

# ***Оптика. Интерференция света***

## ***Лекция №2-3***

***Постникова Екатерина Ивановна,  
доцент кафедры экспериментальной физики***

# Интерференция света.

## Световые волны

**Свет** – сложное явление: в одних условиях он ведет себя как электромагнитная волна, в других – как поток фотонов.

В электромагнитной волне колеблются вектора  $E$  и  $H$ . Опыты показывают, что физиологические, фотохимические, фотоэлектрические и другие действия света вызывают колебания вектора  $E$ . Следовательно, говоря о световом векторе, подразумевают вектор  $E$ .

**Интенсивность света** – модуль среднего по времени значения плотности потока энергии

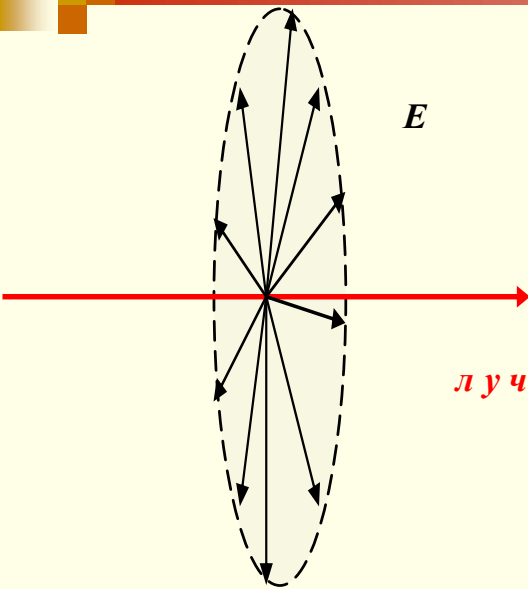
$$I = \left\langle S \right\rangle = \left\langle \vec{E} \cdot \vec{H} \right\rangle.$$

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды световой волны  $I \sim A^2$ .

**Световой луч** – линия, вдоль которой распространяется световая энергия.

Вектор Пойтинга  $\langle \vec{S} \rangle$  направлен в каждой точке по касательной к лучу.

В изотропных средах лучи перпендикулярны волновым поверхностям.



В естественном свете колебания вектора  $E$  совершаются в различных направлениях, перпендикулярных к лучу.

*Механизм испускания света:*

Излучение светящегося тела складывается из волн, испускаемых его атомами. Процесс испускания света возбужденным атомом конечен, равен  $\approx 10^{-8}$  с. За это время успевает образоваться последовательность минимумов и максимумов, протяженностью примерно 3 м – это «цуг волн». Испустив свет, атом «гаснет» и через некоторое время снова испускает свет, но уже с новой начальной фазой.

Одновременно свет испускают многие атомы. Возбуждаемые ими цуги волн, налагаются друг на друга, образуют световую волну. Плоскость колебаний для каждого цуга ориентирована случайным образом. Следовательно, в результирующей волне колебания различных направлений *равновероятны*.

# *Законы геометрической оптики*

1. Закон прямолинейного распространения света.

2. Закон независимости световых лучей.

3. Закон отражения света.

4. Закон преломления света

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

# Основные фотометрические величины

## ✓ Энергетические величины.

Поток излучения  $\Phi_e = \frac{W}{t}$ , [Вт].

Энергетическая светимость  
(излучательность)  $R_e = \frac{\Phi_e}{S}$ ,  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ .

Энергетическая сила света  
(сила излучения)  $I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega}$ ,  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{стерадиан}} \right]$ .

**Стерadian** – телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

**Энергетическая яркость**  
(лучистость)

$$B_e = \frac{\Delta I_e}{\Delta S}, \quad \left[ \frac{Вт}{ср \cdot м^2} \right].$$

**Энергетическая освещенность**

$$E_e, \quad \left[ \frac{Вт}{м^2} \right].$$

## ✓Световые величины

### Сила света.

*Кандела* [кд] – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении

$$I_e = \frac{1}{683} \frac{Вт}{ср}.$$

**Световой поток**, [люмен, лм,  $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$ ].

**Освещенность**  $E = \frac{\Phi}{S}$ ,  $\left[ \text{люкс} = 1 \text{ лк} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ м}^2} \right]$ .



# Интерференция света

**Интерференция волн** – явление наложения в пространстве двух (или нескольких) когерентных волн, в результате которого в различных точках получается усиление или ослабление результирующей волны.

Экспериментально наблюдается интерференция света, которая объясняется явлением интерференции волн. Необходимое условие интерференции волн – их *когерентность*.

**Интерференция света** – пространственное перераспределение энергии света при наложении двух или нескольких световых волн.

Условию когерентности удовлетворяют **монохроматические волны** — волны одной определенной и строго постоянной частоты.

