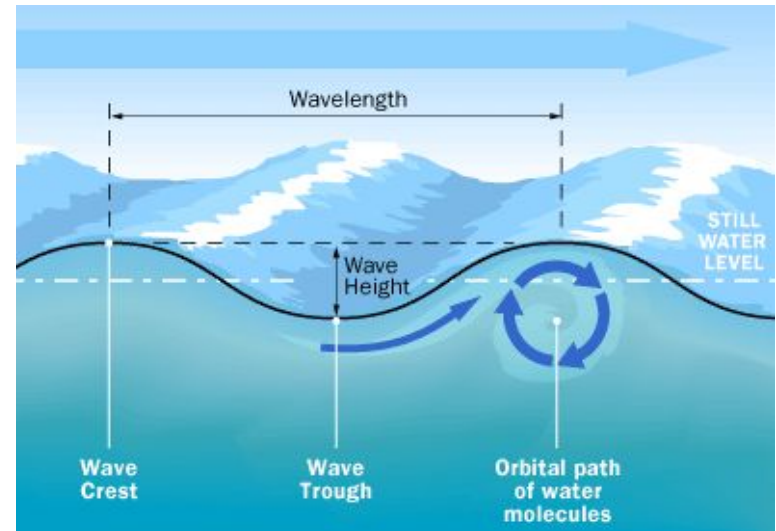
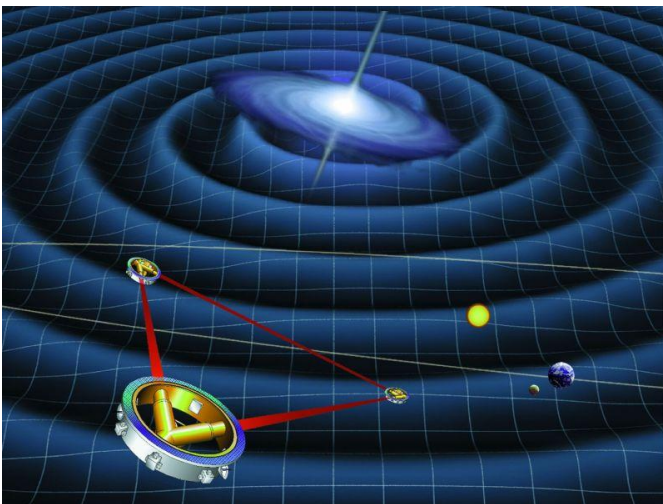


# Лекция 12

# Физика волн

**Элементы содержания:** Волновые процессы. Виды и типы волн. Волновая поверхность и фронт волны. Фазовая скорость. Математическое описание бегущей волны. Фаза и длина волны. Интерференция волн. Когерентные волны. Условия усиления и ослабления волн при интерференции. Стоячие волны. Проблема когерентности в оптике. Интерференция в тонких пленках. Опыт Юнга. Дифракция волн. Принцип Гюйгенса. Дифракция света на дифракционной решетке. Поляризация света. Законы Малюса и Брюстера.

Литература: Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2006. С. **281-369**.



**Волна** (в узком смысле) – процесс распространения колебаний в пространстве.

В физике под словом «**возмущение**» понимают всякое изменение какого-либо параметра, характеризующего состояние среды.

**Волны** (в широком смысле) – это возмущения, распространяющиеся в той или иной среде и несущие с собой энергию.

Наиболее важные виды волн:

1. Упругие волны:

- звуковые волны;
- сейсмические волны.

2. Электромагнитные волны:

- радиоволны;
- свет;
- рентгеновское излучение и т.д.

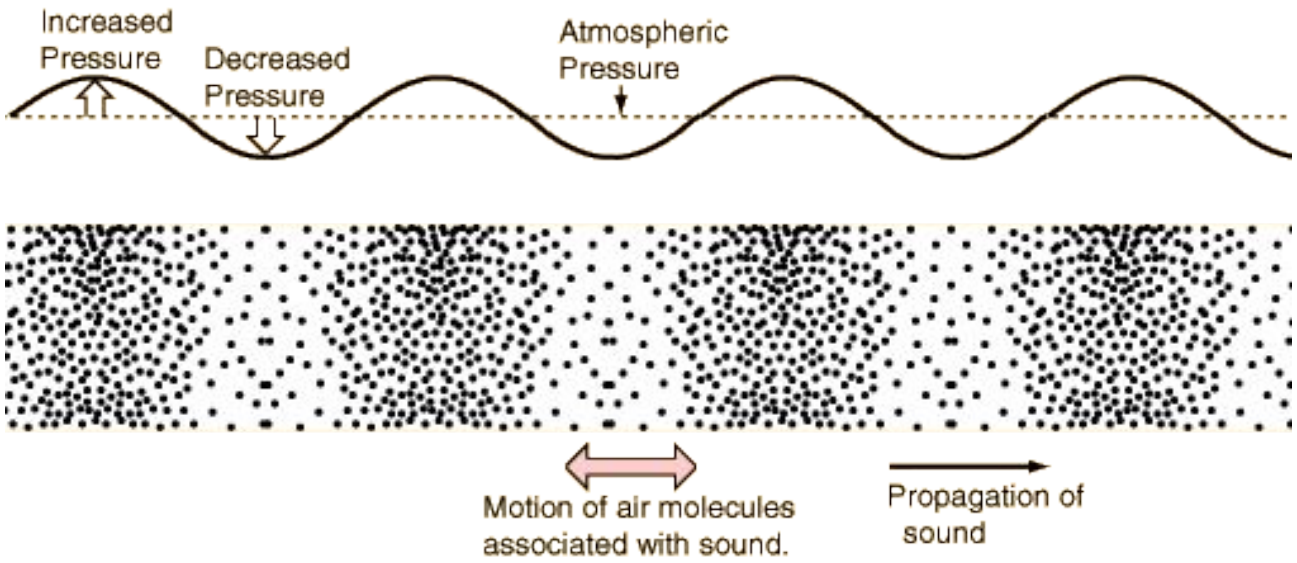
3. Волны на поверхности жидкости.



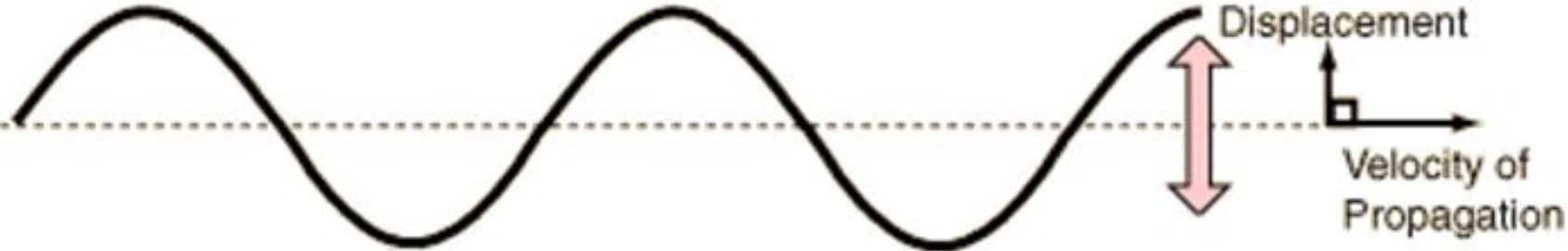
**Продольной** называют волну, в которой направления колебаний совпадают с направлением распространения волны.



