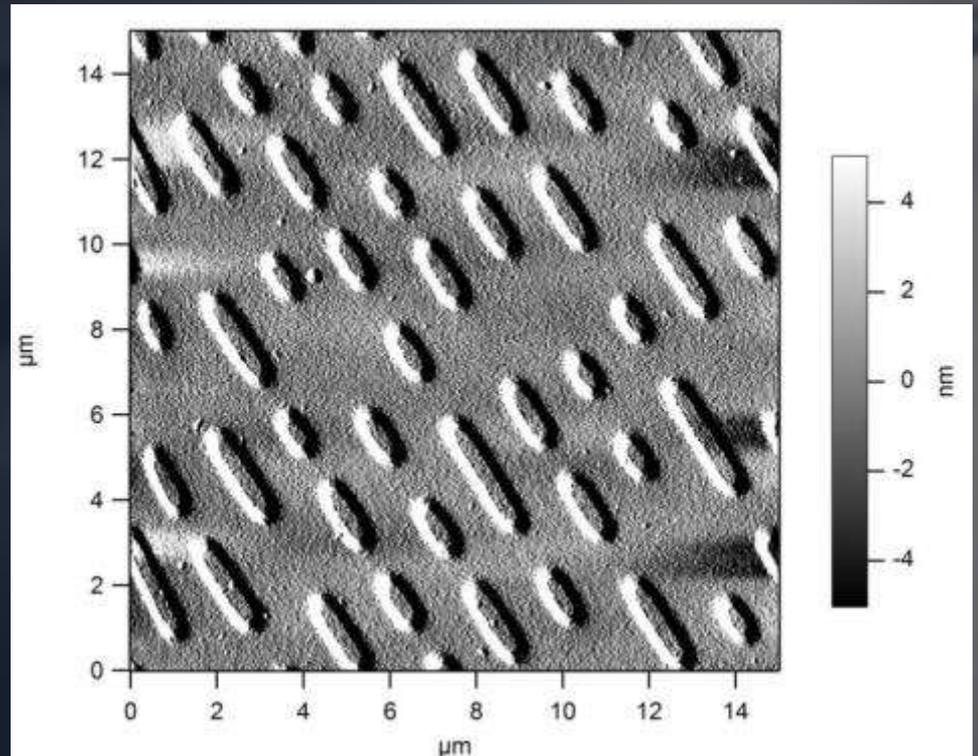
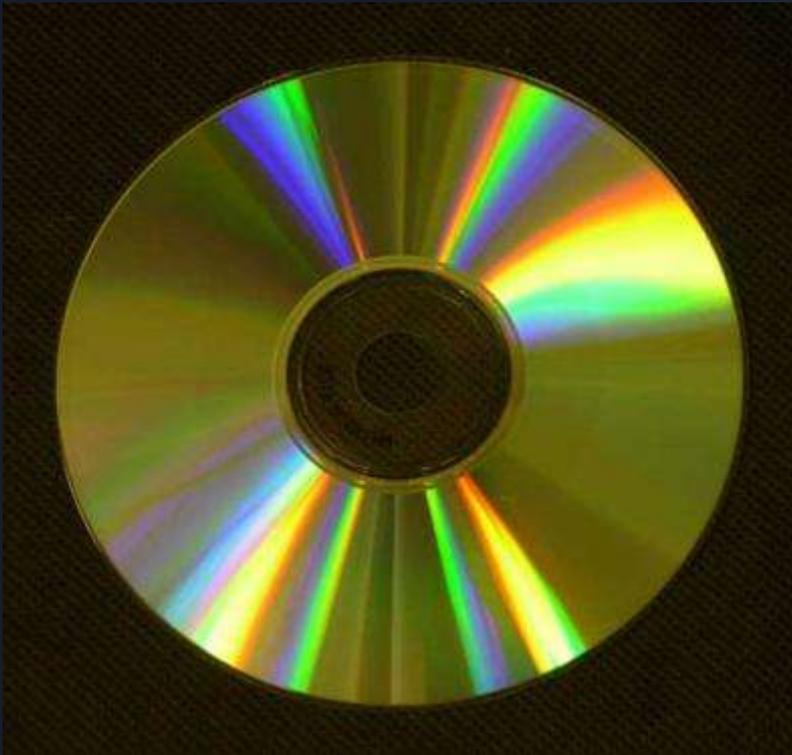
Дифракция света - определение

Под дифракцией света понимают всякое отклонение от прямолинейного распространения света, если оно не может быть истолковано как результат отражения, преломления или изгибания световых лучей в средах с непрерывно меняющимся показателем преломления. Если в среде имеются мельчайшие частицы постороннего вещества (туман) или показатель преломления заметно меняется на расстояниях порядка длины волны, то в этих случаях говорят о рассеянии света и термин «дифракция» не употребляется.



Условия наблюдения дифракции

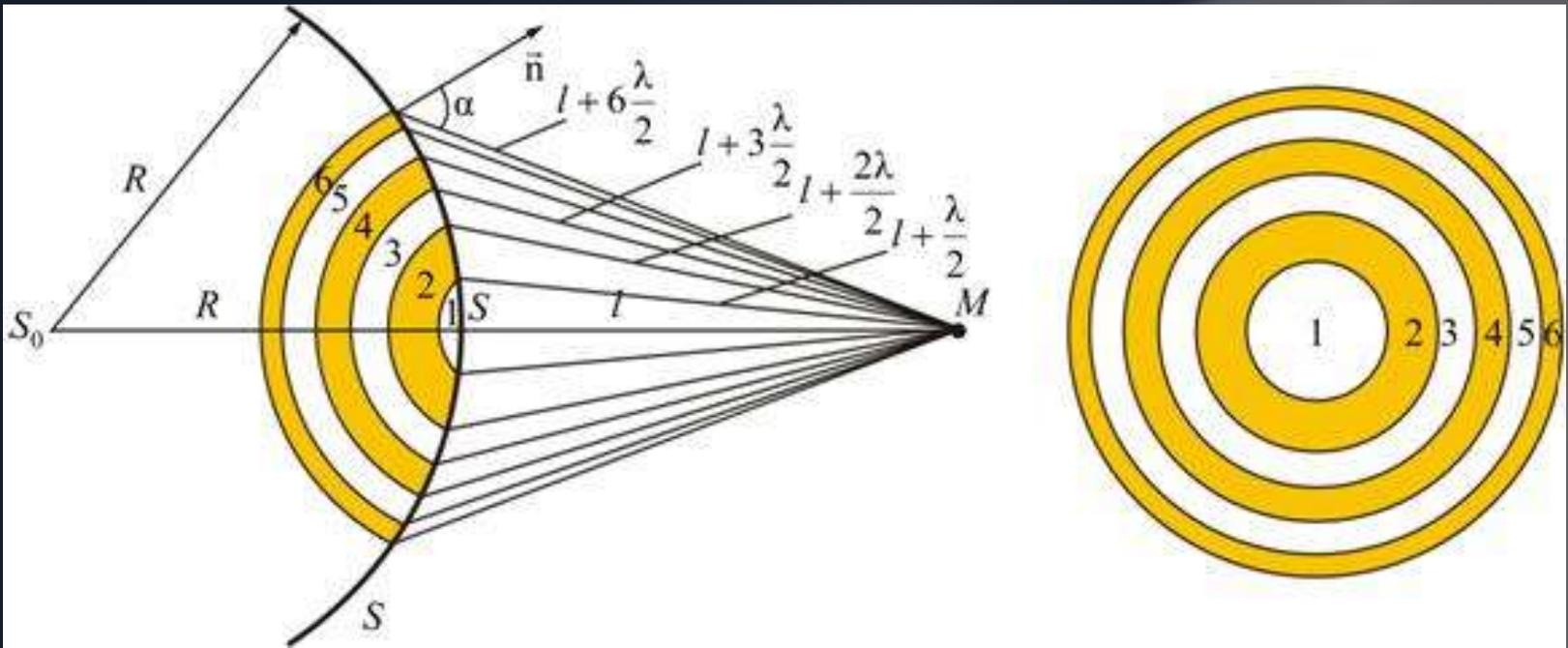
Для наблюдения дифракции световых волн необходимо создание специальных условий. Это обусловлено тем, что масштабы дифракции сильно зависят от соотношения размеров, препятствия и длины волны. При **длине волны, сравнимой с размерами препятствия**, дифракция выражена очень сильно.



Зоны Френеля, зонная пластинка

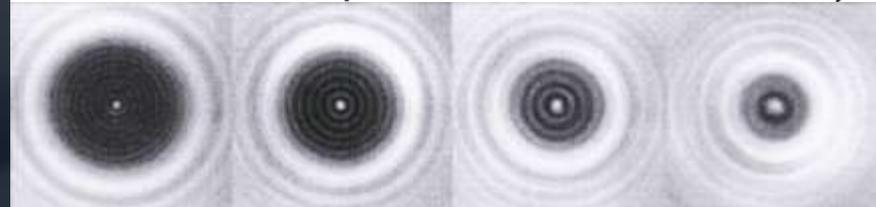
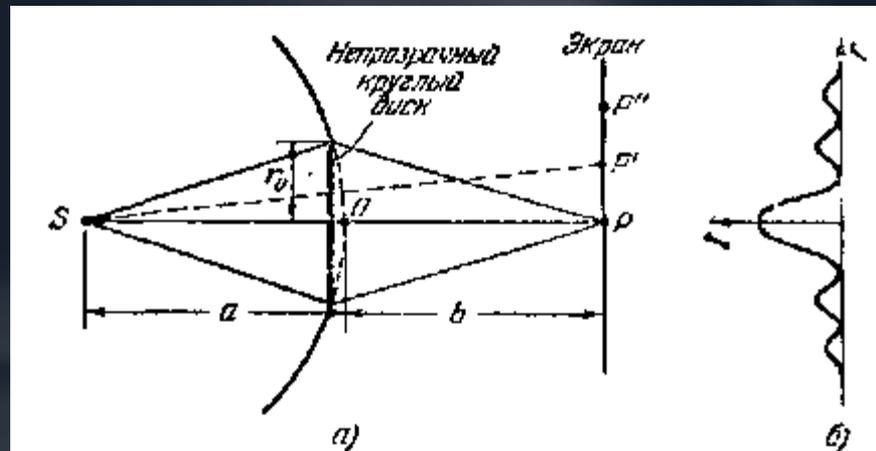
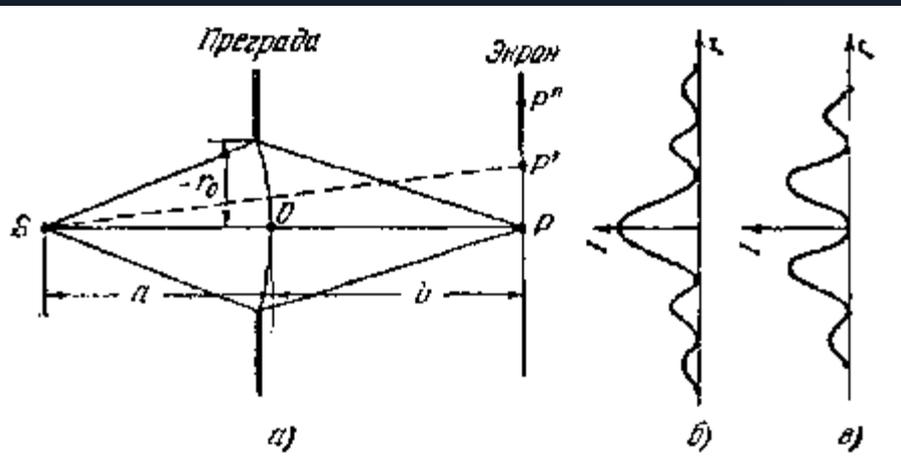
Разобьем сферический волновой фронт исходящий от точечного источника S_0 на кольцевые зоны такие чтобы разность хода лучей из указанной зоны до точки наблюдения M не превышала $\lambda/2$. Такие кольцевые зоны называются зонами Френеля. Интенсивность света в точке наблюдения складывается из интенсивностей из интенсивностей каждой зоны с учетом знака фазы (чередование знаков). Амплитуда колебания от некоторой m -й зоны равна среднему арифметическому от амплитуд примыкающих к ней зон, т.е.