Немонохроматический свет представляется в виде совокупности сменяющих друг друга независимых гармонических цугов продолжительностью  $\tau$ , в течение которого только и существует когерентность.

***Способ получения когерентных световых волн:***

Разделение волны, излучаемой одним источником, на 2 части, прошедшие разный ***оптический путь***.

Рассмотрим интерференцию двух когерентных волн:

Первая волна  $x_1 = A_1 \cos \omega \left( t - \frac{s_1}{v_1} \right)$

вторая волна  $x_2 = A_2 \cos \omega \left( t - \frac{s_2}{v_2} \right)$

$S$  – геометрический путь.

Оптический путь в среде с показателем преломления  $n$ :

$$L = n \cdot S.$$

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad \text{и} \quad n_2 = \frac{c}{v_2}, \quad \text{где } v_1, v_2 \text{ – фазовые скорости.}$$

Разность фаз колебаний, возбуждаемых первой и второй волной в некой точке пространства:

$$\delta = \varphi_1 - \varphi_2 = \omega \left( \frac{S_2}{\nu_2} - \frac{S_1}{\nu_1} \right) = \frac{2\pi}{T} \left( \frac{S_2 n_2}{c} - \frac{S_1 n_1}{c} \right) = \frac{2\pi}{Tc} \left( \underbrace{S_2 n_2}_{\substack{\text{опт.} \\ \text{путь}}} - S_1 n_1 \right) =$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda_0} \underbrace{(L_2 - L_1)}_{\Delta} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad \text{в вакууме} \quad \lambda_0 = Tc.$$

$\Delta$  – оптическая разность хода.

$$\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1$$

$$\Delta = \pm m \lambda_0 = \pm 2m \frac{\lambda_0}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \Rightarrow \delta = \pm 2m \pi$$

колебания с одинаковой фазой и наблюдается  
*интерференционный max.*

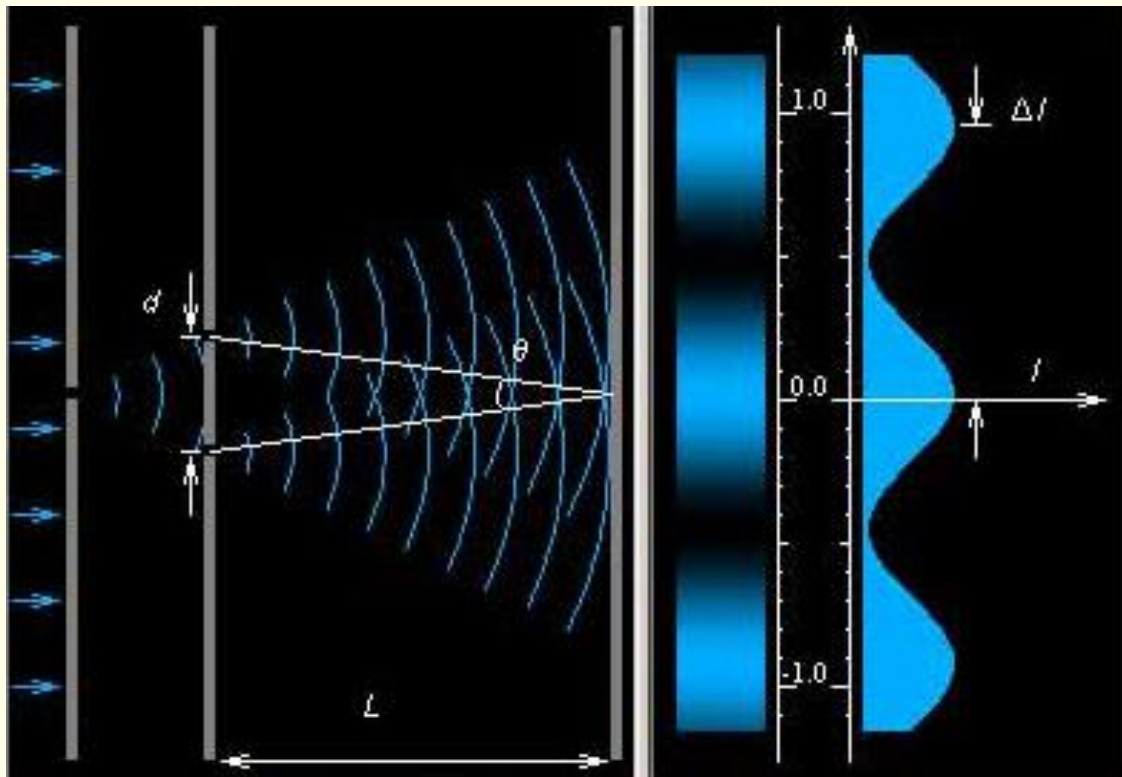
$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \Rightarrow \delta = \pm (2m + 1) \pi$$

