

# Концепции и модели физики

Кузьмичев Сергей Дмитриевич



## Содержание лекции №2

1. Волновая теория света. Электромагнитные волны.
2. Интерференция монохроматического света от точечных источников. Когерентность.
3. Роль поляризации света при интерференции.
4. Схема Юнга. Ширина интерференционных полос. Основные характеристики интерференционной схемы.
4. Основные интерференционные схемы и их характеристики.
5. Кольца Ньютона.
6. Интерференция в плёнках и пластинках.

# О волновой природе света

Согласно волновой теории света, он представляет собой электромагнитную волну (электромагнитные волны).

Волновая теория света (Гюйгенс, Френель) даёт объяснение таким явлениям как **интерференция, дифракция и дисперсия света.**

Волновая теория света (электромагнитного излучения) получила своё развитие в работах Максвелла (уравнения Максвелла).

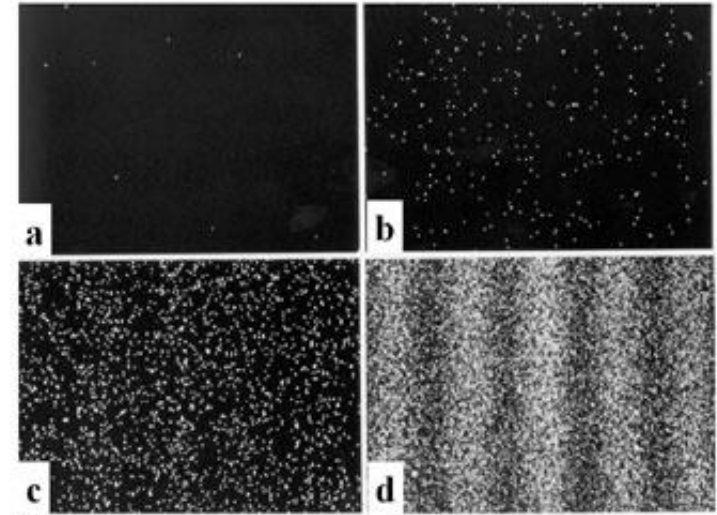
## О волновой природе света

**Интерференция света** — пространственное *перераспределение интенсивности* света в результате наложения (суперпозиции) нескольких *когерентных* световых волн. Это явление сопровождается чередующимися в пространстве максимумами и минимумами интенсивности. Её пространственное распределение называется интерференционной картиной.

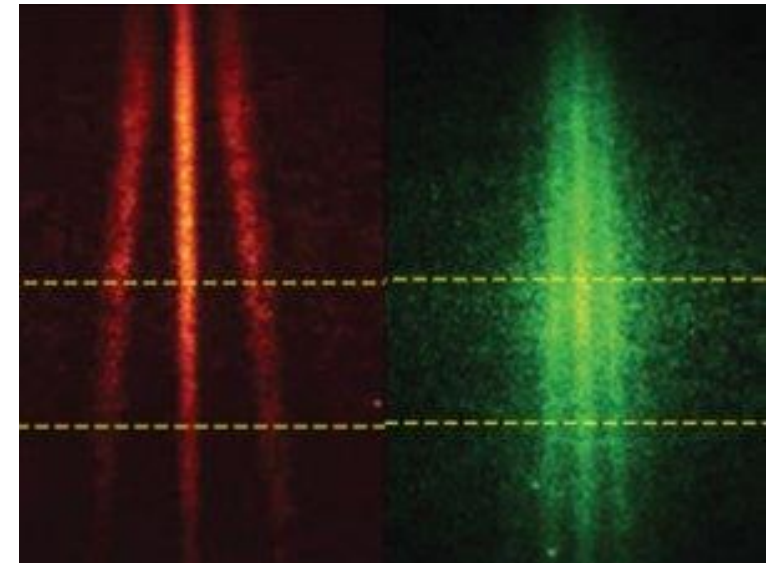
**Дифракция волн** — явление, которое проявляет себя как отклонение от законов геометрической оптики при распространении волн.

**Дисперсия света** — это явление, обусловленное зависимостью оптических характеристик среды (например, абсолютного показателя преломления вещества) от частоты (или длины волны) света.

Эти явления наблюдаются для волновых полей *разной природы* (звуковые волны, волны на поверхности воды) и характеризуются одними и теми же законами.



Single-electron Build-up of Interference Pattern



# Плоские и сферические монохроматические волны

$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{a} \cdot \cos(\vec{k}\vec{r} - \omega t)$ ,  $\vec{a} = \text{const}$ , - уравнение плоской волны, амплитуда

$$\Phi = \vec{k}\vec{r} - \omega t, \quad k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

- фаза волны, волновой вектор,  
длина волны

$$\Phi = \text{const}$$

- уравнение поверхности постоянной фазы  
(волновая поверхность - плоскость)

$E(r, t) = \frac{a_0}{r} \cdot \cos(kr - \omega t)$ ,  $a_0 = \text{const}$ ,

- уравнение сферической волны,  
амплитуда зависит от  $r$

$$\Phi = kr - \omega t, \quad k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

- фаза волны

$\Phi = kr - \omega t = \text{const}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

- уравнение поверхности постоянной фазы  
(волновой поверхность - сфера)

# Комплексная амплитуда монохроматической волны

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}) \cdot \cos(\vec{k}\vec{r} - \omega t) = \vec{A} \cdot \cos(\varphi(\vec{r}) - \omega t)$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re} \left( \vec{A}(\vec{r}) \cdot e^{i(\varphi(\vec{r}) - \omega t)} \right)$$

$$\vec{f}(\vec{r}) = \vec{A}(\vec{r}) \cdot e^{i\varphi(\vec{r})}$$

$\vec{f}(\vec{r}) = \vec{A}(\vec{r}) \cdot e^{i\varphi(\vec{r})}$  - комплексная амплитуда волны в данной точке.

Средняя интенсивность света при регистрации фотодетектором

$$I(\vec{r}, t) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{c}{2} E^2(\vec{r}, t) dt$$

$$\lambda = 600 \text{ нм}, \quad T = \frac{\lambda}{c} = \frac{600 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 2 \cdot 10^{-15} \text{ с}, \quad \tau \gg T$$

# Принцип суперпозиции и интерференция монохроматических волн одинаковой частоты

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad \vec{f}(\vec{r}) = \vec{A}(\vec{r}) \cdot e^{i\varphi(\vec{r})} \quad \vec{f} = \vec{f}_1 + \vec{f}_2$$

$$I = \overline{(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^2} = \overline{\vec{E}_1^2} + \overline{\vec{E}_2^2} + 2\overline{\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2}, \quad I = |\vec{f}|^2 = \vec{f} \cdot \vec{f}^* = (\vec{f}_1 + \vec{f}_2) \cdot (\vec{f}_1^* + \vec{f}_2^*)$$

$$I_1 = \overline{\vec{E}_1^2}, \quad I_2 = \overline{\vec{E}_2^2}, \quad I_{12} = 2\overline{\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2} \quad I_1 = |\vec{f}_1|^2 = \vec{f}_1 \cdot \vec{f}_1^*, \quad I_2 = |\vec{f}_2|^2 = \vec{f}_2 \cdot \vec{f}_2^*,$$

$$I = I_1 + I_2 + I_{12}$$

$$I_{12} = \vec{f}_1 \cdot \vec{f}_2^* + \vec{f}_2 \cdot \vec{f}_1^*$$

$$I \neq I_1 + I_2$$

$$I = I_1 + I_2 + I_{12}$$

$$I_1 = |\vec{A}_1|^2, \quad I_2 = |\vec{A}_2|^2, \quad I_{12} = 2 \cdot |\vec{A}_1 \cdot \vec{A}_2| \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1),$$

$$I = |\vec{A}_1|^2 + |\vec{A}_2|^2 + 2 \cdot |\vec{A}_1 \cdot \vec{A}_2| \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$