$$r_m = \sqrt{\frac{Rl}{R+l} m \lambda}; \quad A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 \dots; \quad A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2}; \quad A = \frac{A_1}{2}; \quad J = \frac{J_1}{4}$$



Дифракция Френеля, круглое отверстие или экран

$$m = \frac{r_0}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) - \text{число зон Френеля}$$



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

$$\dots + \begin{cases} \left(\frac{A_{m-2}}{2} - A_{m-1} + \frac{A_m}{2} \right) + \frac{A_m}{2} & m - \text{нечетное} \\ \left(\frac{A_{m-3}}{2} - A_{m-2} + \frac{A_{m-1}}{2} \right) + \frac{A_{m-1}}{2} - A_m & m - \text{четное} \end{cases}$$

$$A = \frac{A_m}{2}$$

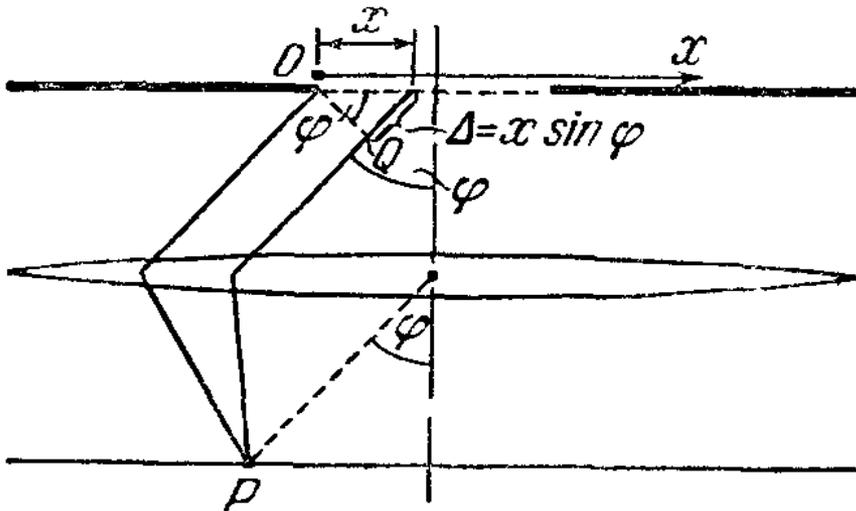
Пятно Араго - Пуассона

$$A = A_{m+1} - A_{m+2} + A_{m+3} - \dots =$$

$$= \frac{A_{m+1}}{2} + \left(\frac{A_{m+1}}{2} - A_{m+2} + \frac{A_{m+3}}{2} \right) + \dots$$

$$A = \frac{A_{m+1}}{2}$$

Дифракция Фраунгофера,



$$m = \frac{r_0}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) - \text{число зон Френеля};$$

$m > 1$ – дифракция Френеля,

$m < 1$ – дифракция Фраунгофера

Щель

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \left[\left(\frac{\pi}{\lambda} \right) b \sin \varphi \right]}{\left[\left(\frac{\pi}{\lambda} \right) b \sin \varphi \right]^2} = \frac{\sin^2 x}{x^2}$$

$b \sin \varphi = \pm k \lambda \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$ условие минимумов

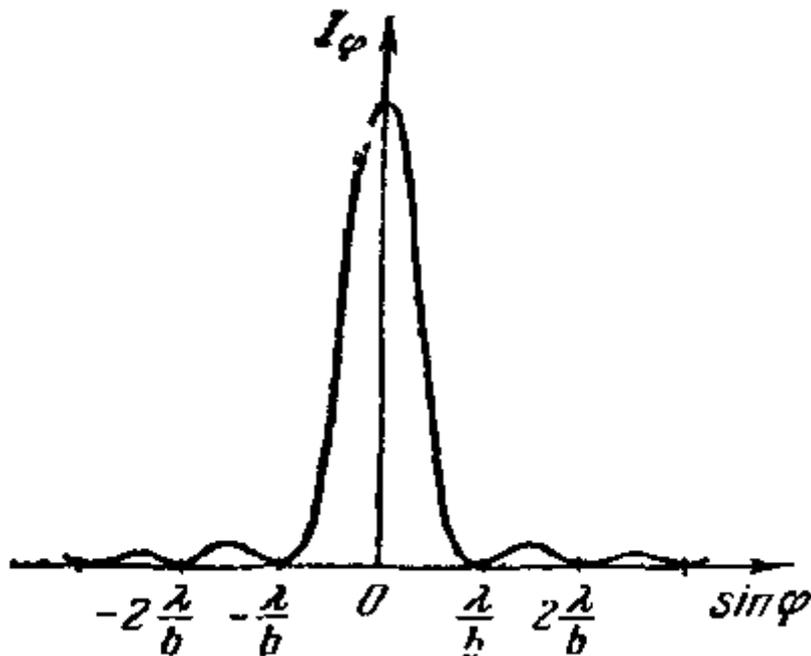
$\delta \varphi = 2 \arcsin \frac{\lambda}{b} \cong \frac{2\lambda}{b}$ ширина первого максимума

Отверстие

$I = J_1^2(\alpha)$ – функция Бесселя 1-го порядка

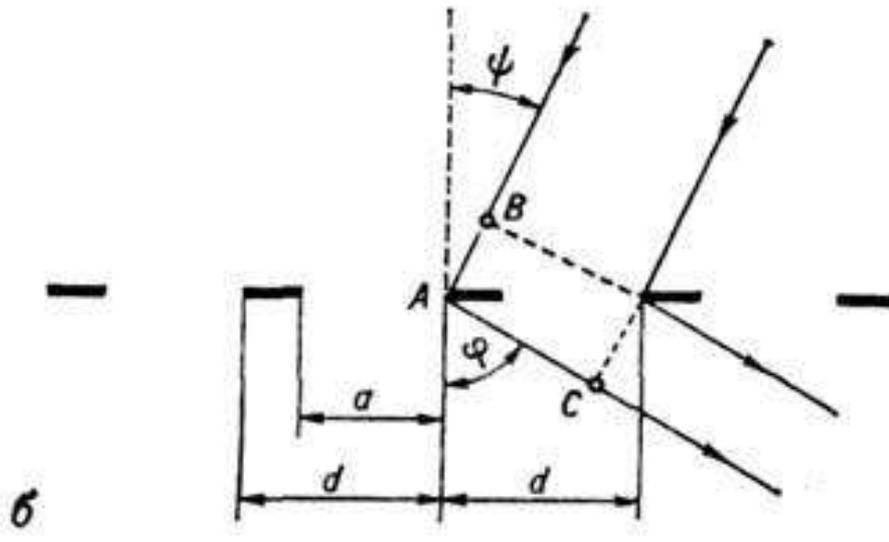
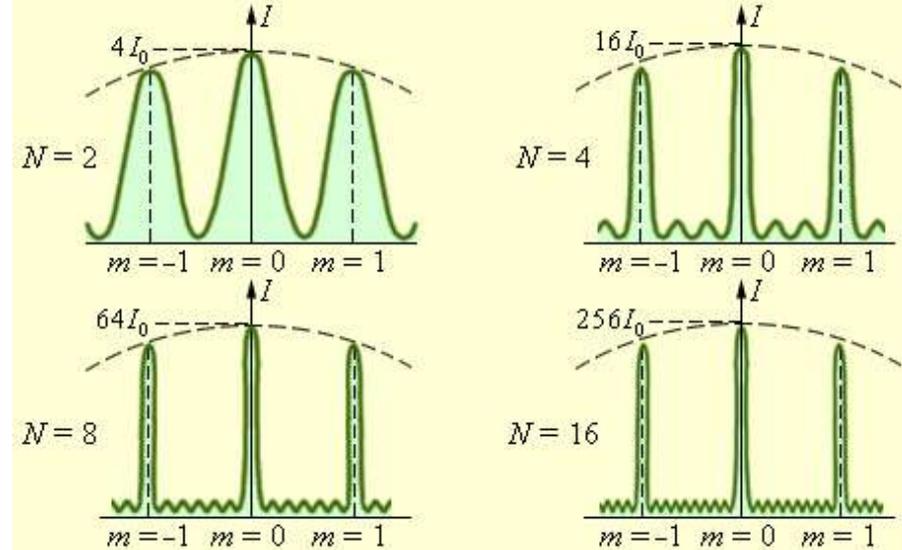
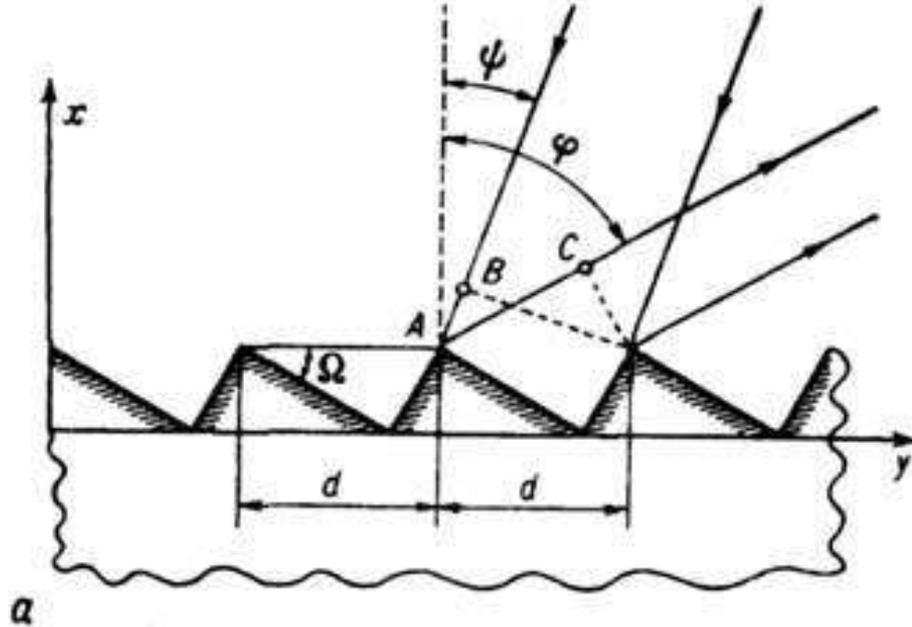
$\alpha = \frac{2\pi r \varphi}{\lambda}$; r – радиус отверстия