колебания в противофазе и наблюдается  
*интерференционный min.*

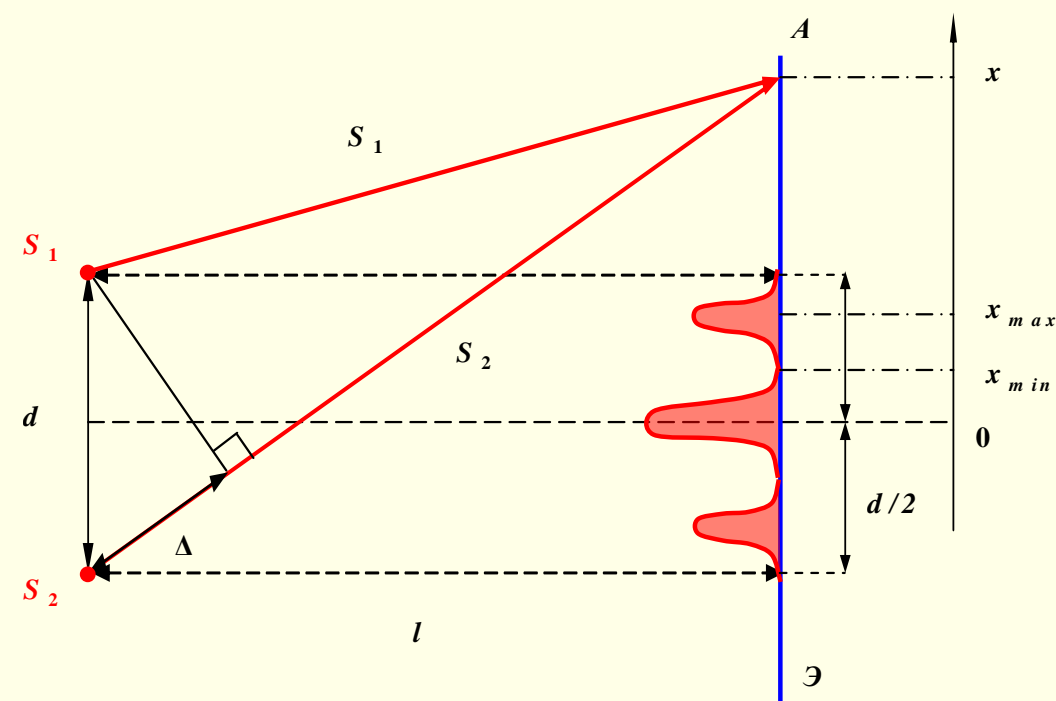
# Методы наблюдения интерференции света.

## 1. Метод Юнга.

Параллельный пучок света падает на экран с небольшим отверстием. Пройдя через отверстие, свет доходит до второго экрана, в котором проделаны две щели. Когерентные пучки, излучаемые каждой из щелей, интерферируют на третьем экране.



# Интерференционная картина от двух источников



$S_1, S_2$  – монохроматические источники света на расстоянии  $d$  друг от друга.

Расстояние до экрана  $\mathcal{E}$   
 $l \gg d$ .

0 – точка отсчета расположена симметрично относительно  $S_1, S_2$ .

$x$  – расстояние до произвольной точки  $A$ , в которой наблюдается интерференционная картина.

Оптическая разность хода

$$\Delta = S_2 - S_1.$$

Из геометрических соображений

$$\Delta = \frac{xd}{l}$$

$$\Delta_{\max} = \pm 2m \frac{\lambda_0}{2} \Rightarrow x_{\max} = \pm m \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2 \dots)$$

– интерференционный максимум.

$$\Delta_{\min} = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \Rightarrow x_{\min} = \pm \left( m + \frac{1}{2} \right) \underbrace{\frac{l}{d}}_{\Delta x} \lambda_0$$

– интерференционный минимум.



Расстояние между соседними максимумами или минимумами – *ширина интерференционной полосы*

