

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

---

# ТЕОРИЯ СВЕТА

***Корпускулярная***

Ньютон – Декарт

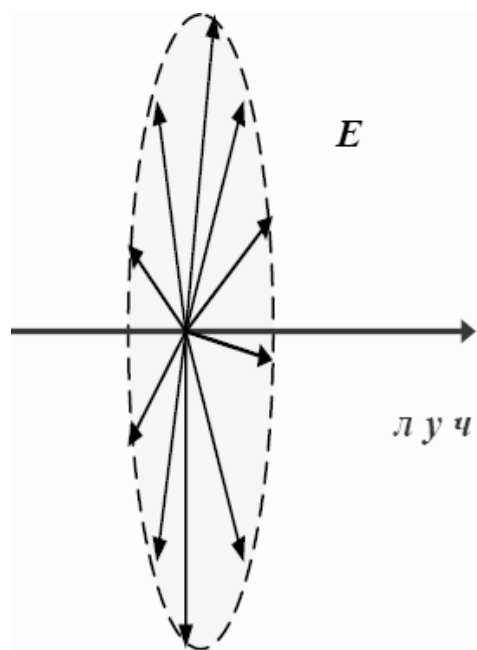
***Волновая***

Гук – Гюйгенс

***Свет представляет собой сложное явление. В одних случаях он ведет как электромагнитная волна, в других как поток частиц (фотонов)***

***Двойственность природы света*** – наличие у него одновременно характерных черт, присущих и волнам, и частицам, – является проявлением ***корпускулярно-волнового дуализма***.

- **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 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.

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

- Энергетическая освещенность  $E_e$ ,  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ .

## 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

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

# Интерференция

- **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.

# Интерференция

- 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*.



# Интерференция

- Рассмотрим две волны одинаковой частоты, накладывающиеся друг на друга и возбуждающие в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

$$x_1 = A_1 \cos \omega \left( t - \frac{S_1}{v_1} \right) \quad x_2 = A_2 \cos \omega \left( t - \frac{S_2}{v_2} \right)$$

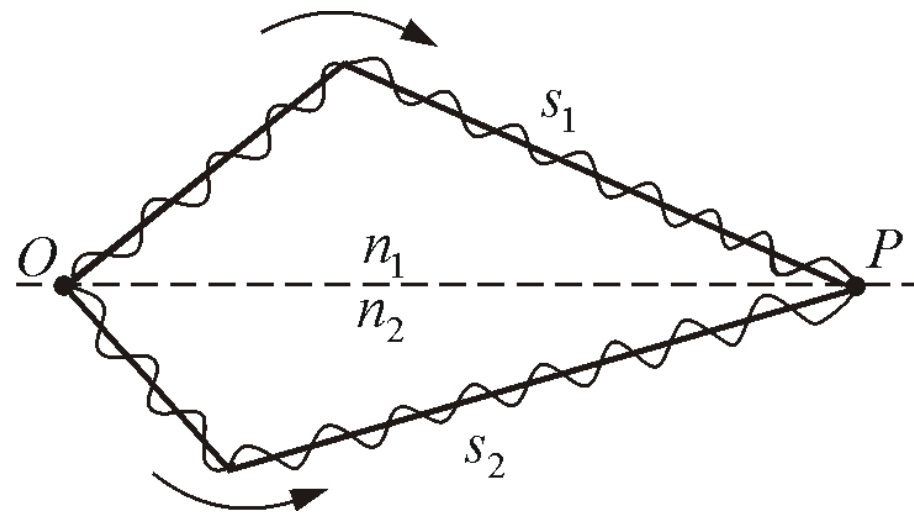
$S$  – геометрический путь.

- Оптический путь в среде с показателем преломления  $n$ :

$$L = n \cdot S .$$

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad \text{и} \quad n_2 = \frac{c}{v_2}$$

где  $v_1, v_2$  – фазовые скорости.



# Интерференция

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

$$\delta = \varphi_1 - \varphi_2 = \omega \left( \frac{S_2}{v_2} - \frac{S_1}{v_1} \right) = \frac{2\pi}{T} \left( \frac{S_2 n_2}{c} - \frac{S_1 n_1}{c} \right) = \frac{2\pi}{Tc} \left( \underbrace{S_2 n_2}_{\substack{\text{отт.} \\ \text{путь}}} - S_1 n_1 \right) =$$
$$= \frac{2\pi}{\lambda_0} \underbrace{(L_2 - L_1)}_{\Delta} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad \text{в вакууме} \quad \lambda_0 = Tc.$$

- $\Delta$  – оптическая разность хода  $\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1$

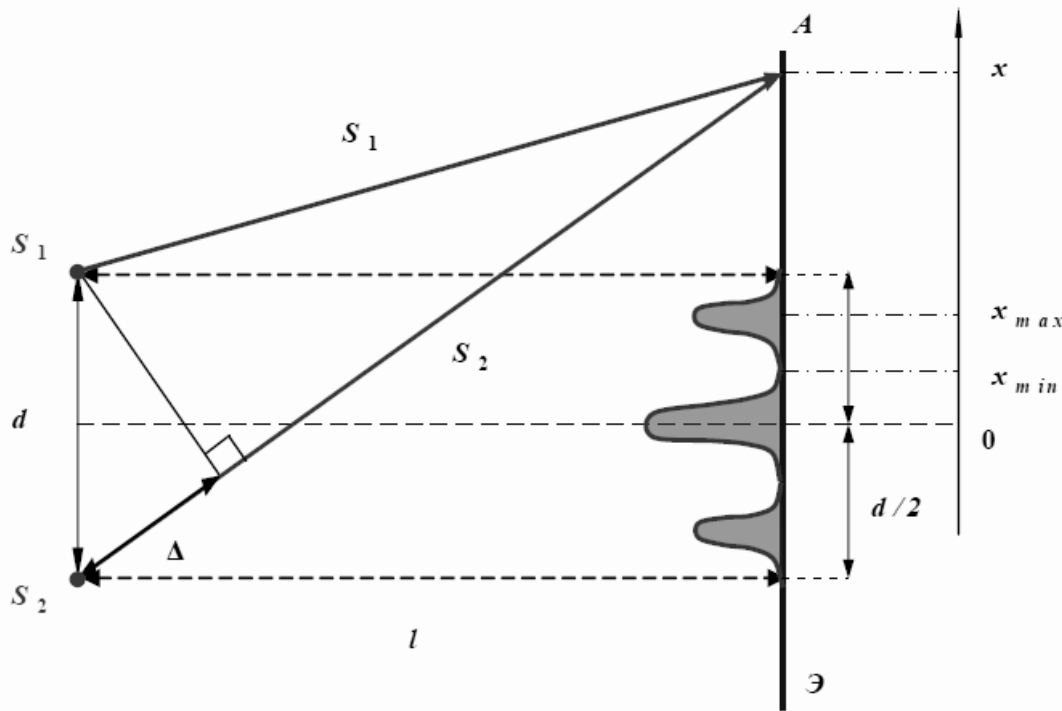
$$\Delta = \pm m \lambda_0 = \pm 2m \frac{\lambda_0}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \Rightarrow \delta = \pm 2m\pi$$

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.