$\varphi_m = \frac{\lambda}{r} \left[0.61 + \frac{m-1}{2} \right]$ – угловые радиусы темных колец



Дифракционная решетка

многолучевая интерференция дифрагированных на N-щелях лучей



Условие максимума

$$d(\sin \varphi + \sin \psi) = m\lambda;$$

$$(m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

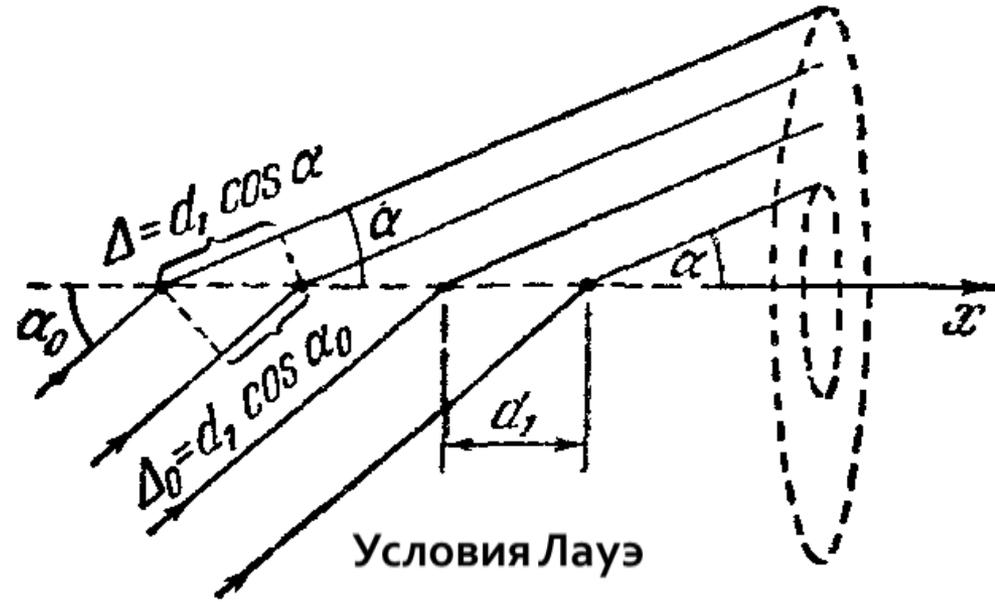
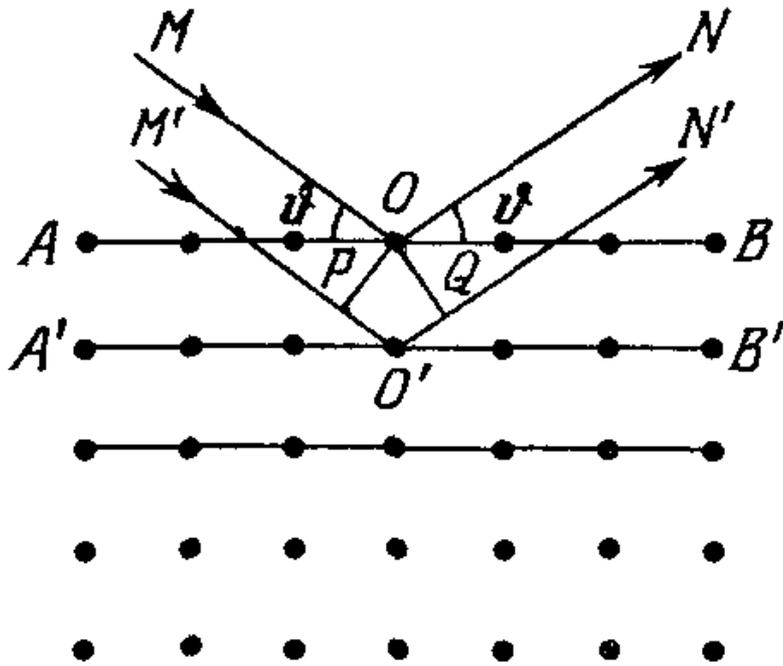
Угловая дисперсия

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi}$$

Разрешающая способность

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN = m \frac{L}{d}$$

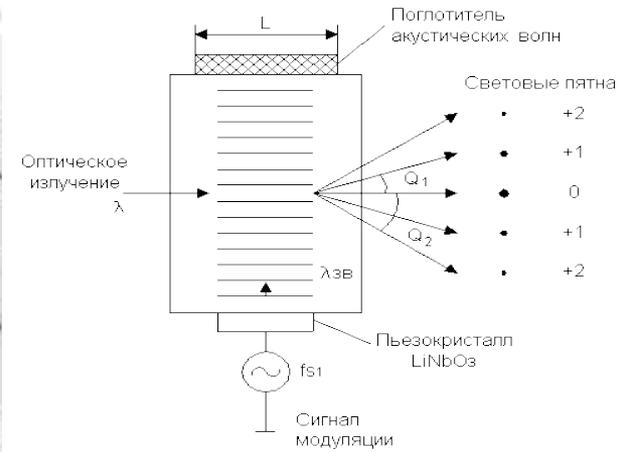
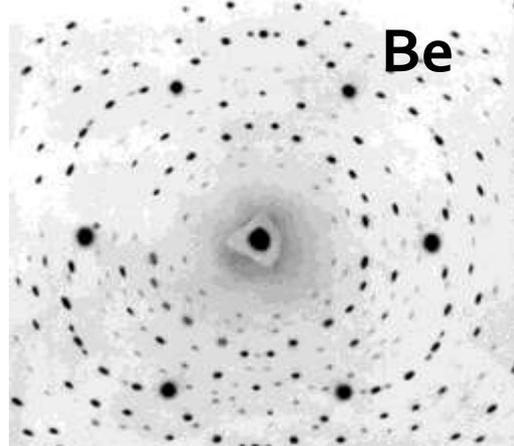
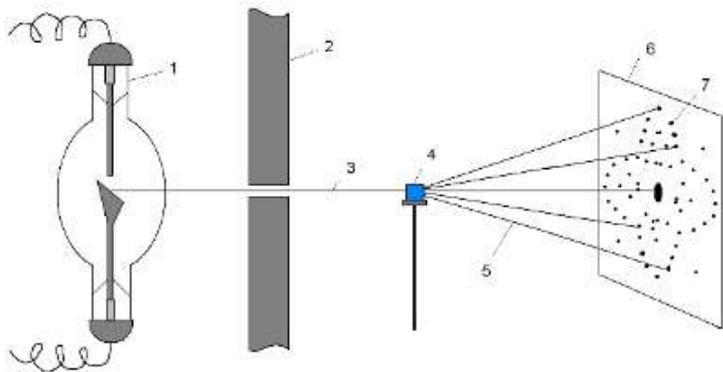
Дифракция Вульфа-Брегга



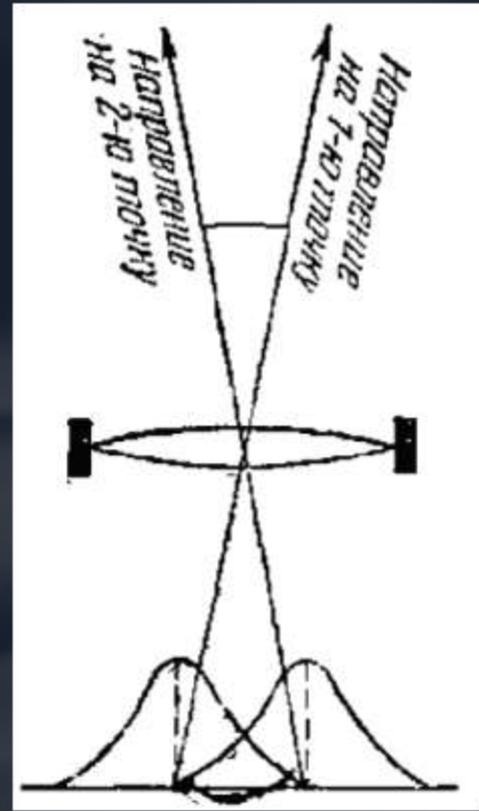
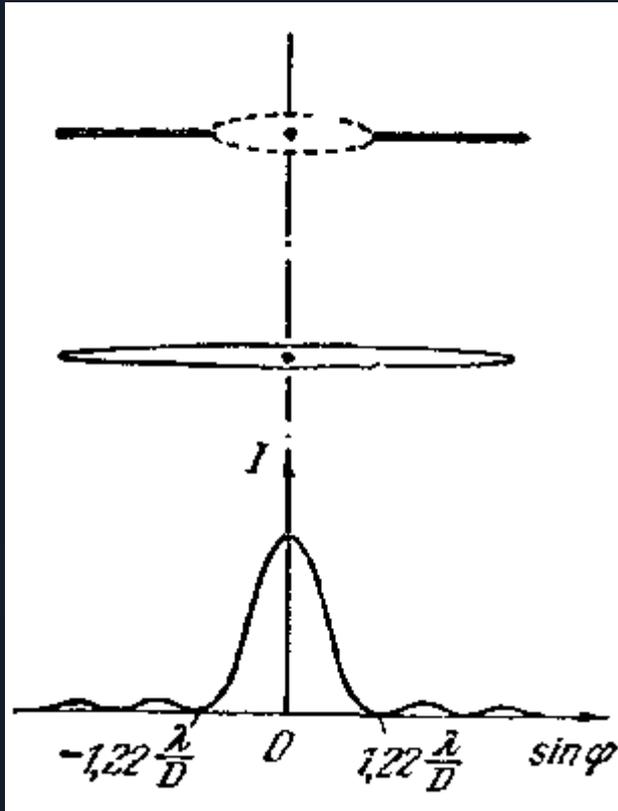
$$2d \sin \vartheta = \pm m\lambda \quad (m = 1, 2, \dots).$$

$$\left. \begin{aligned} d_1 (\cos \alpha - \cos \alpha_0) &= \pm m_1 \lambda, \\ d_2 (\cos \beta - \cos \beta_0) &= \pm m_2 \lambda, \\ d_3 (\cos \gamma - \cos \gamma_0) &= \pm m_3 \lambda \end{aligned} \right\} \quad (m_i = 0, 1, 2, \dots).$$

