

Волновые свойства света

Природа света двойственна (дуалистична). Это означает, что **свет** проявляет себя **и** как **электромагнитная волна**, **и** как **поток частиц** — фотонов.

Энергия фотона ε : $\varepsilon = h\nu$

где h — постоянная Планка, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

ν — частота электромагнитной световой волны.

Волновая оптика - круг явлений, в основе которых лежит волновая природа света.

В волновой оптике:

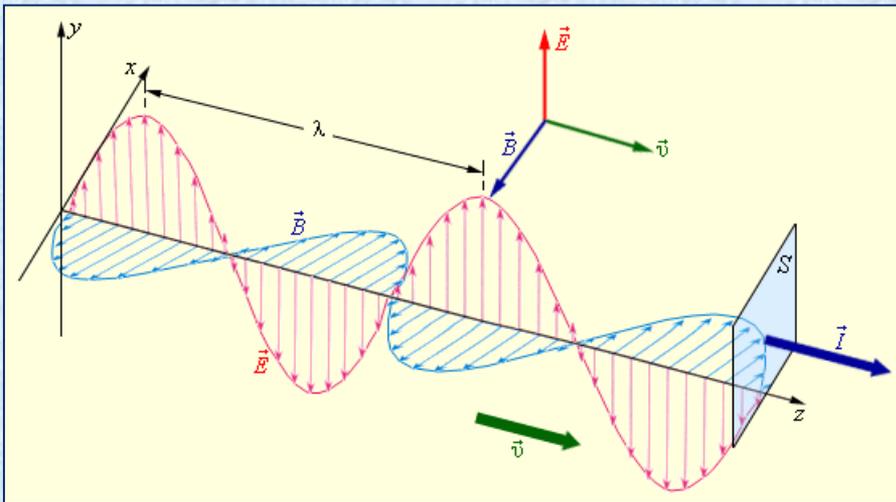
СВЕТ – электромагнитная волна

Уравнение электромагнитной волны

Уравнения электромагнитной волны:

$$E = E_m \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right]; \quad B = B_m \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right]$$

где E - напряженность электрического поля в момент времени t , E_m - амплитуда напряженности электрического поля; B - магнитная индукция в момент времени t ; B_m - амплитуда магнитной индукции; v - скорость волны; x - координата точки; ω - циклическая частота.



**Векторы \vec{E} , \vec{B} и \vec{v}
взаимно
перпендикулярны.
ЭМ волны –
поперечные.**

**Световой вектор – вектор напряженности
электрического поля \vec{E}**

Сложение электромагнитных волн

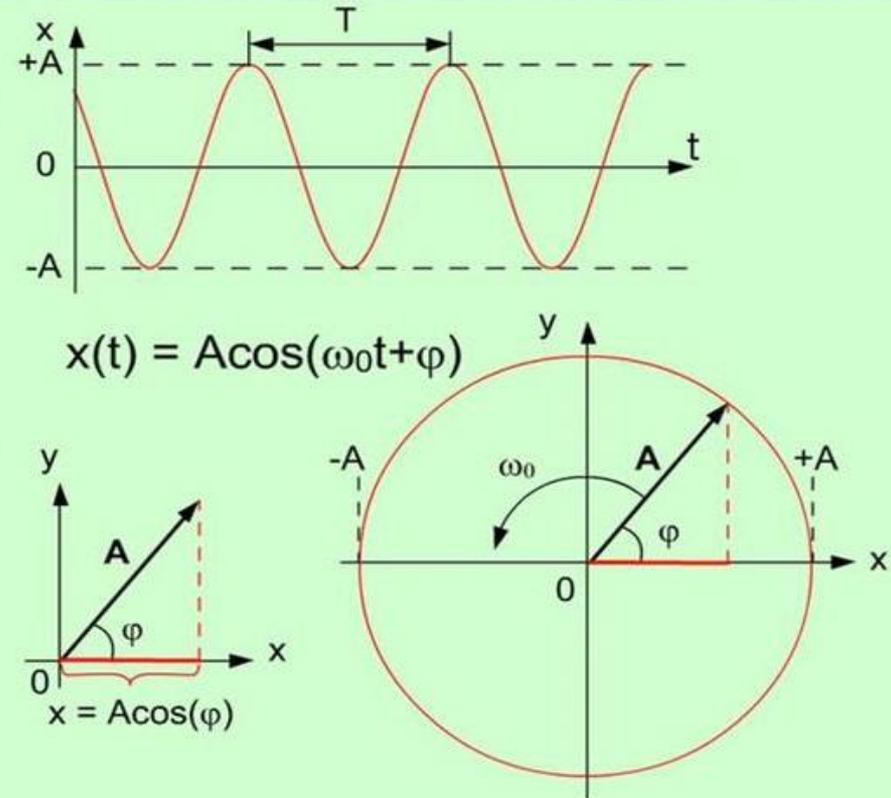
Сложение волн, распространяющихся в среде, определяется сложением в разных точках пространства соответствующих колебаний.

Пусть две волны одинаковой частоты, накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

$$E_1 = E_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$E_2 = E_{m2} \cos(\omega t + \varphi_2)$$

Представим эти колебания в виде векторов (векторная модель колебаний).



Векторная модель колебаний

Сложение электромагнитных волн

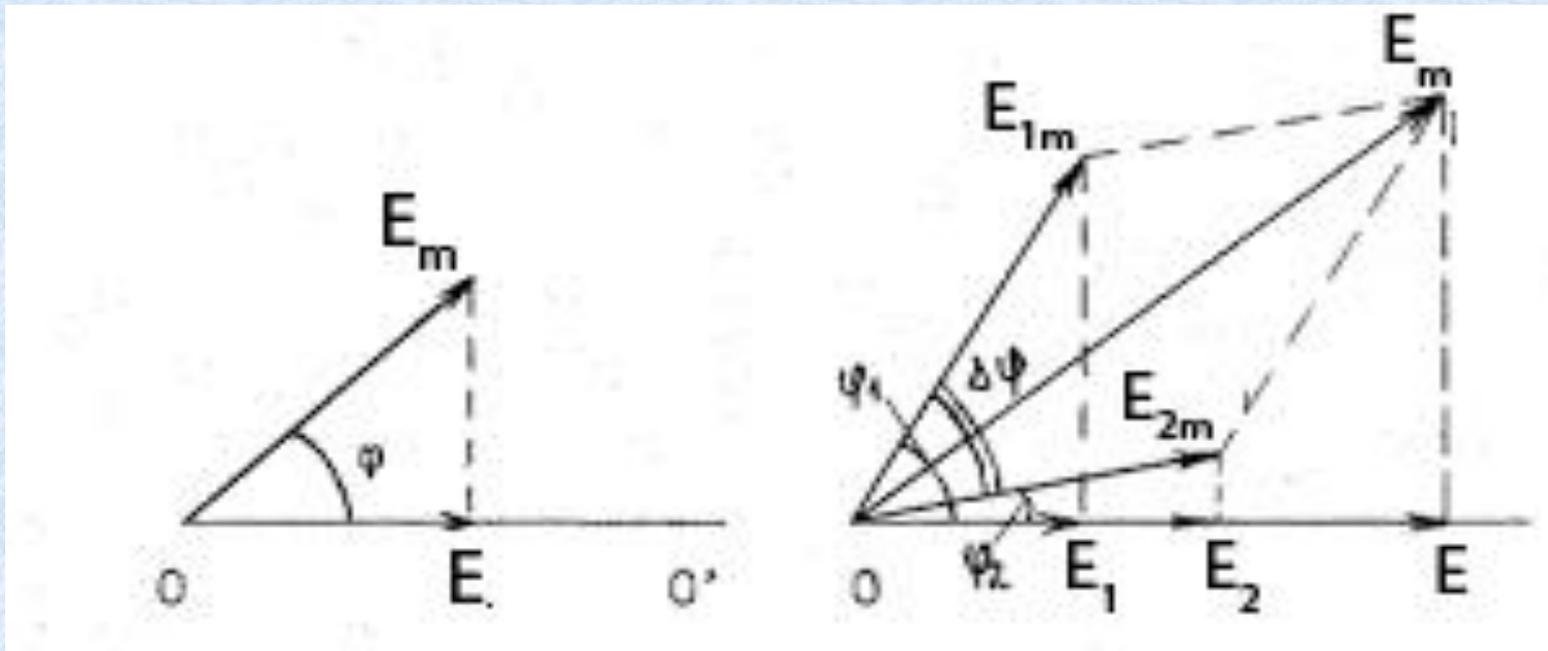
При наложении двух волн одинаковой частоты, получается:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$E_1 = E_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1) \quad E_2 = E_{m2} \cos(\omega t + \varphi_2)$$

По теореме косинусов:

$$E_m^2 = E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$



Сложение световых волн от «обычных»

источников света

$$E_m^2 = E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

При сложении волн от «обычных» источников света (лампа, пламя, Солнце и т. п.) разность фаз $(\varphi_2 - \varphi_1)$ меняется случайным образом.