# Принцип суперпозиции и интерференция

$$I_1 = |\vec{A}_1|^2, \quad I_2 = |\vec{A}_2|^2, \quad I_{12} = 2 \cdot |\vec{A}_1 \cdot \vec{A}_2| \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1),$$

$$I = |\vec{A}_1|^2 + |\vec{A}_2|^2 + 2 \cdot |\vec{A}_1 \cdot \vec{A}_2| \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

$I_{12} = 2 \cdot |\vec{A}_1 \cdot \vec{A}_2| \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$  - интерференционное слагаемое

- Интерференция света возникает при наложении двух и более пучков света
- Источники света должны быть когерентными
- Когерентные источники света - монохроматические источники с фиксированной разностью фаз  $\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi(\vec{r}) = \text{const}$  для каждой точки наблюдения
- О роли поляризации излучения

# Интерференция сферических волн

$$E(r, t) = \frac{a}{r} \cdot \cos(\omega t - kr) = A(r) \cdot \cos(\omega t - kr)$$

$$E_1(r_1, t) = A_1(r_1) \cdot \cos(\omega t - kr_1),$$

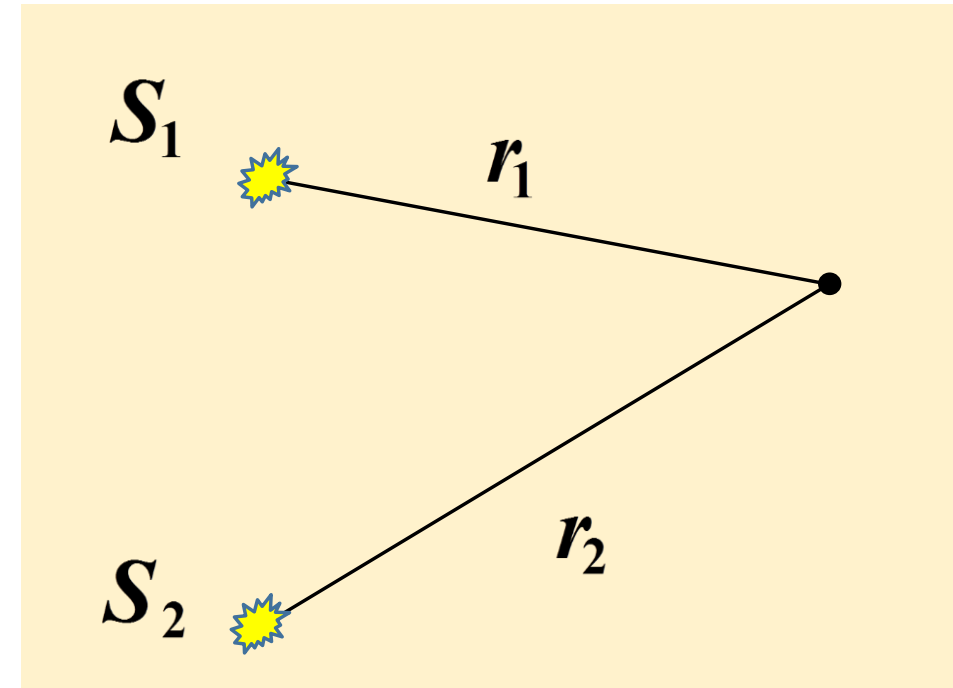
$$E_2(r_2, t) = A_2(r_2) \cdot \cos(\omega t - kr_2)$$

$$I(r_1, r_2) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cdot \cos[k(r_2 - r_1)]$$

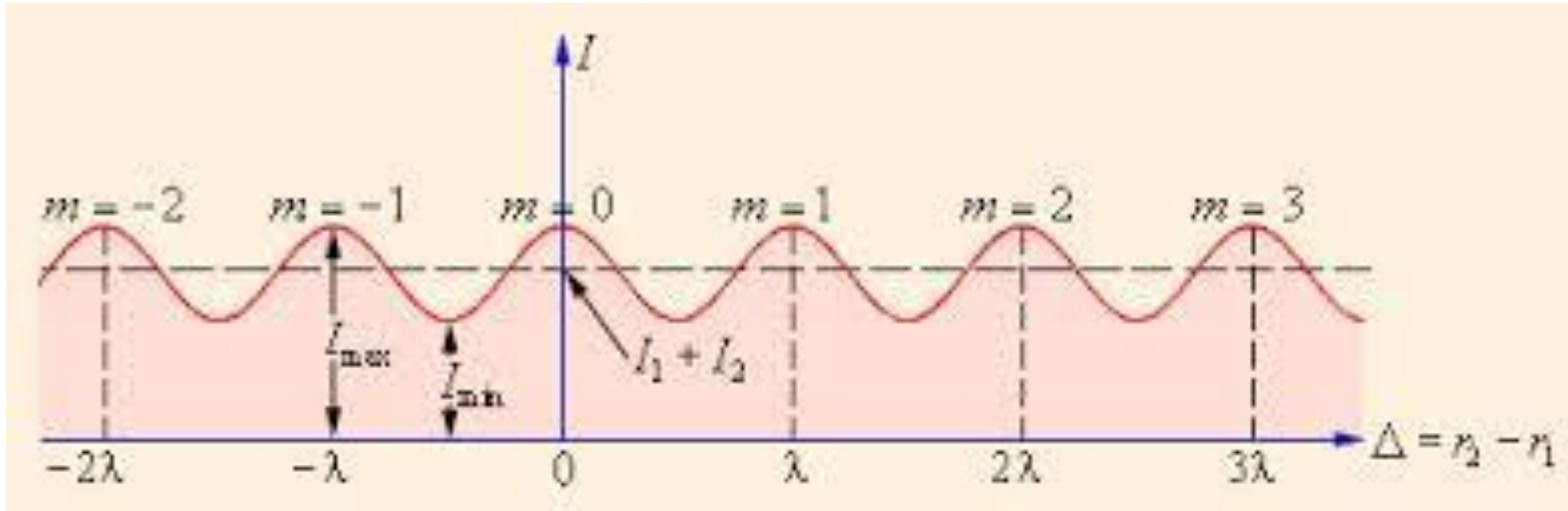
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

$$\delta = k(r_2 - r_1) = k \cdot \Delta$$

$$\Delta = r_2 - r_1 \quad - \quad \text{разность хода}$$



# Интерференция сферических волн



$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad \delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (r_2 - r_1)$$

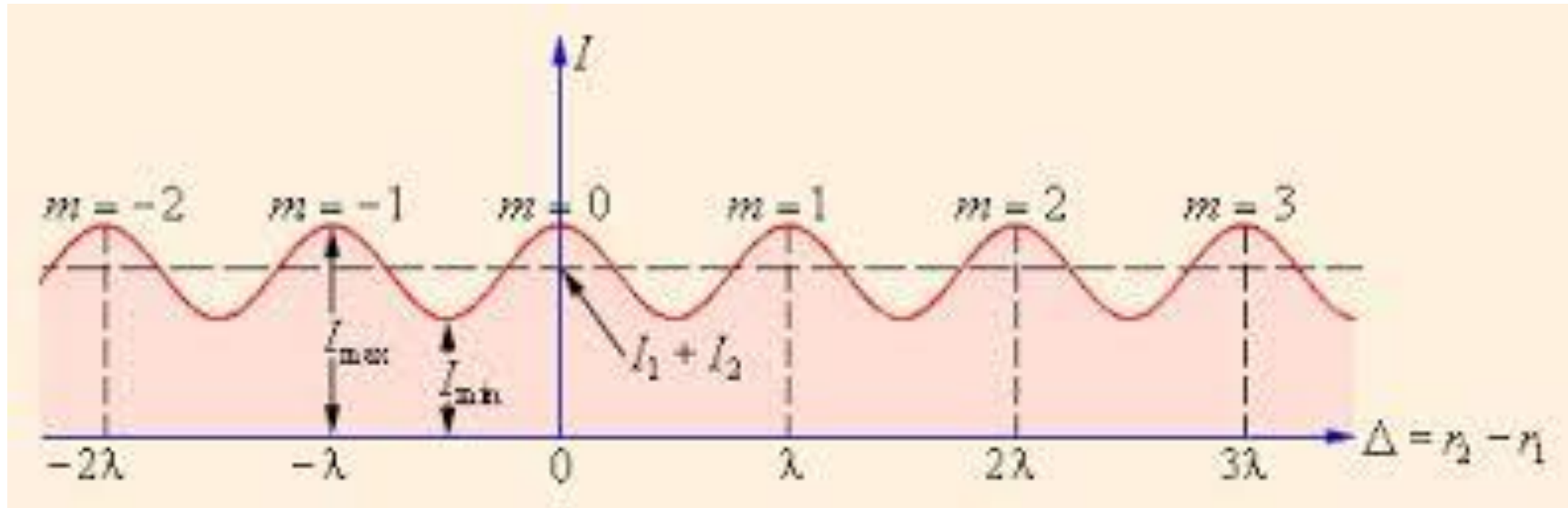
$$I = I_{max} = (A_1 + A_2)^2, \quad \cos \delta = 1, \quad \delta = 2\pi m, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$I = I_{min} = (A_1 - A_2)^2, \quad \cos \delta = -1, \quad \delta = \pi(2m + 1), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$m$  - порядок интерференции