# Интерференционная картина от двух источников



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

Расстояние до экрана Э

$l \gg d$ .

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

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

Оптическая разность хода

$$\Delta = S_2 - S_1.$$

# Интерференционная картина от двух источников

- 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.

# Интерференционная картина от двух источников

- 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* тах в точке 0,  $m = n$  – максимум  $n$ -го порядка.

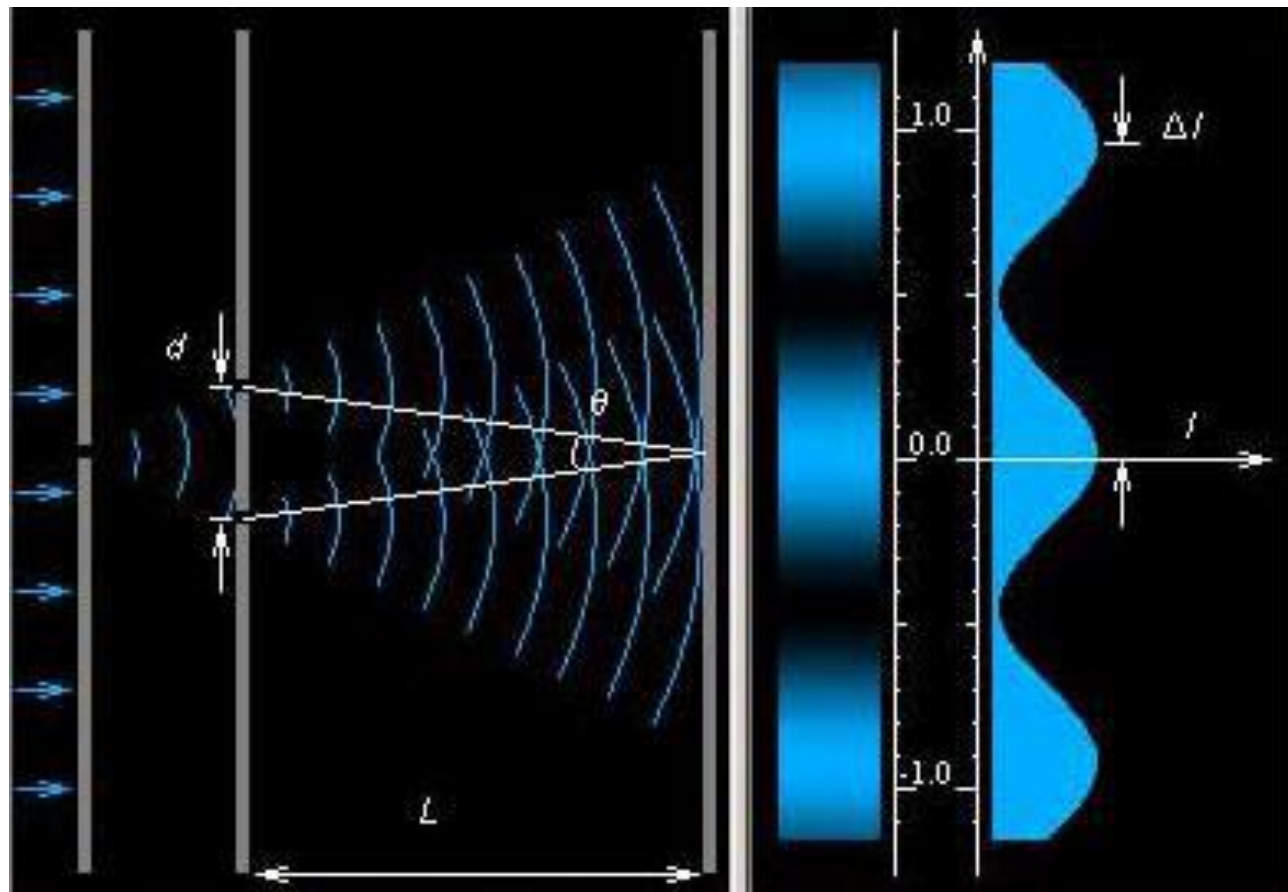
$$x_{\max; \min} = f(\lambda_0); \quad \Delta x = f(\lambda_0) \Rightarrow$$

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.