Среднее значение $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ равно нулю.

$$\langle \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \rangle_{\text{среднее}} = 0$$

Тогда получаем усредненное равенство для тех точек пространства, где складываются две волны, идущие от двух обычных источников света:

$$\langle E_m^2 \rangle = \langle E_{m1}^2 \rangle + \langle E_{m2}^2 \rangle$$

Отсюда условие сложения интенсивностей I_1 и I_2 волн от «обычных» источников:

$$I = I_1 + I_2$$

Сложение световых волн от «обычных» источников света

Правило сложения световых волны от «обычных» источников света:

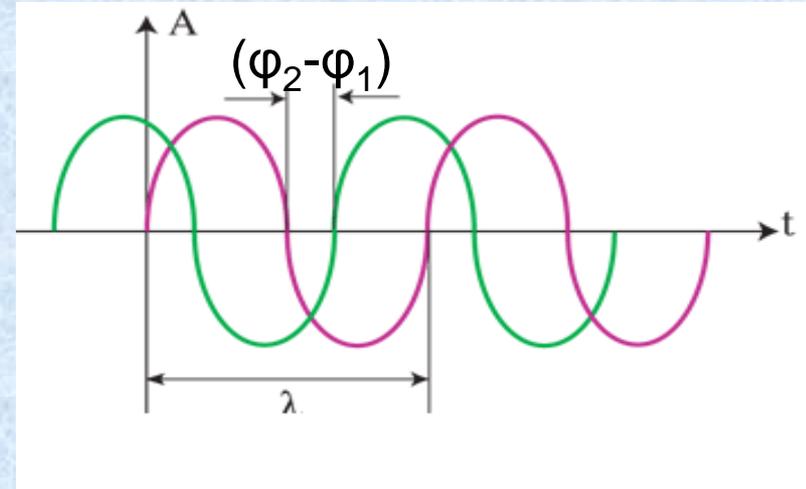
Интенсивность суммарного излучения «обычных» (естественных) источников равна сумме интенсивностей слагаемых волн.

$$I = I_1 + I_2$$

Интерференция света

$$E_m^2 = E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Если разность фаз $(\varphi_2 - \varphi_1)$ остается постоянной, то волны — **когерентны**.



Интерференция света — это сложение в пространстве двух или нескольких когерентных световых волн, при котором в разных его точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.

В случае когерентных волн $(\varphi_2 - \varphi_1)$ имеет постоянное во времени (но свое для каждой точки пространства) значение, поэтому интенсивность результирующей световой волны:

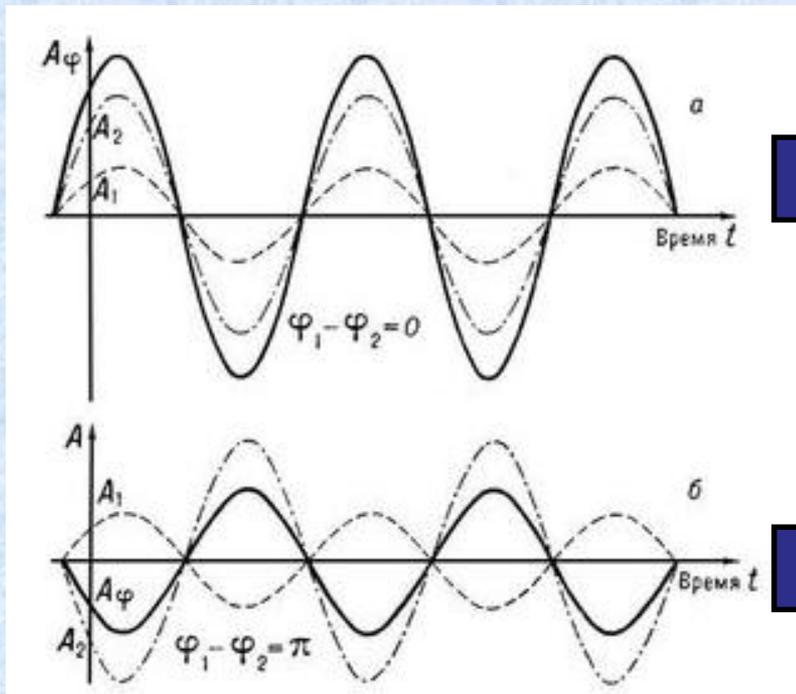
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Интерференция света

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Если $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$, то $I > I_1 + I_2$ - УСИЛЕНИЕ

Если $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$, то $I < I_1 + I_2$ - ОСЛАБЛЕНИЕ

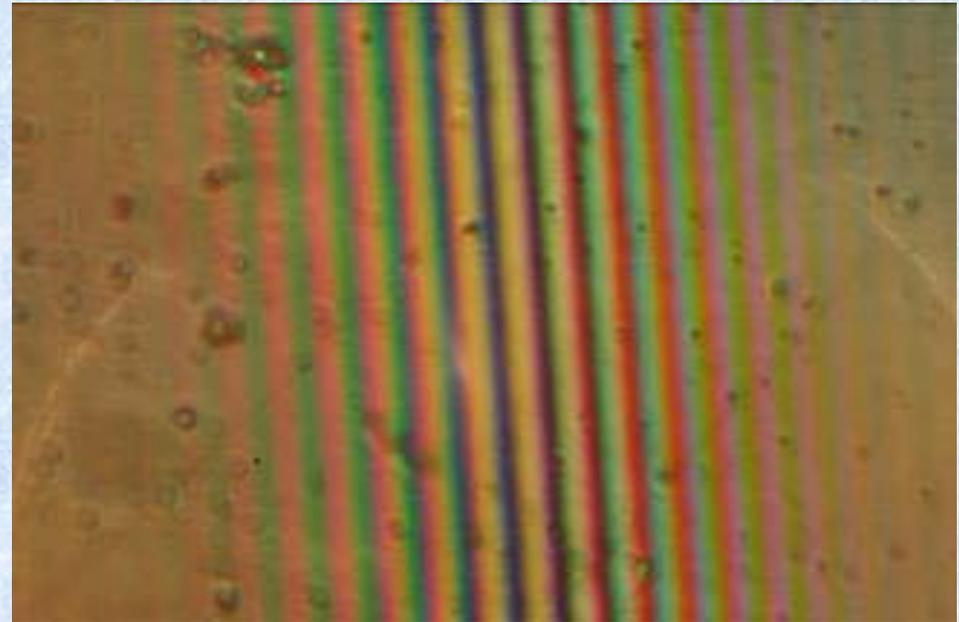
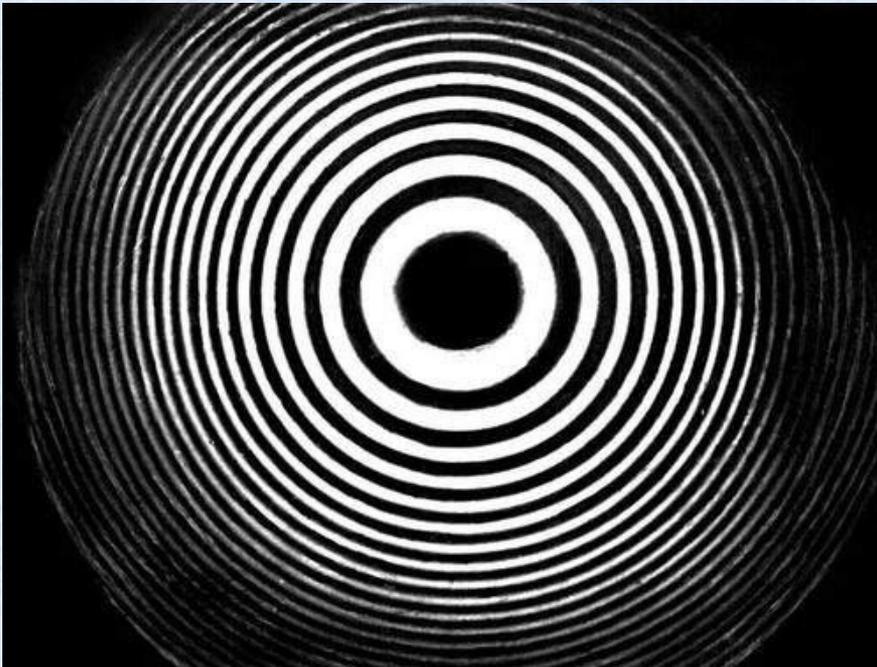


$\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1) = 0$,
 $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$
МАКСИМУМ

$\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1) = \pi$,
 $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$
МИНИМУМ

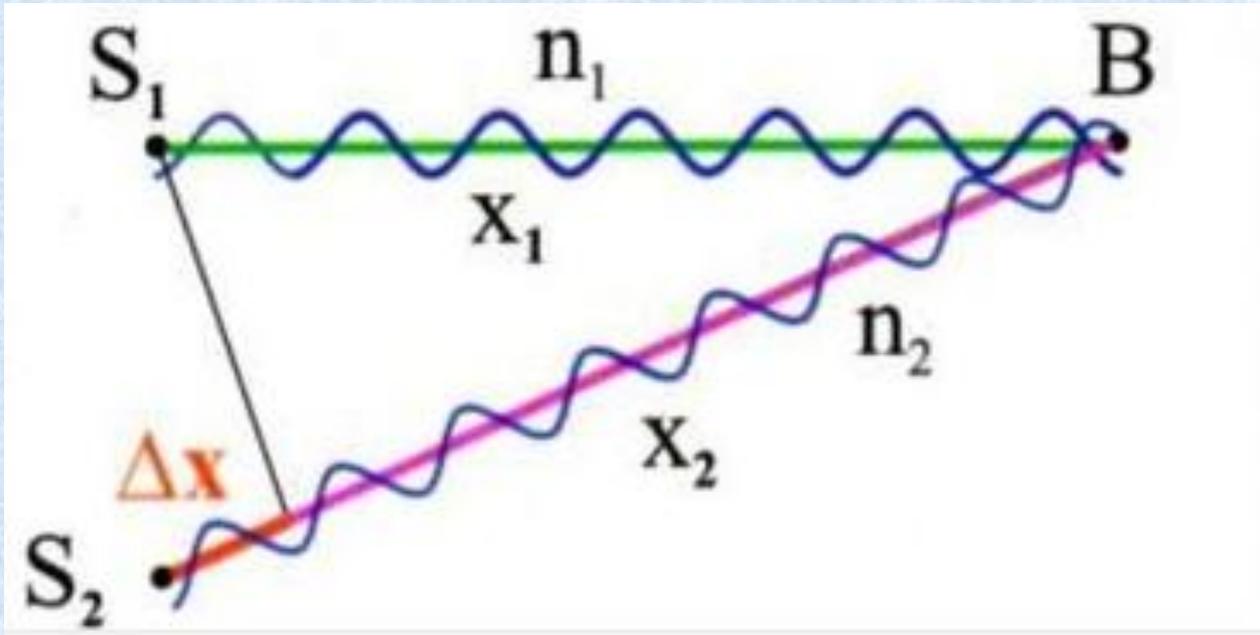
Интерференция света

При наложении когерентных световых волн происходит перераспределение светового потока в пространстве (интерференция), в результате чего в **одних местах возникают максимумы, а в других—минимумы** интенсивности.