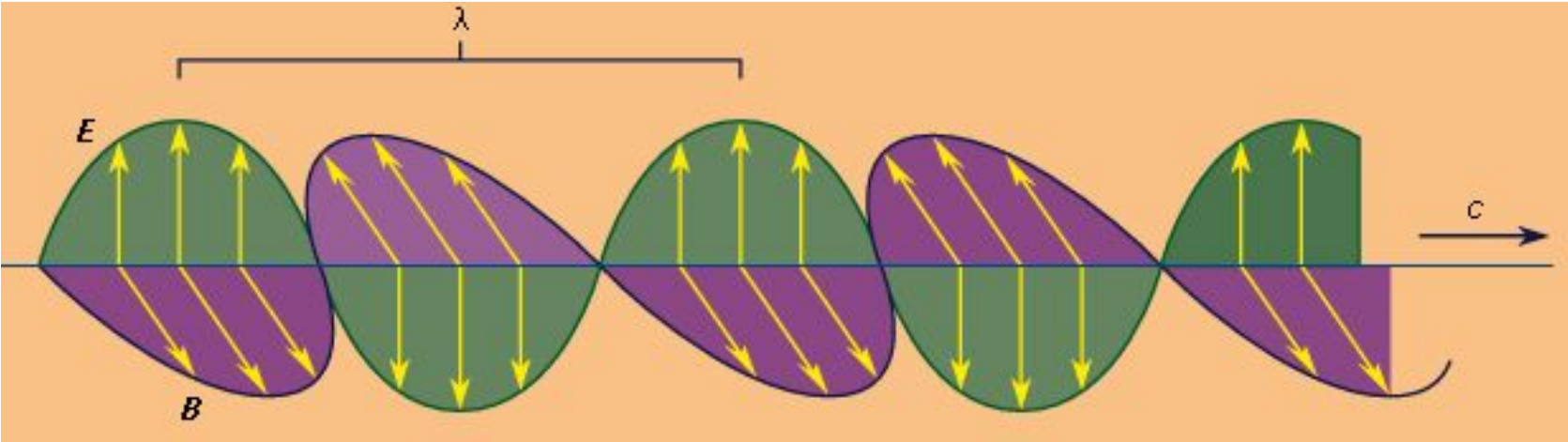
Пример продольной волны: **звуковая волна в воздухе**



**Поперечной** называют волну, в которой колебания происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.



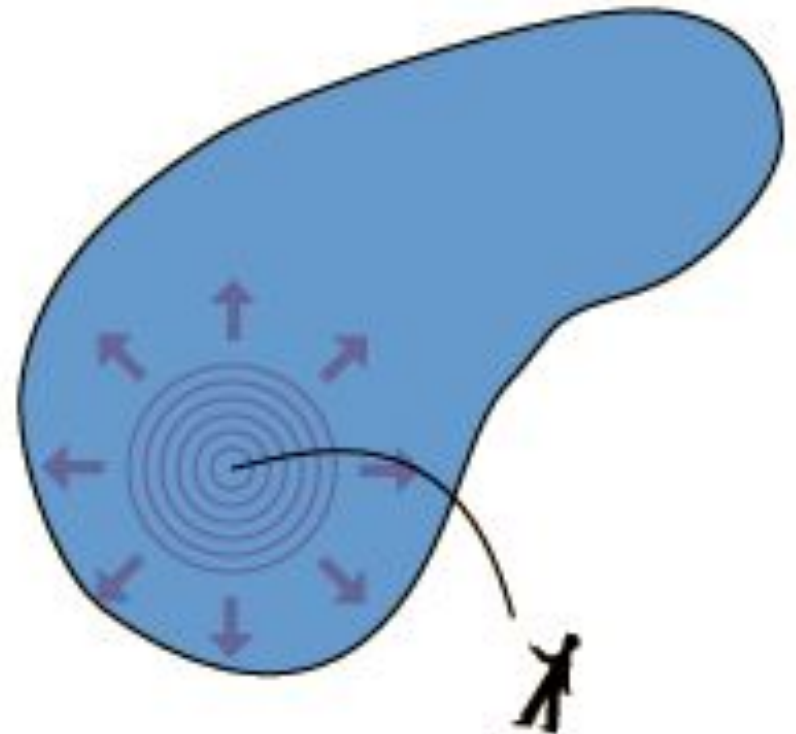
Пример поперечной волны: **электромагнитная волна**



**Волновая поверхность** гармонической волны - геометрическое место точек волны, колеблющихся в одинаковой фазе.

**Фронт волны** - самая далекая в данный момент времени волновая поверхность.

**Фазовая скорость** – скорость распространения в пространстве фронта волны.



## Математическое описание бегущей волны

**Бегущей** называется волна, которая переносит энергию в пространстве.

Колеблущаяся величина одномерной гармонической волны, распространяющейся, например, вдоль оси  $OZ$ , описывается уравнением

$$\psi(t, z) = A \cos \left[ \omega \left( t \pm \frac{z}{v} \right) + \varphi_0 \right] , \quad (12.1)$$

где  $v$  – фазовая скорость волны;

$$\varphi = \omega \left( t \pm \frac{z}{v} \right) + \varphi_0 = 2\pi \left( \frac{t}{T} \pm \frac{z}{\lambda} \right) + \varphi_0 - \quad (12.2)$$

- **фаза волны** – аргумент функции, описывающей гармоническую волну. Колеблущаяся величина, описывающая одномерную бегущую волну, является решением **волнового уравнения** вида

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 , \quad (12.3)$$

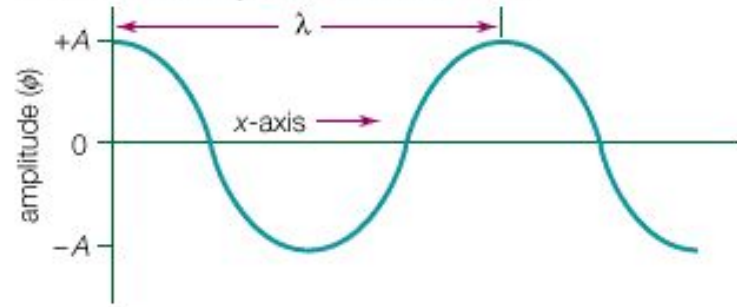
представляющего собой дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка.

**Длина волны** – расстояние между точками волны, разность фаз между которыми равна  $2\pi$  радиан.

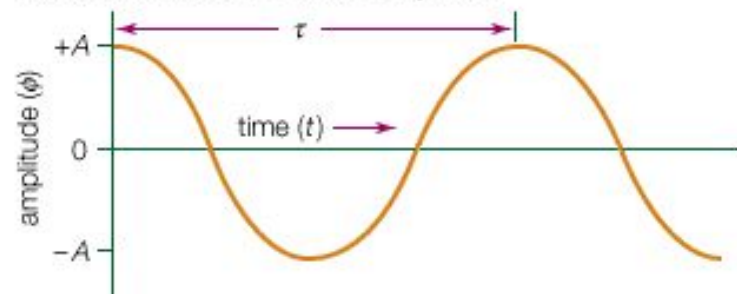
Другое определение: **длина волны** – расстояние, которое проходит фронт волны за время, равное периоду колебаний:

$$\lambda = vT = v/f \quad (12.4)$$

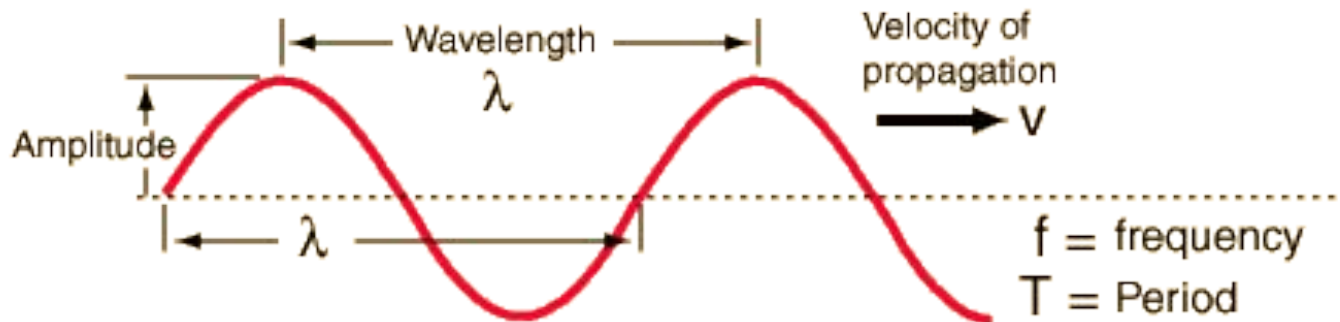
Variation with position at one time



Variation with time at one place



## Графическое представление бегущей волны



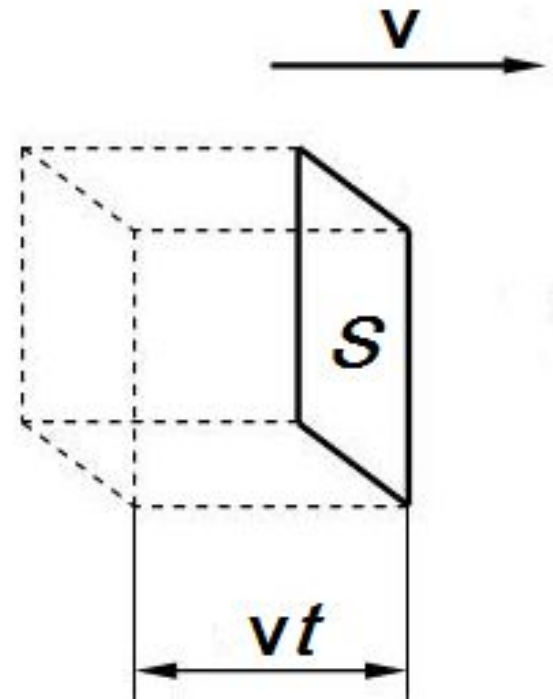
**Интенсивность волны** – величина, пропорциональная квадрату амплитуды волны:

$$I \sim A^2 \quad . \quad (12.5)$$

Другое определение:

**интенсивность волны** – величина, численно равная энергии, переносимой волной в единицу времени, через поверхность единичной площади, расположенную перпендикулярно распространению волны,  $[I]=\text{Вт}/\text{м}^2$ :

$$I = \frac{W}{St} \quad . \quad (12.6)$$





## Интерференция волн

*Интерференция* - взаимодействие волн, при котором в разных точках пространства происходит усиление или ослабление результирующей волны.

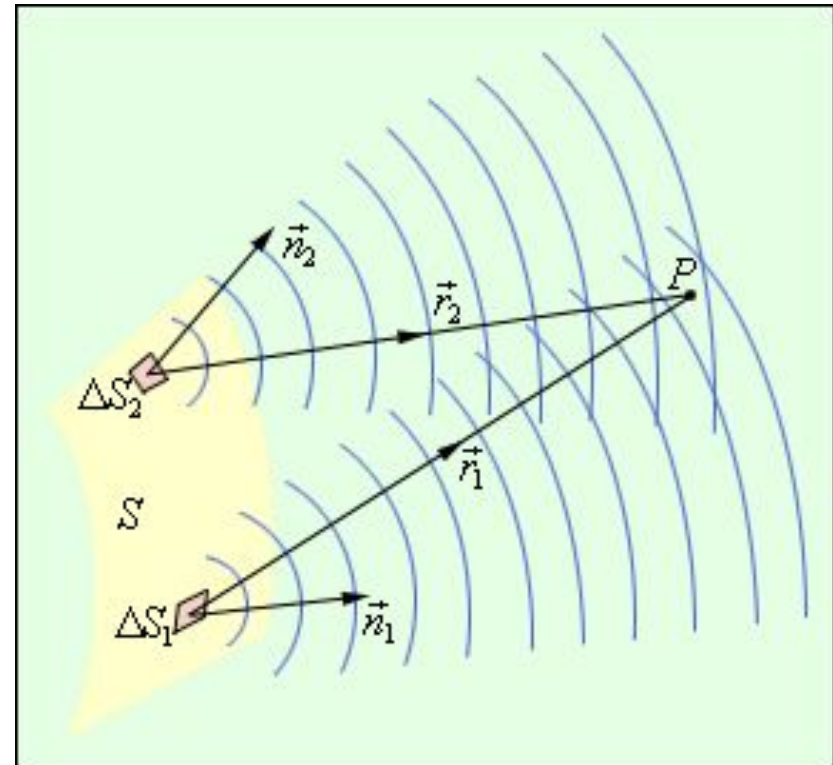
*Когерентность* - согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов.

*Условия когерентности волн:*

- 1) одинаковые частоты;
- 2) постоянство во времени разности фаз.

*Разность хода двух волн* – разность расстояний, которые проходят волны до места их встречи:

$$\Delta l = \left| \vec{r}_2 \right| - \left| \vec{r}_1 \right| . \quad (12.7)$$

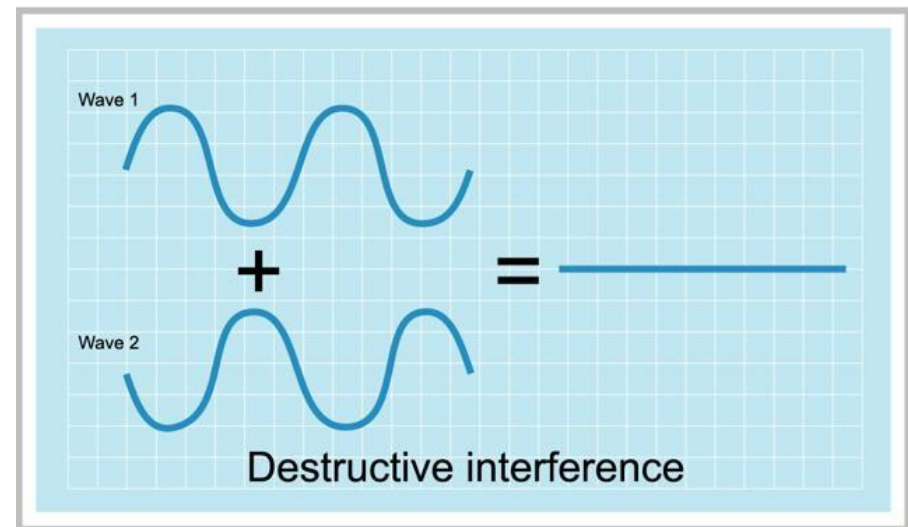
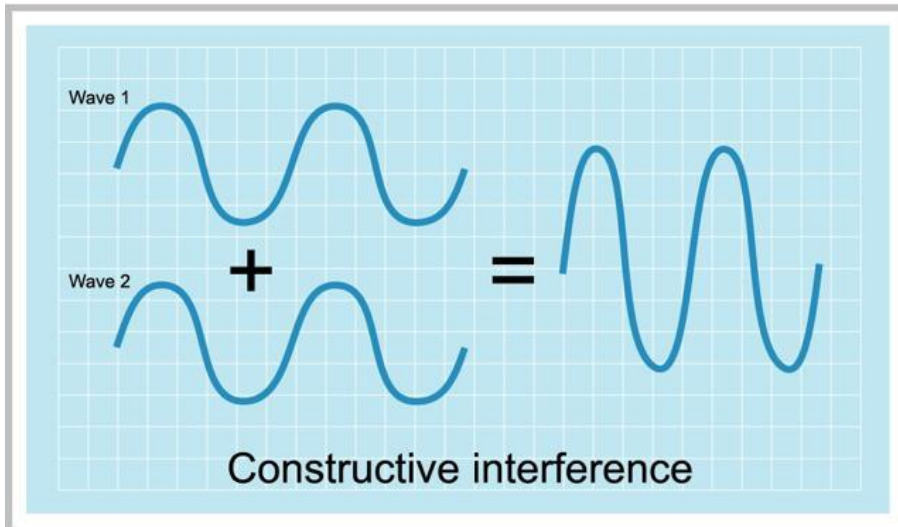


**Условие усиления волн** (конструктивная интерференция): при интерференции волны усиливают друг друга, если **разность хода волн составляет целое число длин волн**:

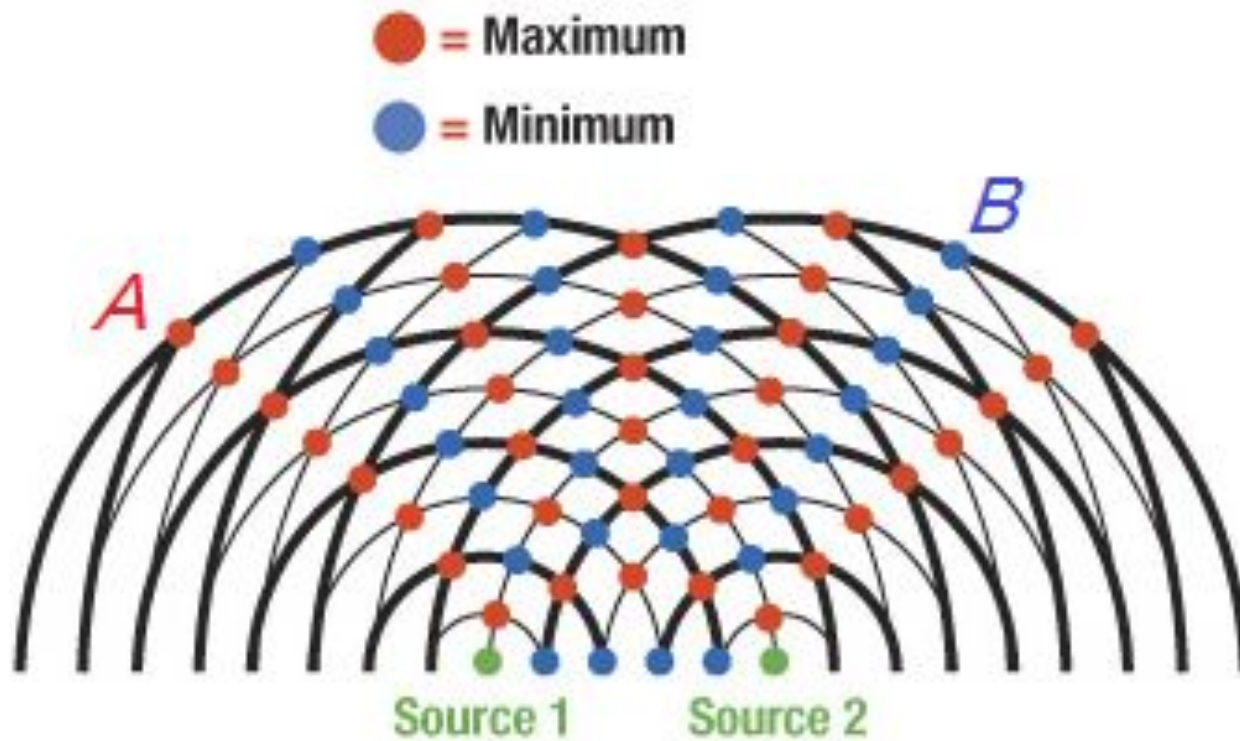
$$\Delta l = m\lambda = 2m\frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (12.8)$$

**Условие ослабления волн** (деструктивная интерференция): при интерференции волн одинаковой интенсивности они гасят друг друга, если **разность хода волн составляет нечетное число длин полуволн**:

$$\Delta l = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (12.9)$$

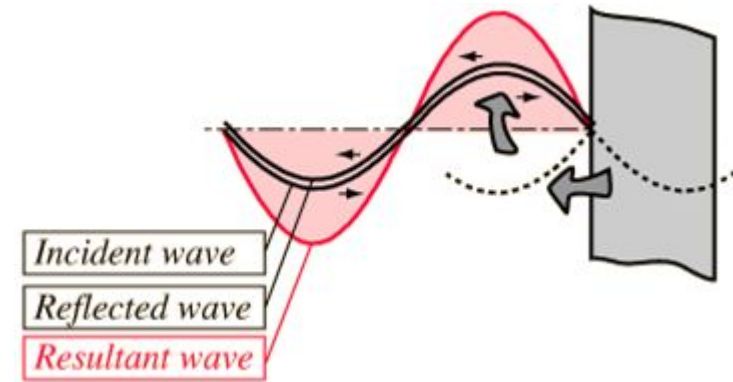


# Интерференционная картина от двух точечных ИСТОЧНИКОВ



## Стоячие волны

Стоячими называются волны, образующиеся в результате сложения двух одинаковых волн, распространяющихся навстречу друг другу.



$$\begin{array}{l} \longrightarrow \psi_1 = A \cos(\omega t - kz + \Phi_{01}) \\ \longleftarrow \psi_2 = A \cos(\omega t + kz - \Phi_{02}) \end{array} \quad z$$

Уравнение стоячей волны:

$$\psi_{\Sigma} = \psi_1 + \psi_2 = A_{\Sigma}(z) \cos(\omega t + \Phi_0) , \quad (12.10)$$

где амплитуда стоячей волны:

$$A_{\Sigma}(z) = 2A \cos\left(kz - \frac{\Phi_{01} + \Phi_{02}}{2}\right) , \quad (12.11)$$

фаза стоячей волны:

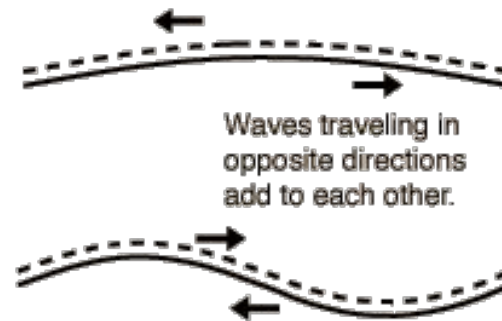
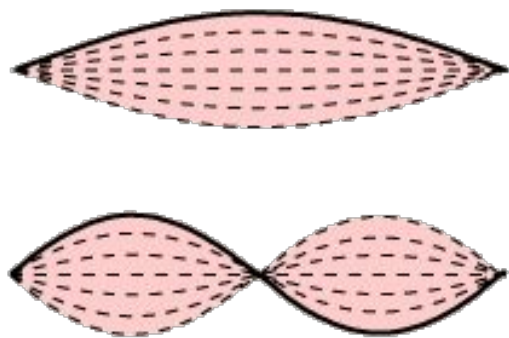
$$\Phi_0 = \frac{\Phi_{01} - \Phi_{02}}{2} . \quad (12.12)$$

## Отличия бегущих волн от стоячих волн:

- 1) Бегущие волны переносят энергию в пространстве, стоячие волны не переносят энергию.
- 2) Различные точки бегущей волны колеблются с одинаковыми амплитудами, но разными фазами; различные точки стоячей волны колеблются с разными амплитудами, но одинаковыми фазами.

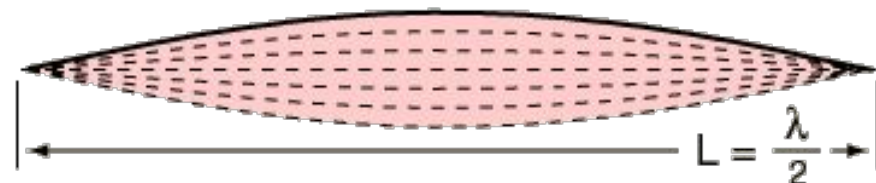
**Узел** – неподвижная точка среды при стоячей волне.

**Пучность** – точка среды при стоячей волне, в которой размах перемещений имеет максимум.



В стоячей волне расстояние между соседними узлами и пучностями одинаково:

$$\Delta z = \lambda/2$$



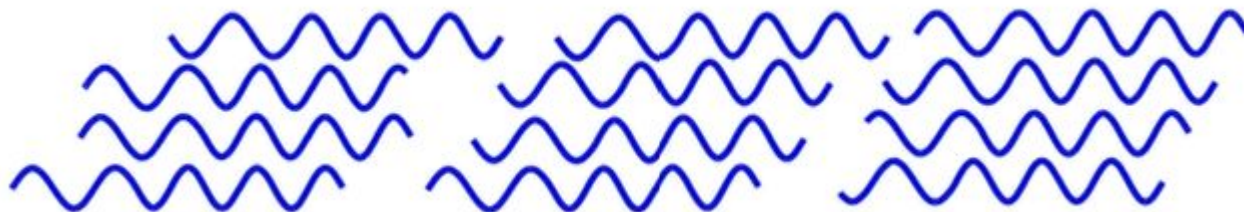
**Проблема когерентности в оптике:** Излучение естественных (тепловых) источников света состоит из множества цугов волн, спонтанно испущенных возбужденными атомами при их высвечивании, т. е. при возвращении в нормальное состояние.

**Цуг** – отрезок синусоиды конечной длины. Длительность цуга порядка  $10^{-10} \dots 10^{-8}$  с, он содержит  $10^6 \dots 10^8$  колебаний и имеет длину порядка  $0,03 \dots 3$  м.

Следовательно, два разных естественных источника некогерентны даже при выделении в их излучении узкой спектральной полосы, поскольку разность фаз колебаний очень быстро и хаотически меняется в каждой точке наблюдения.