# Способы наблюдения интерференции света

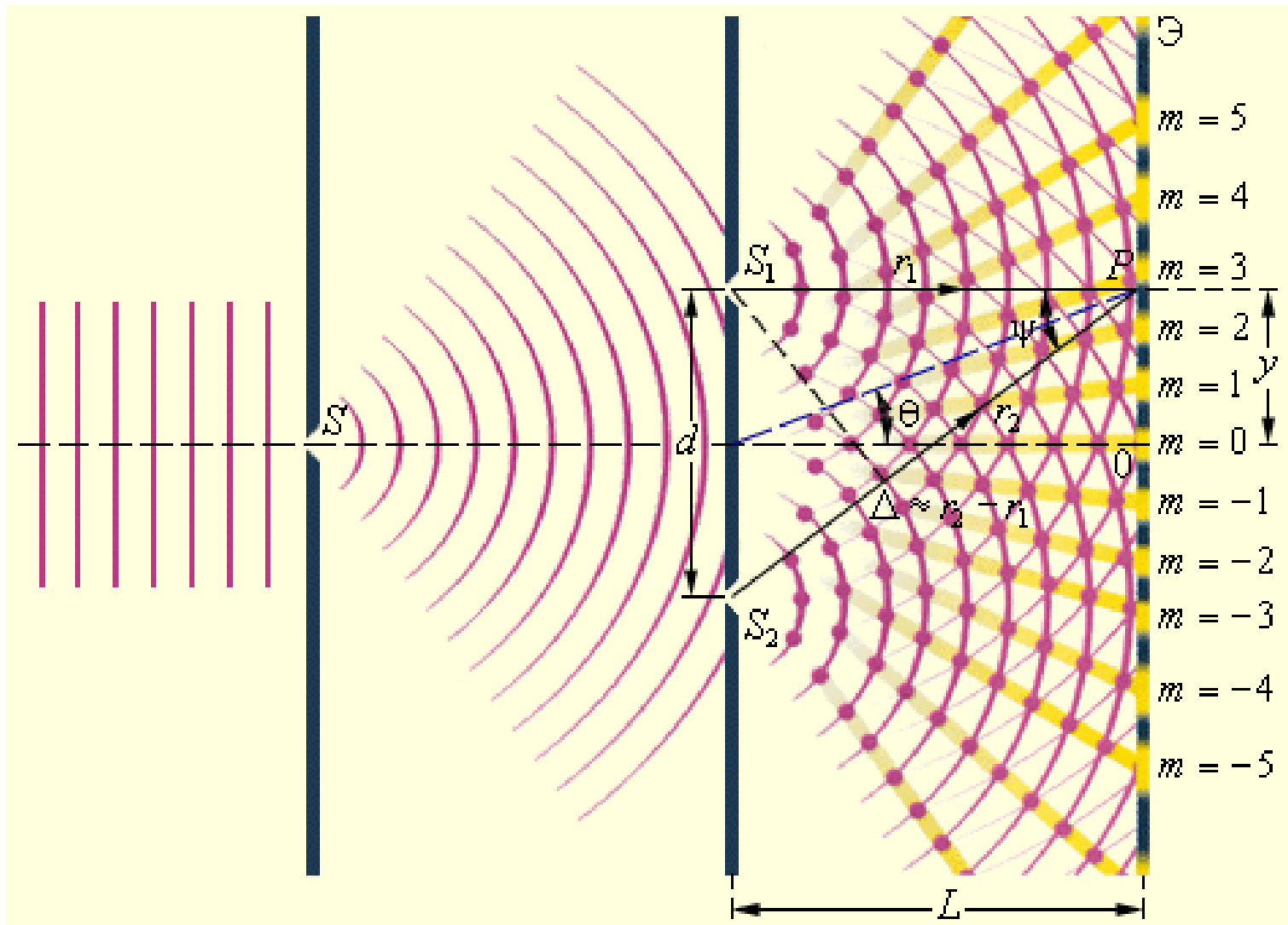
- **Метод Юнга.**

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.

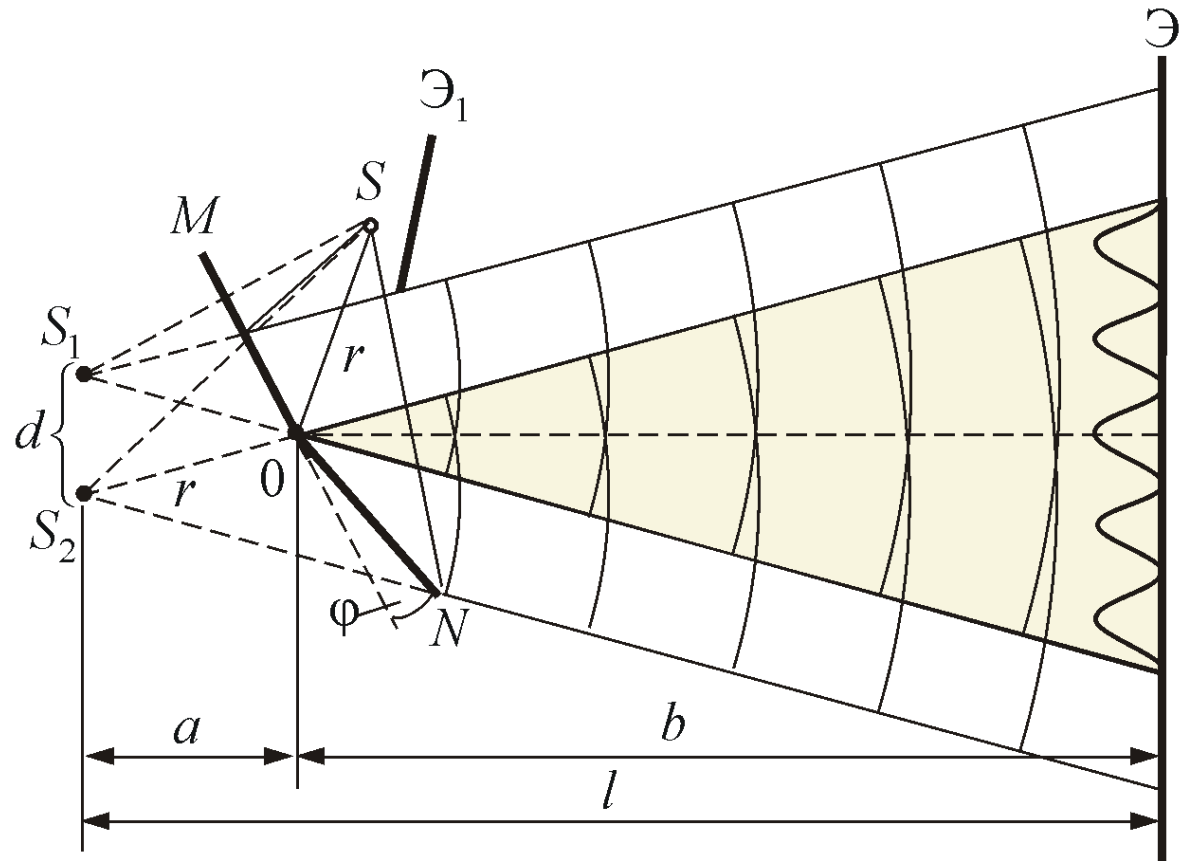
Главный максимум, соответствующий  $m=0$  проходит через точку 0. Вверх и вниз от него располагаются максимумы (минимумы) первого  $m=1$ , второго  $m=2$  порядков, и т. д.



# Способы наблюдения интерференции света

- **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  $S_1, S_2$ .