На практике когерентные волны получают, «расщепляя» световую волну, идущую от одного источника.

Расчет интерференционной картины



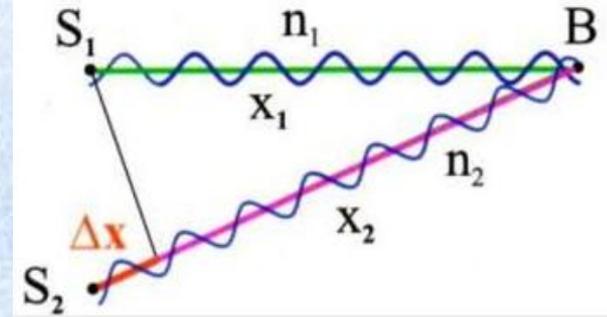
Колебания векторов E_1 и E_2 интерферирующих волн в некоторой точке B , удаленной на расстояния x_1 и x_2 соответственно от каждого источника, происходят по гармоническому закону:

$$E_1 = E_{m1} \cos \left[\omega \left(t - \frac{x_1}{v_1} \right) \right] \quad E_2 = E_{m2} \cos \left[\omega \left(t - \frac{x_2}{v_2} \right) \right]$$

где E_1, E_2 - напряженности электрического поля в момент времени t для двух волн, E_{m1}, E_{m2} - амплитуды напряженности электрического поля; v_1, v_2 - скорости волн; x_1, x_2 - расстояния до источников света S_1, S_2 ; ω - циклическая частота

Расчет интерференционной картины

$$E_1 = E_{m1} \cos \left[\omega \left(t - \frac{x_1}{v_1} \right) \right] \quad E_2 = E_{m2} \cos \left[\omega \left(t - \frac{x_2}{v_2} \right) \right]$$



Пусть показатель преломления среды, в которой распространяется первая волна – n_1 , вторая – соответственно n_2 , тогда скорость волн в каждой из сред:

Скорость первой волны:

$$v_1 = \frac{c}{n_1}$$

Скорость второй волны:

$$v_2 = \frac{c}{n_2}$$

c – скорость света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Разность фаз в точке В:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega \left(t - \frac{x_2}{v_2} \right) - \omega \left(t - \frac{x_1}{v_1} \right) = \omega \left(\frac{x_1}{v_1} - \frac{x_2}{v_2} \right) = \omega \left(\frac{x_1 n_1}{c} - \frac{x_2 n_2}{c} \right)$$

Расчет интерференционной картины

Разность фаз в точке В:

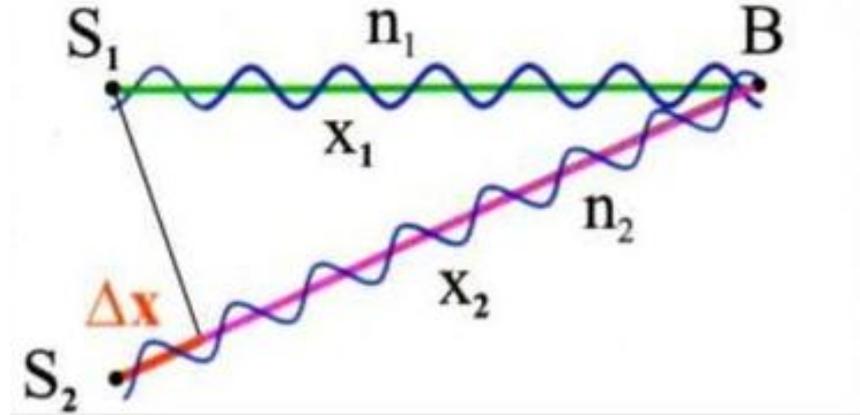
$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega \left(\frac{x_1 n_1}{c} - \frac{x_2 n_2}{c} \right)$$

Учитывая, что $\omega = 2\pi\nu$,

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

где ν – собственная частота колебаний,

λ – длина волны, c – скорость света в вакууме.



Получаем разность фаз двух волн:

$$\Delta\varphi = 2\pi\nu \left(\frac{x_1 n_1}{c} - \frac{x_2 n_2}{c} \right) = \frac{2\pi c}{\lambda} \cdot \frac{1}{c} (x_1 n_1 - x_2 n_2) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 n_1 - x_2 n_2)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega \left(\frac{x_1 n_1}{c} - \frac{x_2 n_2}{c} \right)$$

Расчет интерференционной картины

Таким образом: $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(x_1n_1 - x_2n_2)$

Произведение геометрического пути волны на показатель преломления среды, т. е. $l = x \cdot n$, называют **оптической длиной пути**.

Разность оптических длин пути:

$$\delta = (x_1n_1 - x_2n_2) - \text{оптическая разность хода.}$$

Таким образом: $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \delta$ или $\delta = \frac{\lambda\Delta\varphi}{2\pi}$.

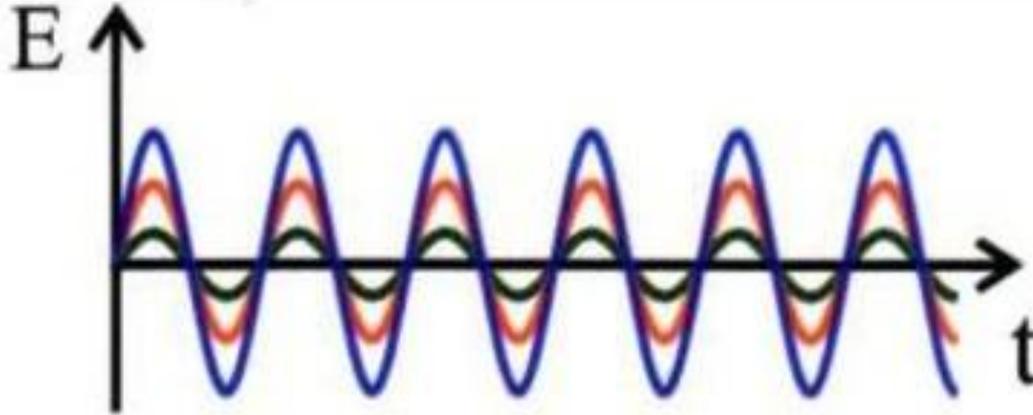
Учитывая уравнение: $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \Delta\varphi$

Получаем **условия МАКСИМУМА и МИНИМУМА:**

если $\cos\Delta\varphi = 1$, $\Delta\varphi = 2\pi k$, k – целое число, $\delta = k\lambda$ - **МАКСИМУМ**

если $\cos\Delta\varphi = -1$, $\Delta\varphi = \pi(2k+1)$, k – целое число, $\delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ - **МИНИМУМ**

Условия максимума и минимума при интерференции

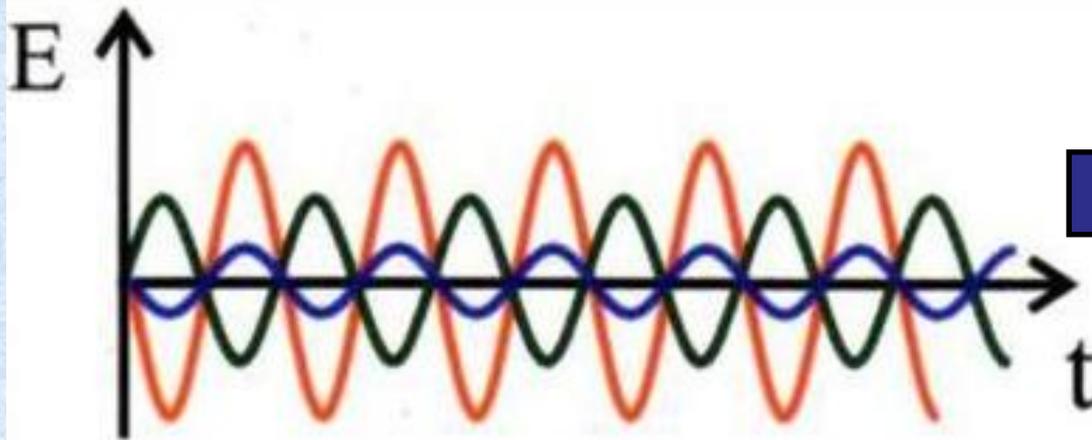


$$\Delta\varphi = 2\pi k,$$

(k - целое число)

$$\delta = k\lambda$$

МАКСИМУМ



$$\Delta\varphi = (2k+1)\pi,$$

(k - целое число)

$$\delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

МИНИМУМ

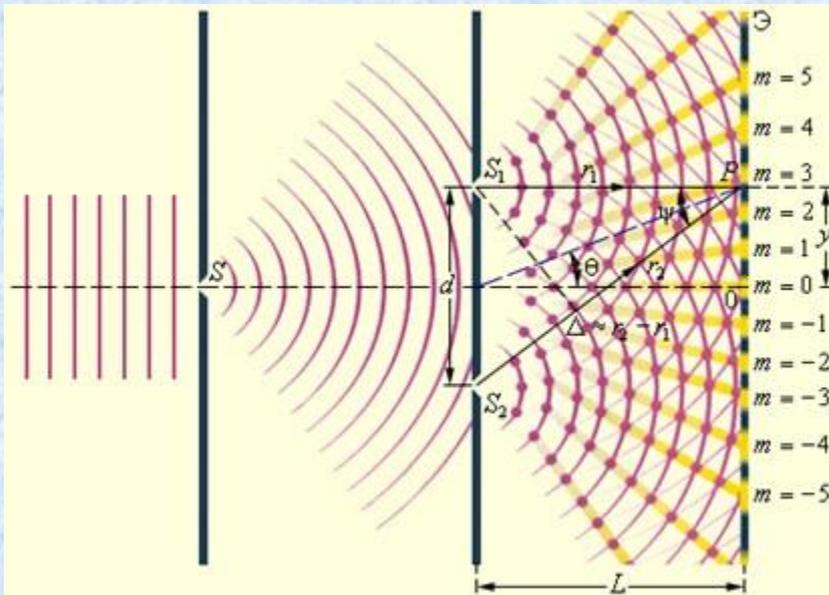
$\Delta\varphi$ - разность фаз двух волн,
 δ - оптическая разность хода, λ - длина волны

Методы наблюдения интерференции

До изобретения лазеров, во всех приборах **когерентные световые пучки получали разделением волны, излучаемой одним источником, на две части**, которые после прохождения разных оптических путей накладывали друг на друга и наблюдали интерференционную картину.