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1.$$



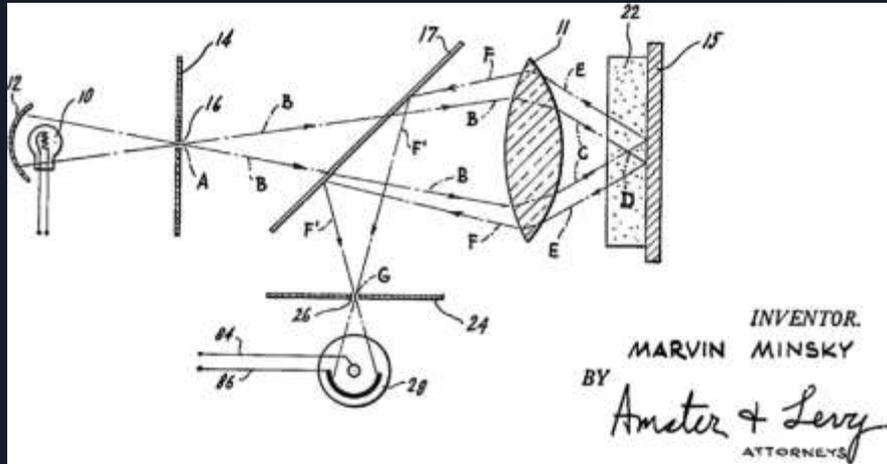
Разрешающая сила объектива



Согласно критерию Рэля две близкие точки будут еще разрешены, если середина центрального дифракционного максимума для одной точки совпадет с краем центрального максимума для второй точки

$$\delta \psi = 1,22 \frac{\lambda}{D}; dx = \delta \psi f = 1,22 \lambda \frac{f}{D} = 1,22 \frac{\lambda}{NA}$$

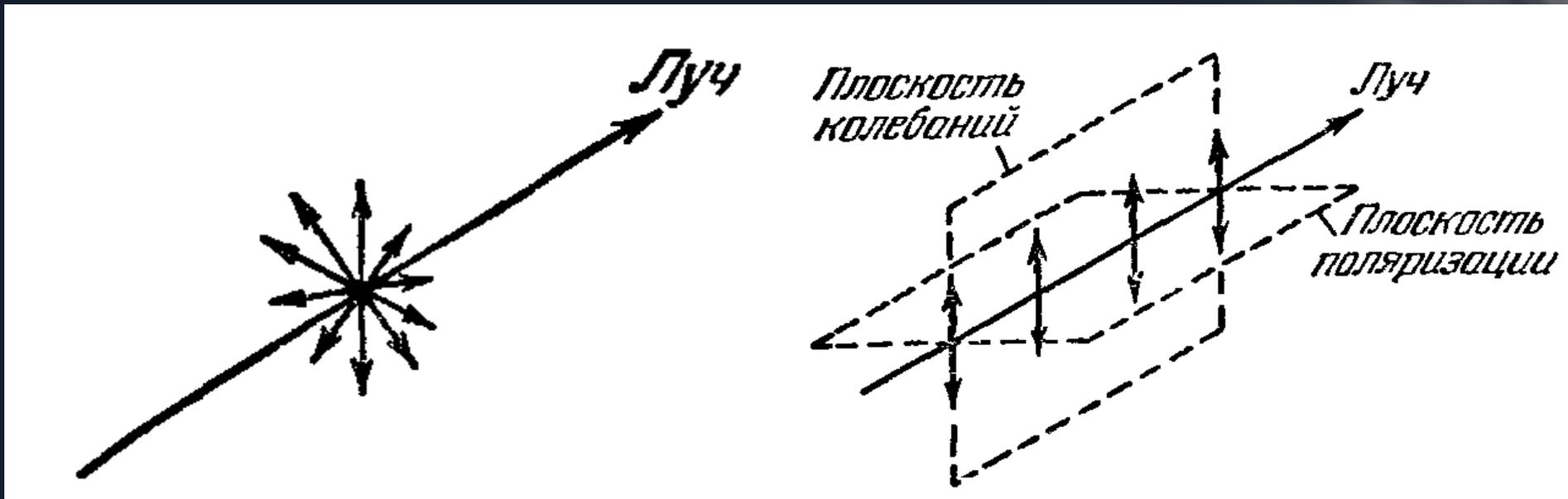
3D-сканеры в стоматологии конфокальный микроскоп



Поляризация света

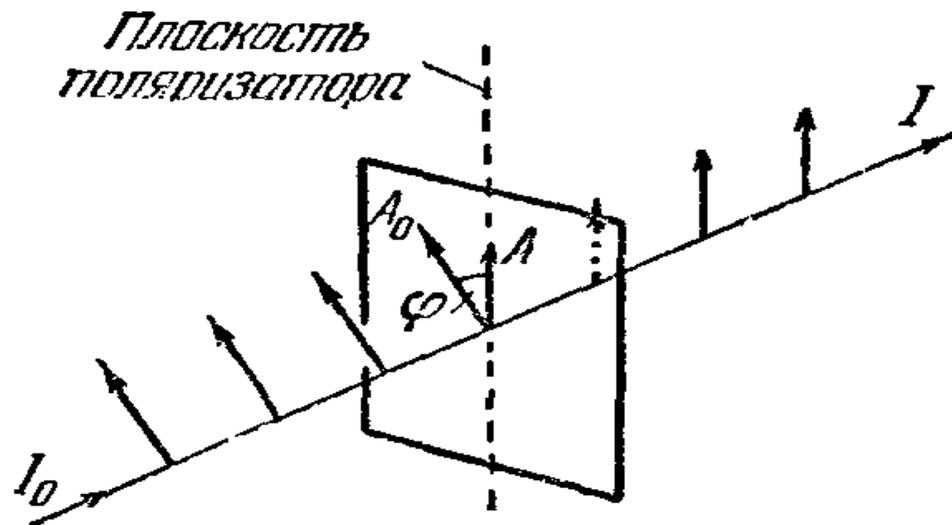
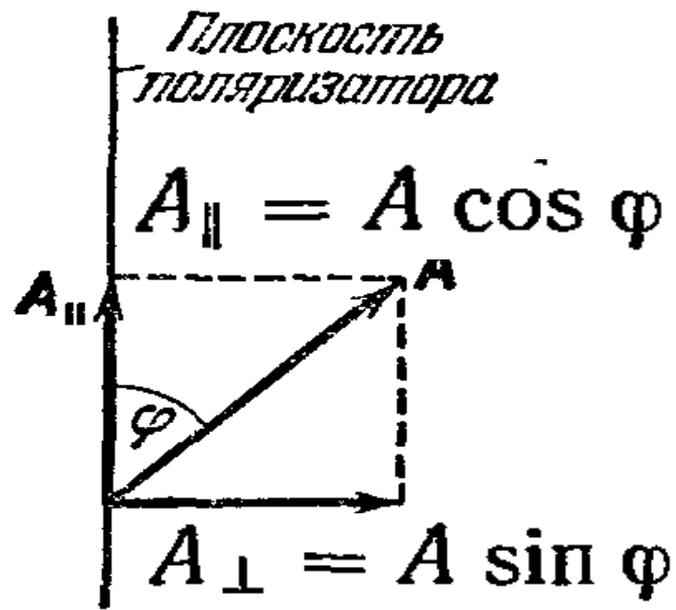
Естественный и поляризованный свет

Свет, в котором направления колебаний упорядочены каким-либо образом, называется поляризованным.



Естественный свет не поляризован. Плоско-поляризованный свет имеет выделенную плоскость колебаний вектора электрического поля. Поляризаторы свободно пропускают колебания, параллельные плоскости, которую называют плоскостью поляризатора,