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



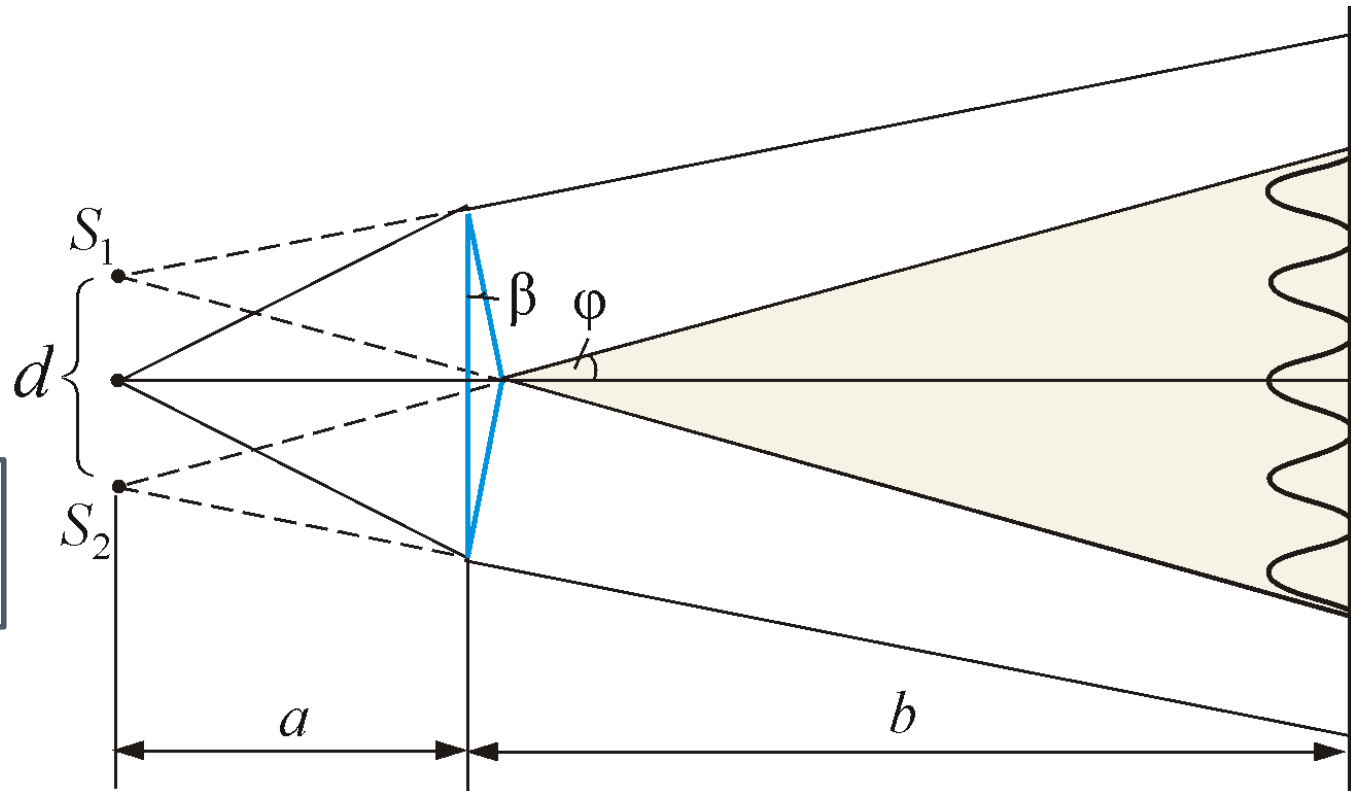


# Способы наблюдения интерференции света

- **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  $S_1, S_2$ .