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda_0 = \text{const} .$$

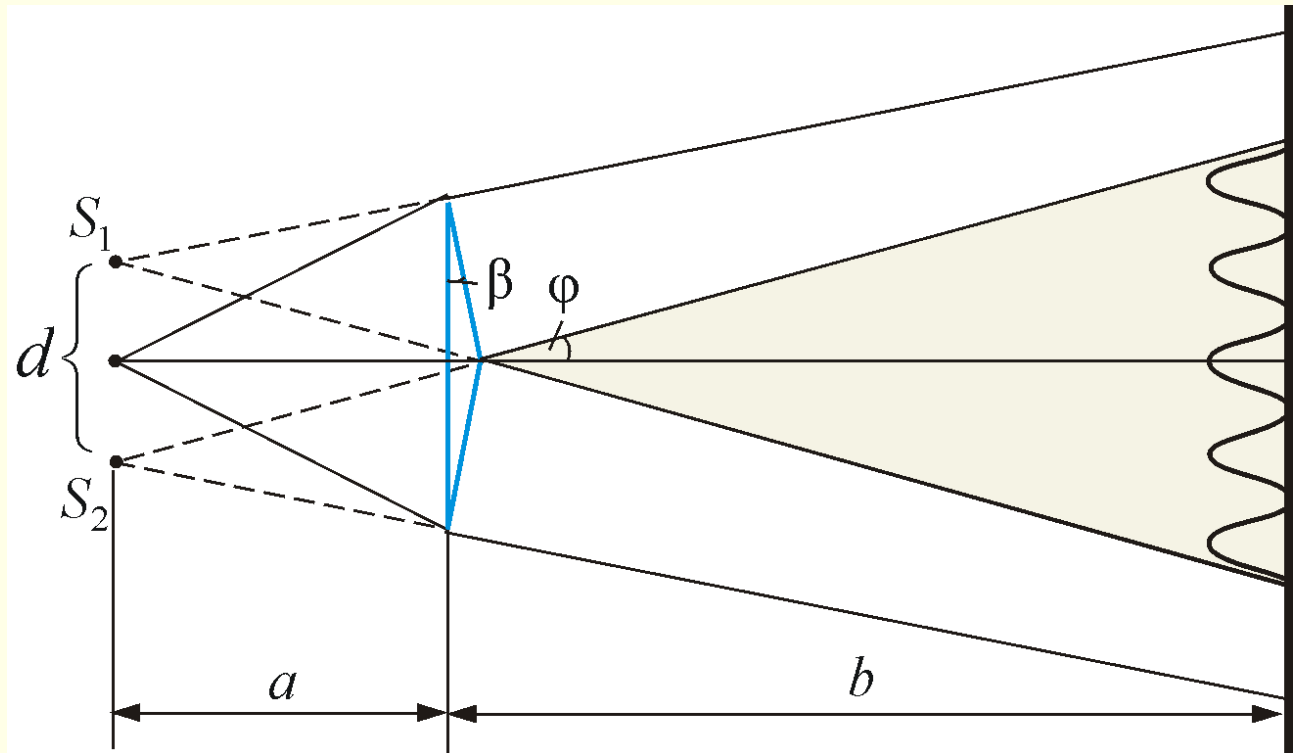
$$\Delta x = x_{\min(m+1)} - x_{\min(m)} = 2(m+1) \frac{l}{d} \frac{\lambda_0}{2} - 2m \frac{l}{d} \frac{\lambda_0}{2} = \frac{l}{d} \lambda_0 .$$

$m = 0$  – главный макс в точке 0,  $m = n$  – максимум  $n$ -го порядка.