### Некогерентные волны:

(соотношение между фазами меняется случайным образом)



### Когерентные волны:

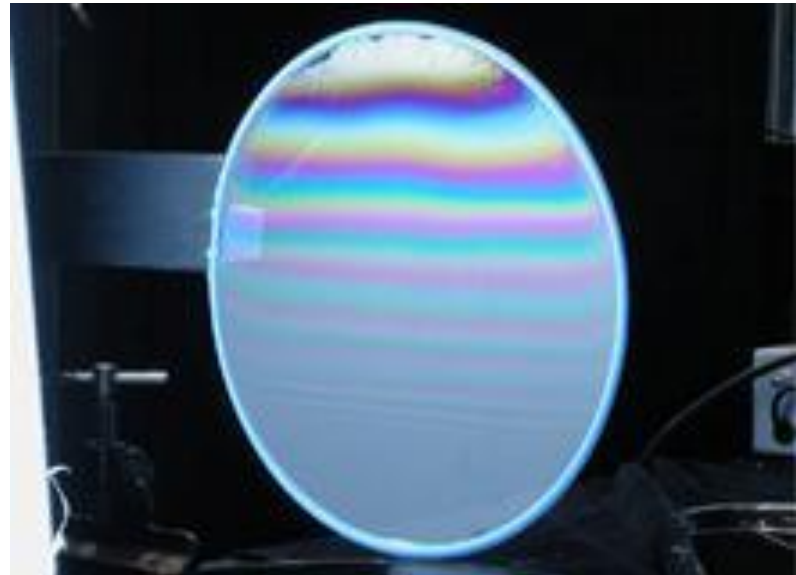
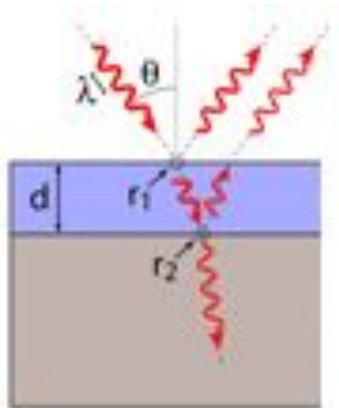
(разность фаз – постоянна)



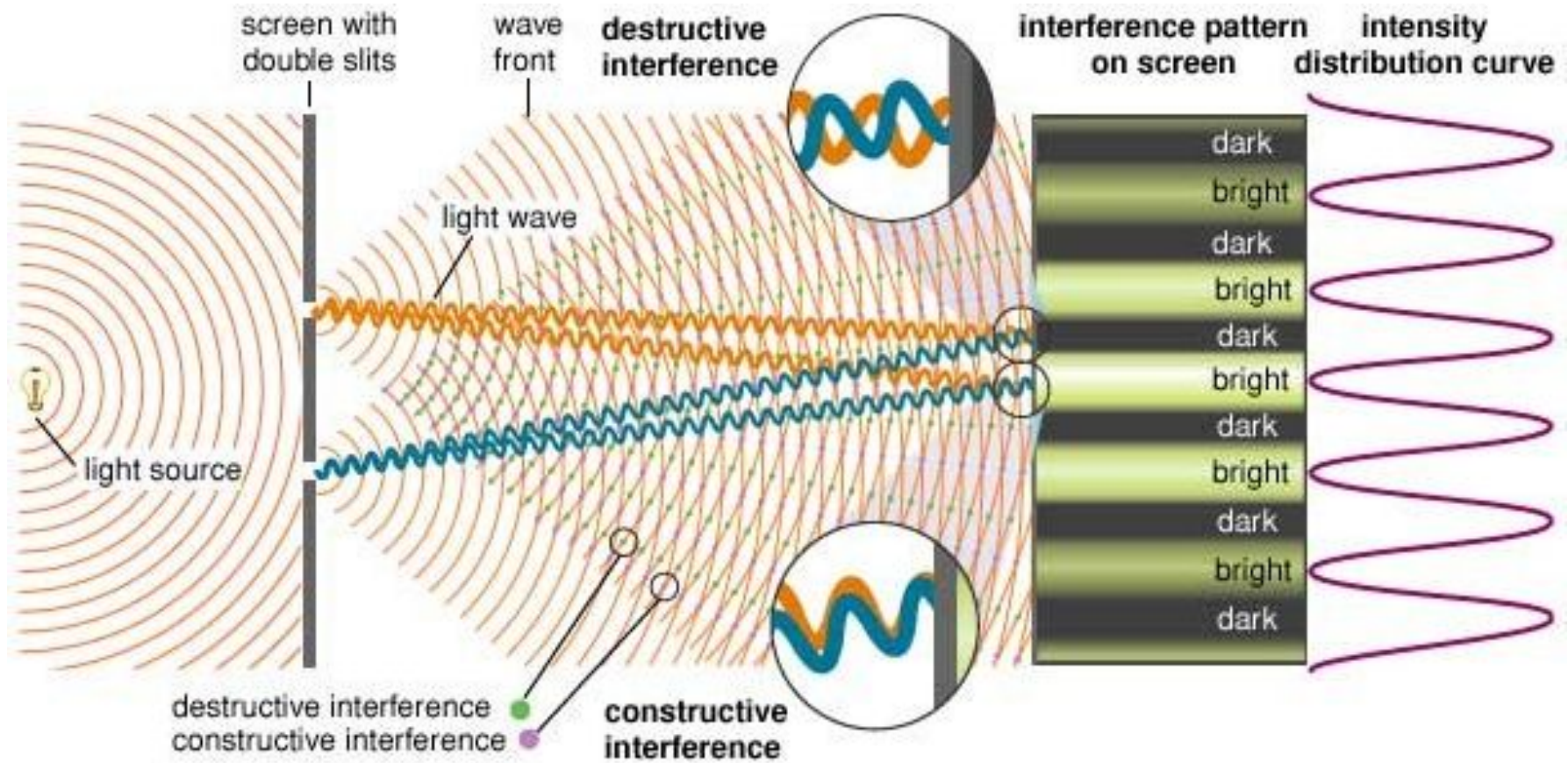
В случае тепловых источников для наблюдения интерференции надо излучение от одного источника расщепить на два или несколько пучков и заставить их попадать в точку наблюдения различными путями. При этом будет происходить интерференция каждого из лучей с самим собой, и условие максимума или минимума будет одновременно выполняться для всех лучей одной частоты, испущенных из одной и той же точки источника.

### Интерференция в тонких пленках:

оба отраженных луча образуются из одного падающего



## Опыт Юнга (Томас Юнг, 1801 г.)



Координаты светлых полос:

$$x_{\max} = \frac{m\lambda L}{d} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (12.14)$$

Координаты темных полос:

$$x_{\min} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda L}{d} \quad (12.15)$$

Расстояние между полосами:

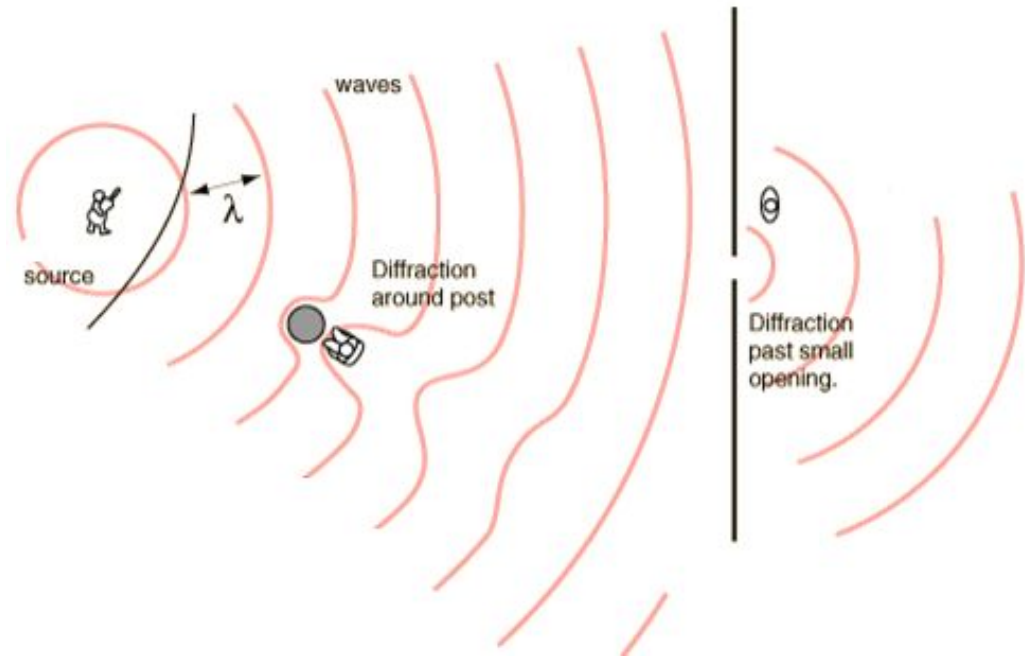
$$\Delta x = \frac{\lambda L}{d} \quad (12.16)$$