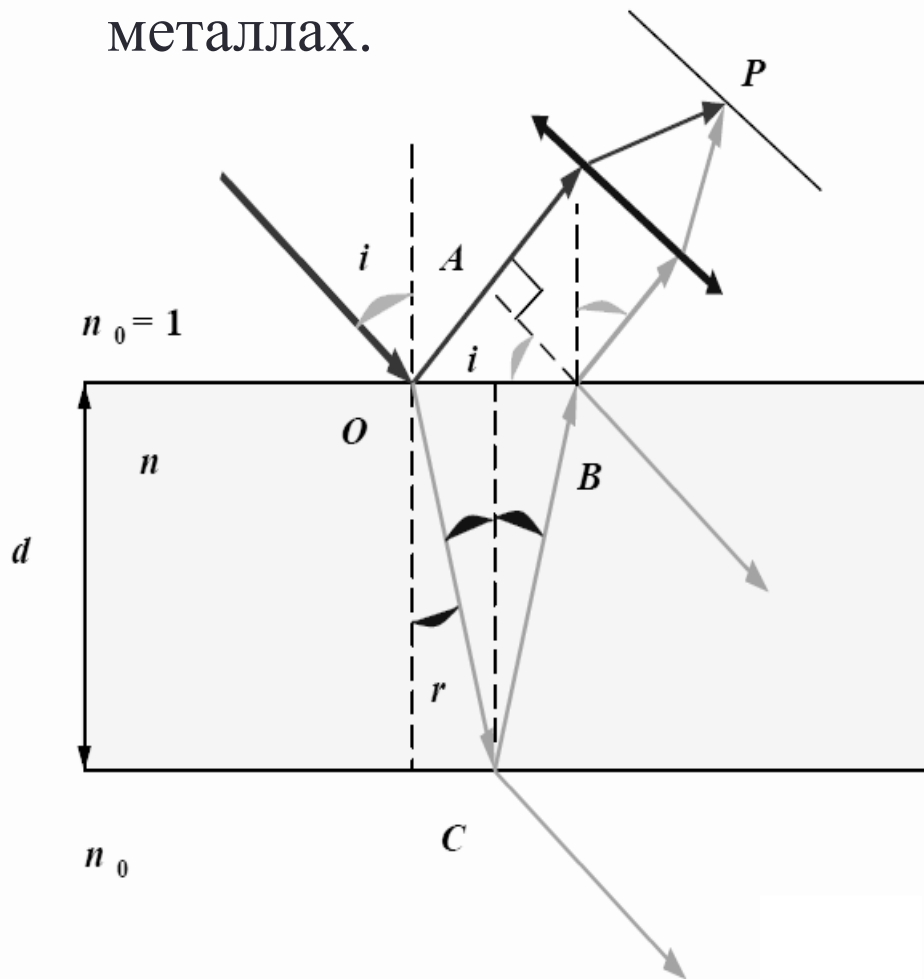
$$\varphi = (n-1)\beta$$

$$\Delta x = \frac{a+b}{2a(n-1)\beta} \lambda$$



# Интерференция в тонких пленках

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

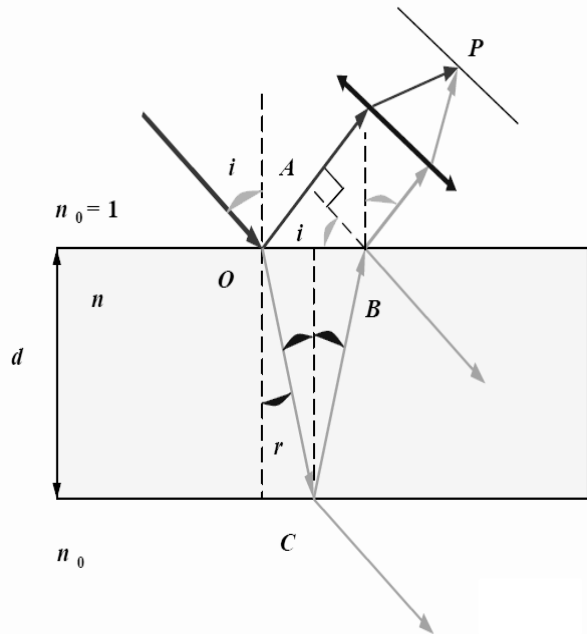


$$\Delta = n(OC + CB) - \left( n_0 \cdot OA \pm \frac{\lambda_0}{2} \right)$$

$\pm \frac{\lambda_0}{2}$  обусловлено потерями полуволны при отражении света от границы раздела.

$$2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda_0}{2}$$

# Интерференция в тонких пленках



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  $\lambda_0/2$  в точке  $O$ , в уравнении

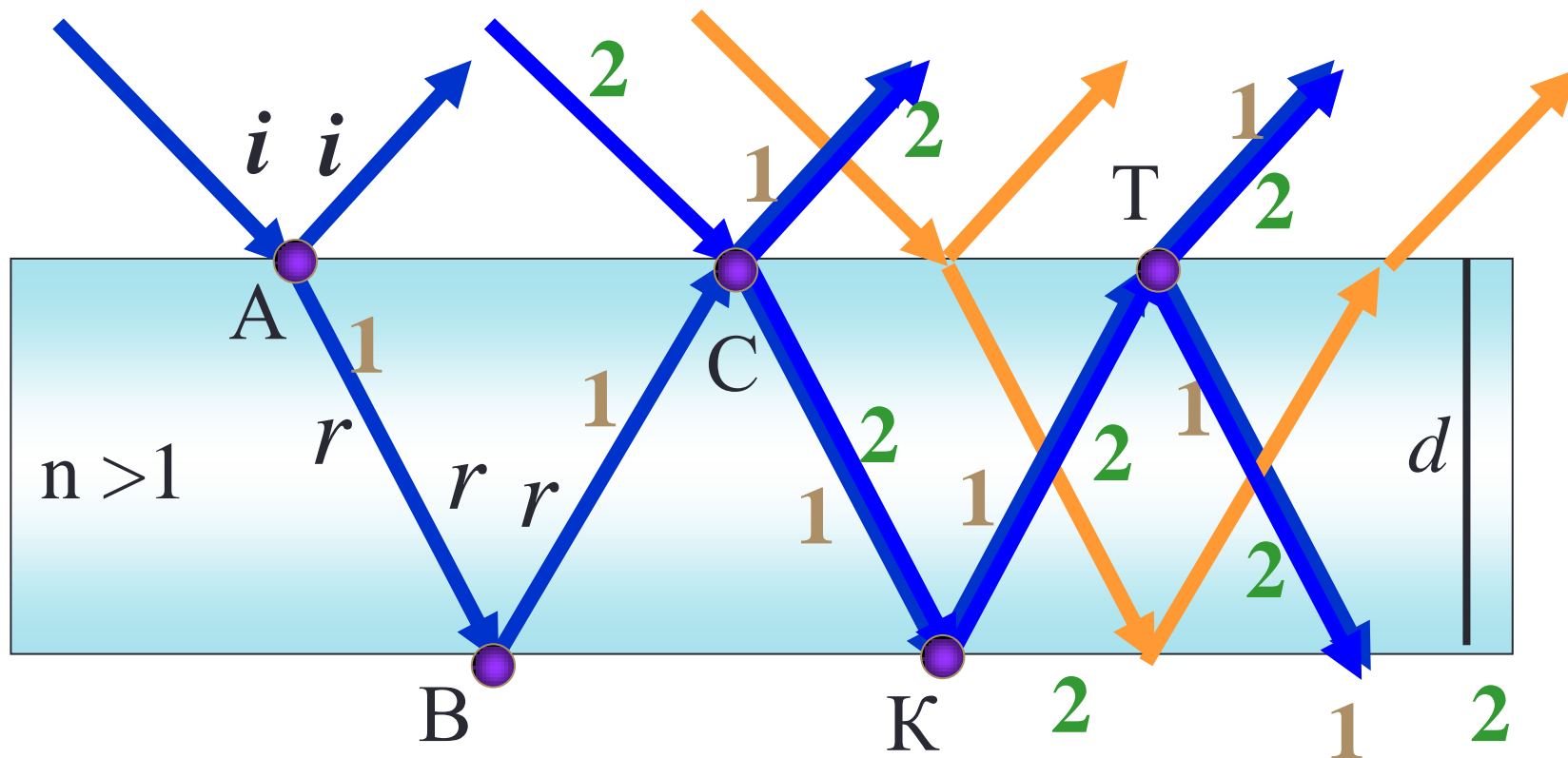
$$\Delta = \dots - \frac{\lambda_0}{2} + \frac{\lambda_0}{2}$$

•  $n < n_0$  – потеря  $\lambda_0/2$  в точке  $C$ , в уравнении

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

# Плоскопараллельная пластинка

- Каждый луч, падающий на границу раздела 2-х сред многократно отражается и преломляется.