Опыт Юнга

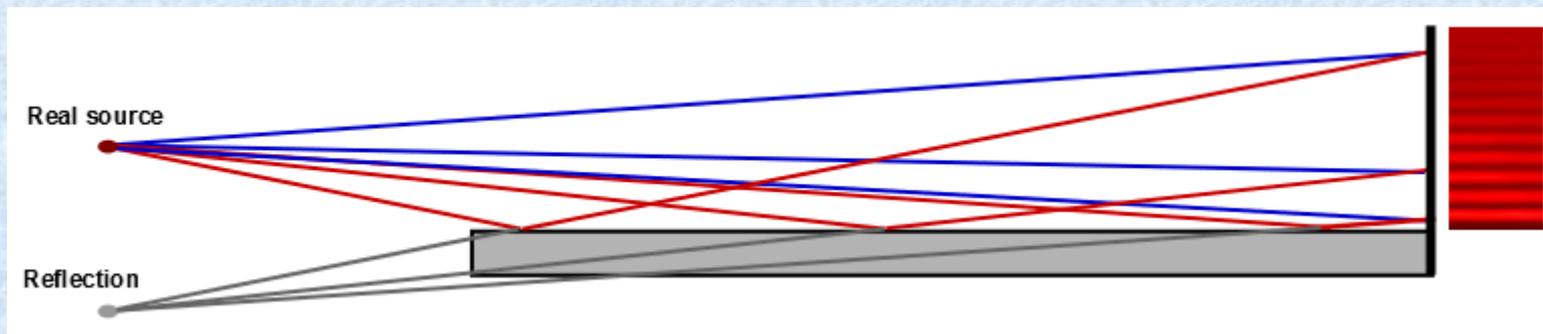
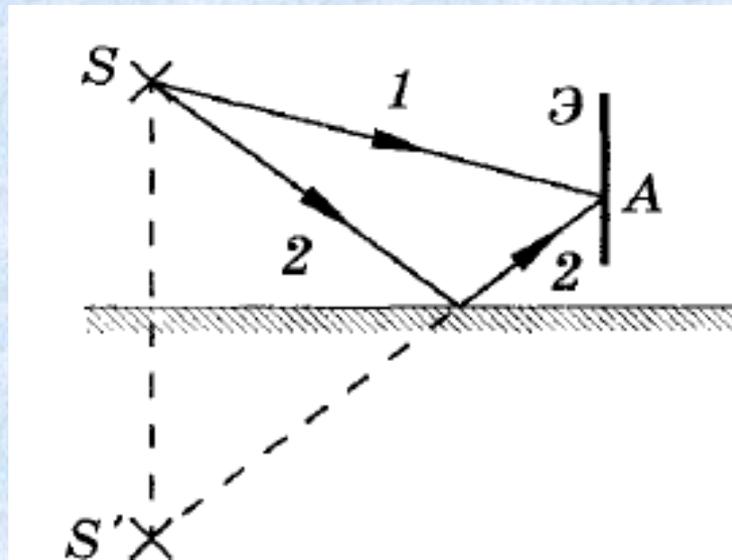
На пути сферической волны, идущей от источника S , устанавливается непрозрачная преграда с двумя щелями. Точки волновой поверхности, дошедшей до преграды, становятся центрами когерентных вторичных волн, поэтому щели можно рассматривать как когерентные источники. На экране наблюдается интерференция.



Методы наблюдения интерференции

Зеркало Ллойда

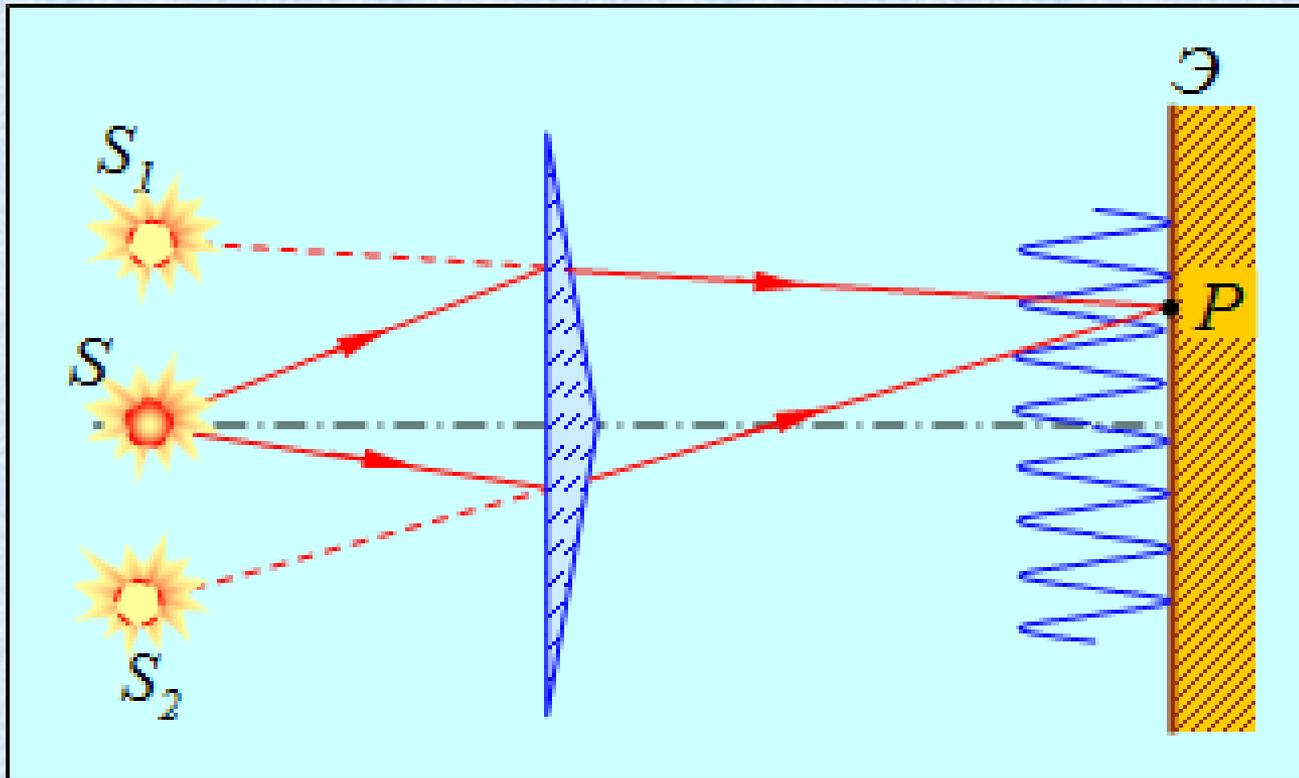
Точечный источник S находится близко к поверхности плоского зеркала M . Когерентными источниками служат сам источник S и его мнимое изображение S' .