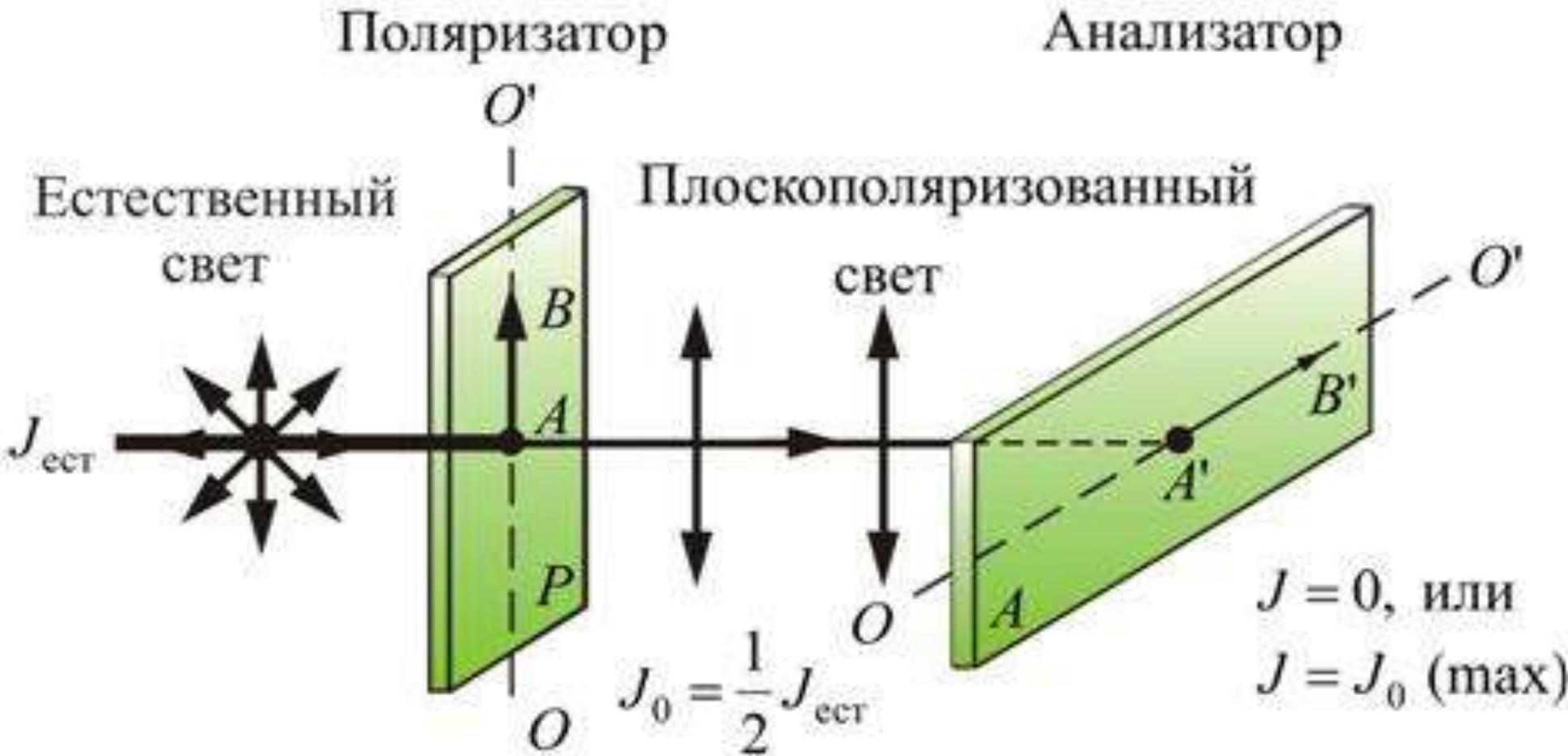
Закон Малюса



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

Закон Малюса

Закон Малюса (естественный свет)

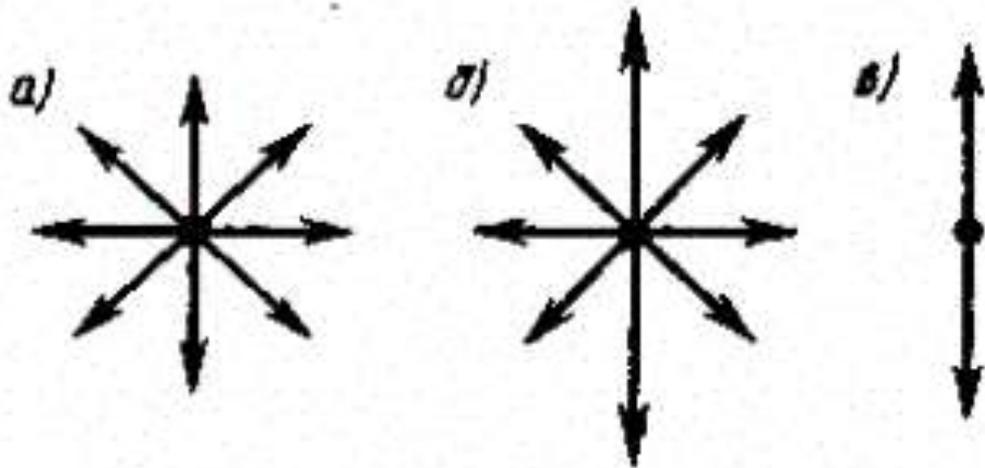


$$I = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \cdot \cos^2 \varphi.$$

Интенсивность при пропускании естественного света через систему поляризатор - анализатор

Частично поляризованный свет, степень поляризации

Свет, в котором колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений, называется частично поляризованным. Если пропустить частично поляризованный свет через поляризатор, то при вращении прибора вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет изменяться в пределах от I_{\max} до I_{\min} , причем переход от одного из этих значений к другому будет совершаться при повороте на угол $\varphi = \pi/2$



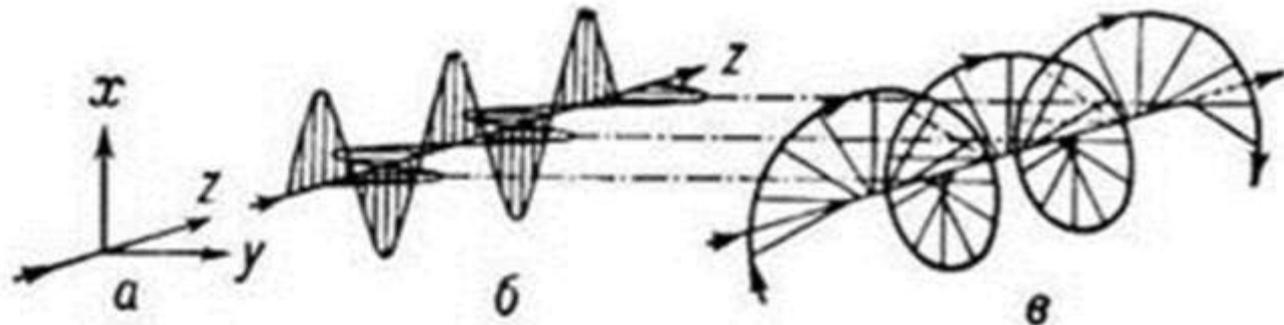
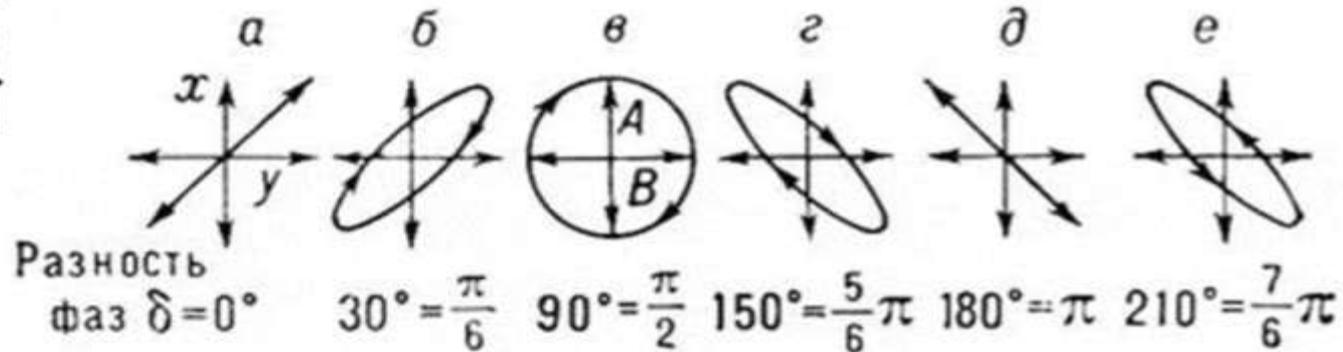
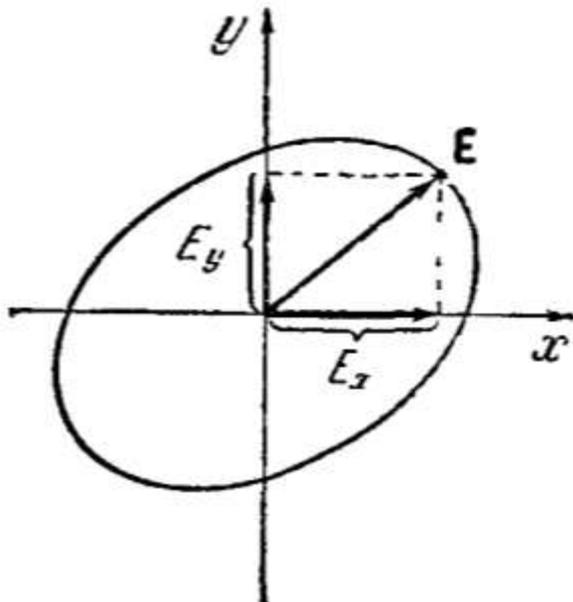
степень поляризации

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Круговая и эллиптическая поляризация, левая и правая поляризации

Сложение двух когерентных плоскополяризованных световых волн, плоскости колебаний которых взаимно перпендикулярны.

$$\left. \begin{aligned} E_x &= A_1 \cos \omega t, \\ E_y &= A_2 \cos (\omega t + \alpha). \end{aligned} \right\}$$



Если по отношению к направлению, противоположному направлению луча, вектор E вращается по часовой стрелке, поляризация называется **правой**, в противном случае — **левой**.

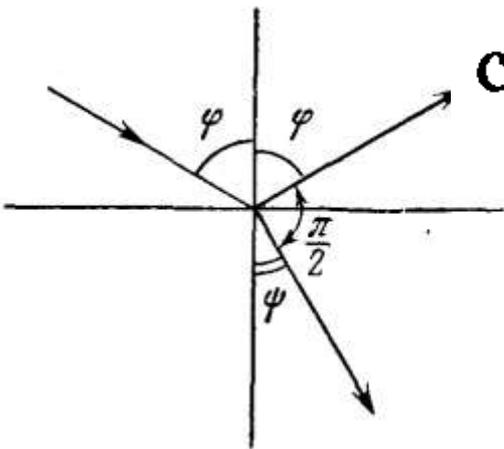
Угол Брюстера

$$\frac{R_{\perp}}{\mathcal{E}_{\perp}} = - \frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi + \psi)},$$

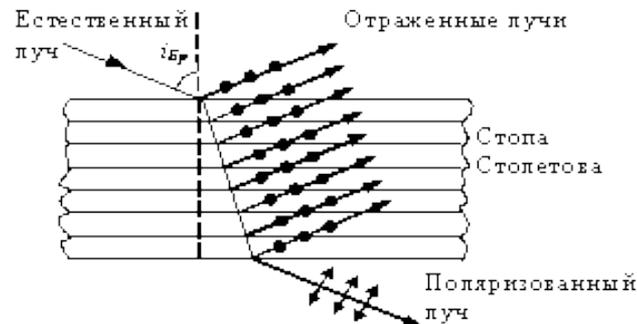
$$\frac{D_{\perp}}{\mathcal{E}_{\perp}} = \frac{2 \cos \varphi \sin \varphi}{\sin(\varphi + \psi)},$$

$$\frac{R_{\parallel}}{\mathcal{E}_{\parallel}} = \frac{\operatorname{tg}(\varphi - \psi)}{\operatorname{tg}(\varphi + \psi)},$$