Вид интерференционной картины зависит от расположения экрана

# Видность интерференционной картины



$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$$

$$V = V_{max} = 1 \text{ при } I_1 = I_2 = I_0 \quad I = 2I_0 \cdot (1 + \cos \delta)$$

$$V \rightarrow 0 \quad I_1 \ll I_2, \quad I_1 \gg I_2$$

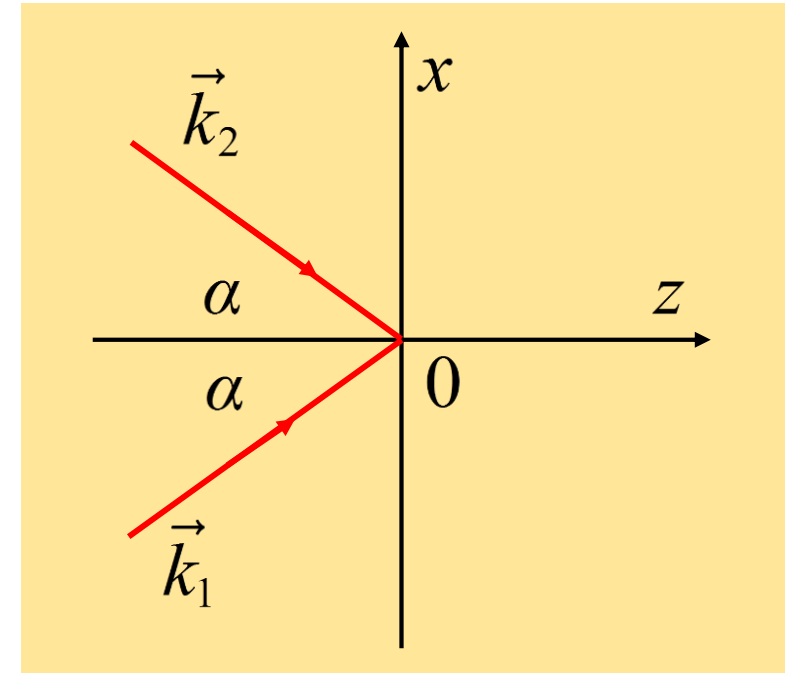
# Интерференция плоских волн

$$E_1 = A_1 \cdot e^{i(k_{1x}x + k_{1z}z)},$$

$$k_{1x} = k \cdot \sin \alpha, \quad k_{1z} = k \cdot \cos \alpha,$$

$$E_2 = A_2 \cdot e^{i(k_{2x}x + k_{2z}z)},$$

$$k_{2x} = -k \cdot \sin \alpha, \quad k_{2z} = k \cdot \cos \alpha$$



$$I(x, z = 0) = |E_1 + E_2|^2 = (E_1 + E_2) \cdot (E_1^* + E_2^*) =$$

$$= |E_1|^2 + |E_2|^2 + E_1 E_2^* + E_1^* E_2,$$

$$I(x) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cdot \cos(2k \sin \alpha \cdot x)$$

# Интерференция плоских волн

$$I(x) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cdot \cos(2k \sin \alpha \cdot x)$$

$$A_1 = A_2 = A,$$

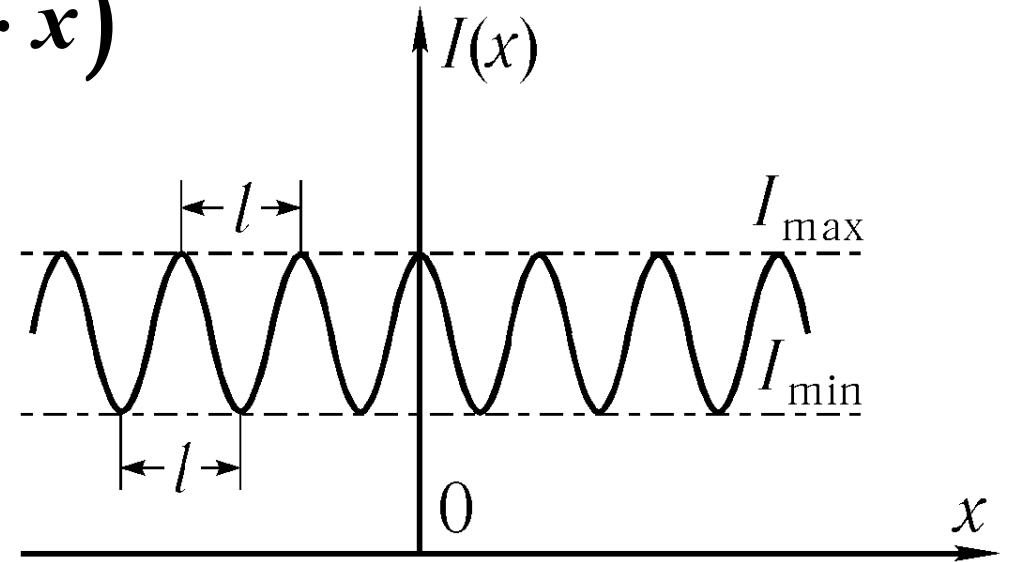
$$I(x) = 2A^2 \cdot (1 + \cos(2k \sin \alpha \cdot x))$$

$$2k \sin \alpha \cdot \Delta x = 2\pi$$

$$\Delta x = l = \frac{\pi}{k \sin \alpha} = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}$$