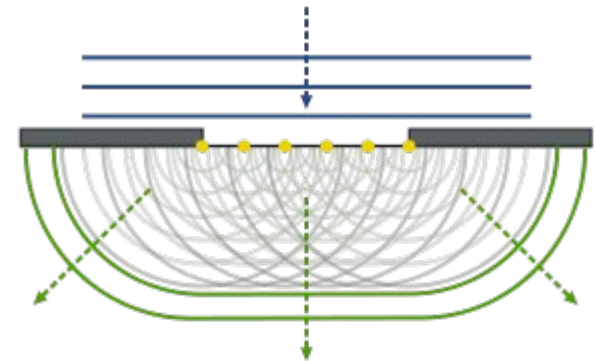
# Дифракция волн

**Дифракция** (в узком смысле) – явление огибания волнами препятствий.

**Дифракция** (в широком смысле) – всякое отклонение при распространении волн от законов геометрической оптики.

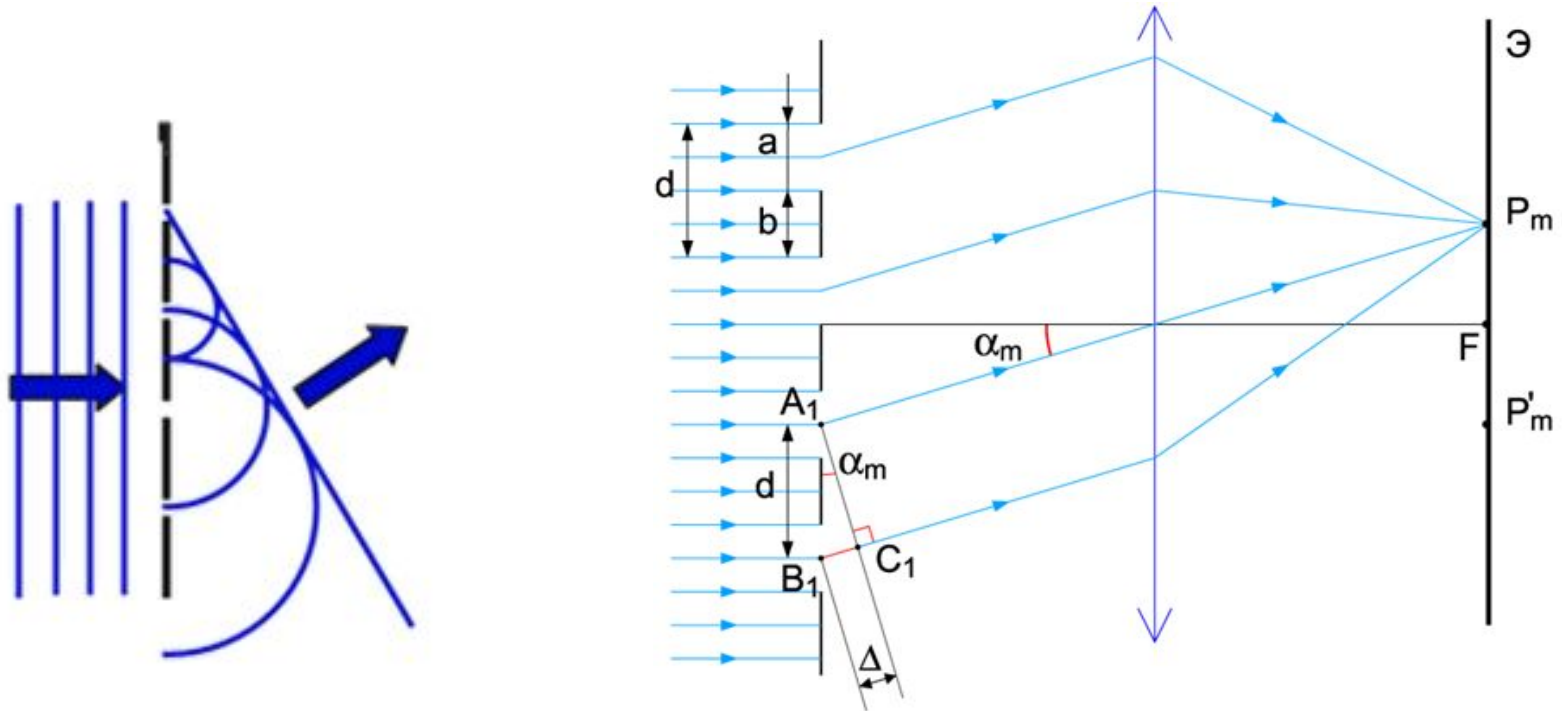


**Принцип Гюйгенса** (Христиан Гюйгенс, 1678 г.): каждая точка пространства, до которой дошла волна в данный момент времени, является центром сферических волн, огибающая которых будет волновым фронтом в следующий момент времени



## Дифракция света

**Дифракционная решетка** – оптическое устройство, представляющее собой стеклянную пластину с нанесенными на ее поверхность параллельными и равноотстоящими штрихами.



**Формула дифракционной решетки** – формула, определяющая условие главных максимумов, наблюдаемых под углом  $\alpha_m$

$$d \sin \alpha_m = m\lambda \quad , \quad (12.17)$$

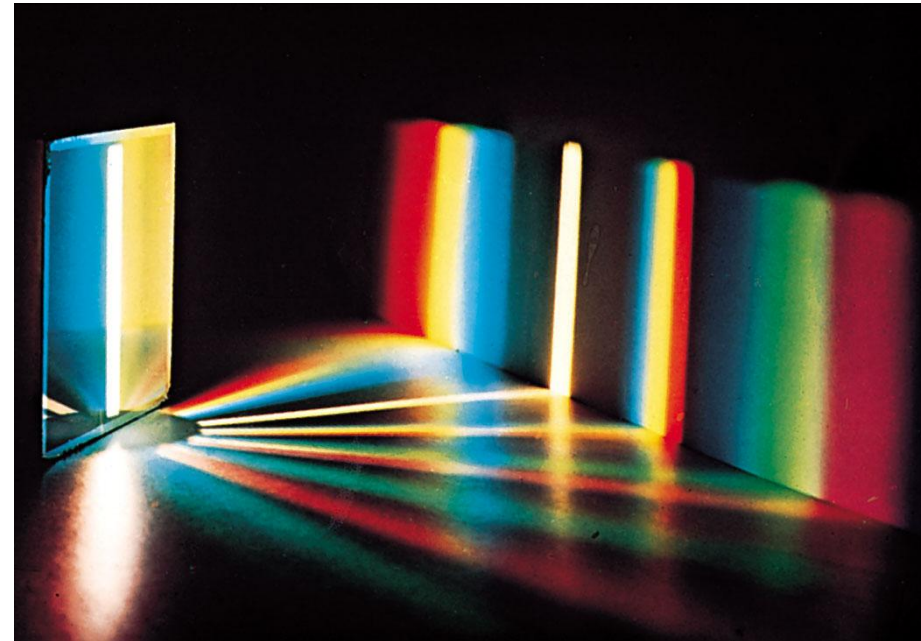
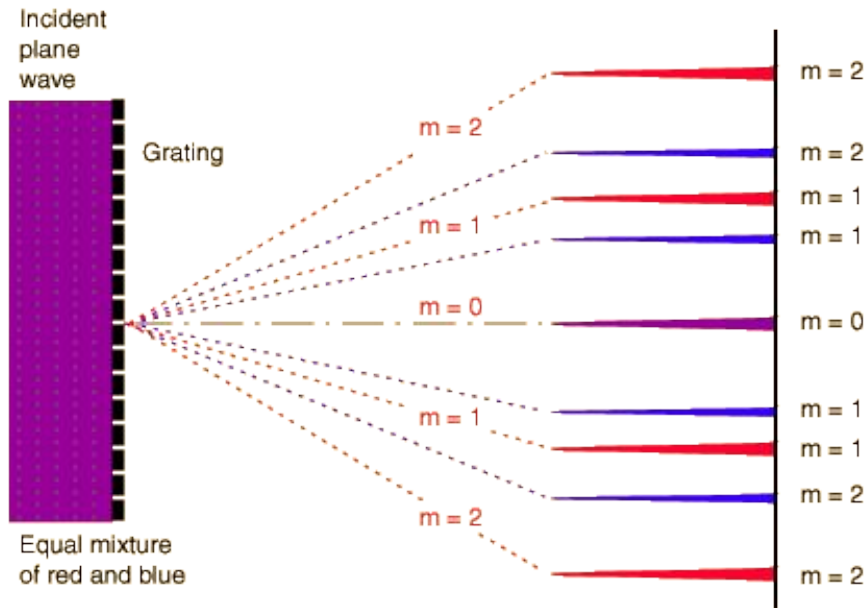
где  $d$  - период решетки;  $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$  - порядок дифракционного максимума.