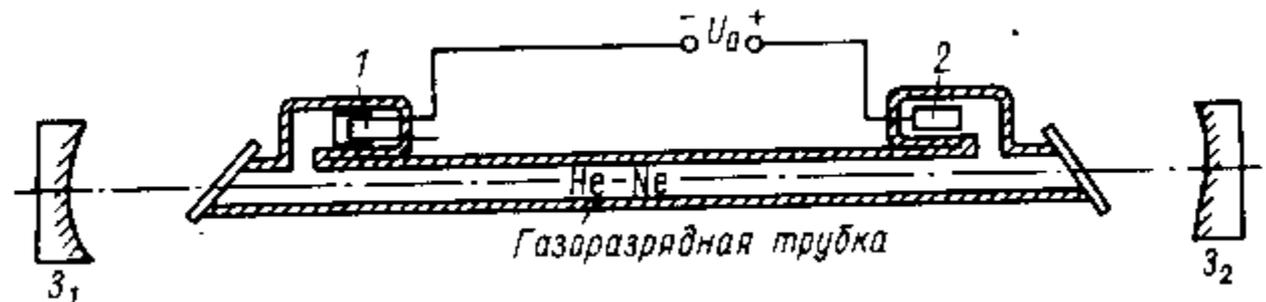
$$\frac{D_{\parallel}}{\mathcal{E}_{\parallel}} = \frac{2 \cos \varphi \sin \varphi}{\sin(\varphi + \psi) \cos(\varphi - \psi)}.$$



$$\cos \varphi_B = \sin \psi_B = \frac{1}{n} \sin \varphi_B, \quad \operatorname{tg} \varphi_B = n.$$



$$\varphi + \psi = \pi/2$$



Полное отражение

Угол преломления мнимая величина. Формулы Френеля

$$\frac{R_{\perp}}{\mathcal{E}_{\perp}} = \frac{\cos \varphi + i \sqrt{\sin^2 \varphi - n^2}}{\cos \varphi - i \sqrt{\sin^2 \varphi - n^2}}, \quad \frac{D_{\perp}}{\mathcal{E}_{\perp}} = \frac{2 \cos \varphi}{\cos \varphi - i \sqrt{\sin^2 \varphi - n^2}},$$

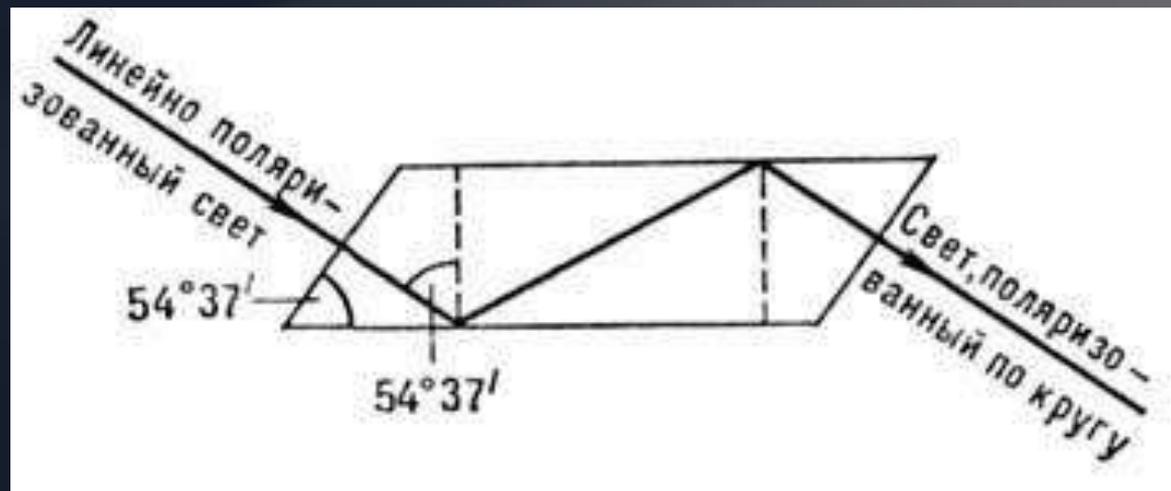
$$\frac{R_{\parallel}}{\mathcal{E}_{\parallel}} = \frac{n^2 \cos \varphi + i \sqrt{\sin^2 \varphi - n^2}}{n^2 \cos \varphi - i \sqrt{\sin^2 \varphi - n^2}}, \quad \frac{D_{\parallel}}{\mathcal{E}_{\parallel}} = \frac{2n \cos \varphi}{n^2 \cos \varphi - i \sqrt{\sin^2 \varphi - n^2}}.$$

$$|R_{\perp}| = |\mathcal{E}_{\perp}| \text{ и } |R_{\parallel}| = |\mathcal{E}_{\parallel}|$$

При полном отражении фаза волны испытывает скачок.

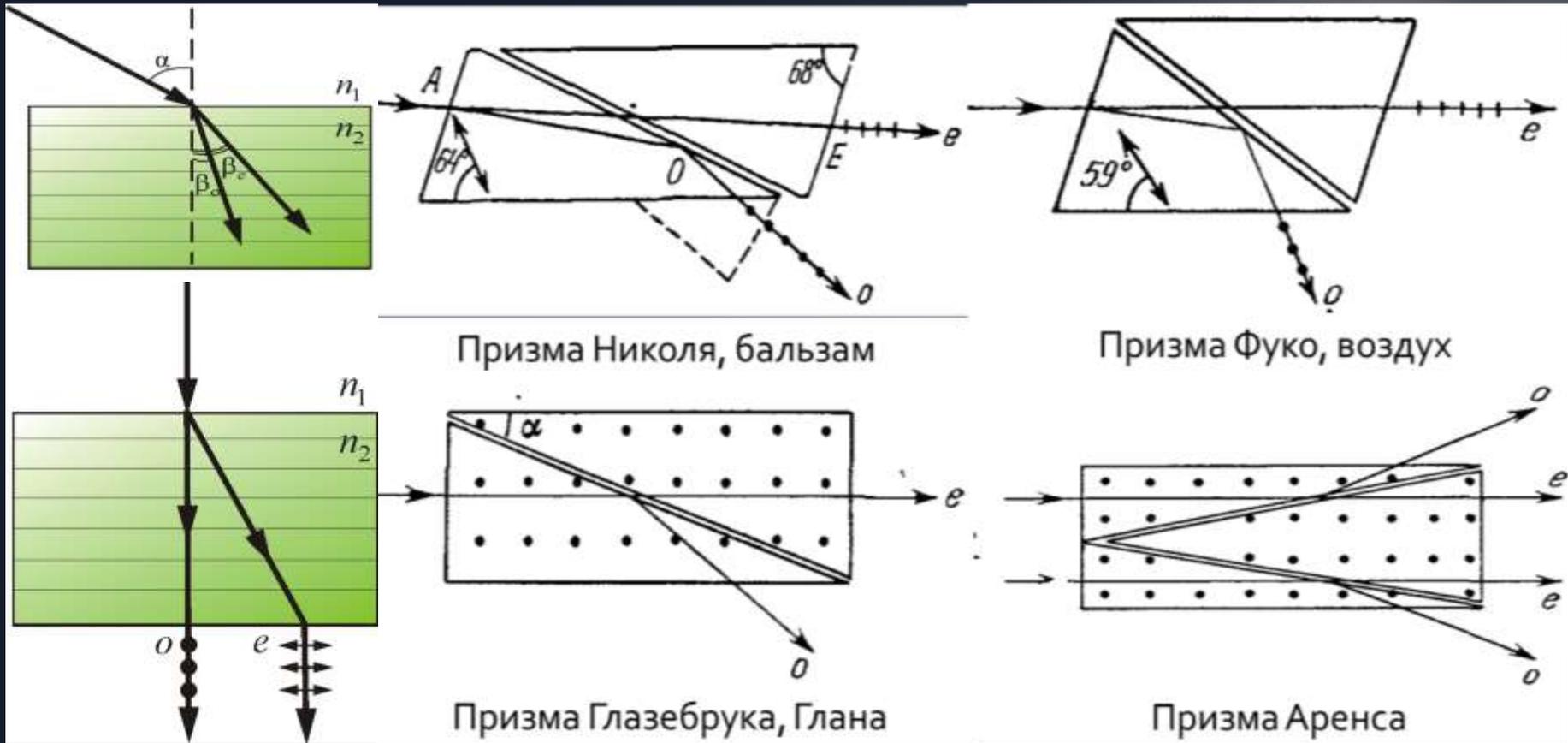
$$\operatorname{tg} \frac{\delta_{\parallel}}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2 \varphi - n^2}}{n^2 \cos \varphi}, \quad \operatorname{tg} \frac{\delta_{\perp}}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2 \varphi - n^2}}{\cos \varphi}.$$

Полное отражение меняет состояние поляризации. Призма Френеля



Поляризация при двойном лучепреломлении .

При прохождении света через некоторые кристаллы световой луч разделяется на два луча. **Двойного лучепреломление**, было обнаружено в 1670 г. Эр'азмом Бартоломином для исландского шпата. При двойном лучепреломлении один из лучей удовлетворяет обычному закону преломления и называется **обыкновенным (o)**. Для другого луча, называемого **необыкновенного (e)**, соотношение Снелиуса не остается постоянным при изменении угла падения. Оба луча полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях. **Ось кристалла** - направление при которых $n_e = n_o$ или скорости o и e волн равны



Дихроизм

В некоторых кристаллах один из лучей поглощается сильнее другого. Это явление называется **дихроизмом**. Весьма сильным дихроизмом в видимых лучах обладает **кристалл турмалина**. В нем обыкновенный луч практически полностью поглощается на длине 1 мм. Таким же свойством обладает поляроид — целлулоидная пленка, в которую введено большое количество одинаково ориентированных **кристалликов сульфата йодистого хинина** (в этих кристаллах один из лучей поглощается на пути примерно в 0,1 мм). Следовательно, поляроид может быть использован в качестве поляризатора.