$$\beta = 2\alpha, \quad l = \frac{\lambda}{2 \sin(\beta / 2)}$$

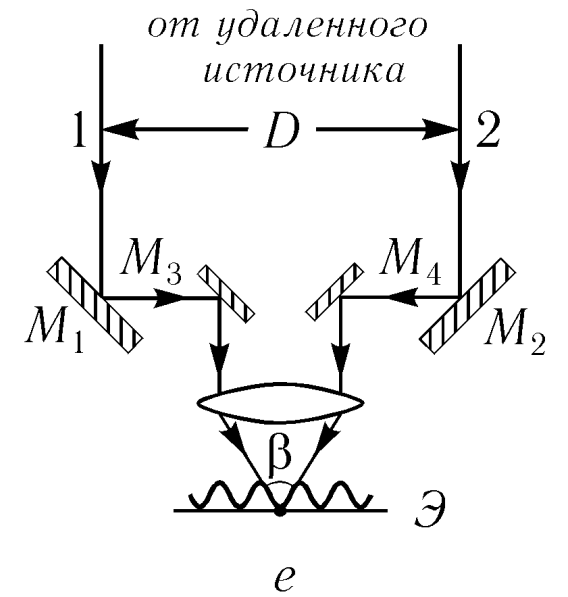
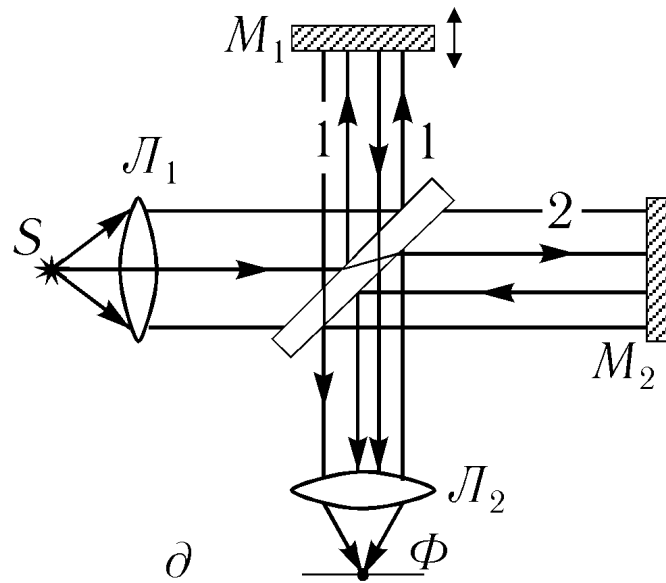
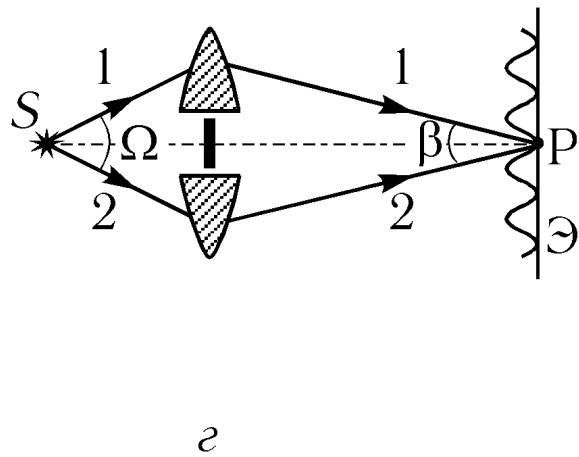
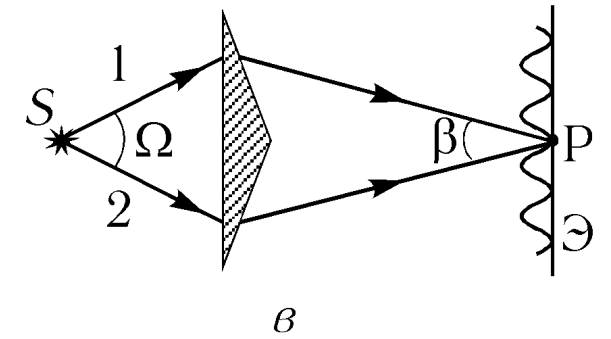
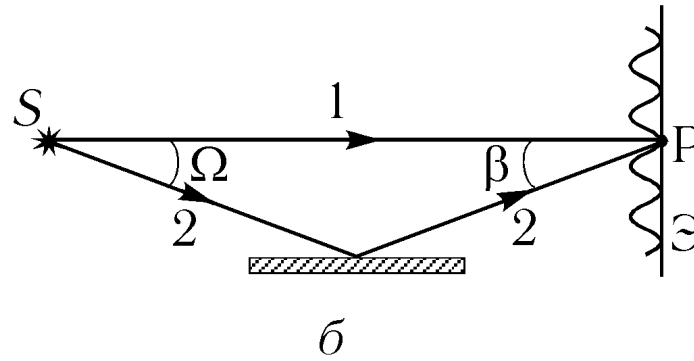
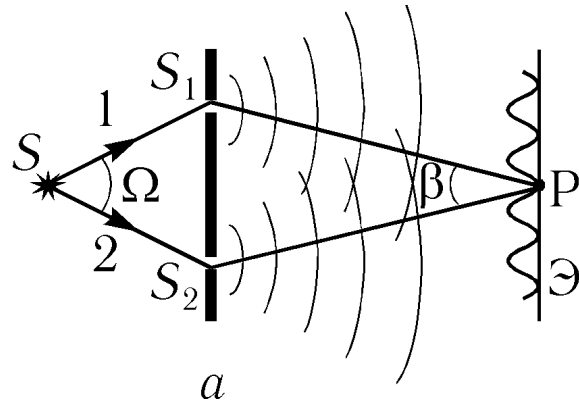
$$\beta \ll 1, \quad l \approx \lambda / \beta$$



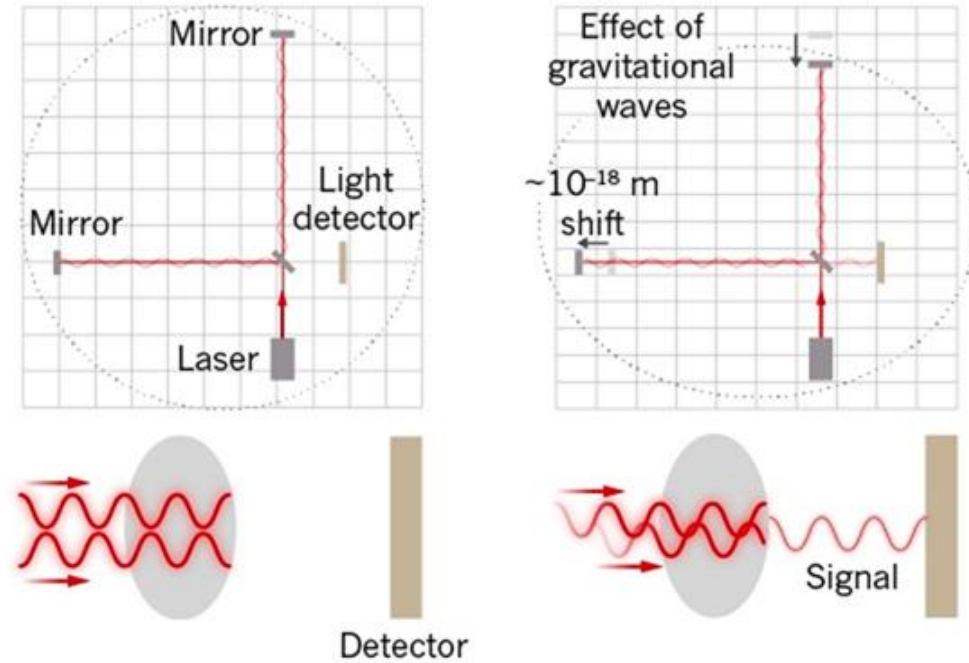
$$\lambda \approx 500 \text{ нм}, \quad l \approx 1 \text{ мм}, \quad \beta \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$$

Интерференционные полосы в этом случае не имеют области локализации

# Интерференционные схемы



# Регистрация гравитационных волн (2015 г., LIGO)



LIGO включает в себя два одинаковых детектора, расположенных в Ханфорде (штат Вашингтон) и в Ливингстоне (штат Луизиана) и разнесенных друг от друга на 3000 км.

Сигнал будет считаться зарегистрированным, только если его увидят оба детектора одновременно.

По разности прихода гравитационно-волнового всплеска на две установки — а она может достигать 10 миллисекунд — можно примерно определить, из какой части неба этот сигнал пришел.