$$x_{\max; \min} = f(\lambda_0); \quad \Delta x = f(\lambda_0) \Rightarrow$$

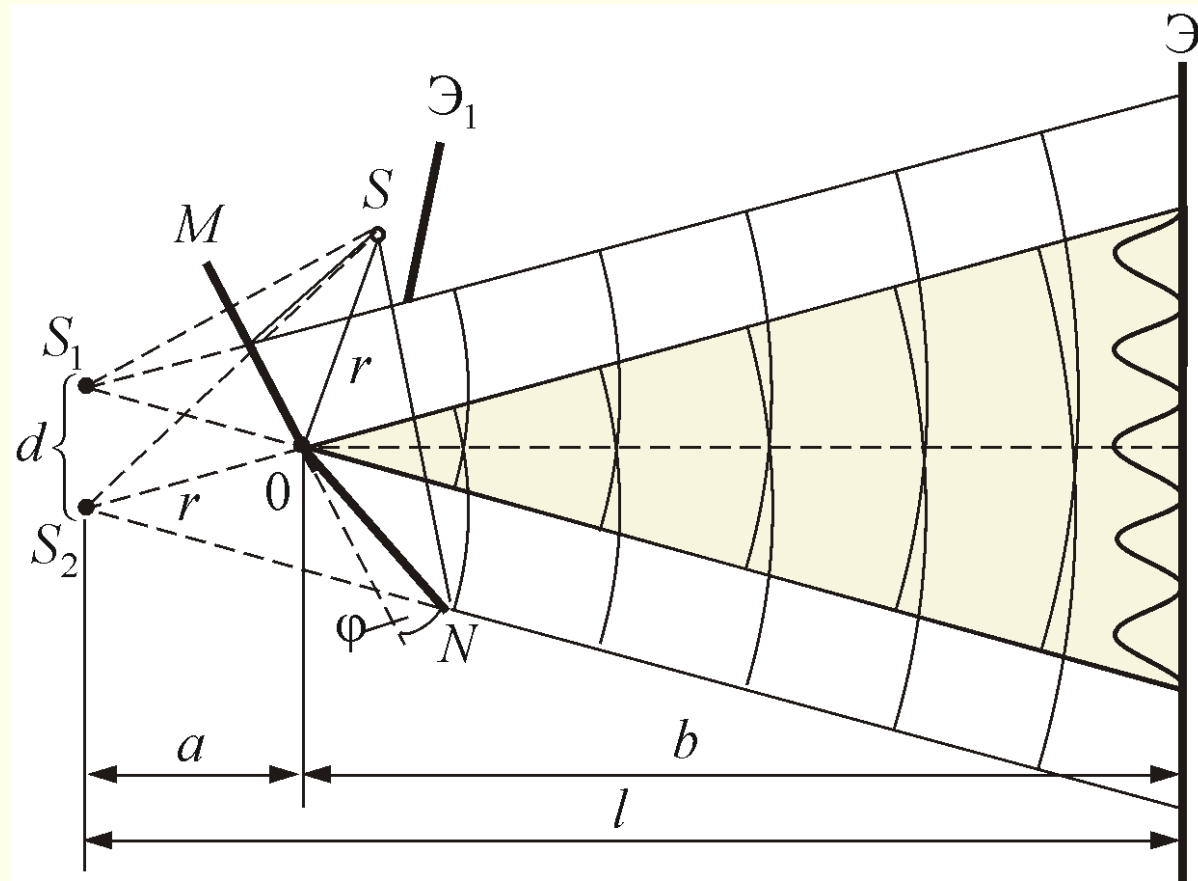
Для некогерентного света (например, белый свет) только для  $m = 0$  максимум для всех длин волн совпадает (в середине экрана наблюдается белое пятно или полоса), а по обе стороны расположены спектрально окрашенные полосы 1, 2 и т.д. порядков.

**2. Бипризма Френеля** состоит из двух одинаковых, сложенных основаниями призм с малыми преломляющими углами. Свет от источника  $S$  преломляется в каждой из призм, за которыми свет распространяется, как от 2-х *мнимых источников*  $S_1, S_2$ .



**3. Зеркала Френеля** – два плоских зеркала, расположенных относительно друг друга под углом  $\leq 180^\circ$ . Свет от источника  $S$ , отражаясь от каждого зеркала, дает 2 мнимых изображения, т.е. 2 мнимых источника  $S_1, S_2$ .

$$\Delta x \approx \frac{\lambda l}{d} = \frac{\lambda(a + b)}{2a\varphi}$$



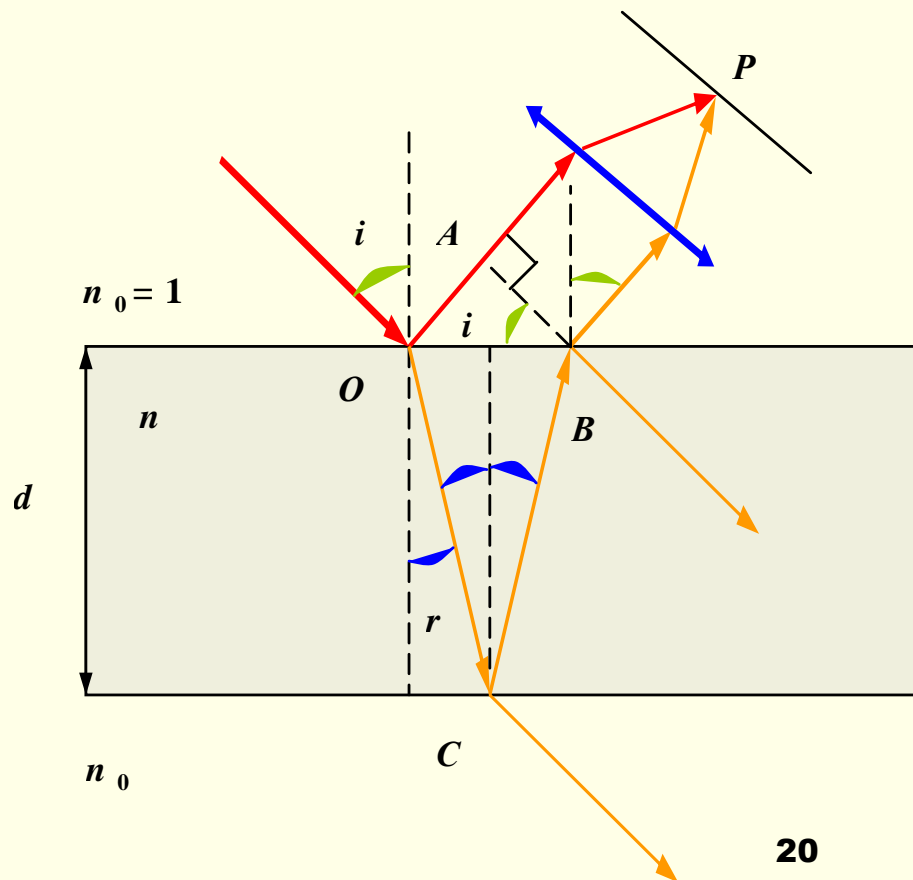
# Интерференция в тонких пленках

Наблюдается в виде радужного окрашивания масляных пленок на воде, мыльных пузырей, оксидных плёнок на металлах.