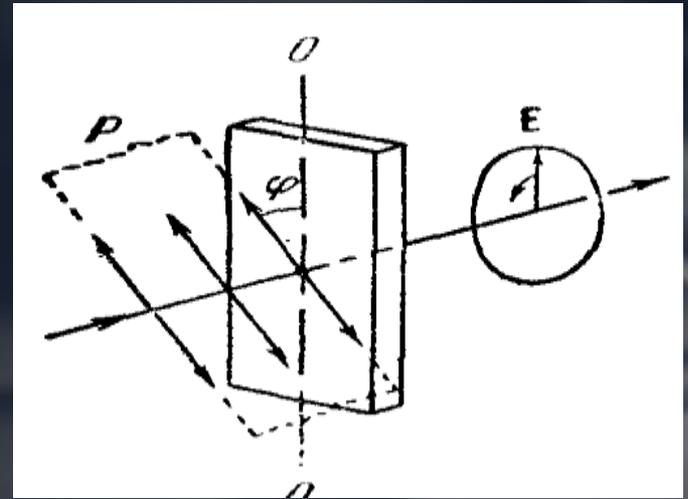


Фазовая пластинка

Вырезанная параллельно оптической оси пластинка, для которой

$$(n_o - n_e)d = \lambda/4,$$

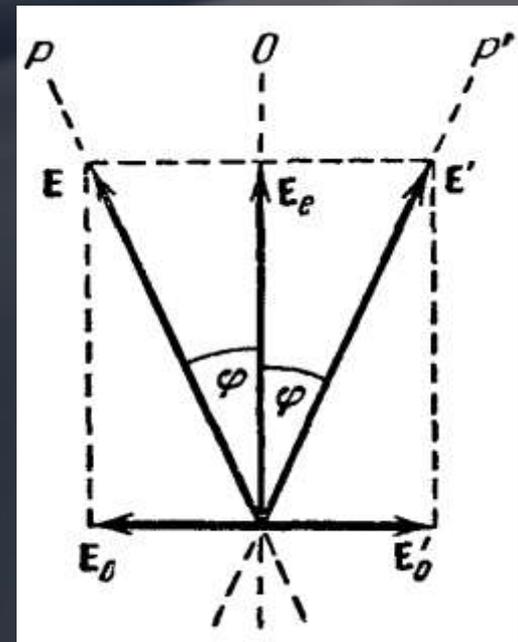
называется **пластинкой в четверть волны** преобразует линейно поляризованный свет в поляризованный по кругу.



Пластинка, для которой

$$(n_o - n_e)d = \lambda/2$$

называется **пластинкой в пол волны**. У света проходящего через полуволновую пластинку поворачивается плоскость поляризации на угол равный удвоенному углу между осью кристалла и плоскостью колебаний



Вращение плоскости поляризации – циркулярная анизотропия

Линейно-поляризованная поперечная волна может быть описана как суперпозиция двух циркулярно поляризованных волн с одинаковым волновым вектором и амплитудой. В изотропной среде проекции полевого вектора этих двух волн на плоскость поляризации колеблются синфазно, их сумма равна полевому вектору суммарной линейно-поляризованной волны. Если фазовая скорость циркулярно поляризованных волн в среде различна (**циркулярная анизотропия среды**), то одна из волн отстаёт от другой, что приводит к появлению разности фаз между колебаниями указанных проекций на выбранную плоскость

Некоторые вещества (кварц, сахар, киноварь, винная кислота, скипидар) обладают способностью поворачивать плоскость поляризации вокруг направления луча. Опыт показывает, что угол поворота плоскости поляризации для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей (естественное вращение)

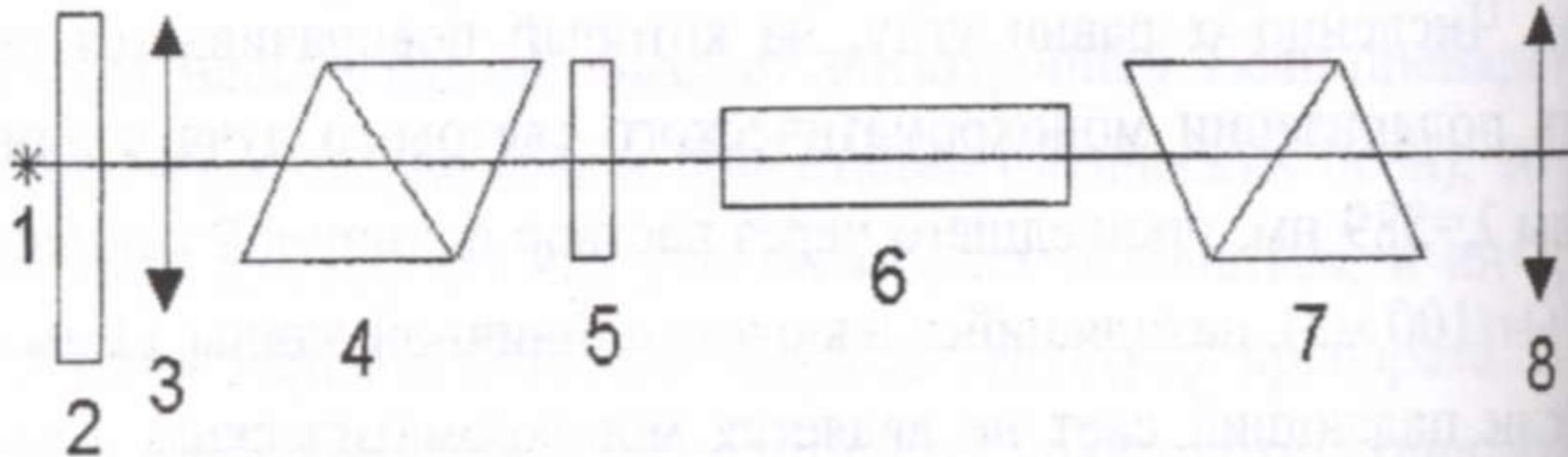
$$\varphi = [\alpha]cl.$$

l – длина трубки,

$[\alpha]$ – удельное вращение,

c – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе (кг/м³).

Поляриметры



1 – источник света; 2 – светофильтр; 3 – объектив; 4 – поляризатор; 5 – кварцевая пластина; 6 – кювета с раствором; 7 – анализатор; 8 – окуляр.

Поляриметры

прибор для измерения величины угла поворота плоскости поляризации света при прохождении через оптически активное вещество.

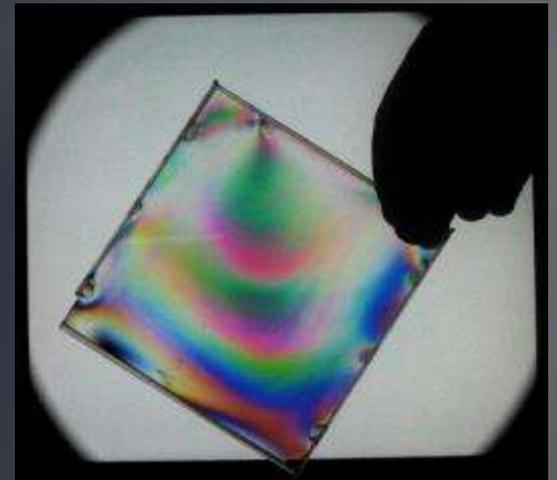
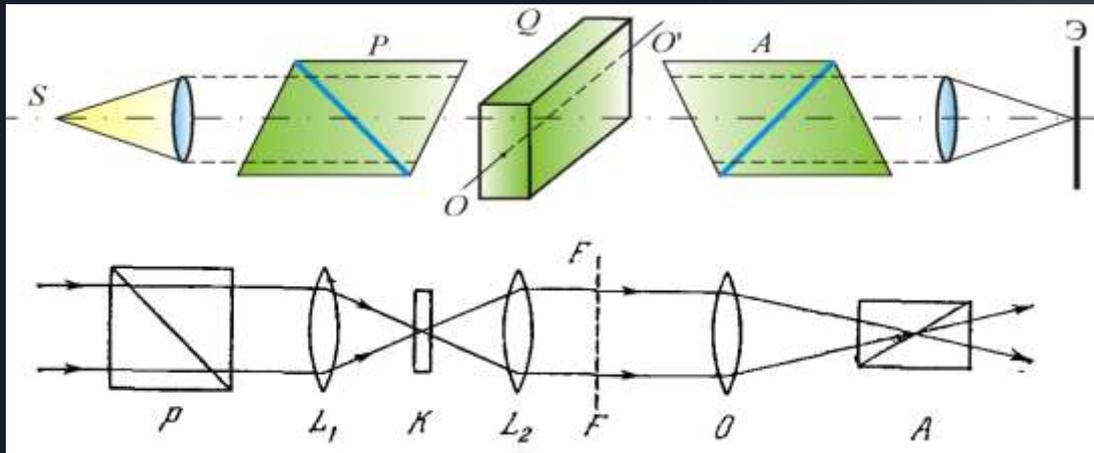
Используется в медицине для определения концентрации сахара в моче.



Интерференция поляризованных лучей

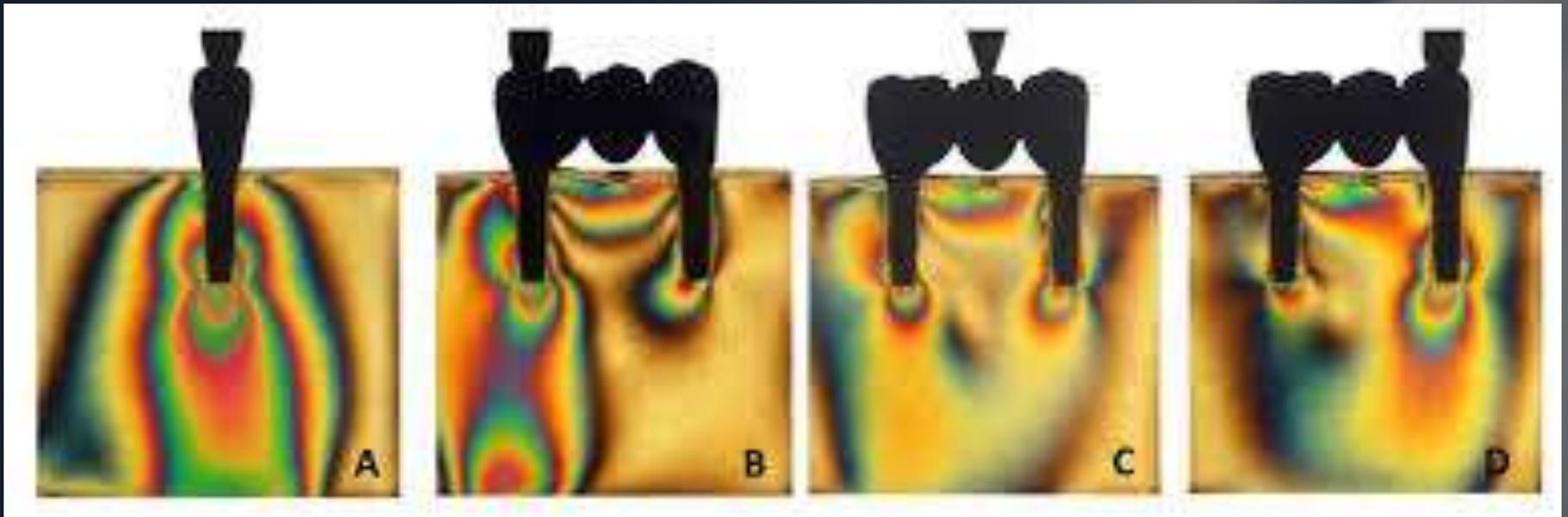
При наложении двух когерентных лучей, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях, никакой интерференционной картины, с характерным для нее чередованием максимумов и минимумов интенсивности, не наблюдается. Это впервые было установлено в опытах Френеля и Араго. Отсюда Френель пришел к заключению о поперечности световых колебаний.