# Опыт Юнга

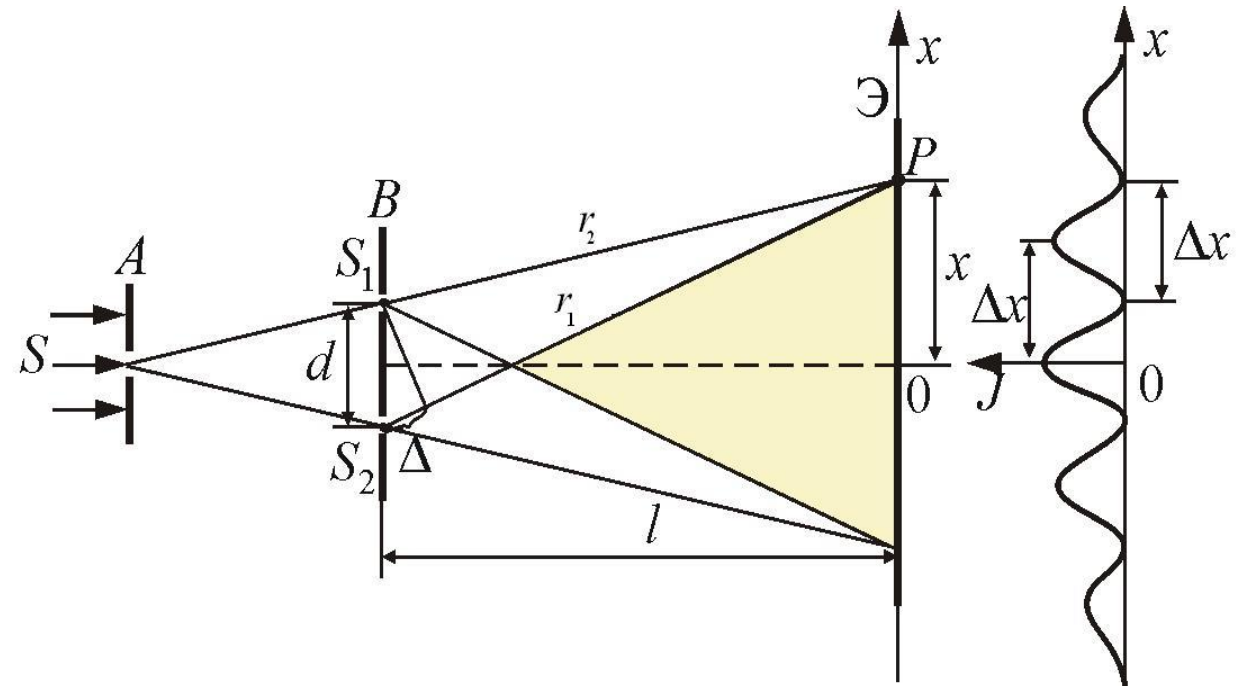
$$r_1^2 = l^2 + \left(x + d / 2\right)^2,$$

$$r_2^2 = l^2 + \left(x - d / 2\right)^2,$$

$$r_1^2 - r_2^2 = 2xd, \quad r_1 - r_2 = \frac{2xd}{r_1 + r_2},$$

$$|x|, d \ll l \quad r_1 + r_2 \approx 2l$$

$$r_1 - r_2 = \frac{xd}{l} = \alpha x, \quad \alpha = \frac{d}{l}$$



$$I(x) = 2I_1 \cdot \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi \alpha x}{\lambda} \right) \right)$$

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

# Опыт Юнга

$$d = 1 \text{ мм}, \quad L = 1 \text{ м},$$

$$\alpha = \frac{d}{L} = 10^{-3} \text{ рад},$$

$$\lambda = 600 \text{ нм}$$

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\alpha} = 0,6 \text{ мм}$$



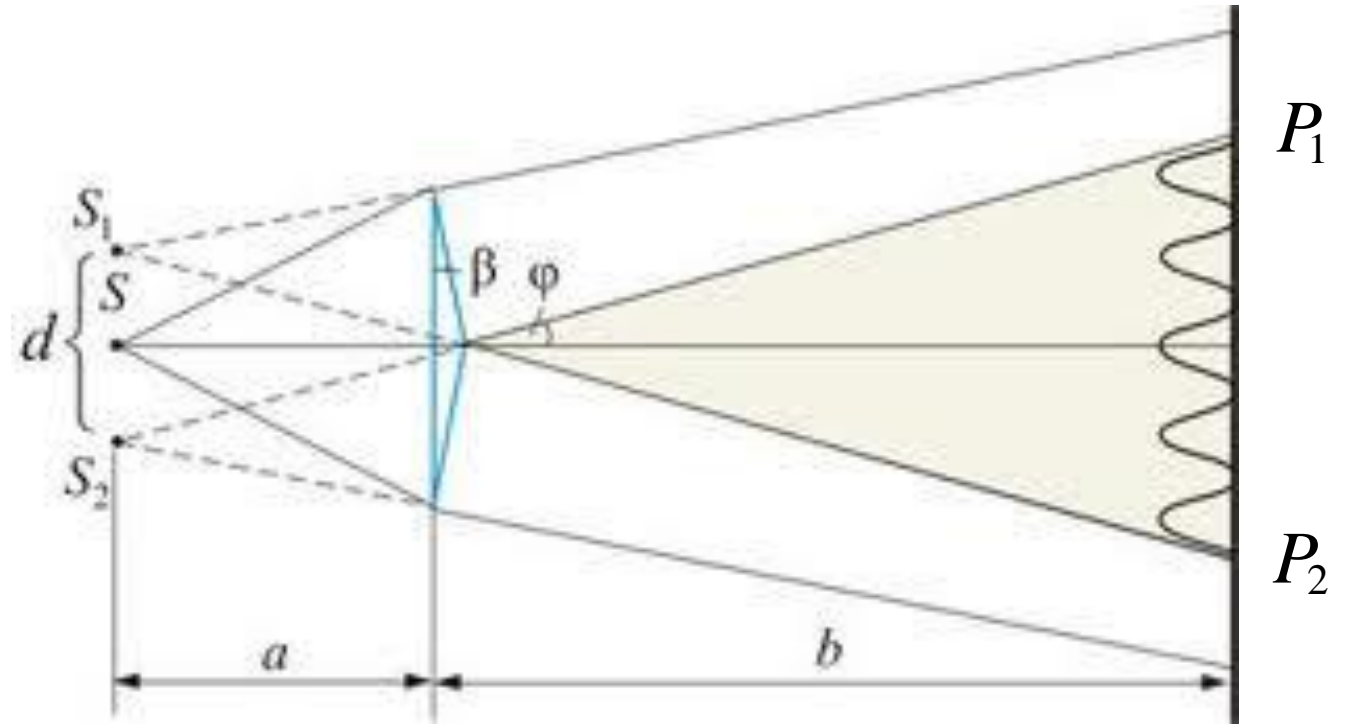
# Бипризма Френеля

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

$$d = 2a \cdot \varphi = 2a(n - 1) \cdot \beta,$$

$$\alpha = \frac{d}{a + b}$$

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



Число наблюдаемых полос  $N_{\text{полос}} = \frac{P_1 P_2}{\Delta x} = \frac{2\varphi b}{\Delta x} = \frac{4(n - 1)^2 \cdot \beta^2 ab}{\lambda(a + b)}$