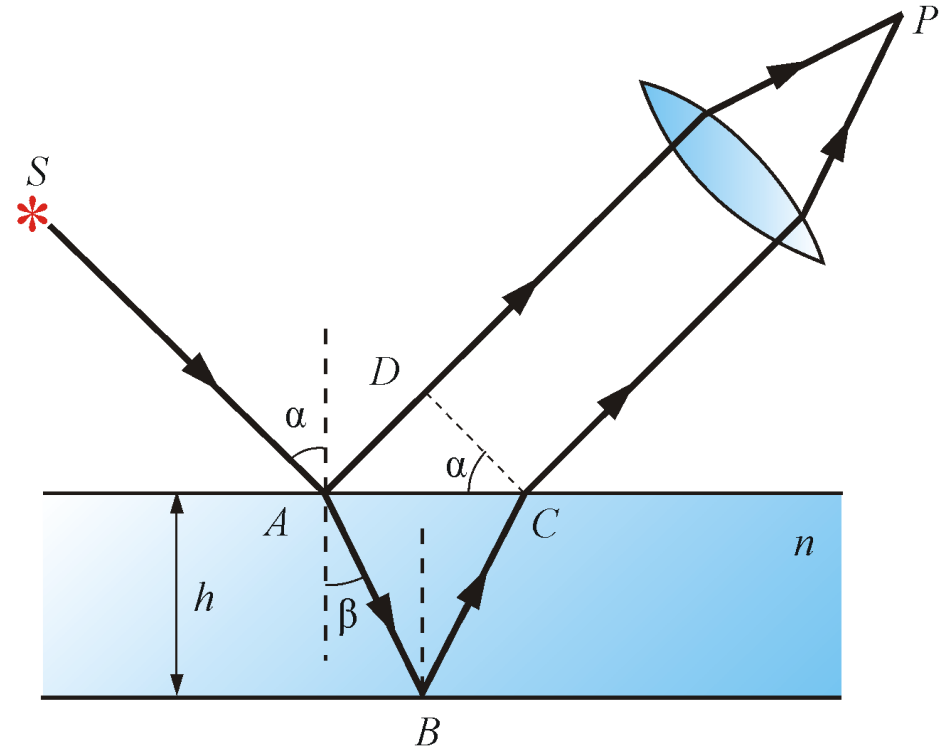
# Плоскопараллельная пластинка

Оптическая разность хода  
(с учетом потери полуволны):

$$2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda_0}{2}$$

$$\Delta = 2m \frac{\lambda_0}{2} \quad \begin{array}{l} \text{- max} \\ \text{интерференции} \end{array}$$

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \quad \begin{array}{l} \text{- min} \\ \text{интерференции} \end{array}$$



# Плоскопараллельная пластинка

- 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

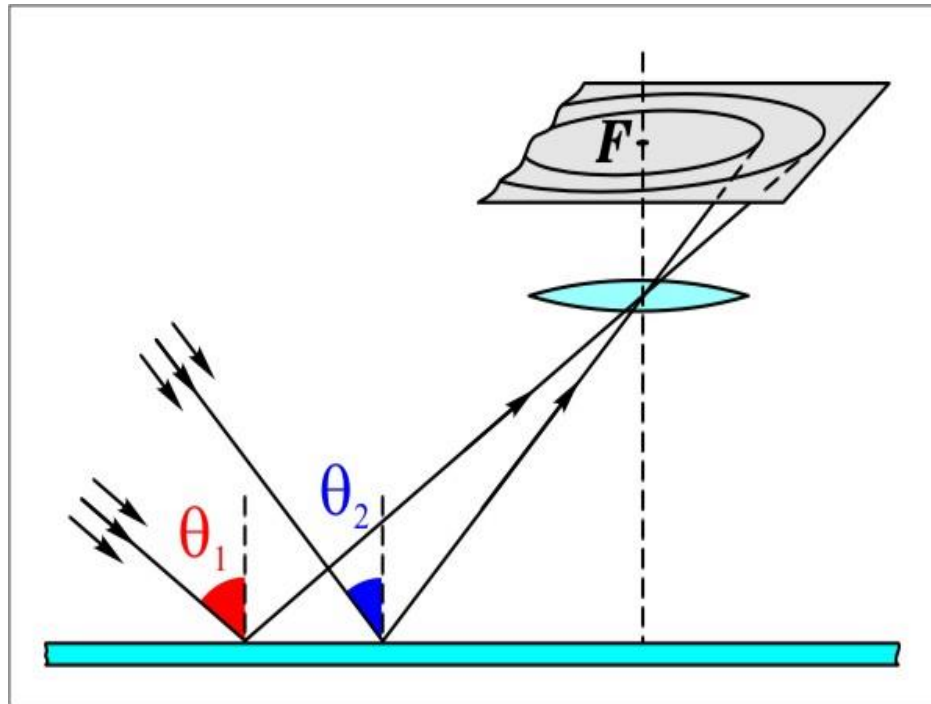
$$2 d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda_0}{2} = \Delta_{\min} = (2 m + 1) \frac{\lambda_0}{2},$$

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

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

# Плоскопараллельная пластинка

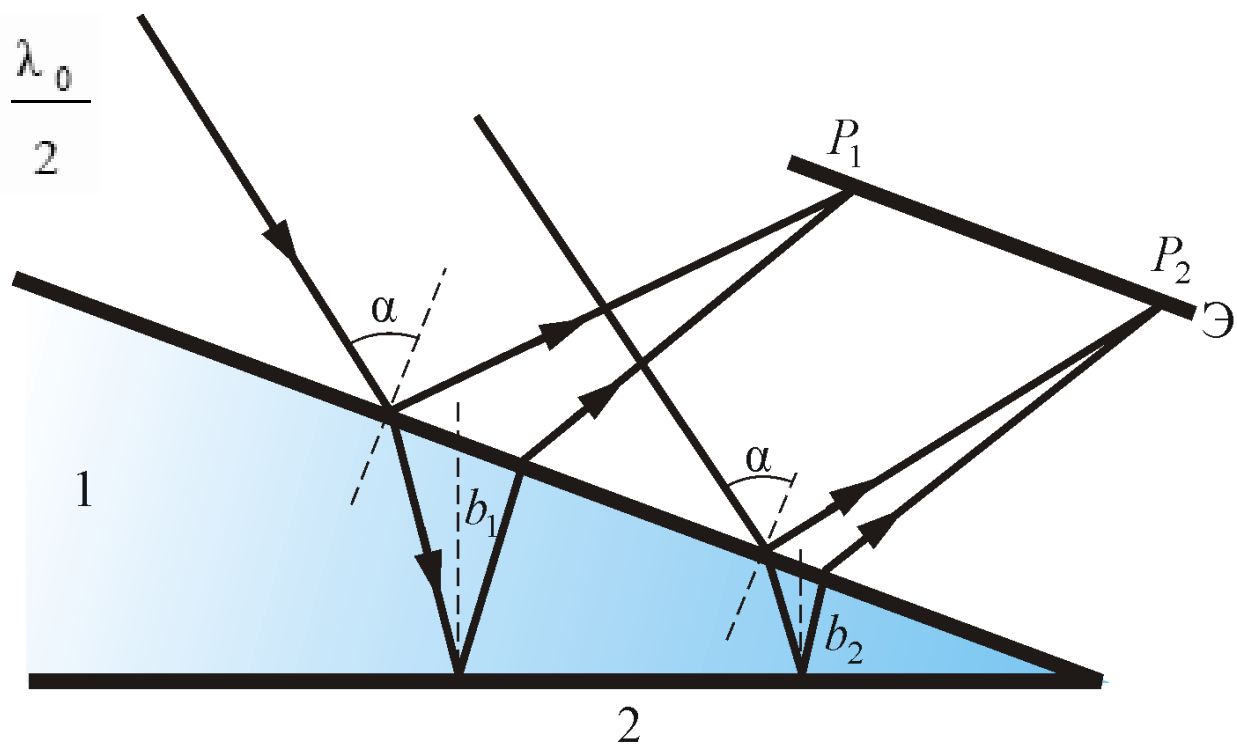
- Каждому падающему углу  $\theta$ , т.е. каждому наклону лучей соответствует своя интерференционная картина.
- После их отражения и фокусировки с помощью линзы наблюдаются интерференционные полосы равного наклона.