Опыт Араго. Линейно поляризованный свет пропускается через кристаллическую пластинку и превращается в эллиптически поляризованный. Интенсивность проходящего света зависит от ориентации анализатора. Разность фаз, возникающая при прохождении света через кристаллическую пластинку зависит от длины волны. По этой причине интерференционная картина получается окрашенной.



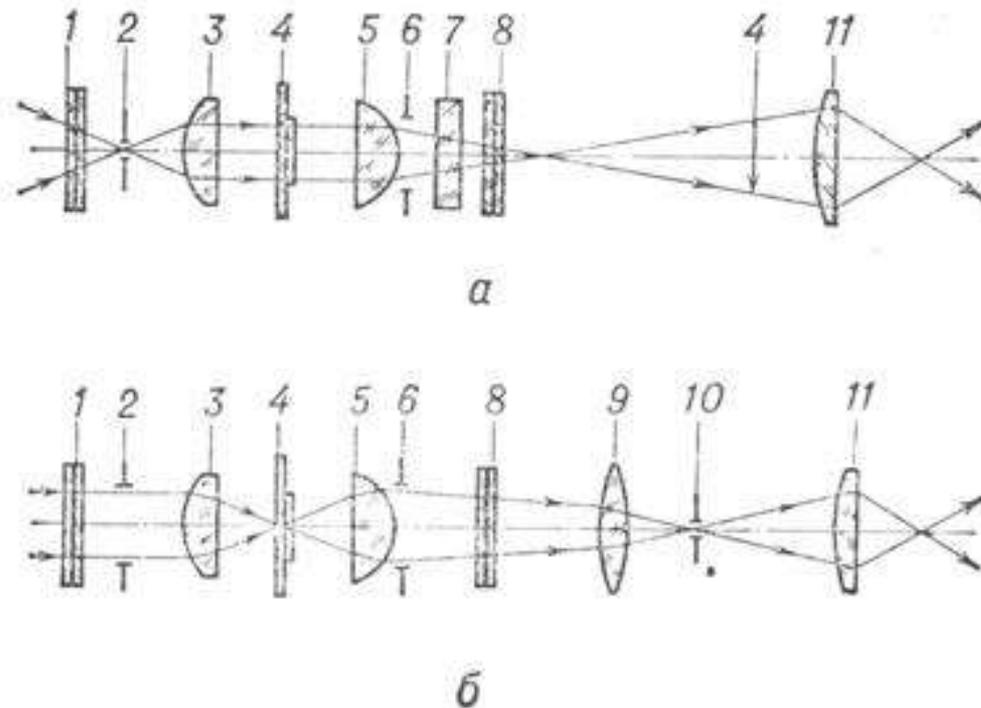
Фотоупругость

Возникновение оптической анизотропии в первоначально изотропных твёрдых телах (в том числе полимерах) под действием механических напряжений. Открыта Т. И. Зеебеком (1813) и Д. Брюстером (1816). Фотоупругость является следствием зависимости диэлектрической проницаемости вещества от деформации и проявляется в виде двойного лучепреломления и дихроизма, возникающих под действием механических нагрузок.



Поляризационный микроскоп

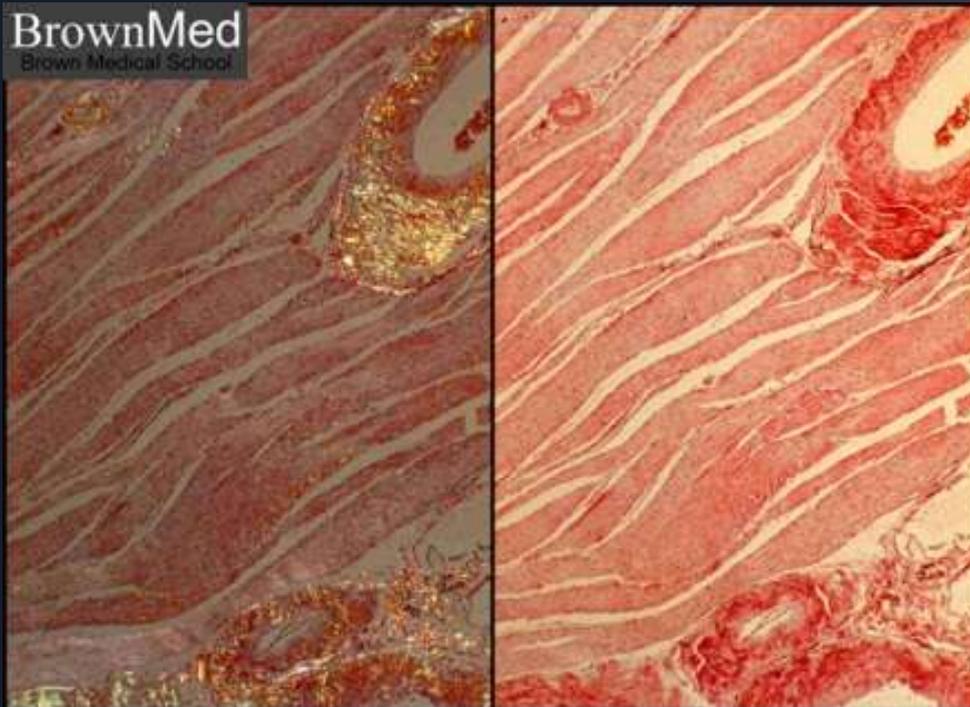
Данный вид микроскопии применяется для исследования анизотропных сред в поляризованном свете. Как уже отмечалось, некоторые биологические объекты, например, мышечные волокна обладают свойством двулучепреломления, измерение которого позволяет определять особенности строения живых клеток



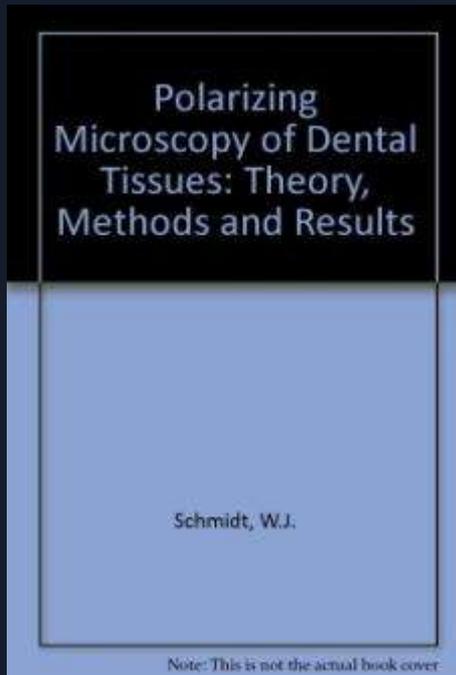
а – для ортоскопического наблюдения; б – для коноскопического наблюдения;
1- поляризатор; 2, 6 – диафрагмы; 3- конденсор;
4 – препарат; 5 – объектив;
7 – компенсатор; 8 – анализатор; 9 – линза Бертрана; 10- фокальная плоскость окуляра; 11- окуляр.

Поляризационный микроскоп

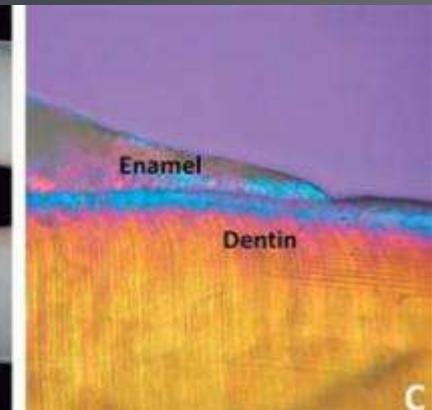
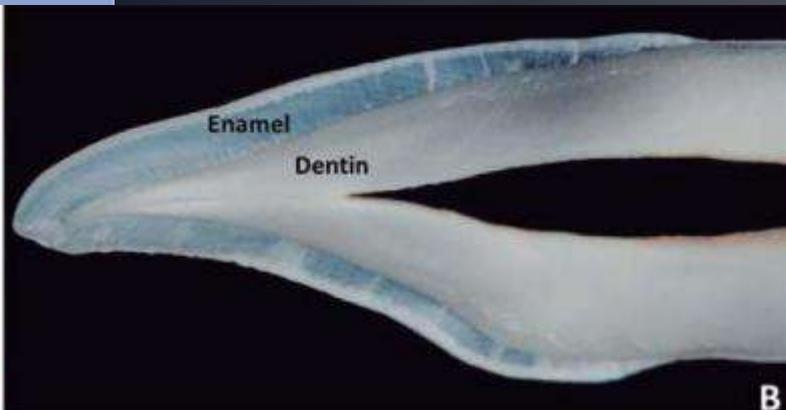
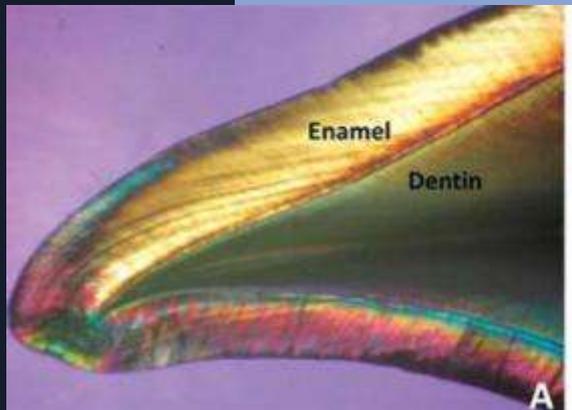
При ортоскопическом ходе лучей в фокальную плоскость окуляра проецируется изображение препарата. Наблюдаемая при этом интерференция поляризованных лучей локализована в плоскости препарата.. При коноскопическом ходе лучей апертурная диафрагма открывается, а наблюдение интерференционной картины, локализованной в бесконечности, производится с помощью линзы Бертрана 9, которая проецирует выходной зрачок 6 в фокальную плоскость 10 окуляра.



Поляризационная микроскопия в СТОМАТОЛОГИИ



Early enamel
caries seen by
polarized light
microscopy



Контрольные вопросы

1. При каком явлении наблюдается пятно Араго-Пуассона?
2. Как называется устройство изменяющее состояние поляризации света?