## Дифракционная решетка как спектральный прибор

**Белый свет** - электромагнитное излучение видимого диапазона с длинами волн в вакууме от 380 нм до 740 нм. Человеческий глаз свет разной длины волны различает по цвету.

При падении на дифракционную решетку белого света дифракционный максимум во всех порядках за исключением нулевого будет возникать под своим углом (рисунок слева). В этом случае центральный максимум будет представлять собой резкую белую полосу, а во всех остальных порядках будет наблюдаться радужное цветовое размытие (рисунок справа).

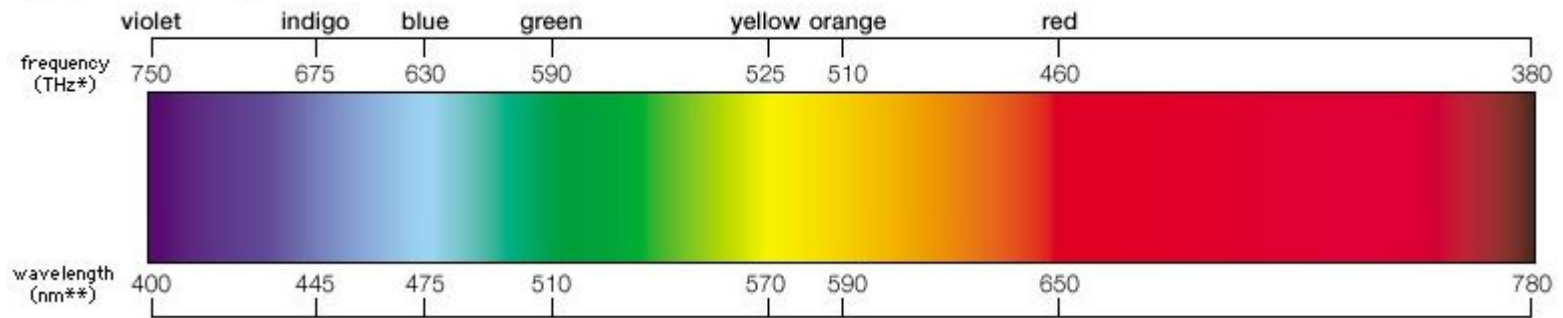
**Спектр** - это последовательность спектральных цветов, упорядоченная по возрастанию длины волны.



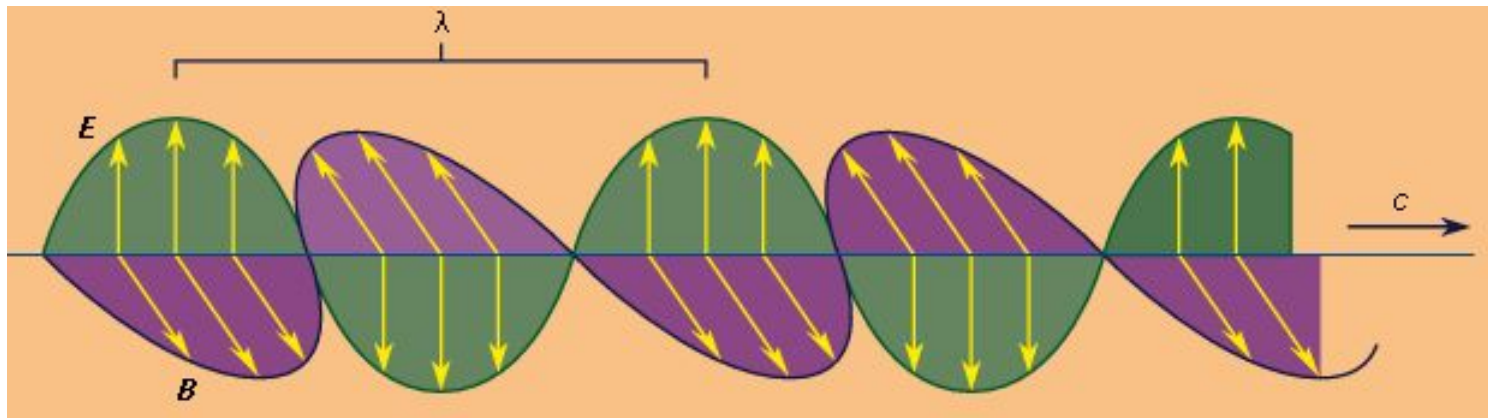
## Поляризация света

С точки зрения физической оптики свет – поток электромагнитных волн в интервале частот, воспринимаемых человеческим глазом ( $f=3,8 \cdot 10^{14} \dots 7,5 \cdot 10^{14}$  Гц).

Light, the visible spectrum



Отдельно взятая электромагнитная волна:

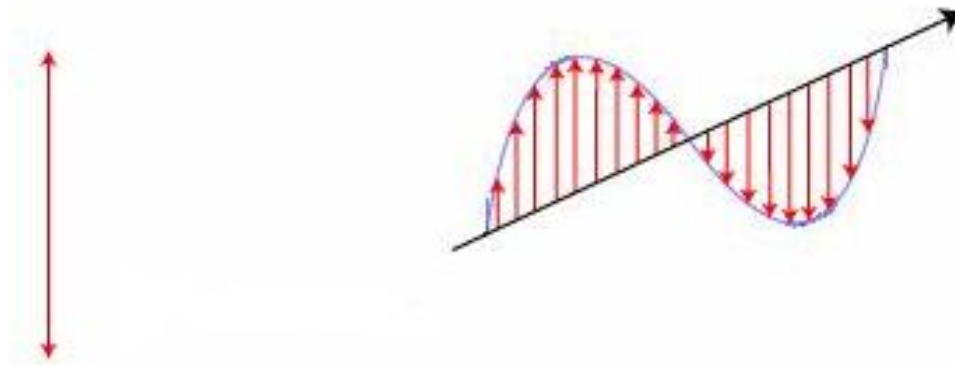


**Поляризация** – физическая характеристика излучения, описывающая неэквивалентность различных направлений в плоскости, перпендикулярной лучу.

**Естественным** называется свет, содержащий электромагнитные волны со всевозможными направлениями колебаний вектора напряженности электрического поля.



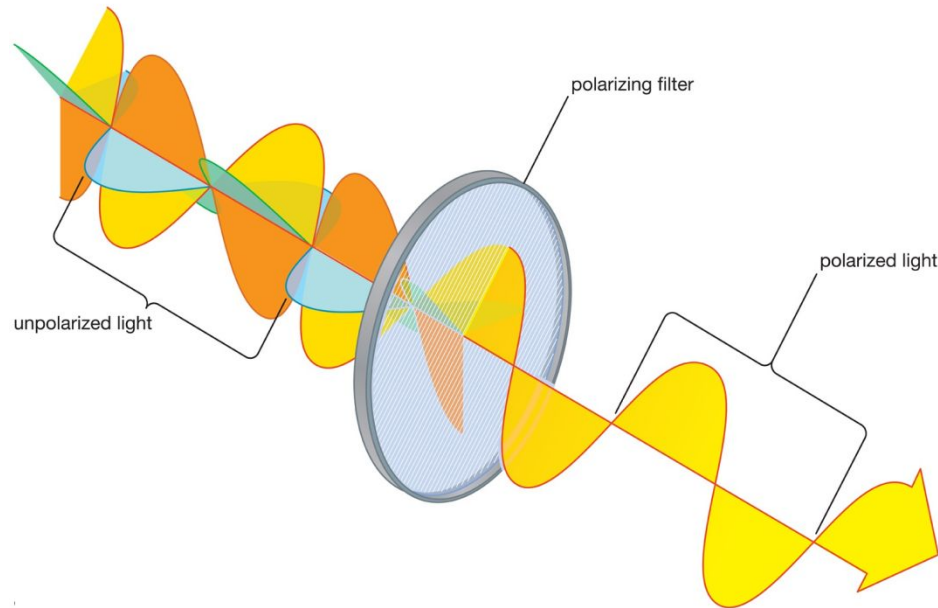
**Линейно поляризованным** называется свет, содержащий только такие электромагнитные волны, у которых вектор напряженности электрического поля при распространении волн лежит в строго определенной плоскости. Эта плоскость называется плоскостью поляризации.