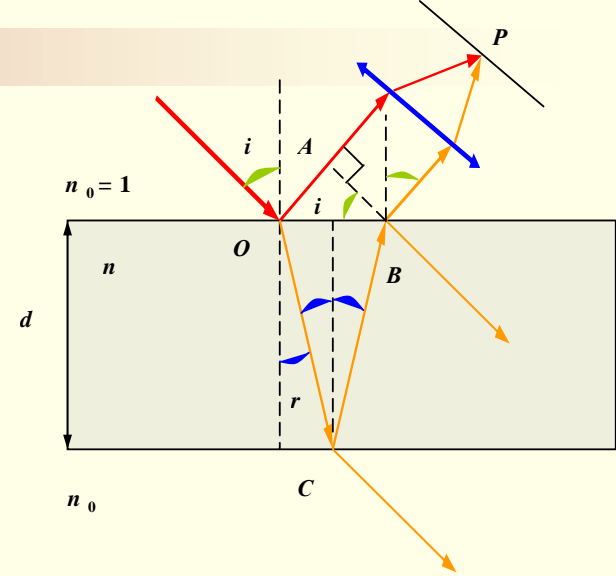
$$\Delta = n(OC + CB) - \left( n_0 \cdot OA \pm \frac{\lambda_0}{2} \right)$$

$\pm \frac{\lambda_0}{2}$  обусловлено потерями

полуволны при отражении  
света от границы раздела.



Если  $n > n_0$ , то потеря полуволны происходит в точке  $O$  при отражении от оптически более плотной среды, т.к. вектор  $E$  в этом случае меняет свою фазу на  $\pi$ .



$n > n_0$  – потеря  $\frac{\lambda_0}{2}$  в точке  $O$ , в уравнении

$$- \frac{\lambda_0}{2}$$

$$\Delta = \dots + \frac{\lambda_0}{2}$$

$n < n_0$  – потеря  $\frac{\lambda_0}{2}$  в точке  $C$ , в уравнении

$$+ \frac{\lambda_0}{2}$$

$$\Delta = \dots - \frac{\lambda_0}{2}$$

В точке  $P$  наблюдается *интерференционный максимум*,  
если

$$2 d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda_0}{2} = \Delta_{\max} = 2 m \frac{\lambda_0}{2},$$

$$2 d n \cos r = (2 m + 1) \frac{\lambda_0}{2}, \quad m = 0, 1, 2 \dots$$

В точке  $P$  наблюдается *интерференционный минимум*,  
если

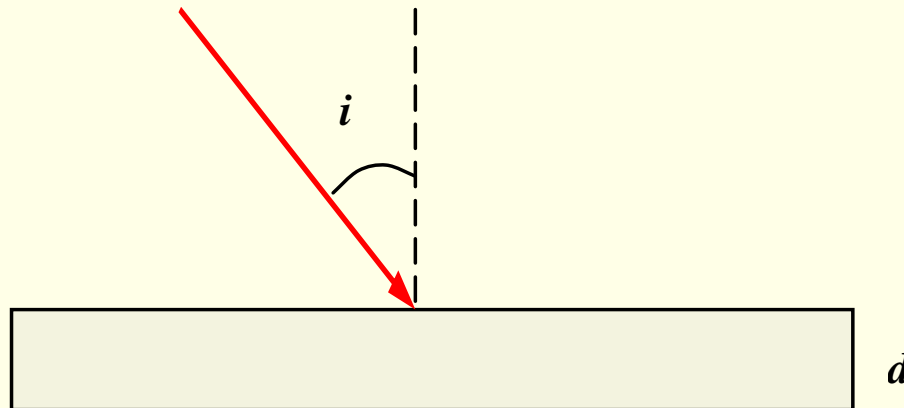
$$2 d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda_0}{2} = \Delta_{\min} = (2 m + 1) \frac{\lambda_0}{2},$$

$$2 d n \cos r = 2 m \frac{\lambda_0}{2}, \quad m = 1, 2 \dots$$

Интерференционная картина наблюдается, если  $2 d < \lambda$ .