# Пластинка 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*.

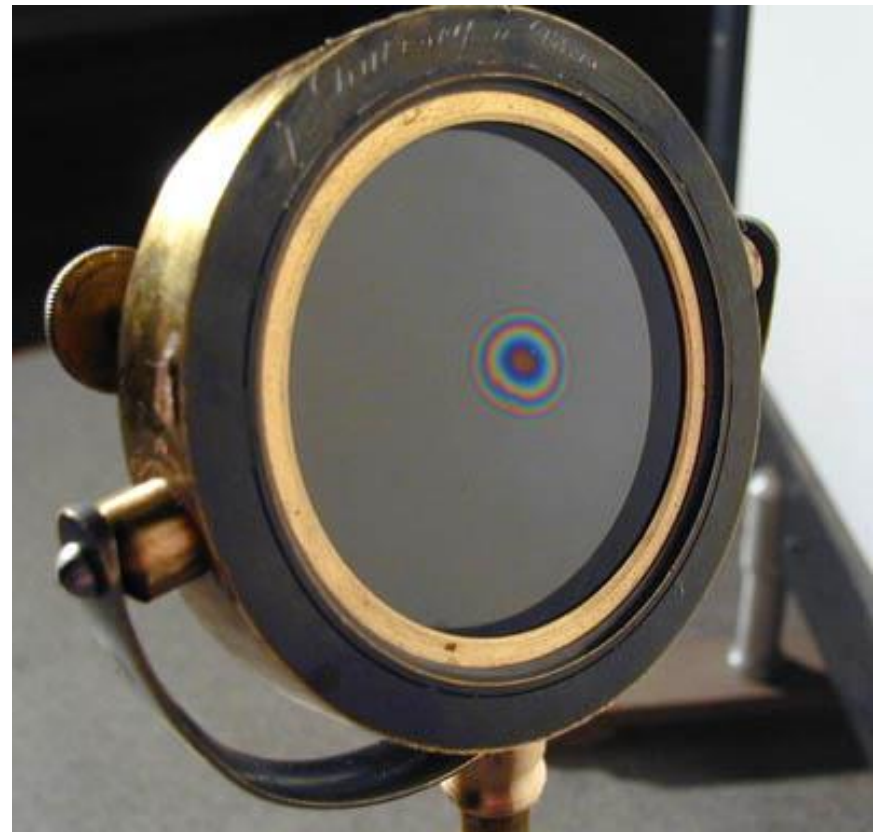
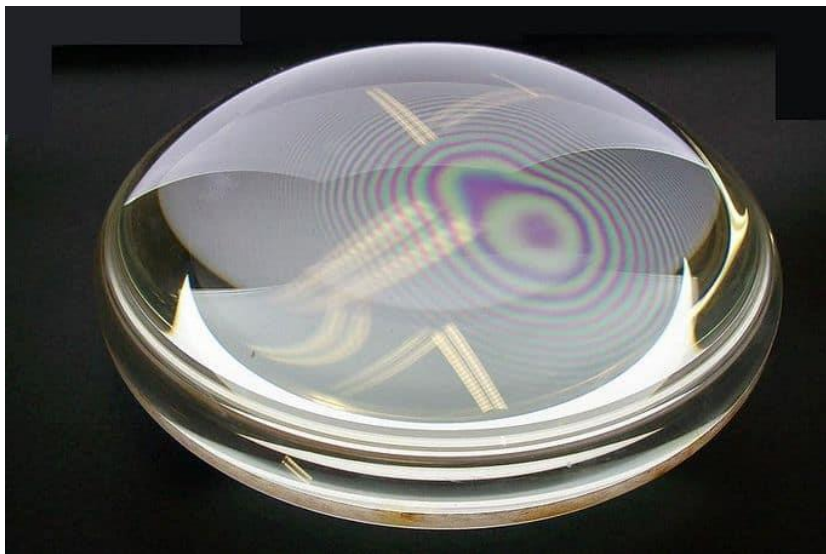
$$\Delta = 2b \sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$