Методы наблюдения интерференции

Бипризма Френеля

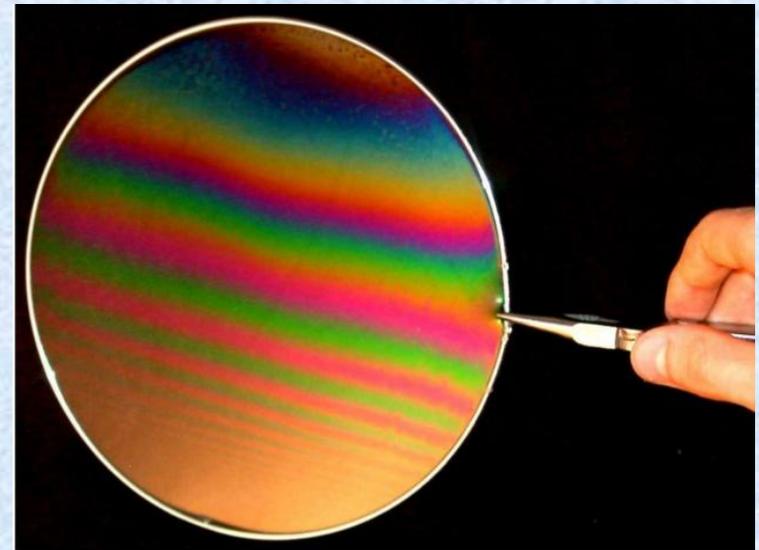
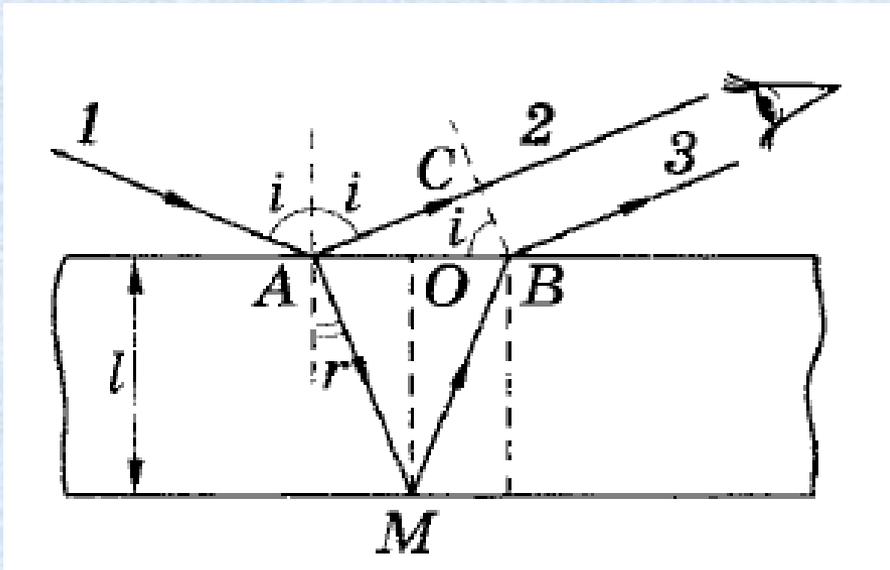
Свет от источника S преломляется в призмах в результате чего за бипризмой распространяются световые лучи, как бы исходящие из мнимых когерентных источников S_1 и S_2 .



Интерференция в тонких пленках

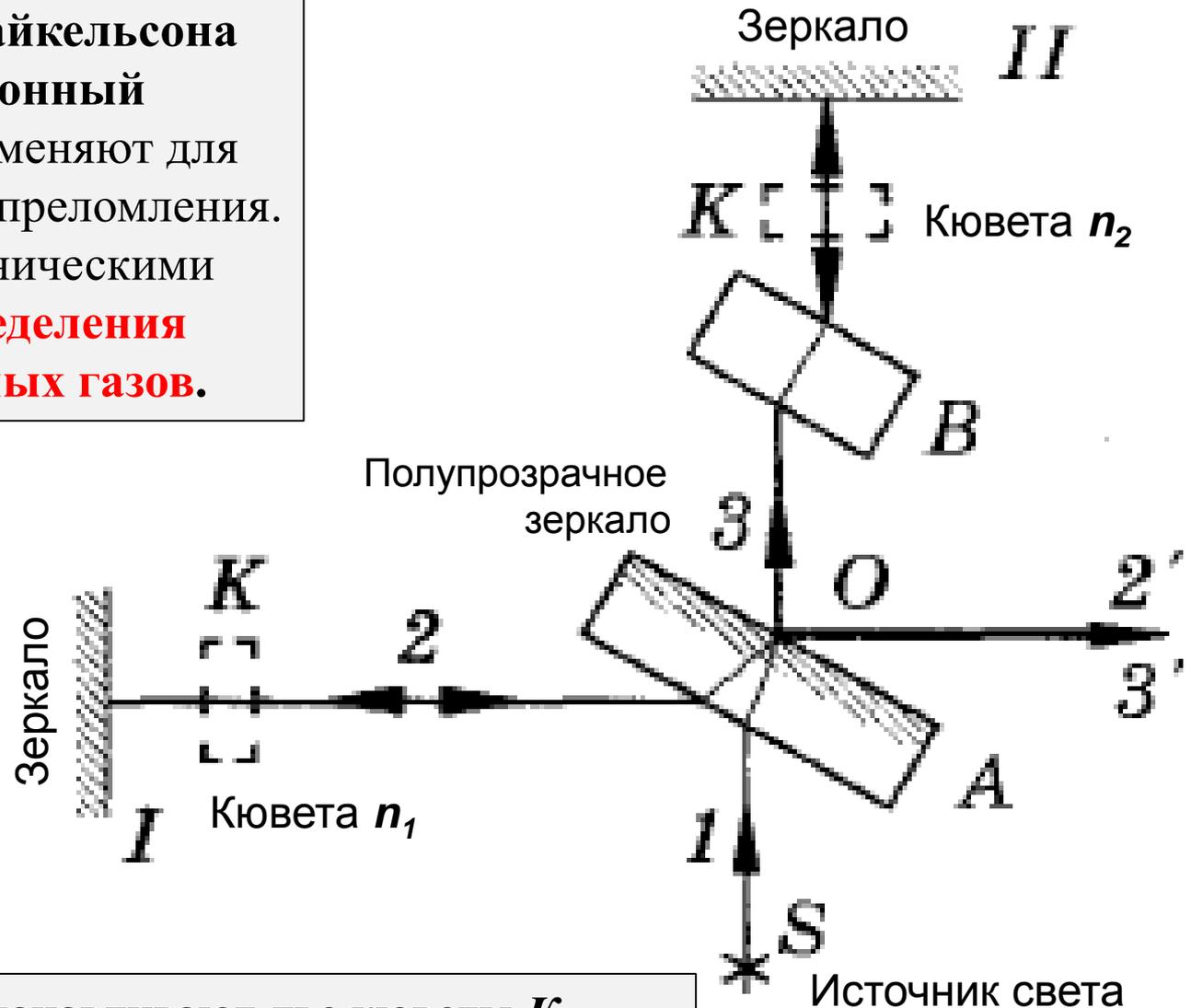
Образование когерентных волн и интерференция происходят также при попадании света на тонкую прозрачную пластинку или пленку.

Пучок света падает на плоскопараллельную пластинку. Луч 1 из этого пучка попадает в точку A , частично отражается (луч 2), частично преломляется (луч AM). Преломленный луч испытывает отражение на нижней границе пластинки в точке M . Отраженный луч, преломившись в точке B , выходит в первую среду (луч 3). Лучи 2 и 3 образованы от одного луча, поэтому они когерентны и будут интерферировать.



Интерферометр Майкельсона

Интерферометр Майкельсона (интерференционный рефрактометр) применяют для измерения показателя преломления. С санитарно-гигиеническими целями - **для определения содержания вредных газов.**



На пути хода лучей устанавливают две кюветы **К**, одна из которых наполнена веществом с показателем преломления n_1 а другая — с n_2 .

Интерференционный рефрактометр

Оптическая разность хода лучей:

$$\delta = 2ln_1 - 2ln_2 = 2l(n_1 - n_2)$$

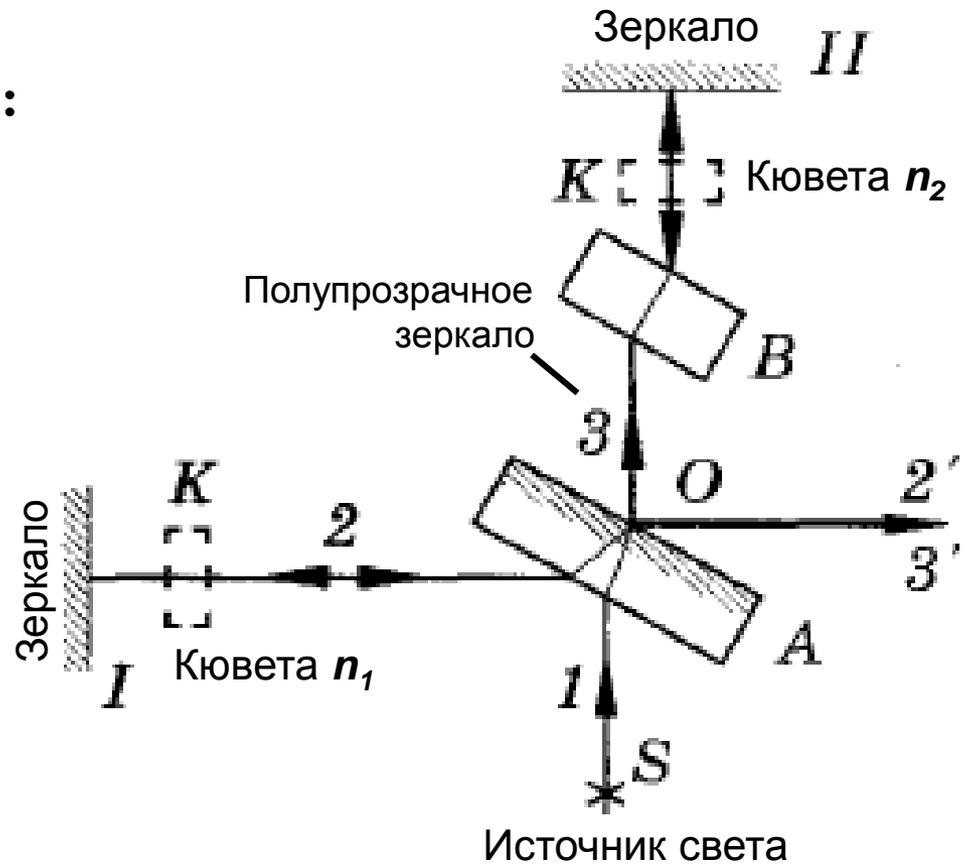
l — длина **однократного** пути луча в среде.