## Способы получения поляризованного света:

- 1) при отражении от диэлектрика;
- 2) при прохождении через оптически анизотропные кристаллы и т.д.

**Поляризатор** – устройство для получения поляризованного света из естественного света.



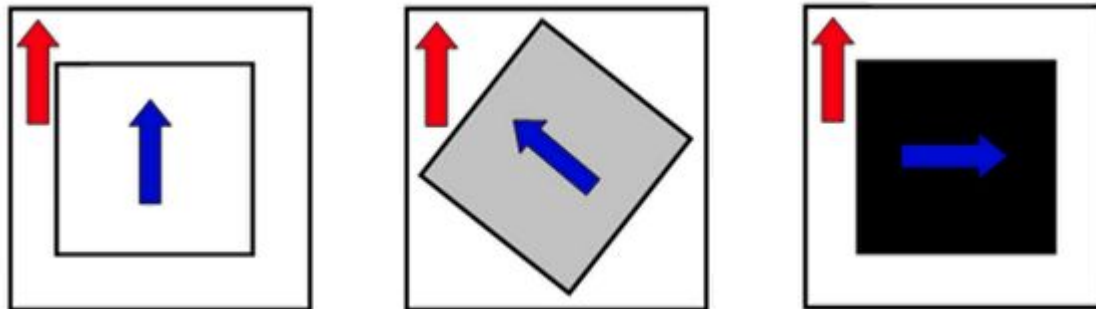
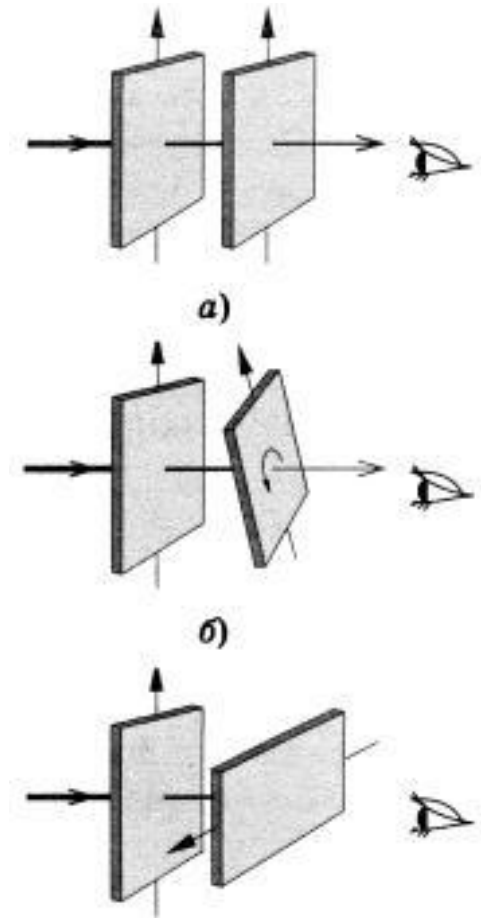
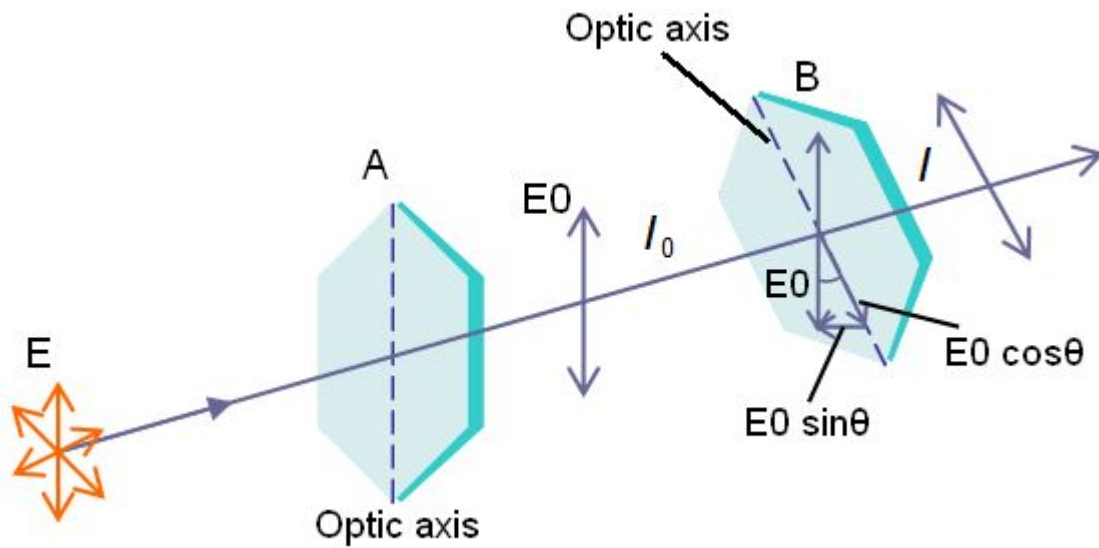
**Анализатор** – устройство для исследования характеристик поляризованного света.

**Главная плоскость поляризатора или анализатора** – плоскость, в которой колеблется вектор напряженности электрического поля света, прошедшего поляризатор или анализатор.

**Закон Малюса** (Этьен Малюс, 1810 г.): интенсивность света, вышедшего из анализатора, определяется выражением

$$I = I_0 \cos^2 \theta , \quad (12.18)$$

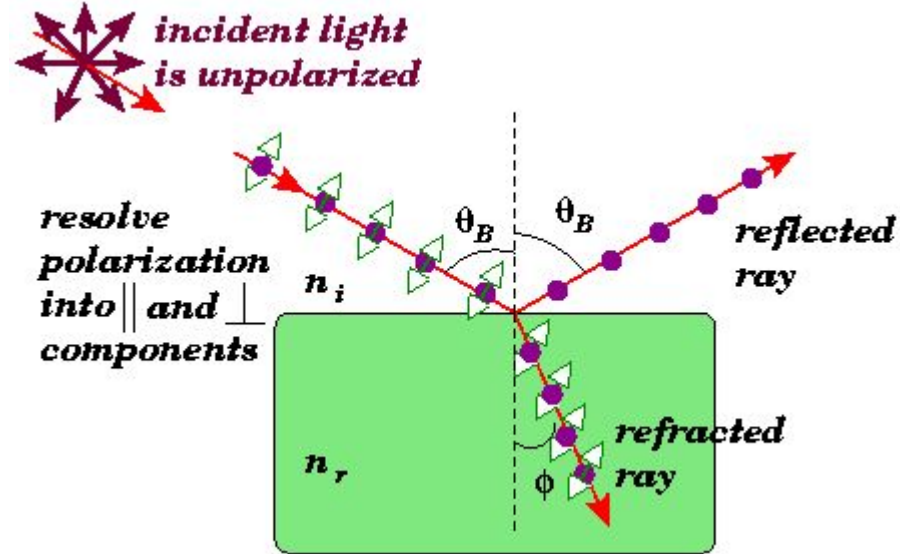
где  $I_0$  – интенсивность света, падающего на анализатор,  $\theta$  - угол между оптическими осями поляризатора и анализатора (между плоскостью поляризации падающего света и главной плоскостью анализатора)



**Закон Брюстера** (Дэвид Брюстер, 1815 г.): если луч естественного света падает на границу двух диэлектриков под углом, тангенс которого определяется из выражения

$$\operatorname{tg}\theta_B = n_r/n_i, \quad (12.19)$$

то отраженный луч будет полностью поляризован с плоскостью поляризации перпендикулярной плоскости падения луча.



**Пример практического использования законов Малюса и Брюстера – поляризационные очки:**