## ✓ Плоскопараллельная пластина

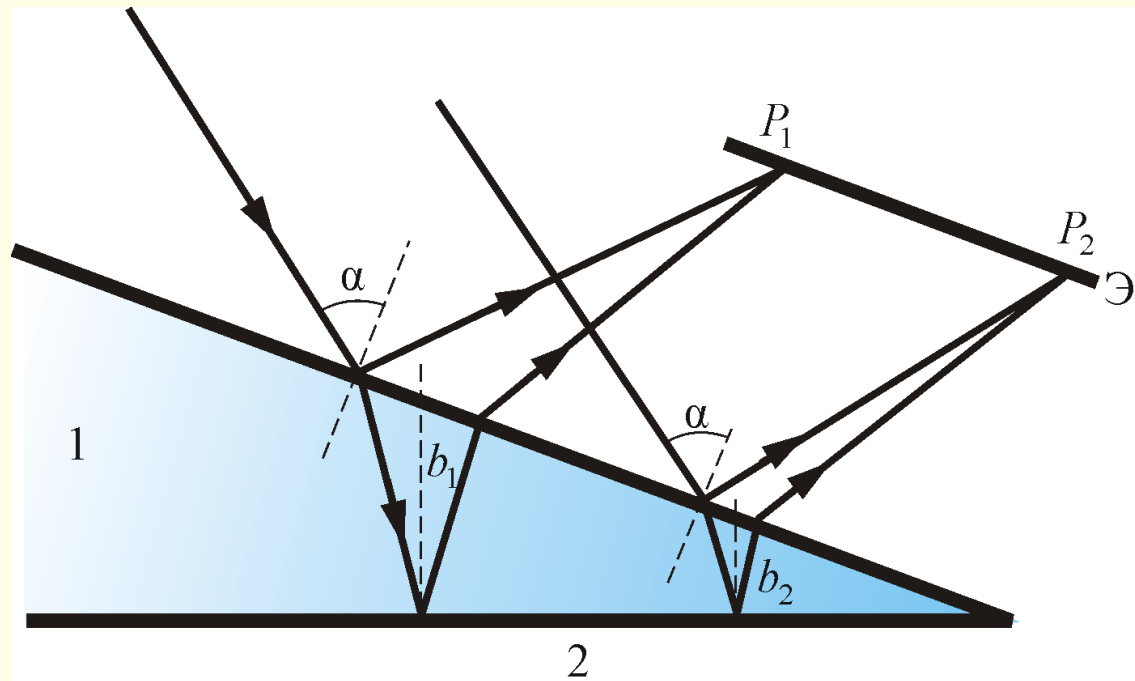
Каждому падающему углу  $i$ , т.е. каждому наклону лучей соответствует своя интерференционная картина. После их отражения и фокусировки с помощью линзы наблюдаются интерференционные **полосы равного наклона**.



## *✓ Пластина переменной толщины.*

В этом случае оптическая разность хода лучей будет зависеть от толщины пластины в месте падения луча. Интерференционные полосы, возникающие в результате наложения лучей, отраженных от мест пластины, имеющих одинаковую толщину, называются полосы равной толщины.

$$\Delta = 2b \sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$







## *Кольца Ньютона*

Кольцевые **полосы**  
**равной толщины**,  
наблюдаемые в  
воздушном зазоре

между соприкасающимися выпуклой сферической поверхностью линзы малой кривизны и плоской поверхностью стекла, называют **кольцами Ньютона**.

Ньютон объяснил это явление на основе корпускулярной теории света.

Оптическая разность хода:

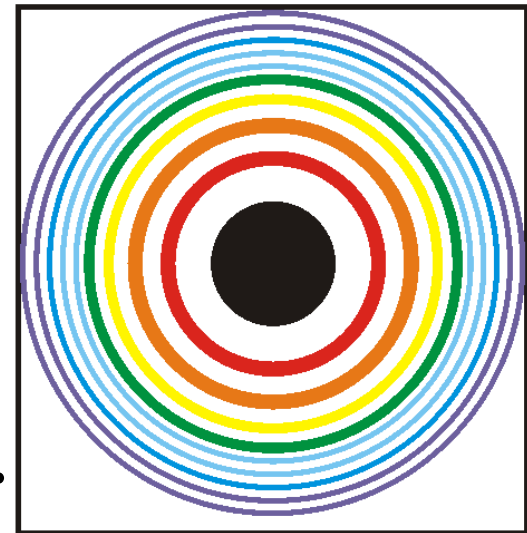
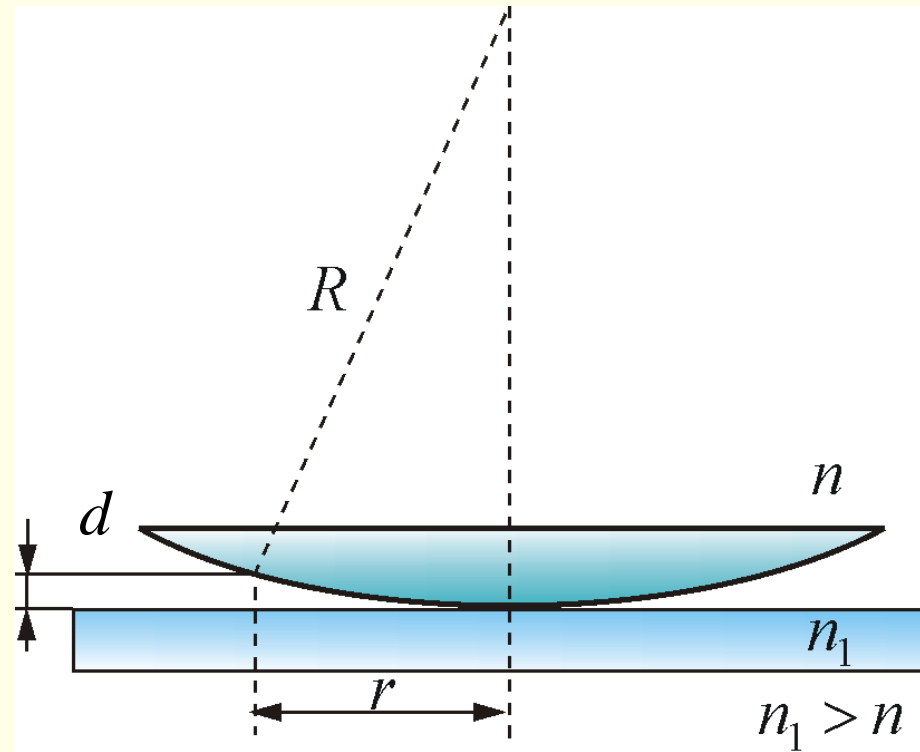
$$\Delta = 2d + \frac{\lambda_0}{2} = 2 \frac{r^2}{2R} + \frac{\lambda_0}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda_0}{2}.$$

В выражении для оптической разности хода член  $\frac{\lambda_0}{2}$  учитывает изменение фазы на  $\pi$  при отражении от пластины.

$$\Delta_{\max} = 2m \frac{\lambda_0}{2} = m \lambda_0$$

$$r_{\max} = \sqrt{\lambda_0 R \left( m - \frac{1}{2} \right)} = \sqrt{\frac{R \lambda_0}{2} (2m - 1)}$$

радиус светлого кольца  $m = 1, 2 \dots$



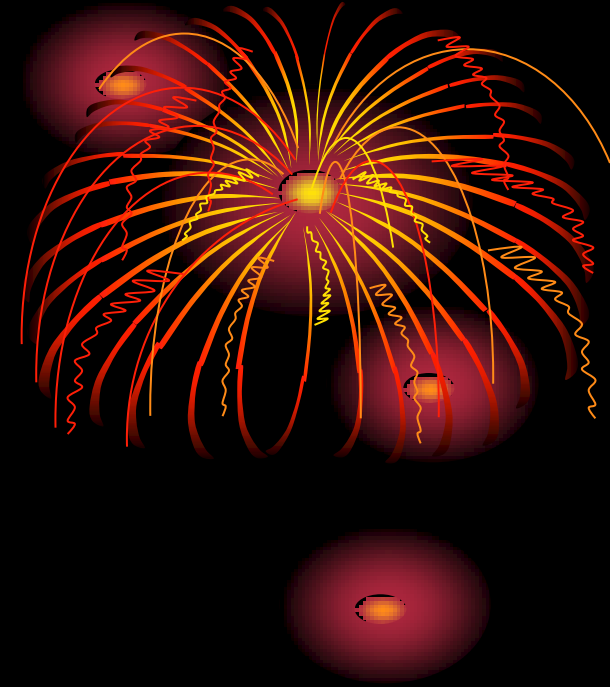
$$\Delta_{\min} = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} = \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda_0 \Rightarrow r_{\min} = \sqrt{\lambda_0 R m}$$

- радиус  
ТЕМНОГО КОЛЬЦА

$m = 0, 1, 2 \dots$ ,  $m = 0$  соответствует  $r = 0$ , т.е. это точка в месте касания пластины и линзы. В этой точке наблюдается минимум интенсивности, обусловленный изменением фазы на  $\pi$  при отражении от пластины.

В проходящем свете луч 2 раза отражается от оптически более плотной среды, поэтому оптическая разность хода для отраженного и проходящего лучей отличаются на  $\frac{\lambda_0}{2}$

Следовательно, уравнению для интерференционного **max** отраженного света соответствует уравнение для **min** проходящего света, а для **min** отраженного – **max** проходящего.



***Конец лекции***