вследствие этой разности хода интерференционная картина смещается на k полос:

$$\delta = k\lambda$$

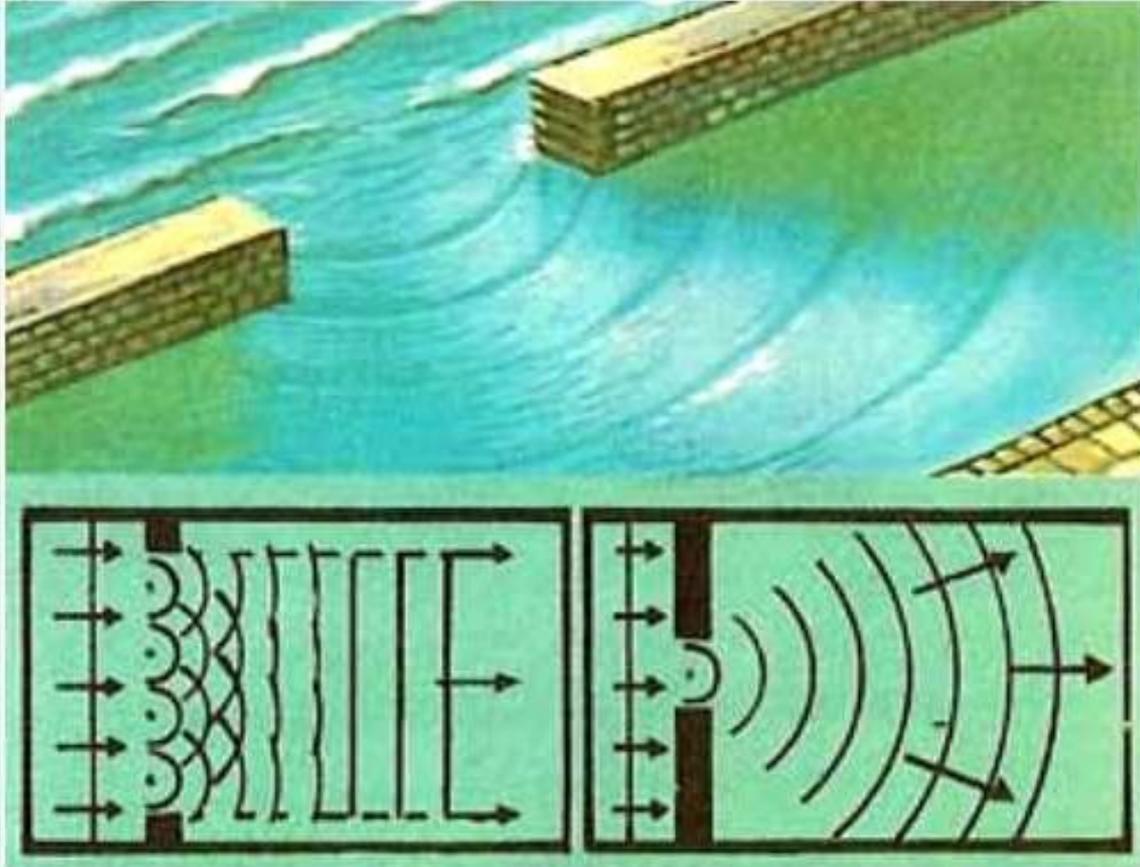
Если $\Delta n = n_1 - n_2 = k\lambda / (2l) = 500$ нм:

$$\Delta n = 0,1 \frac{500 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 0,025} = \frac{5 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 10^{-2}} = 10^{-6}$$



Дифракция. Принцип Гюйгенса—Френеля

Дифракцией называется огибание волнами препятствий, встречающихся на их пути, или в более широком смысле — любое отклонение распространения волн вблизи препятствий от законов геометрической оптики (например, от закона прямолинейного распространения света).



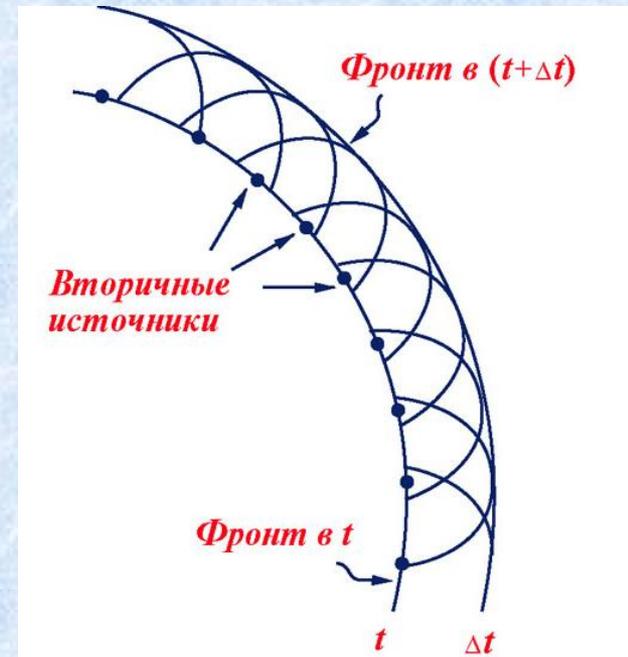
Дифракция. Принцип Гюйгенса—Френеля

Объяснение и приближенный расчет дифракции света можно осуществить, используя принцип **Гюйгенса—Френеля**.

Гюйгенс: Каждая точка волновой поверхности, которой достигла в данный момент волна, является центром элементарных вторичных волн

Френель: Вторичные волны интерферируют.

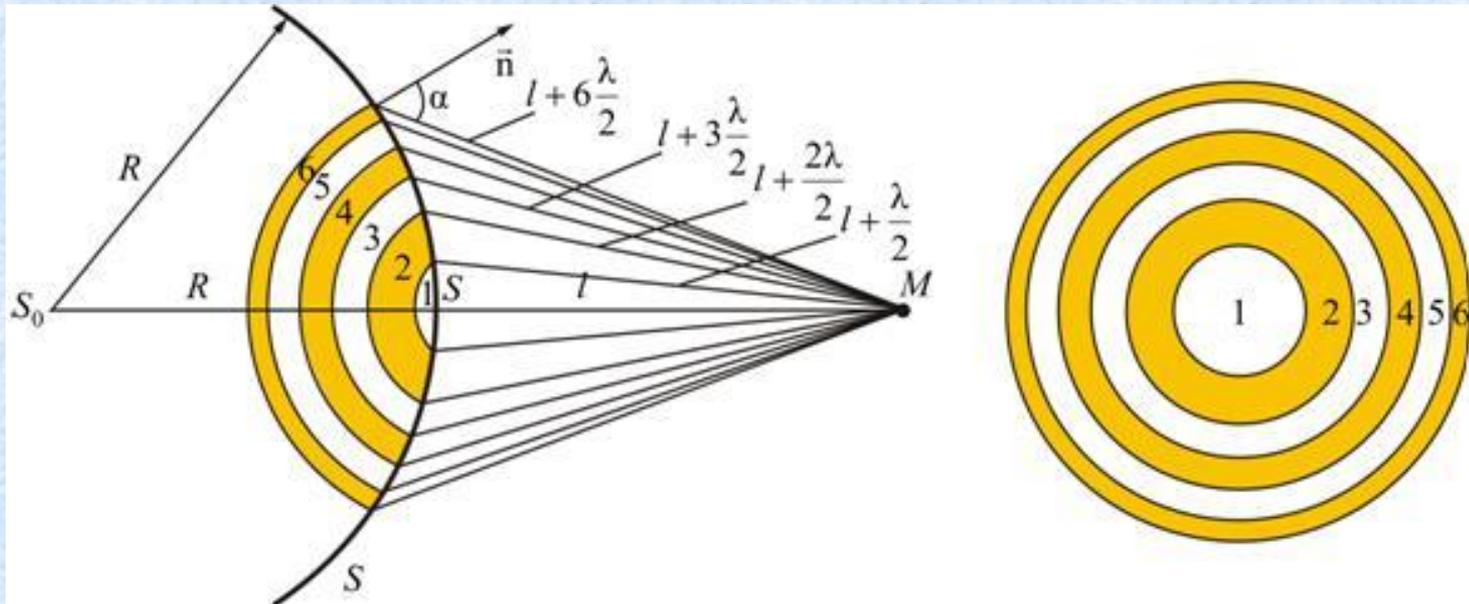
принцип Гюйгенса—Френеля:
световая волна, возбуждаемая каким-либо источником S , может быть представлена как результат интерференции когерентных вторичных волн, излучаемых вторичными источниками — бесконечно малыми элементами любой замкнутой поверхности, охватывающей источник S .



Зоны Френеля

Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, заменим действие источника S_0 действием воображаемых источников, расположенных на вспомогательной поверхности S , являющейся поверхностью фронта волны, идущей из S_0 (поверхность сферы с центром S_0). Разобьем волновую поверхность S на кольцевые зоны такого размера, чтобы расстояния от краев зоны до M отличались на $\lambda/2$. Тогда, обозначив амплитуды колебаний от 1-й, 2-й, ... m -й зон через A_1, A_2, \dots, A_m (при этом $A_1 > A_2 > A_3 > \dots$), получим амплитуду результирующего колебания:

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots$$



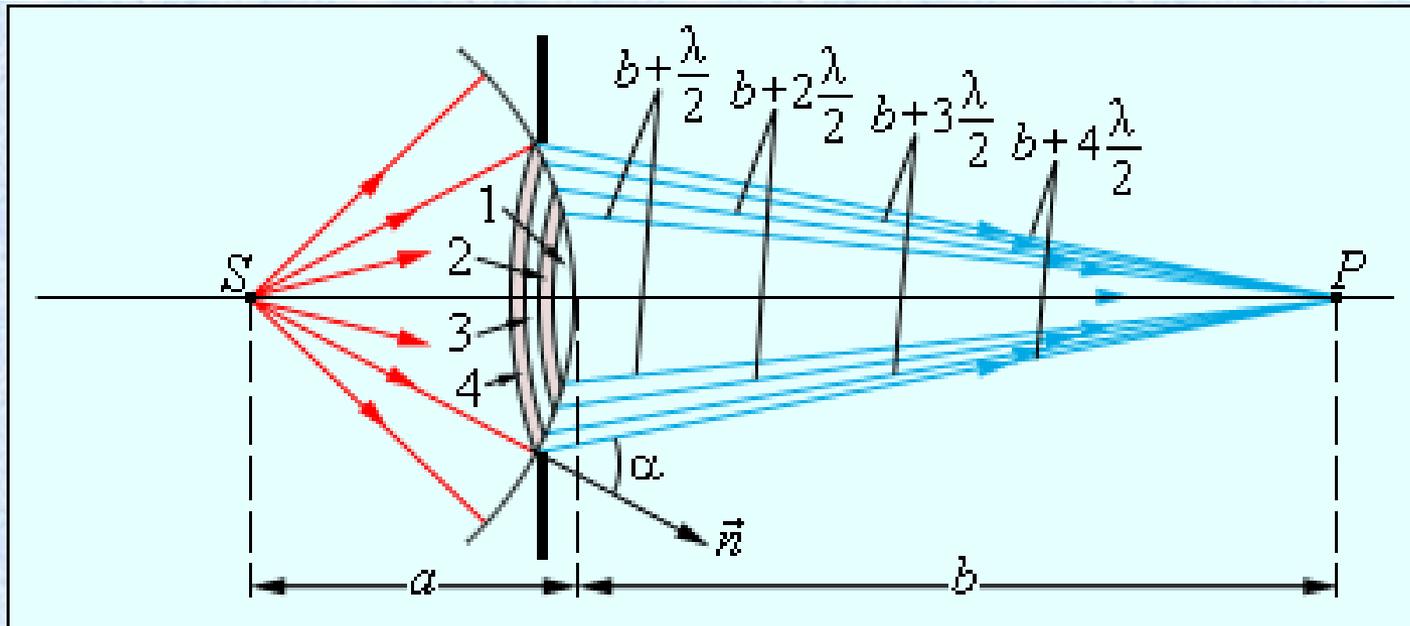
Зоны Френеля

Амплитуда A_m от некоторой m -й зоны Френеля равна среднему арифметическому от амплитуд примыкающих к ней зон:

$$A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2}$$

результатирующая амплитуда в точке Р:

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots = \frac{A_1}{2} \pm \frac{A_m}{2} = \left(\xrightarrow{m \gg 1} \right) = \frac{A_1}{2}$$



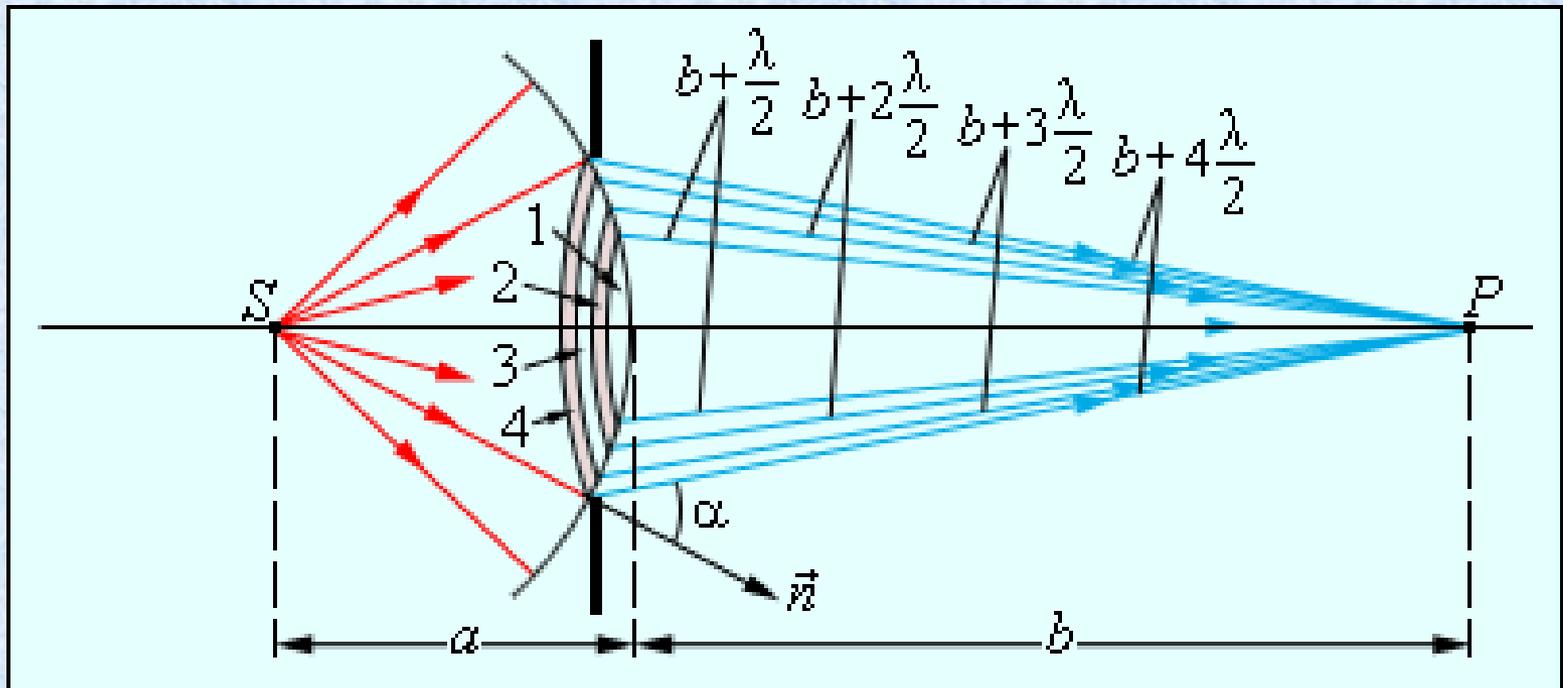
Зоны Френеля

Площади зон Френеля:

$$\sigma = \frac{\pi ab \lambda}{a + b}$$

Радиус внешней границы m -ой зоны Френеля:

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

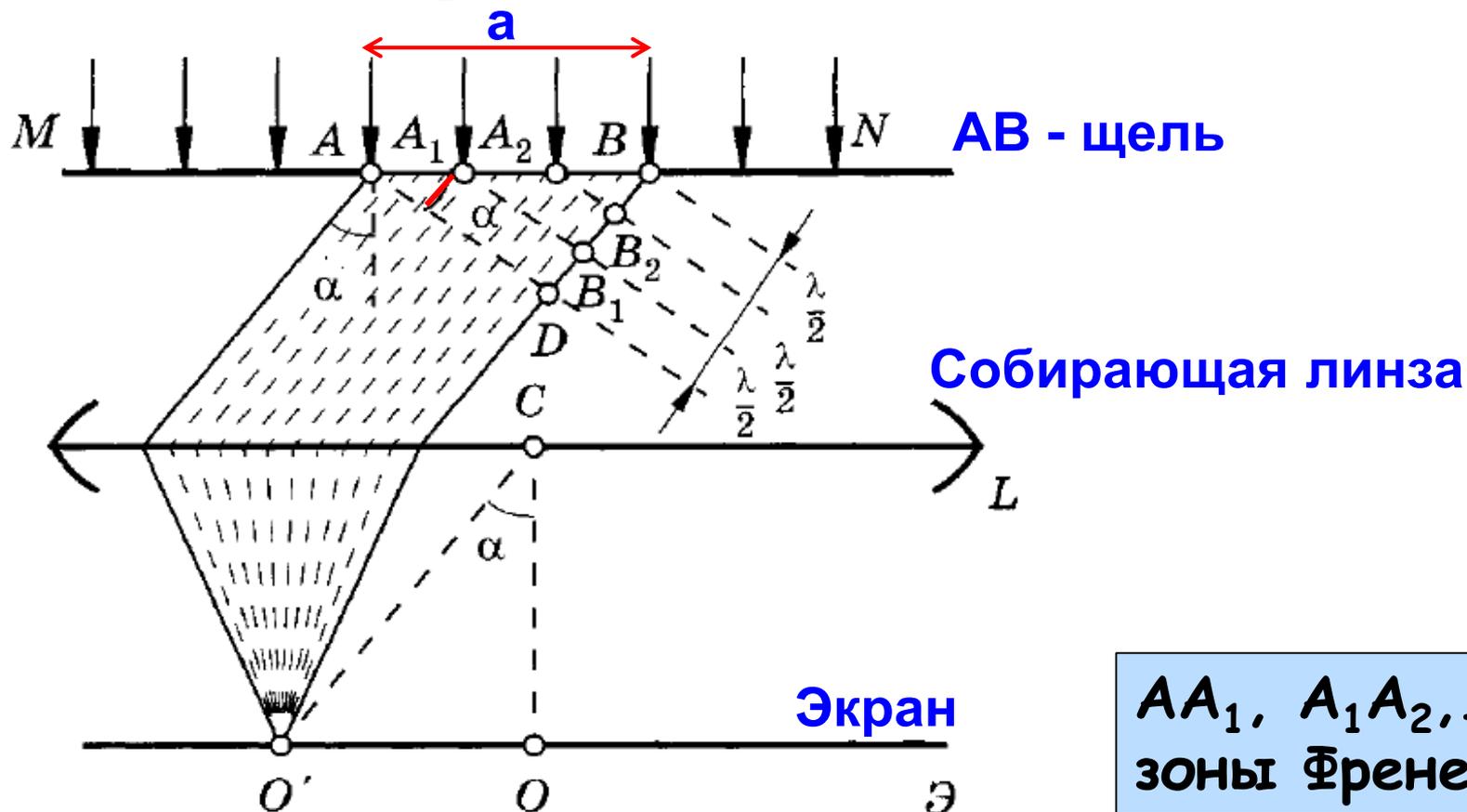


Дифракция Фраунгофера на щели

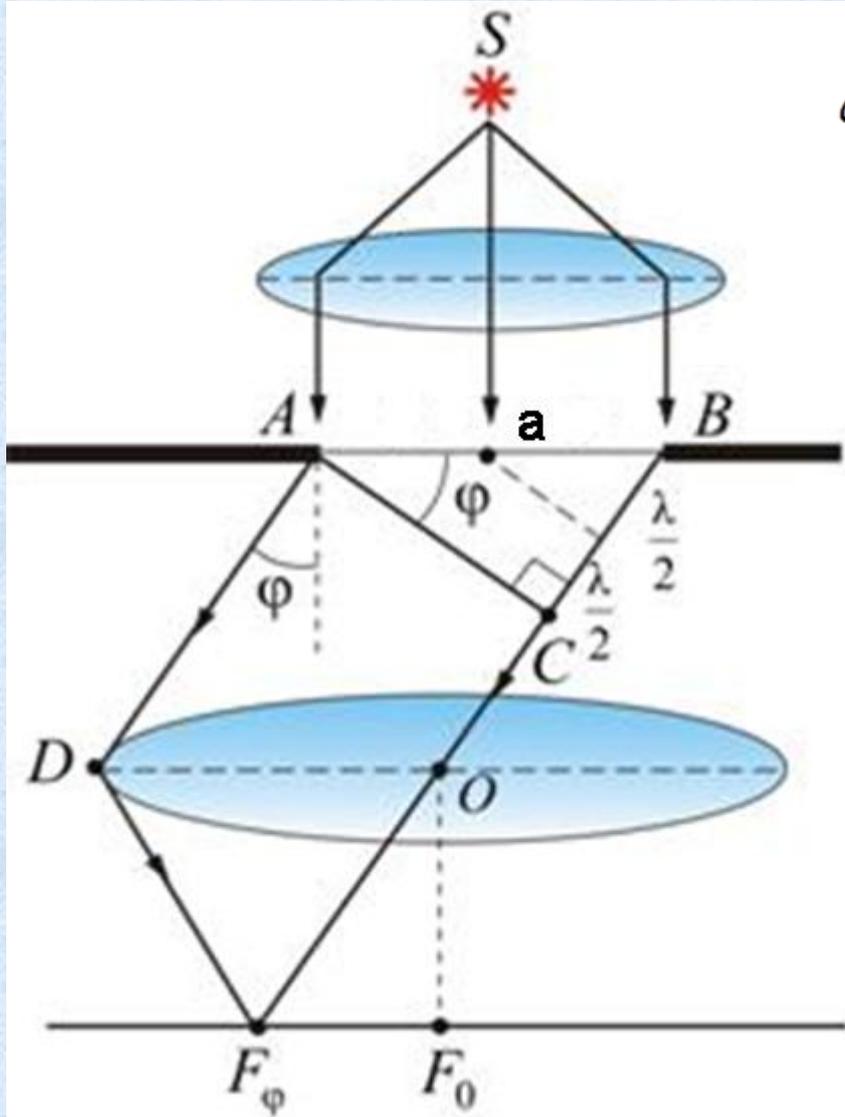
Число зон Френеля, укладывающихся в щели АВ зависит от длины волны λ и угла α .

Условие максимума: $|BD| = a \sin \alpha = \pm (2k + 1)(\lambda/2)$; $k = 1, 2, \dots$
(нечетное число зон Френеля)

Условие минимума: $a \sin \alpha = \pm 2k(\lambda/2) = \pm k\lambda$; $k = 1, 2, \dots$
(четное число зон Френеля)



Дифракция Фраунгофера на щели

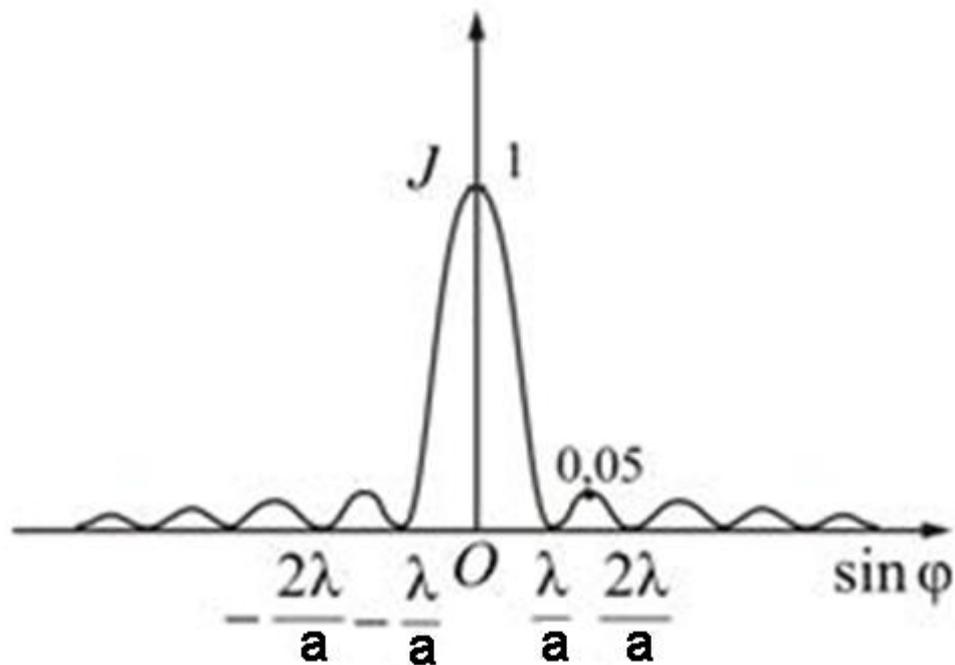


$$a \sin \varphi = \pm(2m+1) \frac{\lambda}{2} - \text{МАКСИМУМ}$$

$$a \sin \varphi = \pm m \lambda - \text{МИНИМУМ}$$

a – ширина щели, λ – длина волны

m – целое число



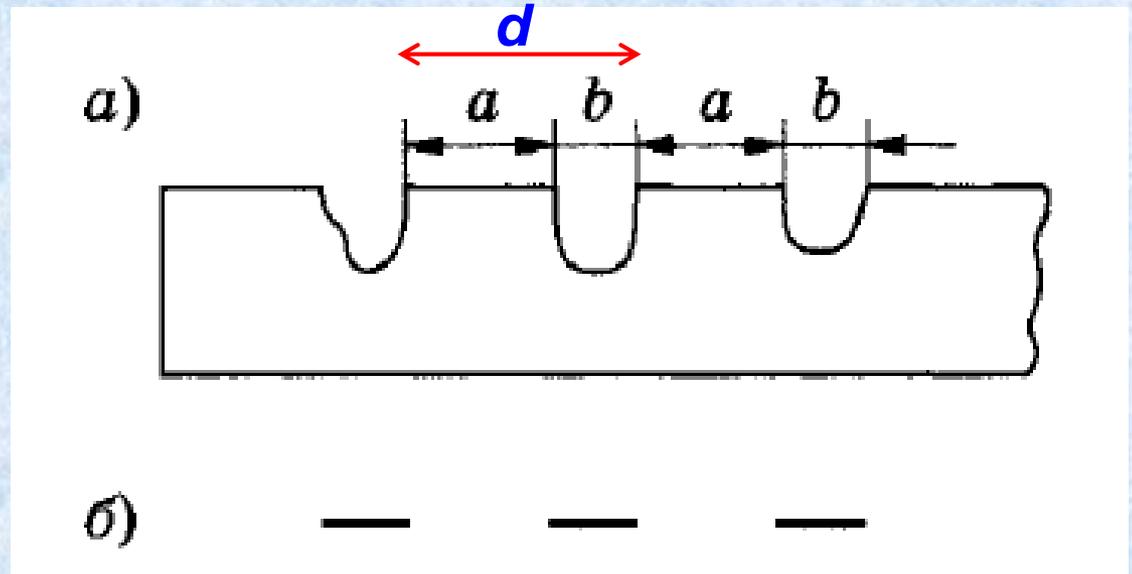
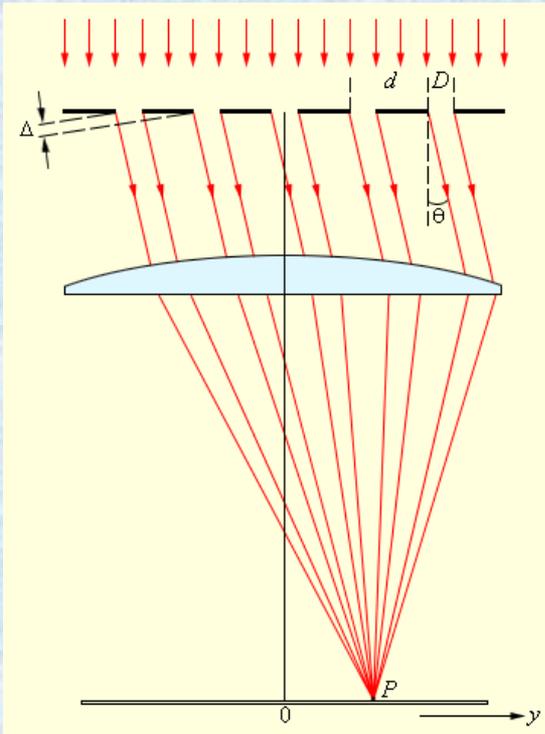
Дифракционная решетка

Дифракционная решетка — оптическое устройство, представляющее собой совокупность большого числа параллельных, обычно равноотстоящих друг от друга, щелей.

Постоянная (период) решетки d — расстояние между соседними щелями:

$$d = a + b$$

Суммарная дифракционная картина есть результат взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей



Дифракционная решетка

Условие главных максимумов: $d \sin \theta = k \lambda$

d – постоянная решетки, λ – длина волны, m – целое число