# 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**.

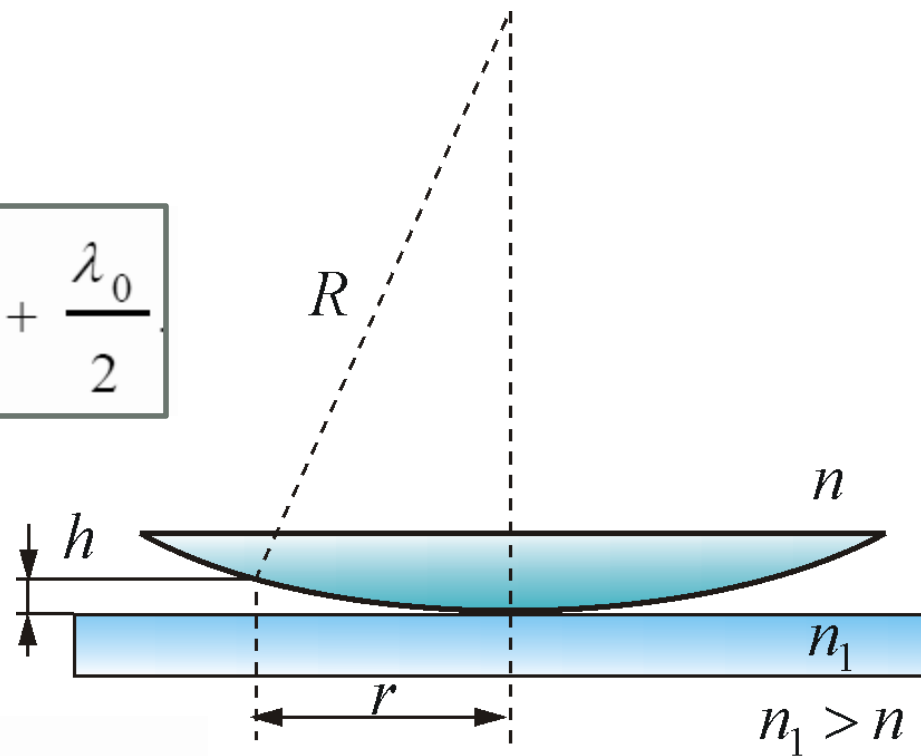


# Кольца Ньютона

- Оптическая разность хода:

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

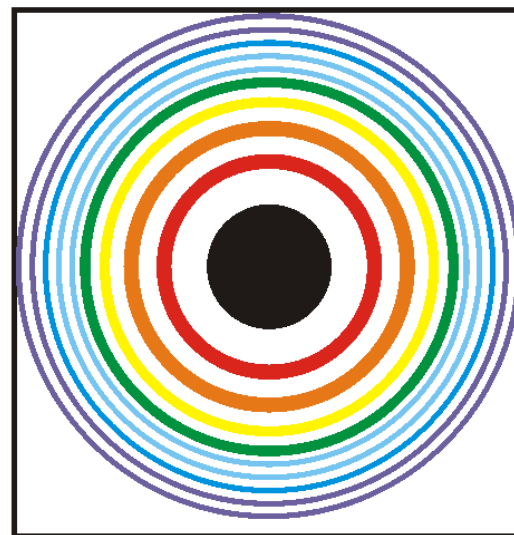
В выражении для оптической разности хода член  $\lambda_0/2$  учитывает изменение фазы на  $\pi$  при отражении от пластины.



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

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

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



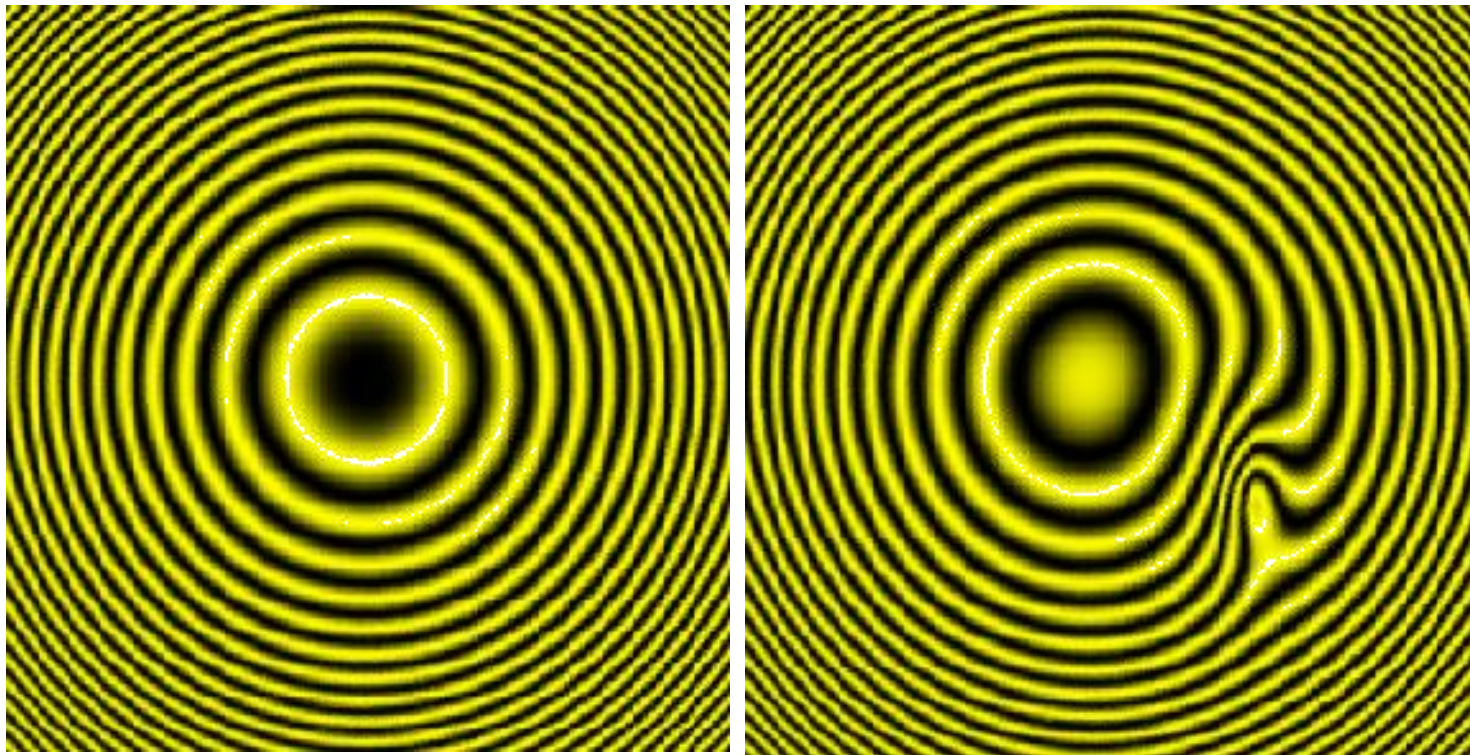
# Кольца Ньютона

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

- 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.

# Применение интерференции света

- По интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды



# Интерферометр Майкельсона

Для наблюдения интерференционных полос равного наклона вместо плоскопараллельной пластинки можно использовать интерферометр Майкельсона:

