

# **Омский государственный технический университет**

**Кафедра физики**

## **Калистратова Л.Ф.**

**Электронные лекции по разделам оптики,  
квантовой механики, атомной и ядерной физики**

**9 лекций**

**(18 аудиторных часов)**

# Лекция 1. Волновая оптика. Интерференция света

## План лекции

- 1.1. Основные характеристики волновых процессов. Электромагнитные волны.
- 1.2. Основные энергетические величины световых пучков.
- 1.3. Интерференция света.
- 1.4. Интерференция света от двух когерентных источников света (опыт Юнга).
- 1.5. Интерференция света на тонких плёнках.
- 1.6. Кольца Ньютона.
- 1.7. Применение интерференции света.

# 1.1. Основные характеристики волновых процессов. Электромагнитные волны

**Волной** называется процесс распространения колебания в среде.

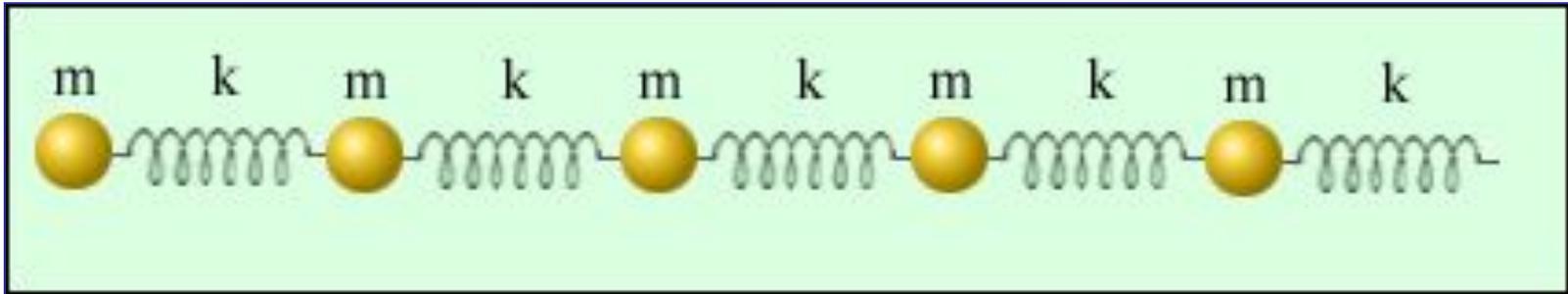
**Волна:**

- переносит энергию;
- не переносит вещество.

Передача колебаний от одной точки среды к другой обусловлена наличием сил упругости между точками среды.

Колеблющиеся **частицы среды** при волновом процессе:

- не перемещаются вместе с волной;
- колеблются около своих положений равновесия;
- передают движение от одной частицы к другой.



**Волны** бывают:

- **механические** (упругие, звуковые, сейсмические, волны на воде);
- **электромагнитные** (радиоволны и световые волны);
- **ударные** (Цунами).

**Монохроматической** называется **волна**,

- вызывающая колебания точек среды по гармоническому закону (по закону синуса или косинуса) с одинаковой частотой.

Волны распространяются в среде с **фазовой скоростью  $v$** .

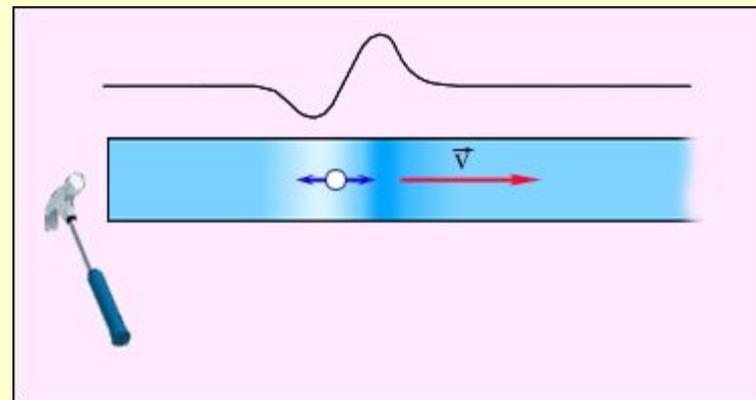
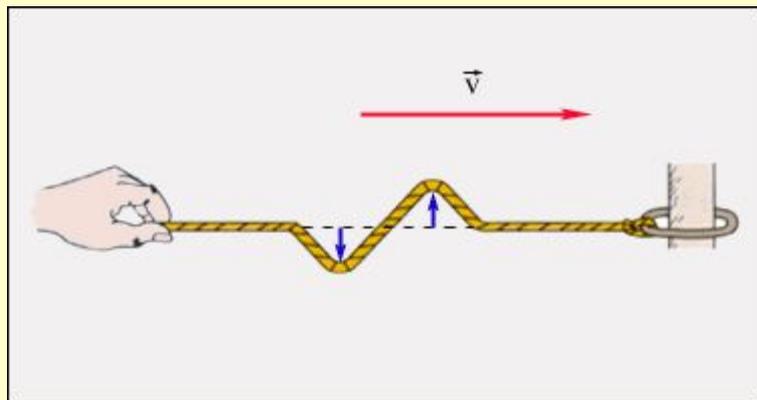
**Скорость звуковых волн** в воздухе:  **$v = 340$  м/с;**

**Скорость электромагнитных волн** в вакууме:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 300000 \text{ км/с}$$

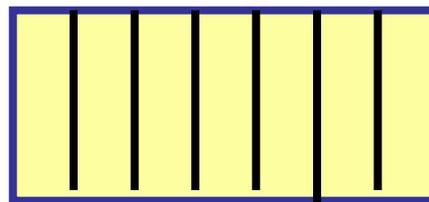
**Волны** бывают: **поперечными и продольными.**

**Поперечной** называется волна, вызывающая колебания частиц среды перпендикулярно к направлению распространения волны (например, колебания струны гитары, электромагнитные волны).

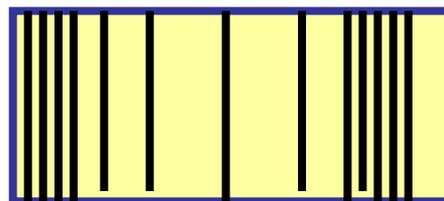


**Продольной** называется волна, вызывающая колебания частиц среды вдоль направления распространения волны (например, звуковые волны в воздухе).

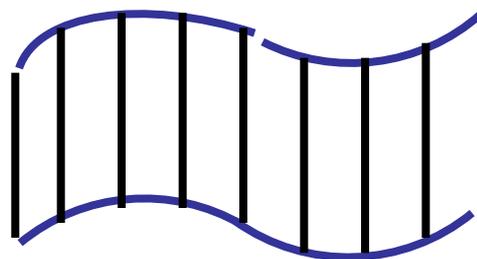
**Невозмущённая среда**



**Продольная волна**



**Поперечная волна**



**Волновая поверхность** – геометрическое место точек среды, колеблющихся в одинаковых фазах.

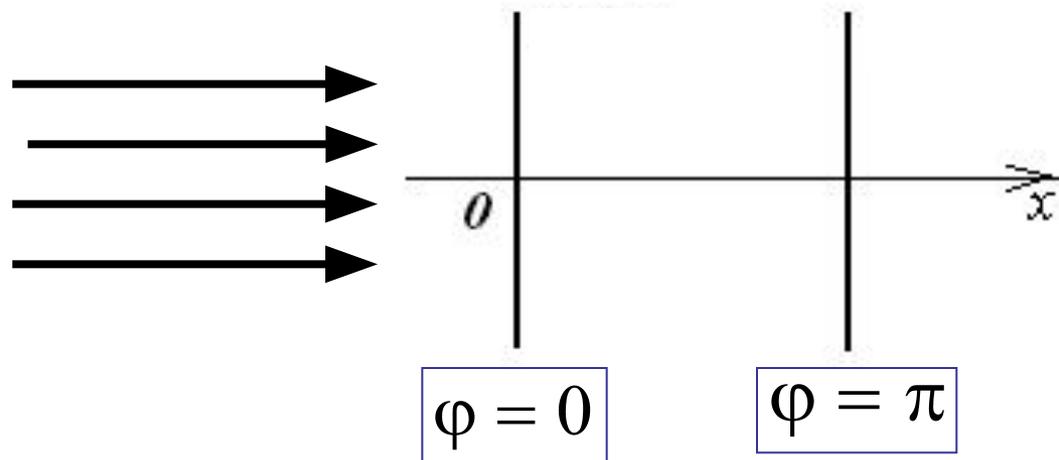
**Волновые поверхности** - неподвижны.

**Фронт волны** - геометрическое место точек среды, отделяющее уже возмущённую волной среду от ещё не возмущённой.

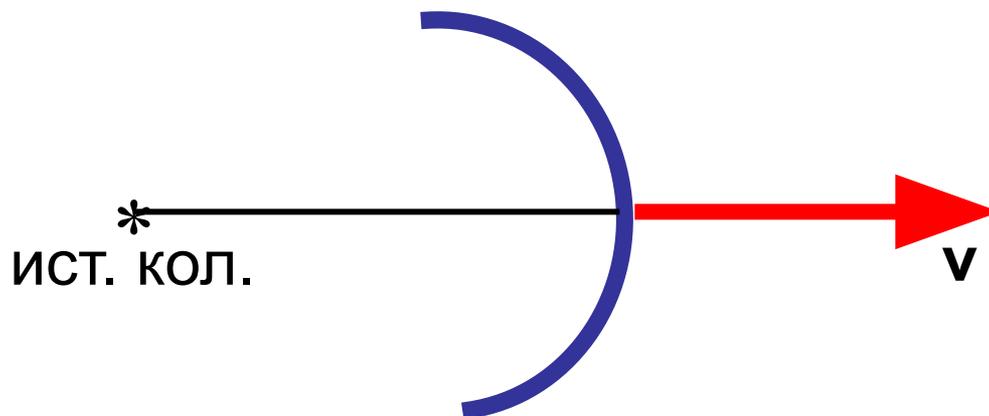
Фронт волны перемещается в пространстве со скоростью  **$v$** .

В зависимости от **формы волновых поверхностей** **волны** бывают: плоские, сферические, цилиндрические, эллиптические.

## Плоские волновые поверхности



## Сферический фронт волны



## **Основные параметры** ВОЛНЫ:

- **фазовая скорость;**
- **длина волны;**
- **частота волны;**
- **период волны;**
- **циклическая частота.**

### **Фазовая скорость:**

- **это скорость, с которой перемещается в пространстве данная фаза волны.**
- в каждой точке среды она перпендикулярна к элементу волновой поверхности в случае однородной и изотропной среды.
- зависит от плотности среды и ее упругих свойств.

## Частота волны

$\nu$  – число полных колебаний частицы среды за единицу времени.

## Циклическая частота волны

$\omega$  – число полных колебаний, совершаемых частицей среды за  $2\pi$  секунд.

## Период волны

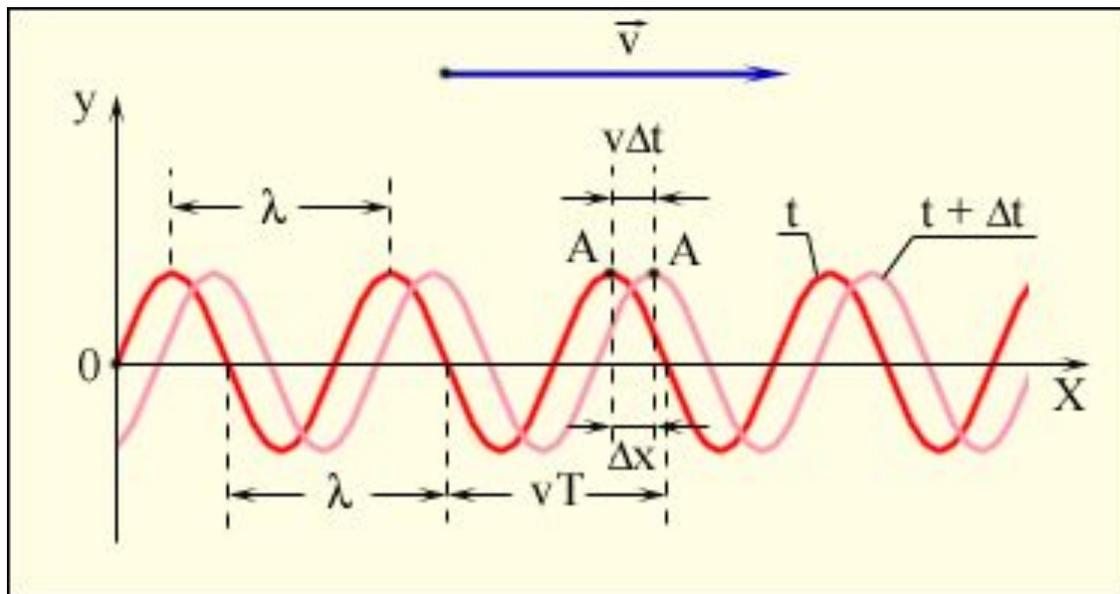
$T$  – время, в течение которого частица среды совершает одно полное колебание.

$$\omega = 2\pi\nu$$

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}$$

## Длина волны:

- расстояние между равновесными положениями ближайших частиц среды, колеблющихся в одинаковых фазах;
- расстояние, на которое волна распространяется за время, равное периоду.



$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}$$

## Волновое число:

- показывает изменение фазы при прохождении волной единичного расстояния.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$k = \frac{\omega}{v}$$

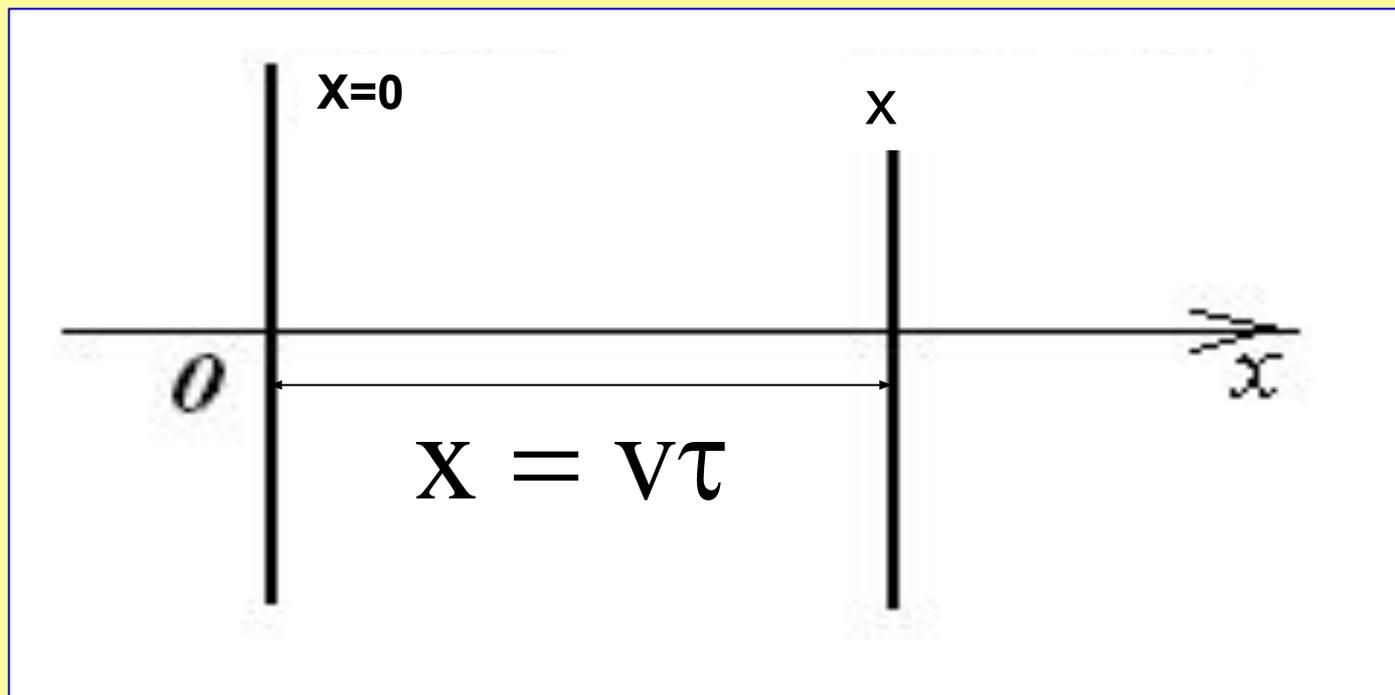
## Волновой вектор:

- указывает направление распространения энергии волны.

$$\vec{k} = k\vec{n}$$

$\vec{n}$  – единичный вектор нормали к волновой поверхности.

Колебания частиц, принадлежащих волновой поверхности с координатой  $x$ , начнутся несколько позже колебаний точек, принадлежащих источнику колебаний ( $x = 0$ ), так как требуется некоторое время для того, чтобы волна прошла это расстояние.



**Уравнением волны** называется уравнение, позволяющее найти смещение точек среды от положения равновесия в любой момент времени.

**Уравнение волны** есть периодическая функция координат равновесных положений частиц и времени:

$$\xi = \xi(x, y, z, t)$$

**Уравнение плоской гармонической волны**, распространяющейся в направлении оси X:

$$\xi(x, t) = \xi_0 \sin(\omega t \pm kx)$$

Знак **минус** относится к **бегущей** волне, знак **плюс** к **отражённой** волне.

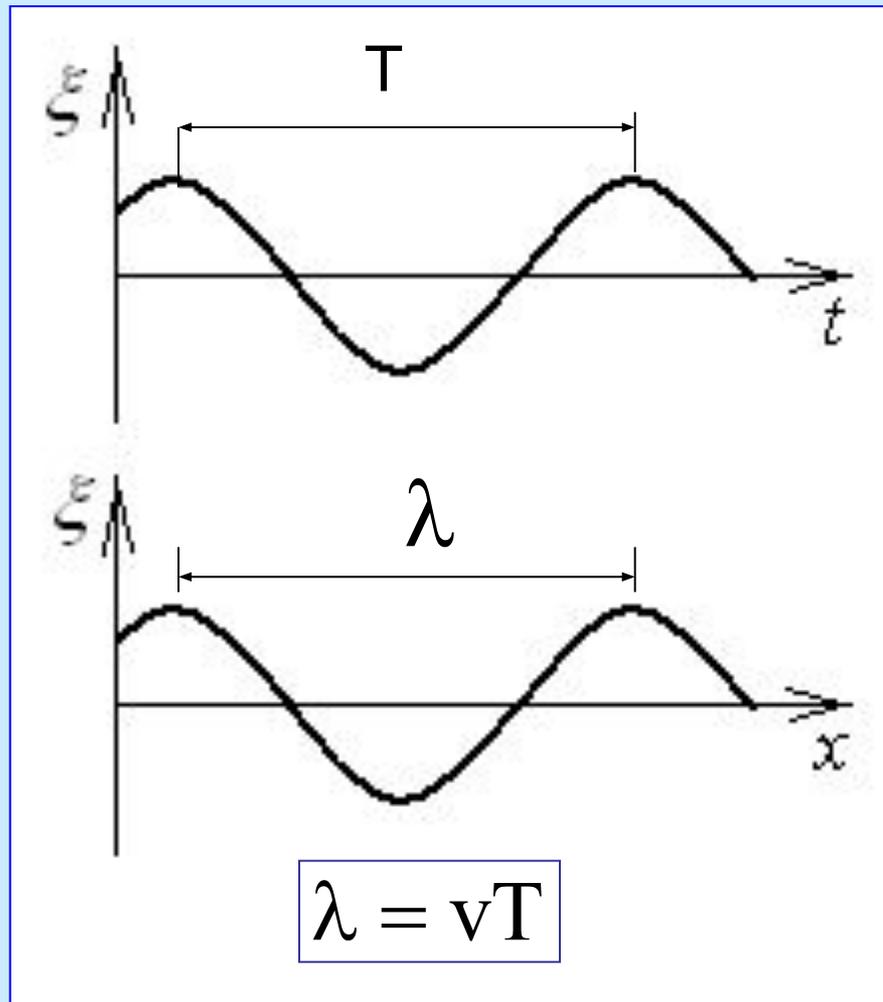
## Плоская волна

- относится к простейшим видам волн;
- колебания частиц среды происходят совершенно одинаково в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны;
- **амплитуда колебаний** точек среды одинакова на **любых расстояниях от источника волн.**

**Уравнение плоской гармонической волны,**  
распространяющейся в произвольном  
направлении:

$$\xi(\mathbf{r}, t) = \xi_0 \sin(\omega t \pm k\mathbf{r})$$

## Графическое изображение плоской волны



## Сферическая волна

- порождается точечным источником колебаний;
- **амплитуда** сферической волны уменьшается в зависимости от пройденного волной расстояния.

**Уравнение сферической волны,**  
распространяющейся в произвольном  
направлении:

$$\xi(\mathbf{r}, t) = \frac{\xi_0}{r} \sin(\omega t - kr)$$

Уравнение волны есть решение соответствующего дифференциального уравнения, называемого **волновым уравнением**.

**Волновое уравнение** для волны, распространяющейся по оси X:

$$\frac{d^2\xi}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2\xi}{dt^2}$$

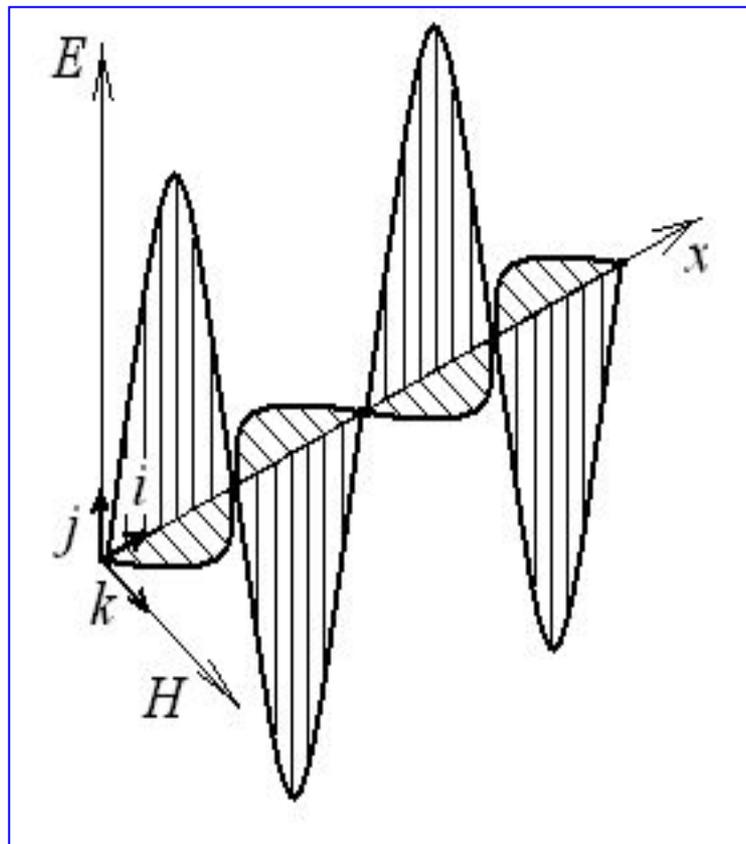
**Волновое уравнение** для волны, распространяющейся в произвольном направлении:

$$\frac{d^2\xi}{dx^2} + \frac{d^2\xi}{dy^2} + \frac{d^2\xi}{dz^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2\xi}{dt^2}$$

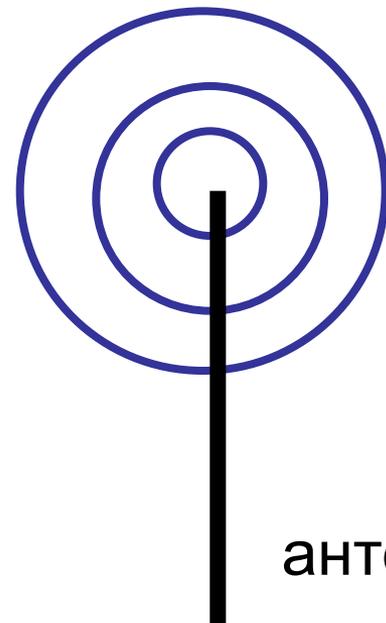
## Электромагнитные волны

Открытый колебательный контур, выполненный в виде антенны, передаёт энергию **электромагнитных волн** во всех направлениях.

Скорость распространения электромагнитных волн:



$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{n}$$



антенна

Для случая однородной и изотропной среды вдали от зарядов и токов **уравнения колебаний напряжённостей электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей в электромагнитной волне** записываются в виде:

$$E_{zx} = E_0 \sin(\omega t - kx + \varphi_0)$$

$$H_{yx} = H_0 \sin(\omega t - kx + \varphi_0)$$

### Волновые уравнения

$$\frac{d^2 E_z}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 E_z}{dt^2}$$

$$\frac{d^2 H_y}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 H_y}{dt^2}$$

## 1.2. Основные энергетические величины световых пучков

**Полная энергия** волны, распространяющейся в объёме  $V$  в среде с плотностью  $\rho$  равна сумме кинетической энергии колеблющихся частиц и потенциальной энергии их взаимодействия.

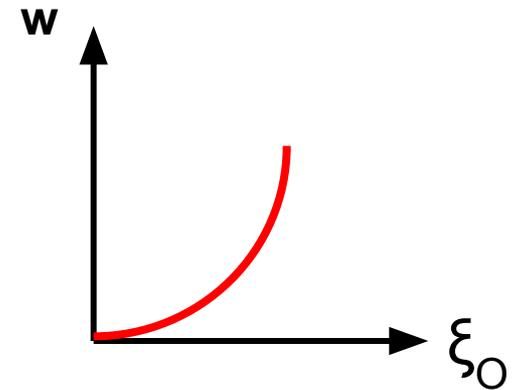
$$W = W_K + W_{\Pi} = \frac{1}{2} \rho \left[ \left( \frac{d\xi}{dt} \right)^2 + v^2 \left( \frac{d\xi}{dx} \right)^2 \right] \cdot V$$

$\frac{d\xi}{dt}$  - скорость частиц среды;  $\frac{d\xi}{dx}$  - деформация среды под действием волны в направлении оси X.

## Объёмная плотность энергии волны

- энергия, заключённая в единице объёма.
- пропорциональна плотности среды  $\rho$ ;
- квадрату амплитуды волны  $\xi_0$ ;
- квадрату её частоты  $\omega$ .

$$w = \frac{1}{2} \rho \xi_0^2 \omega^2$$



**Поток энергии** – энергия перенесённая волной в единицу времени через некоторую площадку  $S$ :

$$\Phi = \frac{dW}{dt}$$

$$[\Phi] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}$$

**Плотность потока энергии** – энергия, перенесённая волной за единицу времени через единичную площадку:

$$J = \frac{dW}{dt \cdot dS}$$

$$[J] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

## Вектор плотности потока энергии

- направлен по скорости распространения волны  $\mathbf{v}$ ;
- был введён в рассмотрение русским физиком

Н. А. Умовым;

- называется **вектором Умова**:

$$\mathbf{J} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{v}$$

## Электромагнитные волны

**Объёмная плотность энергии** складывается из плотности энергии электрического и магнитного полей:

$$W = W_E + W_H = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

Тогда **модуль плотности потока энергии** электромагнитной волны:

$$J = w v = EH$$

Поскольку векторы **E**, **H** и **J** в электромагнитной волне образуют **правовинтовую систему**, поэтому **вектор плотности потока энергии** записывается как:

$$\vec{J} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Вектор плотности потока энергии электромагнитной волны **J** получил название **вектора Умова - Пойнтинга**.

## 1.3. Интерференция света

**Оптика** – учение о распространении электромагнитного излучения (света) и его взаимодействии с веществом.

**Современная теория света** – синтез корпускулярных и волновых представлений двойственной природы света.

**Свет** – одна из форм материи, которая может существовать как в виде вещества, так и в виде поля (**корпускулярно-волновой дуализм света**).

**Свет** – электромагнитная волна с длинами волн в интервале

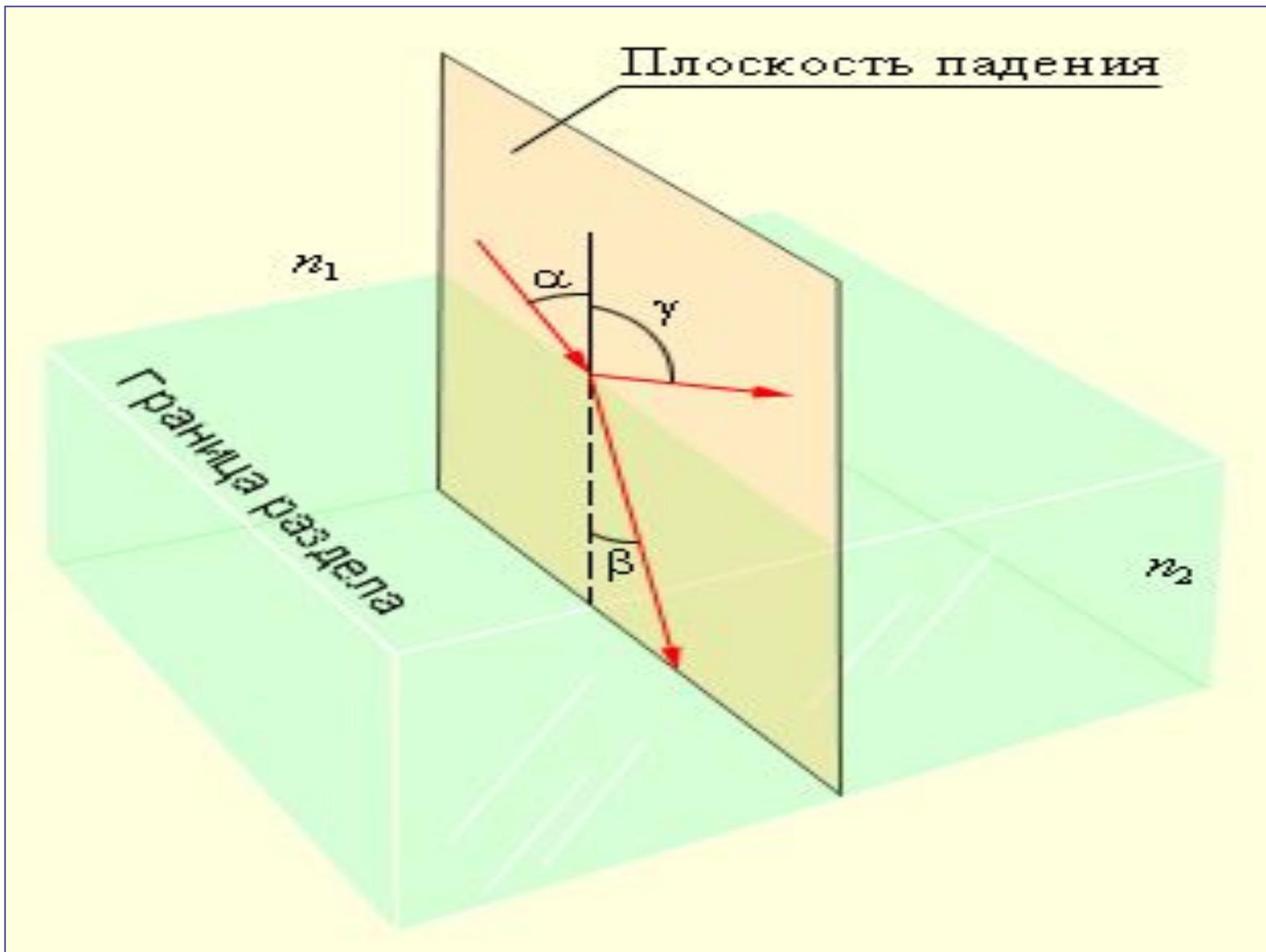
**(0,4 - 0,76) мкм**

**(400 – 760) нм.**

На глаз человека оказывает действие только **электрическое поле** электромагнитной волны.

Поэтому в дальнейшем, говоря о свете, будем подразумевать только **колебания вектора напряжённости электрического поля** – вектора  $\vec{E}$

Иногда вектор  $\vec{E}$  называют **световым вектором**.



## Законы геометрической оптики

1. Падающий, отражённый, преломленный лучи и перпендикуляр к границе раздела сред лежат в одной плоскости (плоскость падения).
2. **Закон отражения:** угол падения равен углу отражения.

$$\alpha = \gamma$$

3. **Закон преломления:** отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

## **Абсолютный показатель преломления среды**

показывает, во сколько раз скорость света в веществе меньше, чем в вакууме.

$$n = \frac{c}{v}$$

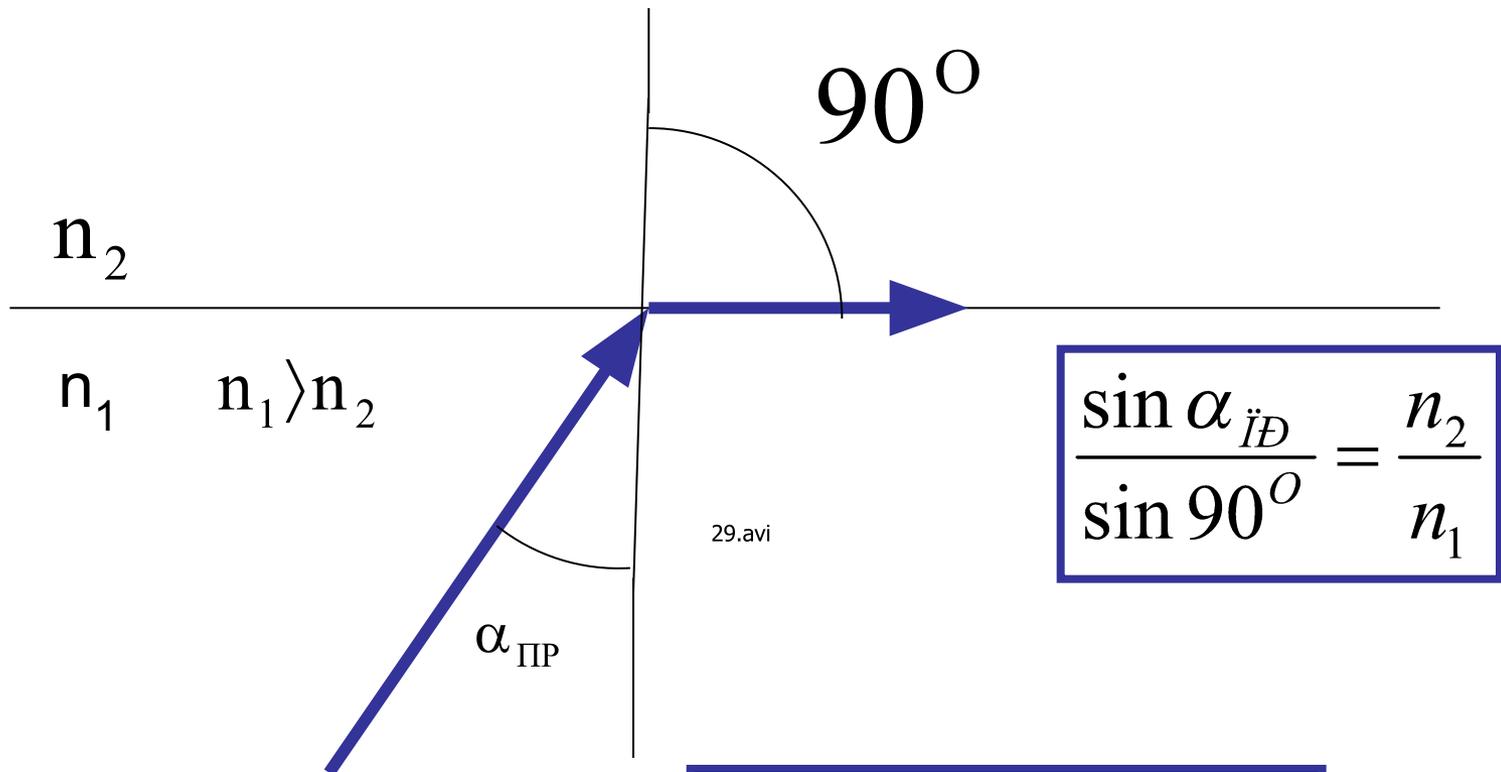
## **Полное отражение**

- явление, при котором энергия падающего света остаётся в первой среде;
- состояние, при котором нет преломленного луча.

Явление полного внутреннего отражения может наступить, когда свет на границу раздела сред идёт **из более плотной среды в менее плотную:**

$$n_1 > n_2$$

## Полное отражение



$$\frac{\sin \alpha_{\text{гД}}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$$

**Предельный угол**  
полного отражения

$$\alpha_{\text{ПР}} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

## Интерференция волн

- общее свойство волн любой природы.
- явление усиления колебаний в одних точках пространства и ослабление в других в результате наложения двух когерентных волн, приходящих в эти точки.

**Когерентными** называются волны одинаковой частоты с постоянной разностью фаз во времени.

$$\omega_1 = \omega_2$$

$$\Delta\varphi = \text{const}$$

Когерентные волны **усиливают** друг друга, **если** разность их фаз равна чётному числу  $\pi$  :

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

Когерентные волны **ослабляют** друг друга, **если** разность фаз равна нечётному числу  $\pi$  :

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

$k$  – целое число.

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

## Интерференция электромагнитных волн

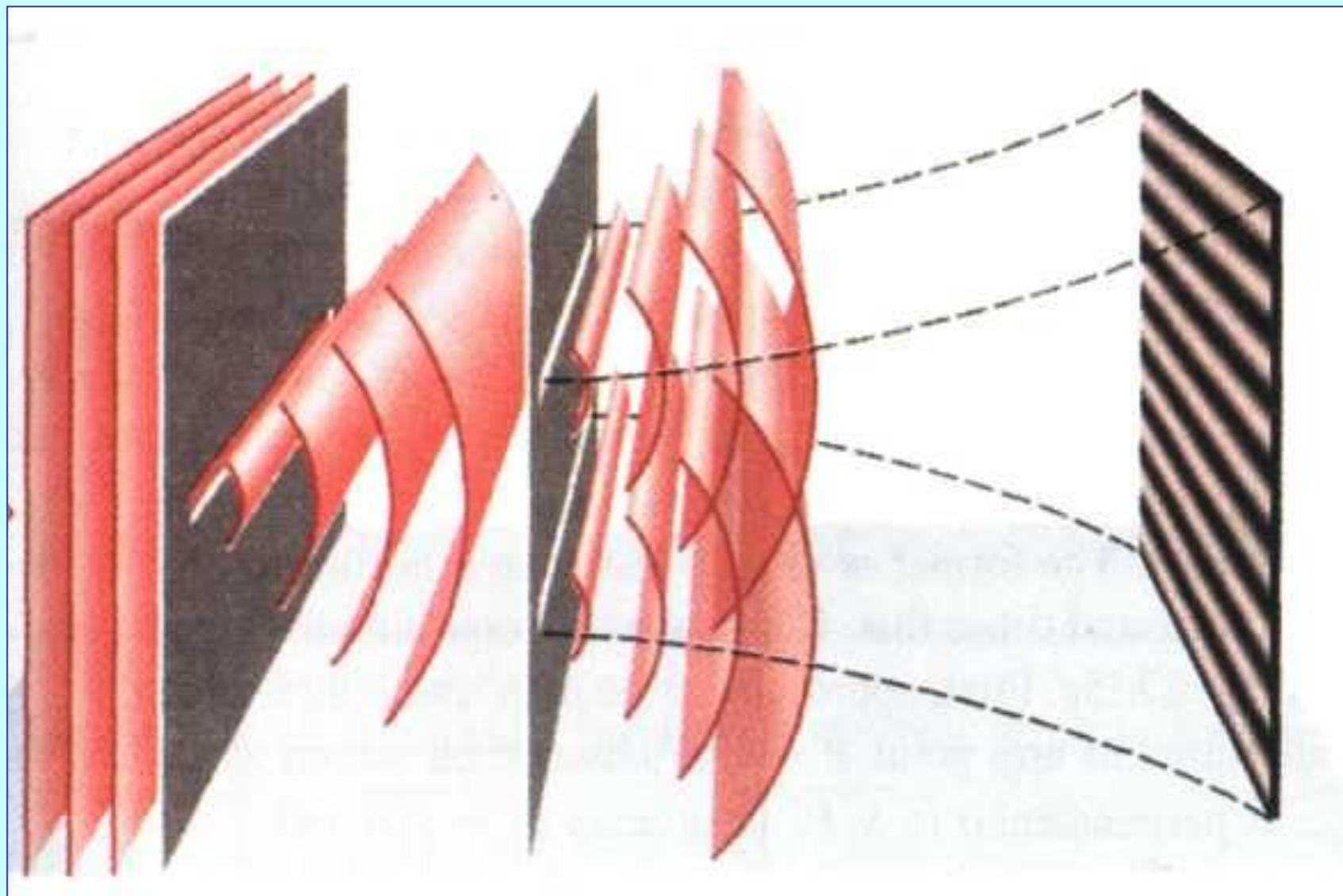
Источники естественного света не когерентны.

От таких источников с помощью глаза невозможно наблюдать устойчивую интерференционную картину.

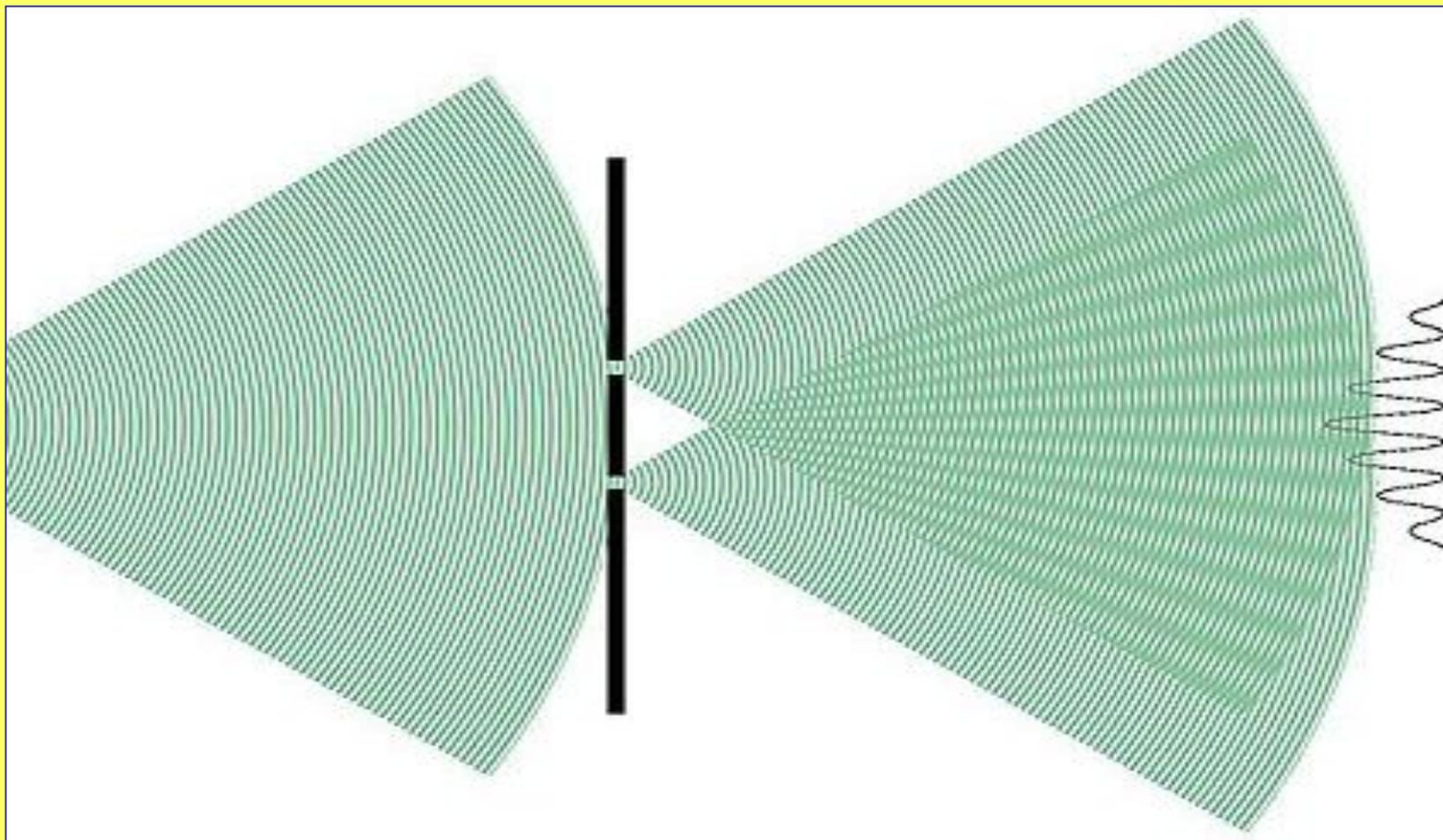
**Томас Юнг** предложил метод создания двух когерентных источников света.



# Опыт Юнга

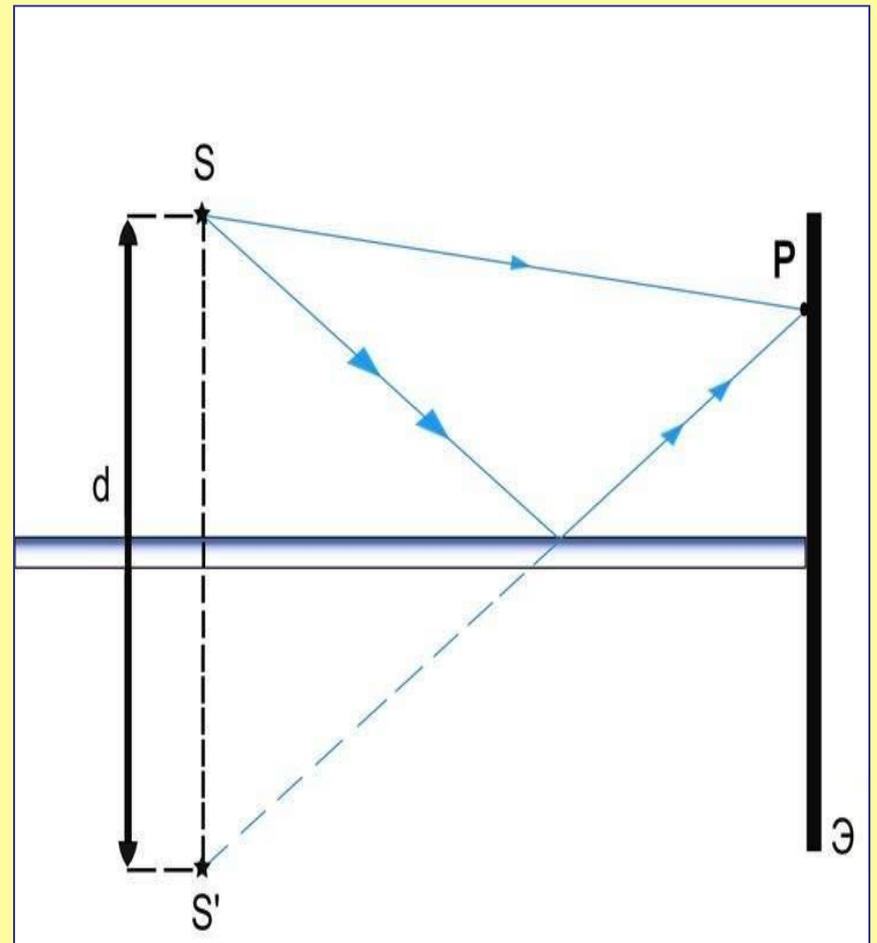


Волновой фронт световых волн от источника света (первая щель) проходит через две щели. На экране в области перекрытия волновых фронтов будет наблюдаться интерференционная картина.



## Способы получения когерентных источников света:

- деление цуга лучей на две части;
- бипризма Френеля;
- зеркало Френеля;
- зеркало Ллойда.



**Световые волны будут когерентны**, если они имеют:

- одинаковую частоту;
- постоянную разность фаз во времени;
- вектор  $\vec{E}$  в этих волнах колеблется в одной плоскости.

**Сложение  
двух некогерентных монохроматических  
световых волн**

Рассмотрим две распространяющиеся в одном направлении световых волны

- одинаковой частоты,
- с разными амплитудами,
- с непостоянной разностью фаз.

Запишем уравнения двух волн:

$$E_1 = E_{01} \sin(\omega t - kx + \varphi_{01}) = E_{01} \sin \varphi_1$$

$$E_2 = E_{02} \sin(\omega t - kx + \varphi_{02}) = E_{02} \sin \varphi_2$$

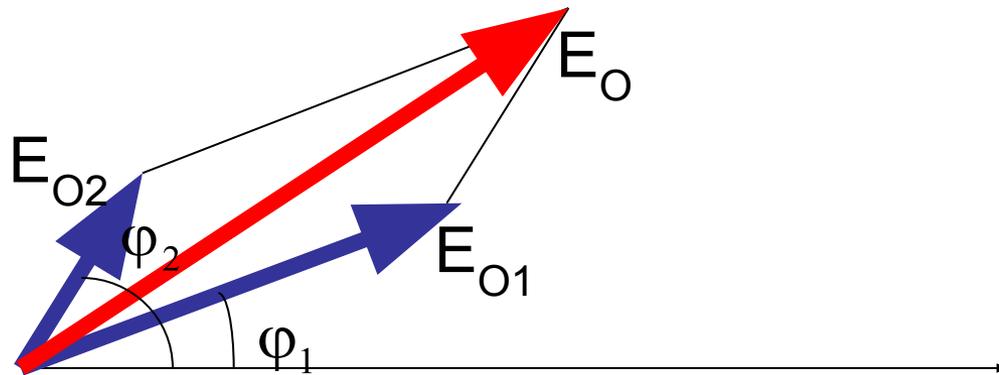
Амплитуды и начальные фазы у них будут разными.

$$E_{01} \neq E_{02}$$

Разность фаз у некогерентных волн изменяется во времени случайным образом:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \neq \text{const}$$

Сложение двух световых волн можно произвести по правилу параллелограмма, представив волны в виде векторов.



**Результирующая амплитуда** вычисляется по теореме косинусов:

$$E_O^2 = E_{O1}^2 + E_{O2}^2 + 2E_{O1}E_{O2} \cos \Delta\varphi$$

Усредним косинус:  $\langle \cos \Delta\varphi \rangle = 0$  )

Тогда **резльтирующая амплитуда** запишется как

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2$$

При этом **интенсивность света**, которая пропорциональна квадрату амплитуды ( $J \approx E^2$ ) будет равна

$$J_0 = J_1 + J_2$$

**Вывод: при наложении некогерентных световых пучков в любой точке пространства имеет место простое суммирование интенсивностей отдельных источников света (интерференции не наблюдается).**

## Сложение когерентных световых волн.

1. Пусть разность фаз равна **чётному числу**  $\pi$  :

$$\Delta\varphi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots, 2k\pi$$

$$\cos \Delta\varphi = 1$$

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}$$

$$E_0^2 = (E_{01} + E_{02})^2$$

$$E_0 = E_{01} + E_{02}$$

В этом случае **амплитуды** двух волн в любой точке пространства просто складываются:

$$E_0 = E_{01} + E_{02}$$

В величинах **интенсивностей** световой энергии получим выражение:

$$J_0 = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2}$$

По сравнению со сложением некогерентных пучков получен **эффект «усиления»** интенсивности света.

2. Пусть разность фаз равна **нечётному числу**  $\pi$  :

$$\Delta\varphi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots, (2k + 1)\pi$$

При этом условии

$$\cos \Delta\varphi = -1$$

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 - 2E_{01}E_{02}$$

$$E_0^2 = (E_{01} - E_{02})^2$$

$$E_0 = E_{01} - E_{02}$$

В величинах **интенсивностей** световой энергии получим

$$J_0 = J_1 + J_2 - 2\sqrt{J_1 J_2}$$

По сравнению со сложением некогерентных пучков получен **эффект «ослабления»** интенсивности света.

**Интерференцией света** называется явление перераспределения световой энергии в пространстве при наложении двух когерентных световых пучков, в результате чего образуются участки повышенной и пониженной интенсивности (**max** и **min** света).

## Условия наблюдения max и min света

**Максимумы** света наблюдаются при разности фаз, равной чётному числу  $\pi$  ;

**минимумы** – при разности фаз, равной нечётному числу  $\pi$  .

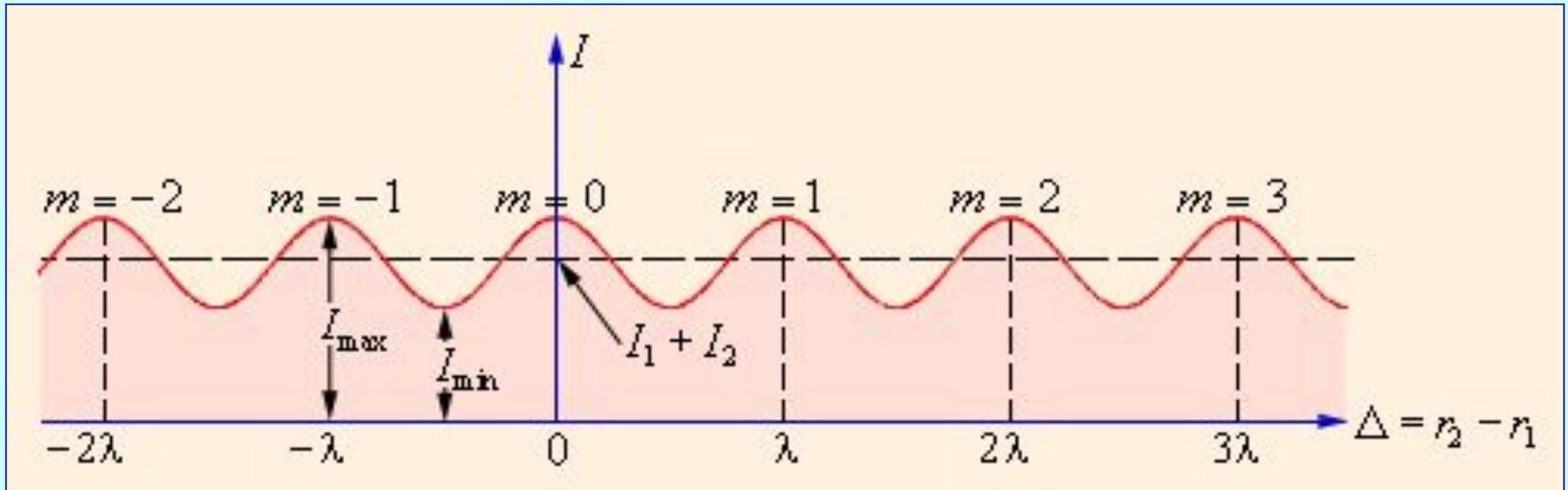
$$\text{max} : \Delta\varphi = 2k\pi$$

$$\text{min} : \Delta\varphi = (2k + 1)\pi$$

Целое число **k** – называется **порядком максимума или минимума**.

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

## Распределение интенсивности в интерференционной картине

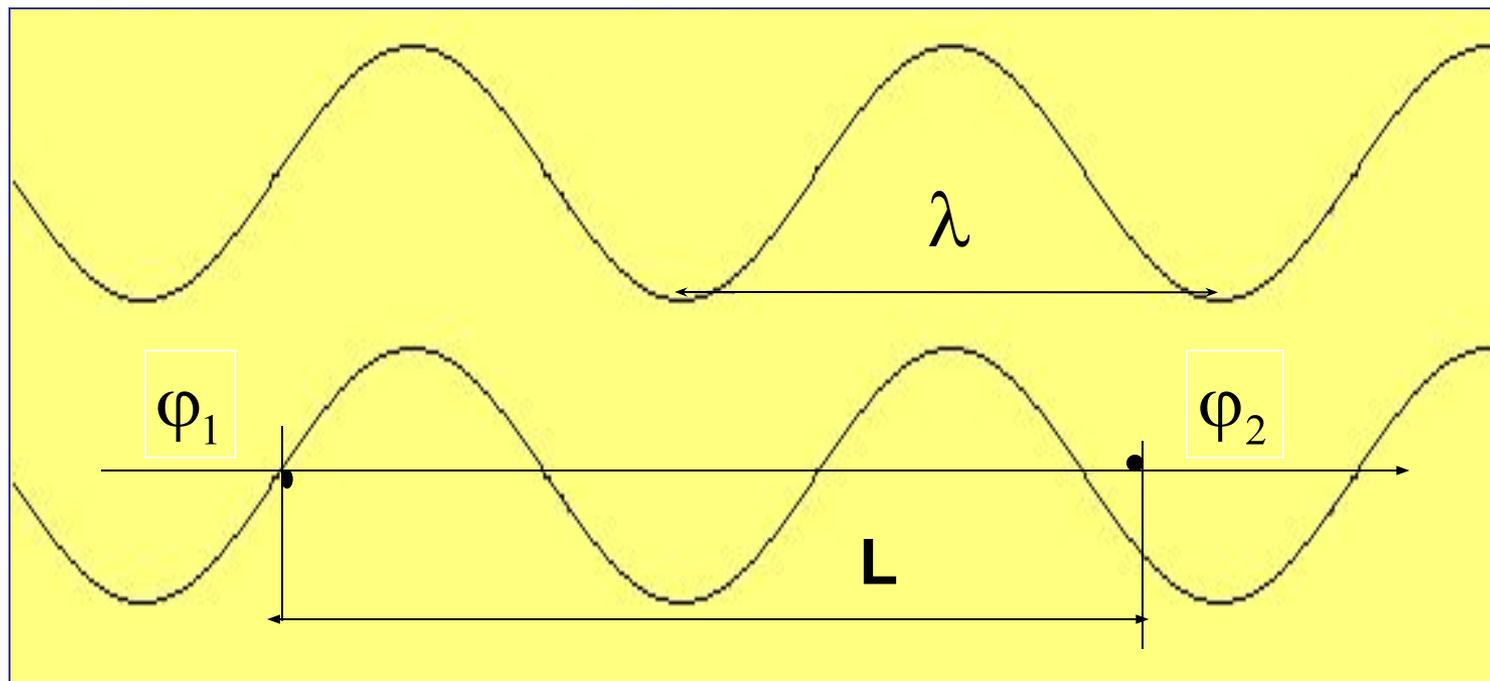


Интерференционная картина представляет собой чередования тёмных (min) и светлых (max) полос одинаковой ширины и высоты.

Если происходит наложение **красных** световых пучков ( $\lambda = 760$  нм), то все **максимумы** будут **красного цвета**.

Из теории волн известно соотношение между разностью фаз и расстоянием, проходимой волной:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} L$$



Два луча до точки наблюдения проходят разные расстояния в разных средах и набирают разность фаз:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \frac{2\pi}{\lambda} (L_2 n_2 - L_1 n_1) = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta_2 - \Delta_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\end{aligned}$$

**Оптический путь луча** равен произведению геометрического пути  $L$  на показатель преломления среды  $n$ :

$$\Delta_1 = L_1 n_1$$

$$\Delta_2 = L_2 n_2$$

**Оптическая разность хода** ( $\Delta$ ) равна разности оптических путей отдельных световых волн.

## Условия наблюдения максимумов и минимумов света

**Максимумы света** наблюдаются в тех точках пространства, для которых на оптической разности хода лучей укладывается чётное число полудлин волны; **минимумы света** – если на оптической разности хода укладывается нечётное число полудлин волны.

$$\text{max} : \Delta = 2k \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{min} : \Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Замечание: **правовинтовая система векторов** в электромагнитной волне требует, чтобы **при отражении света от более плотной среды** вектор напряжённости электрического поля (вектор  $E$ ) **изменил свою фазу на  $\pi$**  .

Это равносильно **изменению оптического пути луча на величину, равную  $\lambda/2$**  .

Это замечание нужно учитывать при решении конкретных задач при интерференции света.

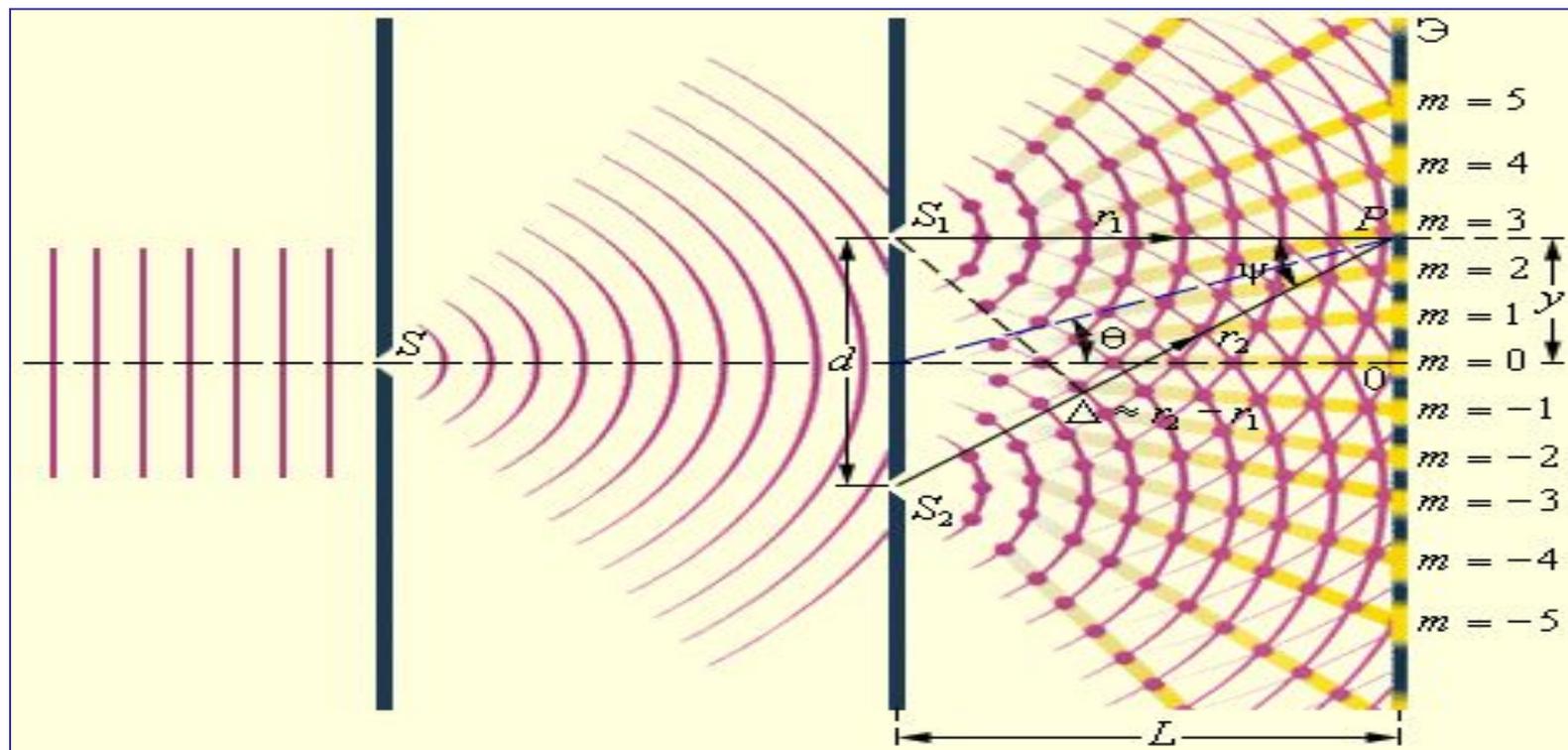
Опыт показывает, что интерференция картина будет наблюдаться при выполнении необходимых условий.

1. Световые волны, пришедшие в точку сложения разными путями, должны принадлежать одному цугу волн.
2. Разность хода этих частей цуга должна быть достаточно малой (значительно меньше длины самого цуга), чтобы эти части были максимально когерентны.
3. Интерференционные полосы на экране наблюдения должны быть локализованы в одном месте.

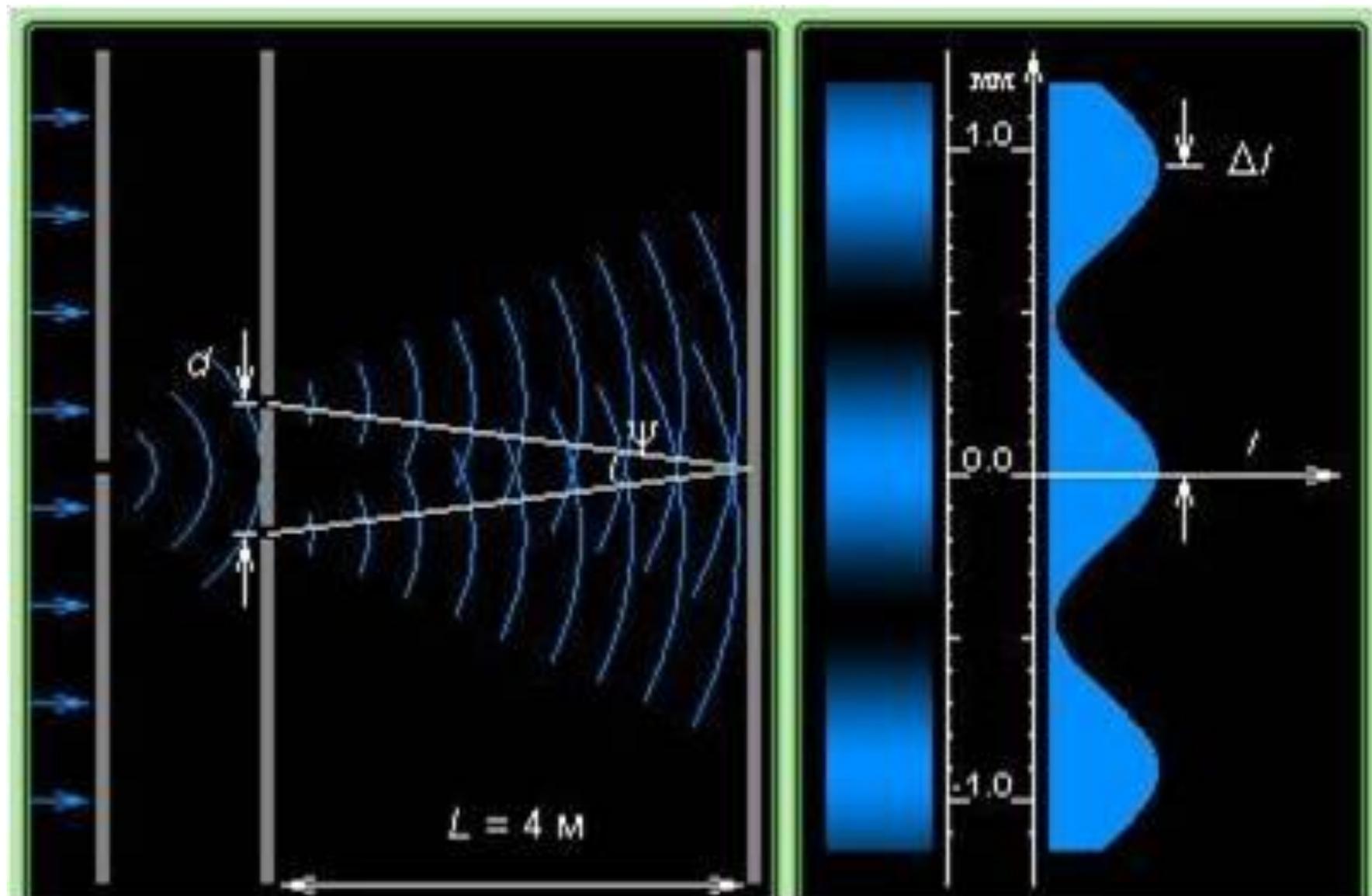
Для этого размеры самого источника света должны быть достаточно малы (источник света должен быть практически точечным).

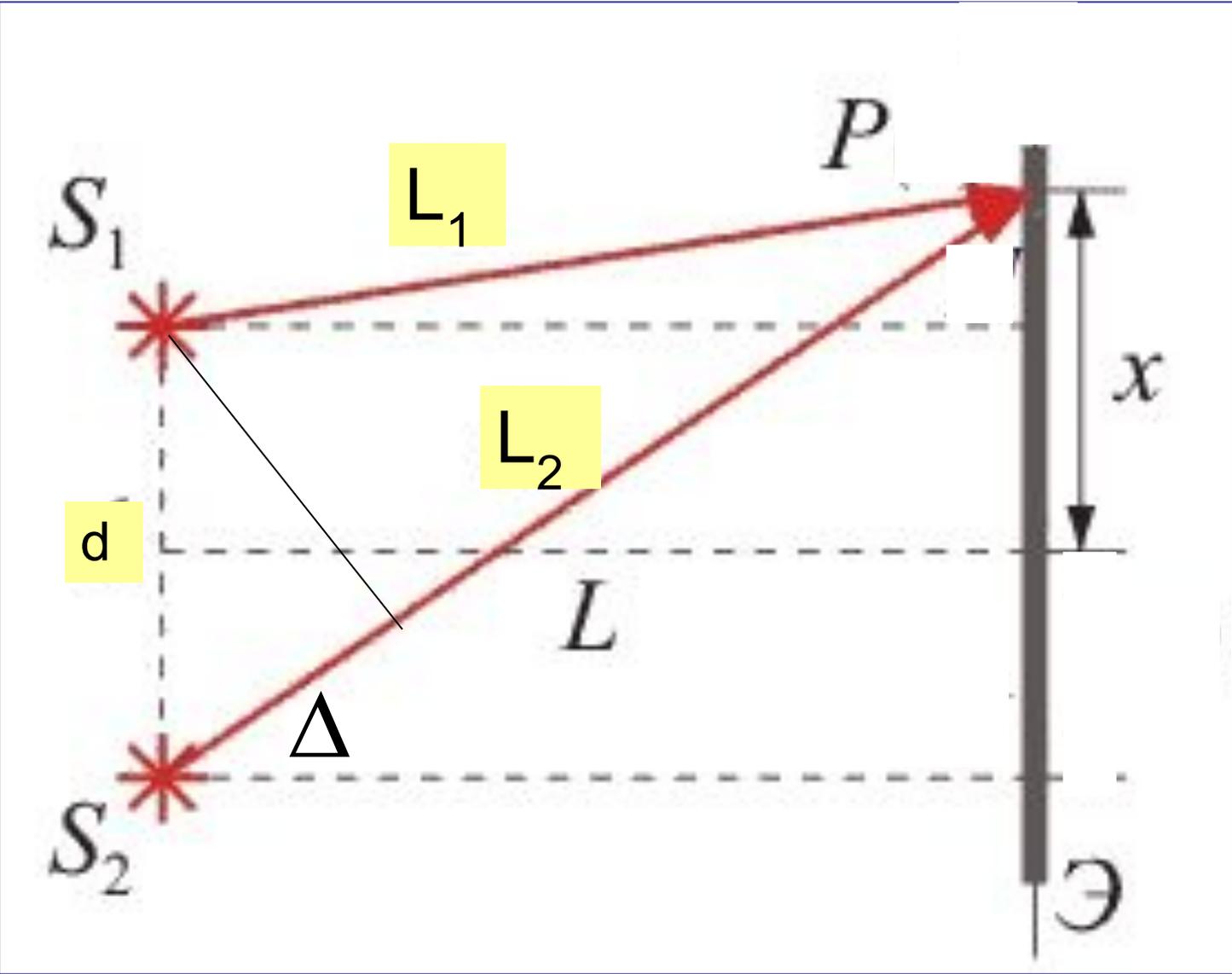
# 1.4. Интерференция света от двух когерентных источников (опыт Юнга)

## Опыт Юнга



# Интерференционная картина





Обозначим:

$d$  – расстояние между источниками;

$L$  – расстояние от источников до экрана (  $L \gg d$  );

$\lambda$  - длина волны монохроматического света.

**Геометрическая разность** хода лучей ( она же и **оптическая разность хода**) равна

$$\Delta = L_2 - L_1$$

Из геометрии рисунка:

$$L_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2$$

$$L_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2$$

Вычитая из второго уравнения первое, получим

$$(L_1 + L_2) \cdot (L_2 - L_1) = 2xd$$

При выполнении условия

$$L \gg d$$

$$(L_1 + L_2) = 2L$$

$$(L_2 - L_1) = \Delta$$

Тогда **оптическая разность хода** лучей:

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

**Максимумы света** будут наблюдаться в тех точках экрана, для которых выполняется условие:

$$\text{max} : \Delta = 2k \frac{\lambda}{2}$$

Тогда

$$\frac{xd}{L} = 2k \frac{\lambda}{2}$$

или

$$x_{\max} = \frac{kL\lambda}{d}$$

**Ширина интерференционного максимума:**

- равна расстоянию между соседними максимумами;
- не зависит от номера максимума;
- равна ширине интерференционного минимума:

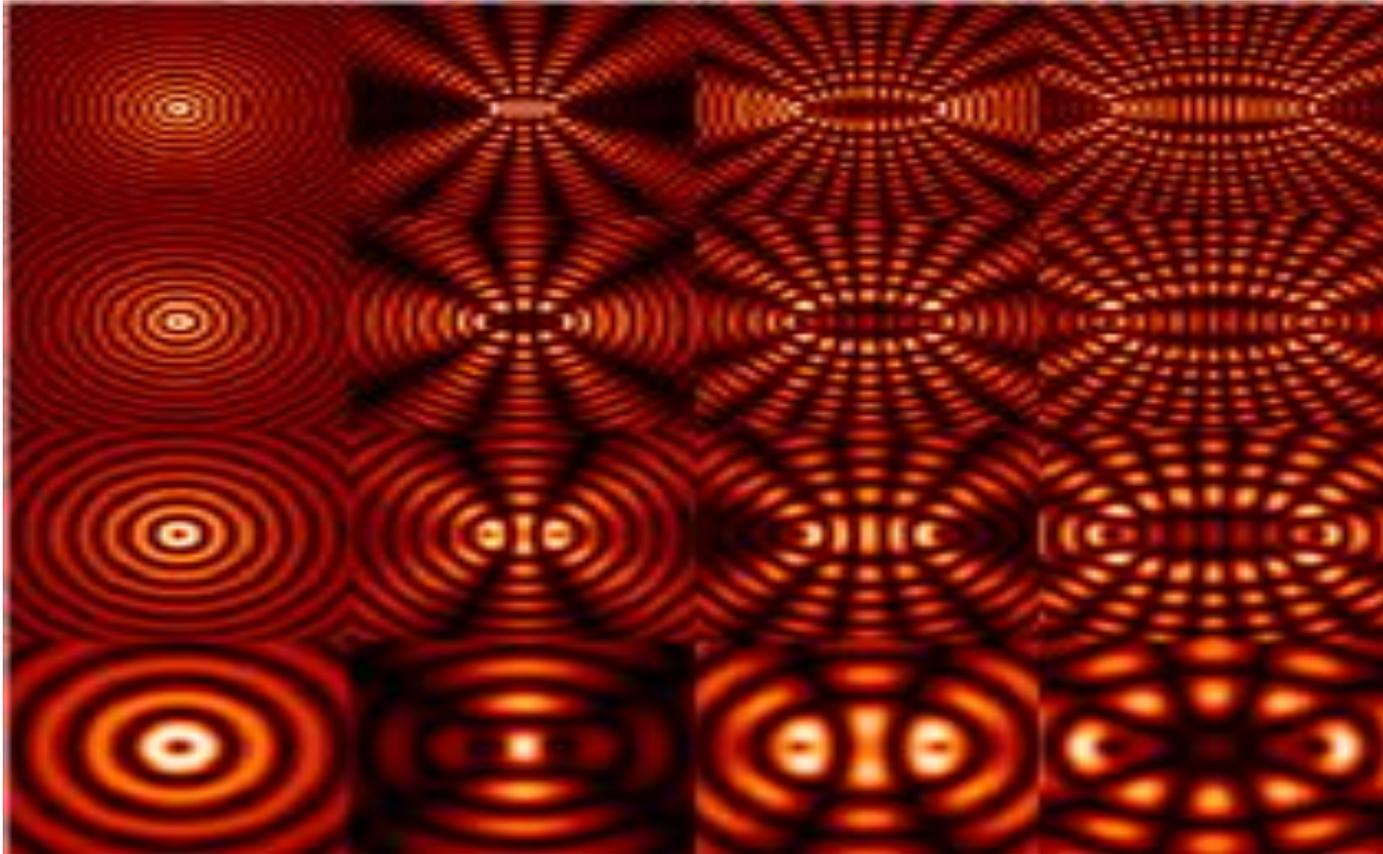
$$\Delta x_{\max} = x_{k+1} - x_k = \frac{L\lambda}{d}$$

$$\Delta x_{\max} = \Delta x_{\min}$$

Интерференционная полоса тем шире,

- чем меньше расстояние между источниками  $d$ ;
- чем больше расстояние от источников света до экрана  $L$ .

## Интерференционные картины



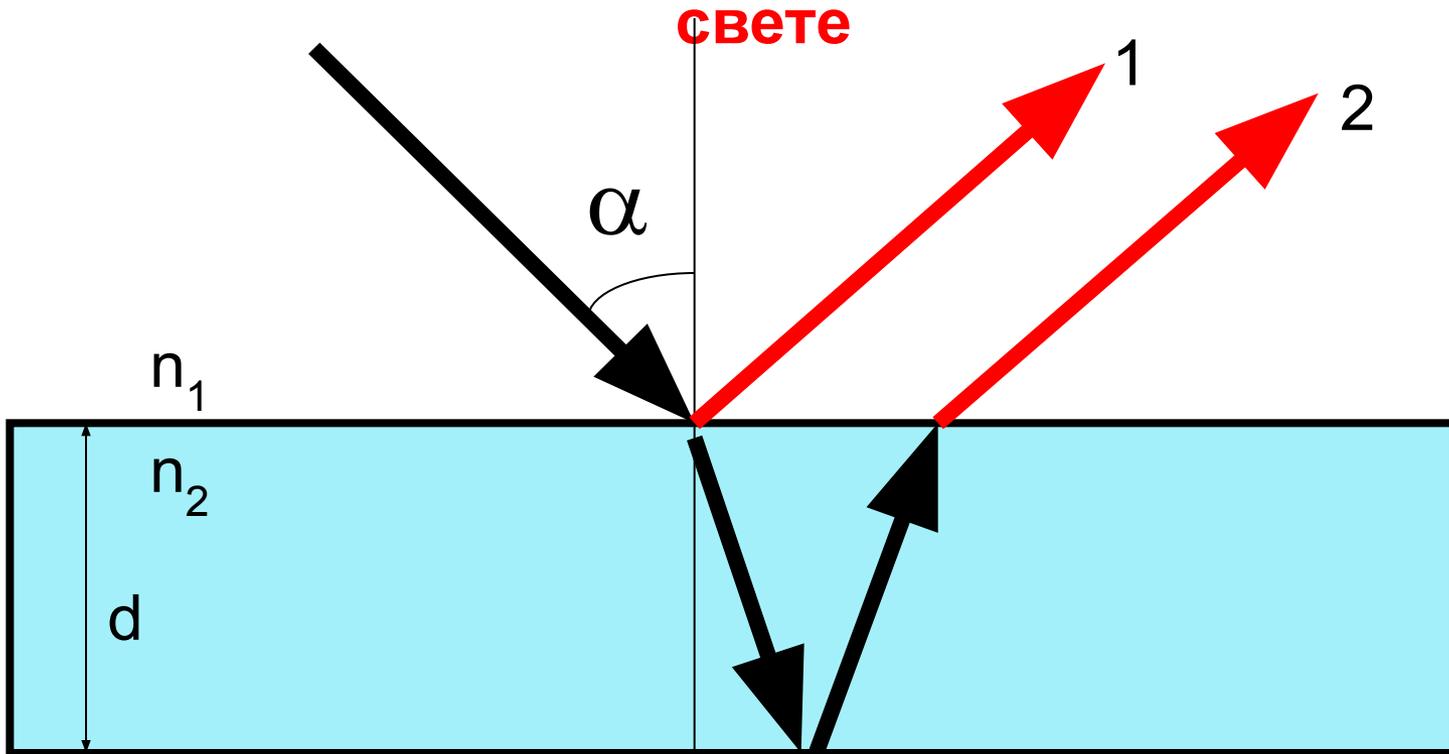
Интерференция двух круговых когерентных волн, в зависимости от длины волны и расстояния между источниками

## 1.5. Интерференция света на тонкой плёнке

Пусть из среды с показателем преломления  $n_1$  на прозрачную плоскопараллельную плёнку с показателем преломления  $n_2$  и толщиной  $d$  под углом  $\alpha$  падает плоская монохроматическая волна.

На верхней поверхности пленки луч разделится на два: один (1) отразится от верхней поверхности плёнки, а второй (2) преломится и войдёт в другую среду.

## Интерференция на тонкой плёнке в отражённом свете



**Лучи 1 и 2 когерентны.** Интерференционная картина будет локализована на верхней плоскости плёнки.

**Условие наблюдения максимумов** при интерференции света на тонкой плёнке **в отражённом свете** (без вывода):

$$2d\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}$$

$n_{21}$  - относительный показатель преломления двух сред.

С увеличением толщины плёнки **d** число интерференционных полос (число **k**) возрастает.

Интерференция света на обычном оконном стекле не наблюдается, так как толщина стекла значительно больше длины волны света.

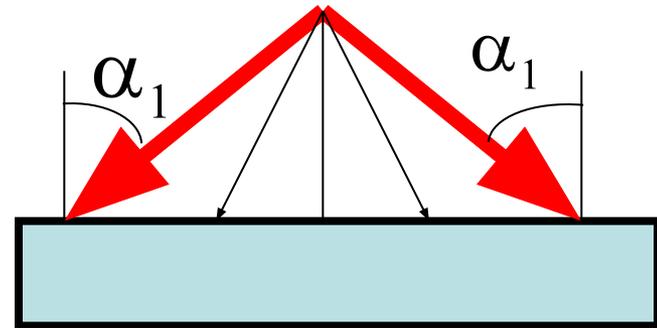
# Интерференционные картины на тонкой плёнке



## 1.6. Полосы равного наклона и равной толщины

**Полосы равного наклона** - интерференционные полосы, возникающие в результате наложения лучей, падающих на плоскопараллельную пластинку под одинаковыми углами.

Полосы равного наклона локализованы в бесконечности.

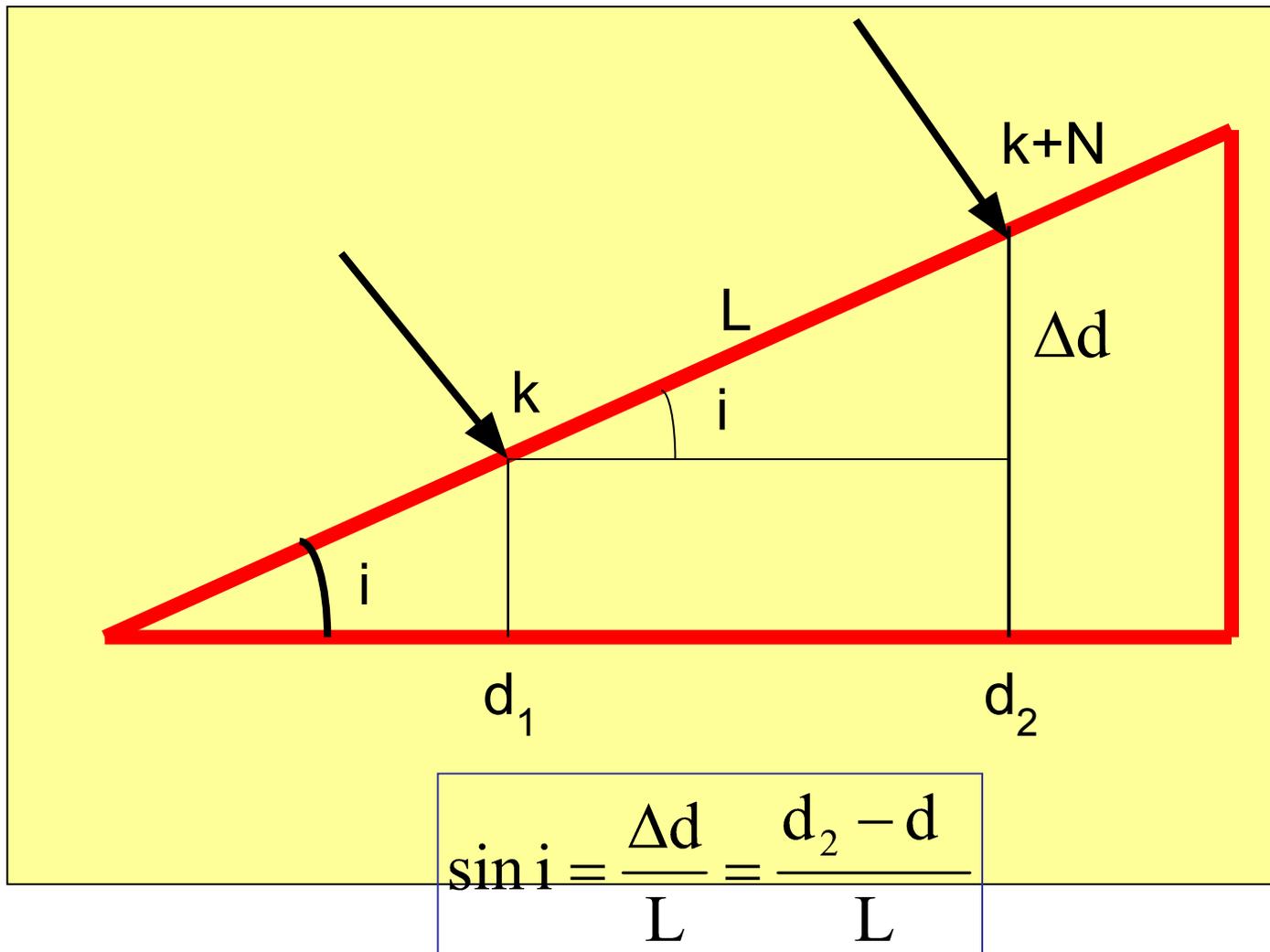


**Полосы равной толщины** - интерференционные полосы, возникающие в результате интерференции от мест одинаковой толщины.

Примерами полос равной толщины является интерференция на клине и **кольца Ньютона**.

Полосы равной толщины локализованы вблизи поверхности **клина** на его наклонной плоскости.

## Интерференция на клине



Условия наблюдения максимумов для двух толщин при нулевом угле падения запишутся:

$$2d_1 n \pm \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}$$

$$2d_2 n \pm \frac{\lambda}{2} = 2(k + N) \frac{\lambda}{2}$$

Угол клина можно определить по количеству интерференционных полос  $N$ , приходящихся на расстояние  $L$  поверхности клина.

$$\sin i = \frac{N\lambda}{nL}$$

## 1.6. Кольца Ньютона

Кольца Ньютона наблюдаются при отражении света **от воздушного клина**, образованного пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны.

Параллельный пучок света падает нормально на плоскую поверхность линзы и частично отражается от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора между линзой и пластинкой.

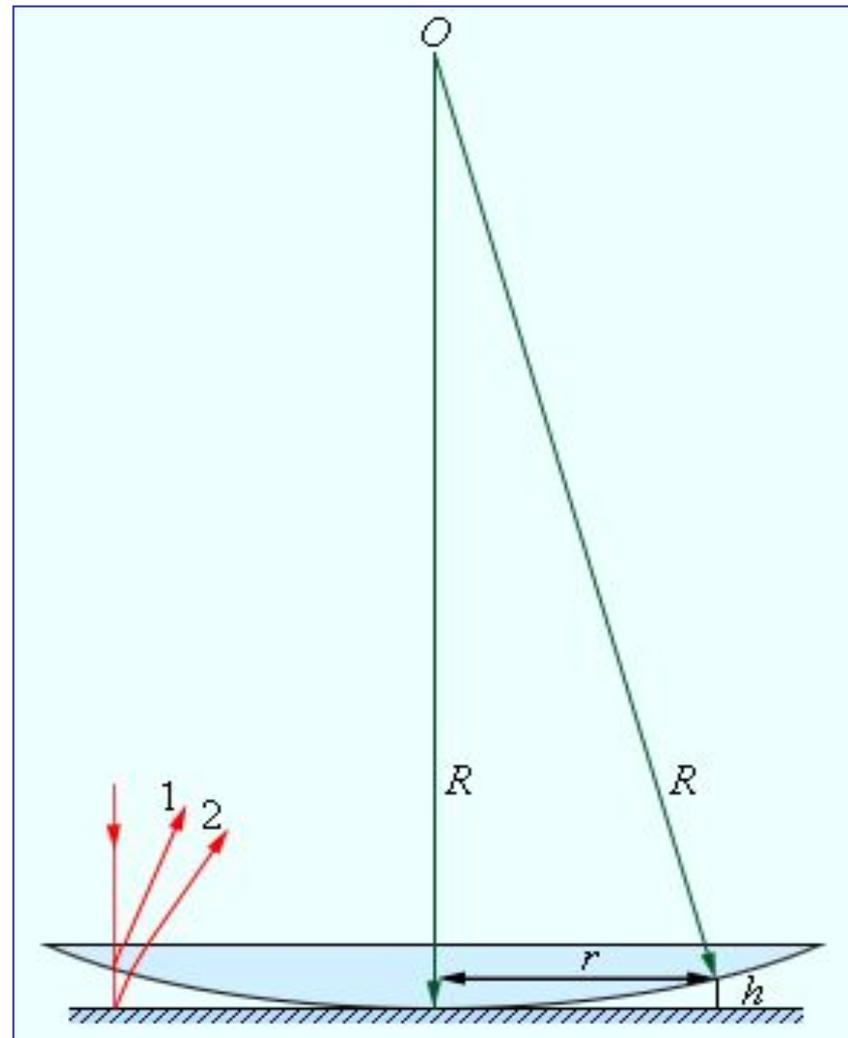
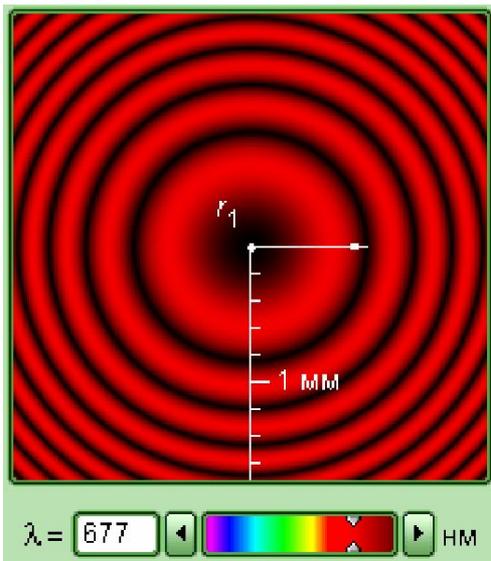
**$h$**  – толщина воздушного зазора;

**$r$**  – радиус кольца Ньютона;

**$R$**  – радиус линзы.

Интерференция возникает при сложении волн, отразившихся от двух сторон воздушной прослойки лучей 1 и 2.

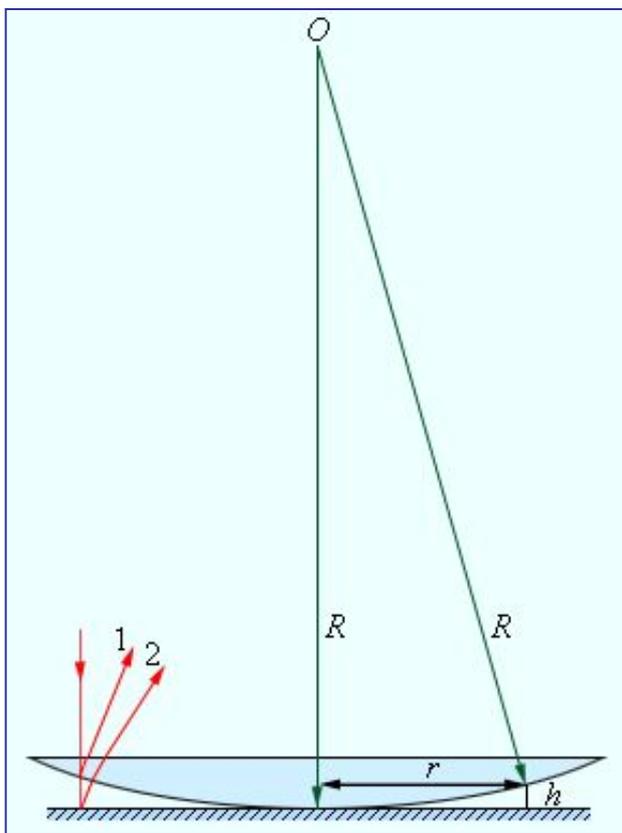
Кольца Ньютона имеют вид концентрических окружностей.



Из геометрии рисунка:

$$R^2 = r_k^2 + (R - d)^2$$

2. **Оптическая разность хода** лучей **в отражённом свете** для воздушного клина:



$$\Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = (2d \pm \frac{\lambda}{2}) - 0$$

По теории:

$$\Delta_{\max} = 2k \frac{\lambda}{2}$$

Совмещая формулы, получим условие наблюдения **радиуса светлого** и аналогично **тёмного** k-ого кольца Ньютона в **отражённом свете**:

$$\begin{aligned} \text{max} : r_k &= \sqrt{\frac{(2k + 1)\lambda R}{2}} \\ \text{min} : r_k &= \sqrt{k\lambda R} \end{aligned}$$

Если установку для наблюдения колец Ньютона поместить в среду с показателем преломления  $n$ , то радиус колец уменьшится в  $\sqrt{n}$  раз.

$$\text{min} : r_k = \sqrt{\frac{k\lambda R}{n}}$$

# 1.7. Применение интерференции света

1. **Интерферометры** — очень чувствительные оптические приборы, позволяющие определять незначительные изменения показателя преломления прозрачных тел.
2. Спектроскопия – **измерение длин волн.**
3. Просветление оптики.
4. Тонирование стёкол.

**Просветление оптики** – увеличение прошедшего через линзу света отражения света в результате нанесения на неё специальной пленки.

На свободные поверхности линз наносят тонкие плёнки с показателем преломления, меньшим, чем у материала линзы.

Другой способ: поверхность стекла обрабатывают реактивами, изменяющими величину показателя преломления.

## Тонирование стёкол



При **отражении света** от границ раздела воздух - плёнка и плёнка - стекло за счёт интерференции когерентных лучей можно добиться **условия минимума**, а для **прошедших лучей** – **условия максимума**.

Минимальная толщина плёнки при этом должна подчиняться условию:

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4n_{21}}$$

$n_{21}$  – относительный показатель преломления плёнки и стекла.