# Бипризма Френеля в параллельном пучке

$$a \rightarrow \infty, \quad \beta = 10^{-3} \text{ рад}, \quad n = 1,5$$

$$b = 3 \text{ м}, \quad \lambda = 600 \text{ нм},$$

$$\alpha = 2 \cdot (n - 1) \beta = 10^{-3} \text{ рад},$$

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\alpha} = 0,6 \text{ мм}$$

$$P_1 P_2 = 2b\alpha = 6 \text{ мм}, \quad N_{\text{полос}} = 10$$

# Интерференция в тонких плёнках (полосы равного наклона)

$$\sin \alpha = n \cdot \sin \beta, \quad AB = BC = \frac{h}{\cos \beta},$$

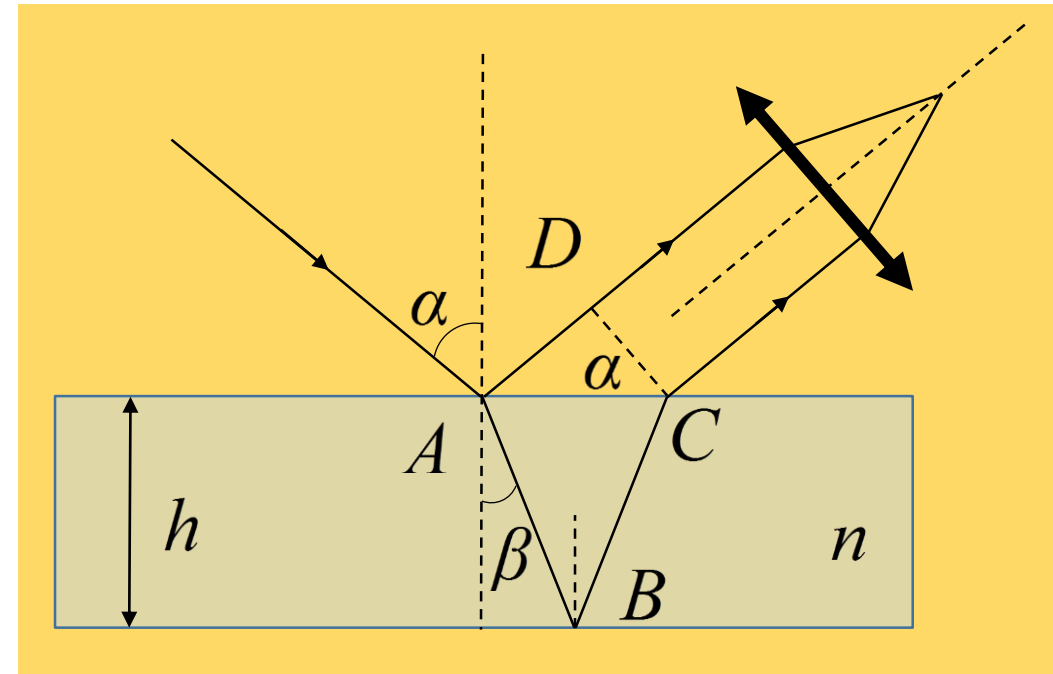
$$AC = 2h \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad AD = AC \cdot \sin \alpha$$

$$\Delta_{\text{геом}} = n \cdot (AB + BC) - AD =$$

$$= \frac{2hn}{\cos \beta} - 2h \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin \alpha =$$

$$= \frac{2hn - 2h \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\cos \beta} =$$

$$= 2h \cdot n \cdot \cos \beta$$



$$\Delta_{\text{геом}} = 2h \cdot n \cdot \cos \beta$$

# Интерференция в тонких плёнках (полосы равного наклона)

$$\Delta_{отр} = \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta = \Delta_{геом} + \Delta_{отр}$$

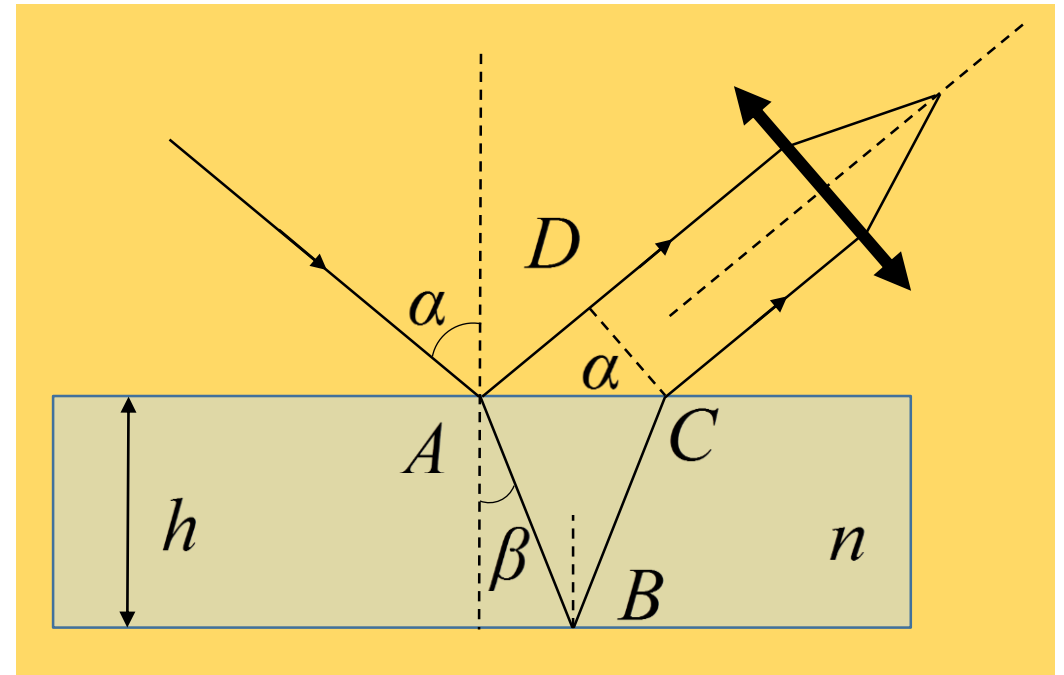
$$\Delta = 2h \cdot n \cdot \cos \beta + \frac{\lambda}{2}$$

Условие максимума интенсивности

$$\Delta = 2h \cdot n \cdot \cos \beta + \frac{\lambda}{2} = m\lambda$$

Наибольший порядок интерференции при

$$\alpha = 0 \quad (\beta = 0)$$



# Интерференция в тонких плёнках (полосы равного наклона, радиусы тёмных полос)

В центре минимум:

$$\Delta(\beta = 0) = 2h \cdot n + \frac{\lambda}{2} = m_0 \lambda + \frac{\lambda}{2}$$

Условие минимума при  $\beta \neq 0$

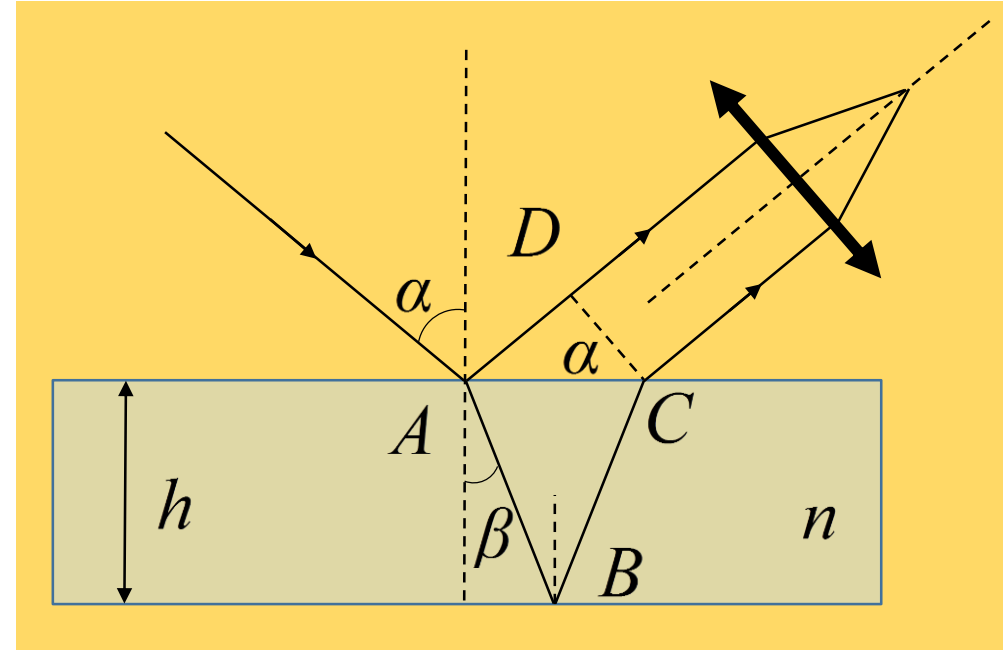
$$\Delta(\beta) = 2h \cdot n \cdot \cos \beta_m + \frac{\lambda}{2} = (m_0 - m) \lambda + \frac{\lambda}{2}$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

$$4h \cdot n \cdot \sin^2(\beta_m / 2) = m \lambda$$

Радиусы тёмных колец в фокальной плоскости линзы  
(для малых углов)

$$\alpha_m = n \beta_m, \quad r_m = F \cdot \alpha_m = F \cdot \sqrt{mn\lambda / h}$$



# Локализация интерференционных полос

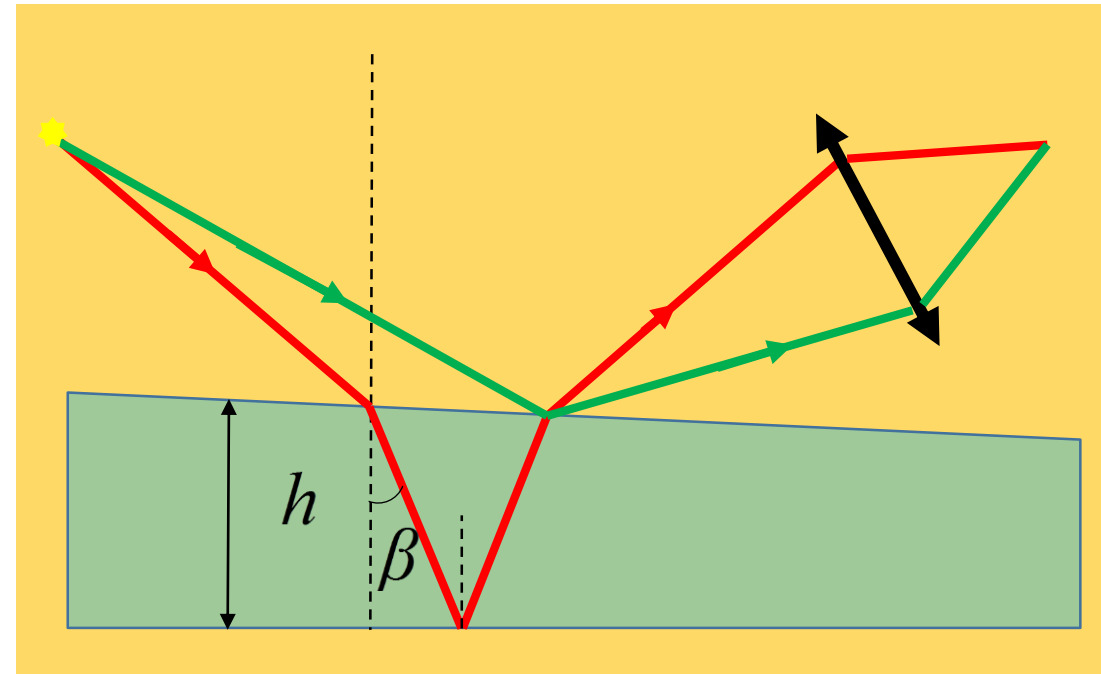
## Цвета тонких плёнок:

- мыльные плёнки (мыльные пузыри)
- плёнки масла (нефти, бензина) на поверхности воды
- плёнки прозрачных окислов (на поверхности стекла или металла)

Интерференционные полосы локализованы вблизи поверхности плёнки.

$$\beta \neq 0$$

$$\Delta = 2h \cdot n \cdot \cos \beta + \frac{\lambda}{2}$$





# Полосы равной толщины

Условие минимума  
интерференционной картины

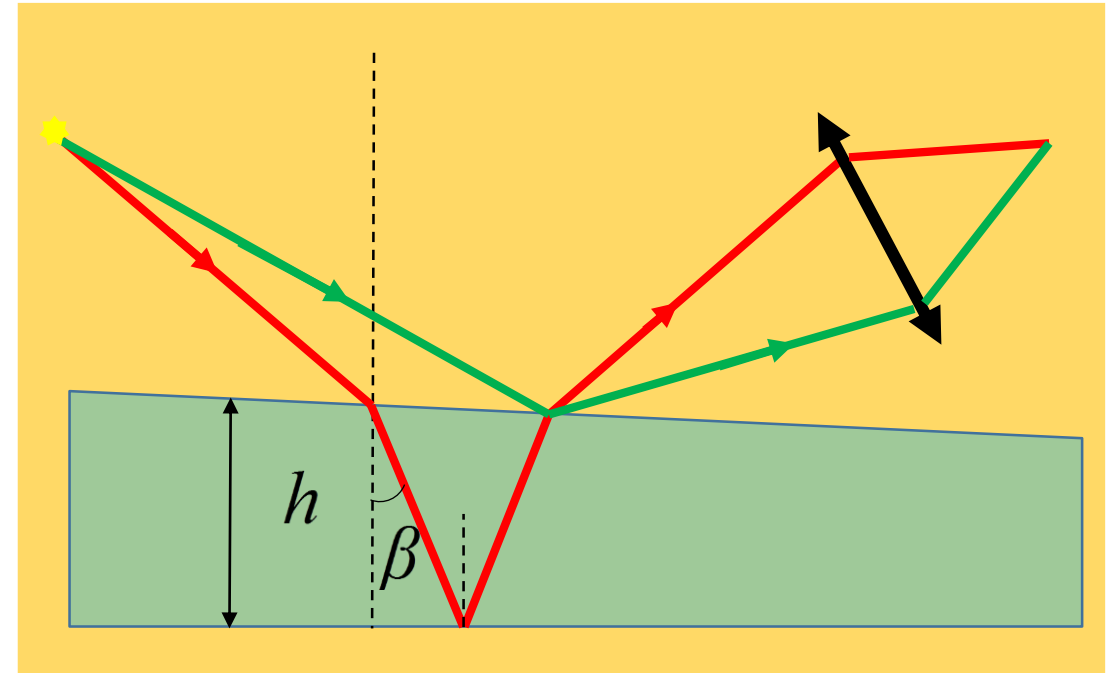
$$\Delta_{min} = 2h \cdot n \cdot \cos \beta = m\lambda$$

Для малых углов ( $\beta \approx 0$ )

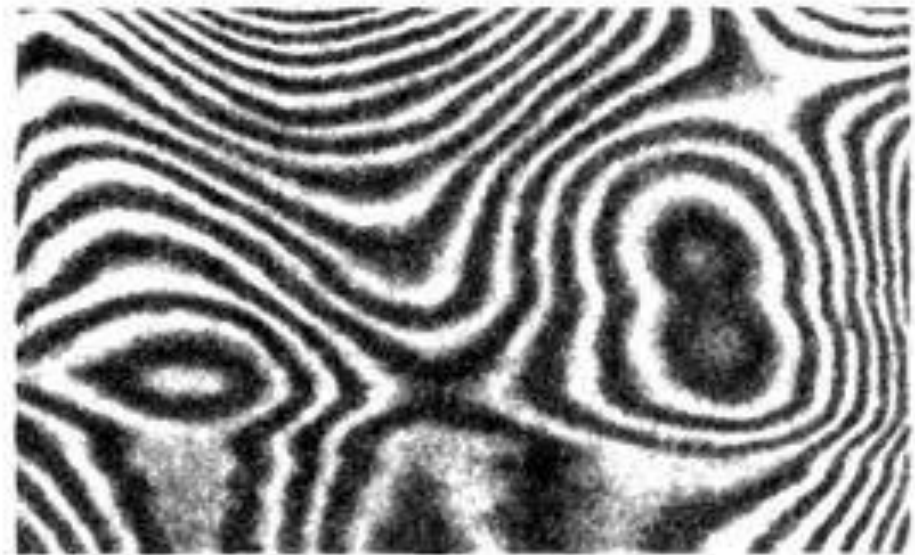
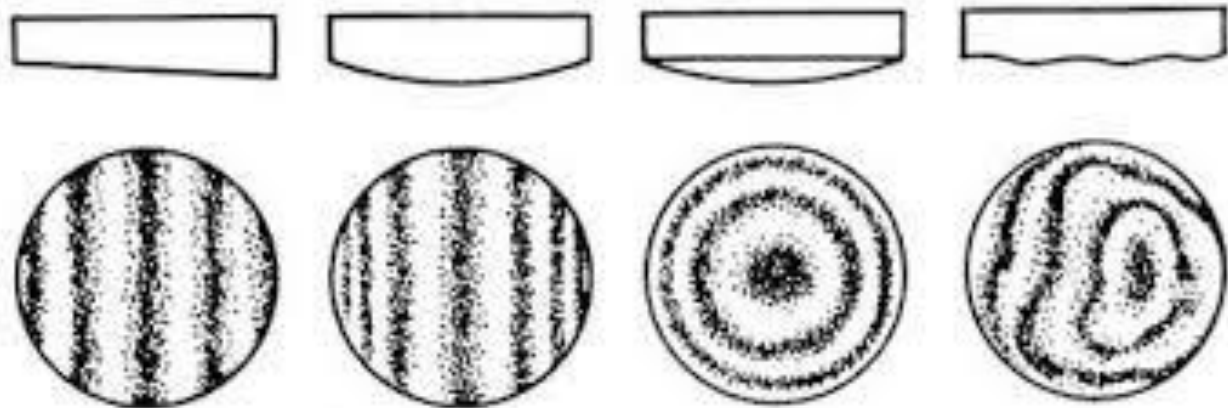
$$\Delta_{min} = 2h \cdot n$$

Одна интерференционная полоса соответствует некоторой толщине пластины.

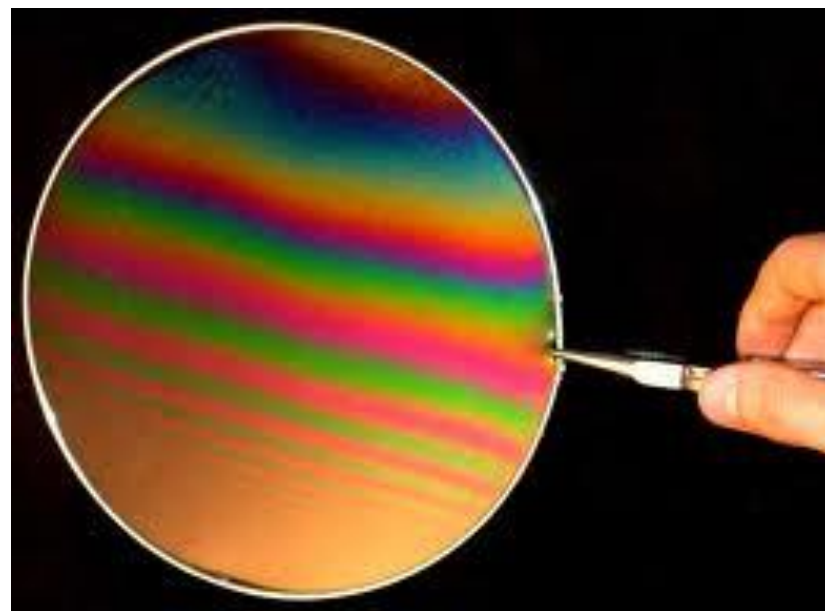
Конфигурация интерференционных полос на поверхности плёнки соответствует геометрическим местам плёнки, в которых она имеет одинаковую толщину.



# Полосы равной толщины



# Интерференция в тонких плёнках



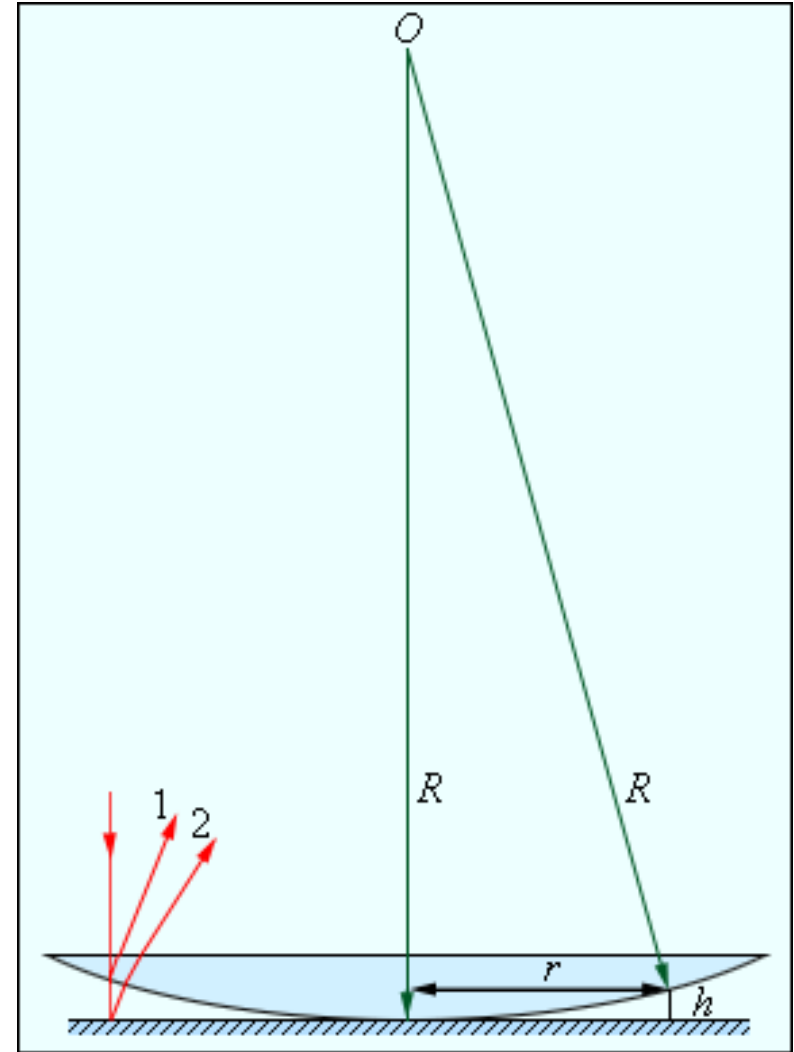
# Кольца Ньютона

$$h = \frac{r^2}{2R}$$

$$\Delta = \Delta_{\text{геом}} + \Delta_{\text{отр}}$$

$$\Delta_{\text{геом}} = 2h, \quad \Delta_{\text{отр}} = \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$



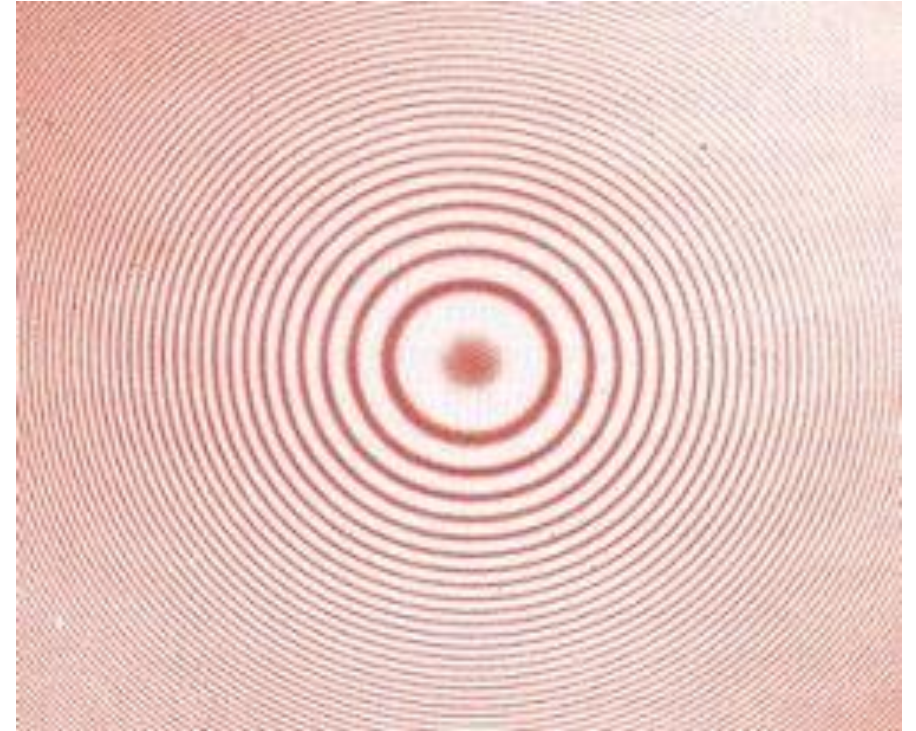
# Кольца Ньютона

$$\mathit{max} : \quad \Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = m\lambda,$$

$$r_{m,\text{свет}} = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right) R\lambda}, \quad m = 1, 2, \dots$$

$$\mathit{min} : \quad \Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = m\lambda + \frac{\lambda}{2},$$

$$r_{m,\text{темн}} = \sqrt{mR\lambda}, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$



# Кольца Ньютона

