

# Волны

Распространяющиеся в пространстве колебания вещества или поля называются волной.



**Классификация  
и характеристики волн**

**Упругие волны  
Электромагнитные  
волны**

**Бегущая волна  
Стоячая волна**

# Понятие волны. Свойства волн

## Колебание

процесс изменения состояний системы, повторяющийся в той или иной степени во времени

## Волна

- процесс распространения колебаний в среде
- **всякие возмущения состояния вещества или поля, распространяющиеся в пространстве с течением времени**

- **Волна НЕ переносит частицы** (они лишь колеблются около положения своего равновесия)
- **Переносится само возмущение среды, приводящее к колебаниям**



отличие колебания от волны

**Свойства всех волн, независимо от их природы:**

**перенос энергии без переноса вещества**

**скорость распространения волн одной природы в данной среде постоянна**

# Классификация волн

По физической природе  
и типу колеблющейся величины

Физическая природа колебаний	Колеблющаяся величина
Механические	Координата Скорость Ускорение Угол поворота
Упругие	<b>ЗВУК</b> Плотность Давление
Электрические	Заряд Сила тока Напряжение
Электромагнитные	<b>СВЕТ</b> Вектор напряженности электрического поля Вектор магнитной индукции
Поверхностные	под действием $F_{\text{тяж}}$ и поверхностного натяжения

# Физическая природа волн

Колебания вещества

Колебания ЭМ поля

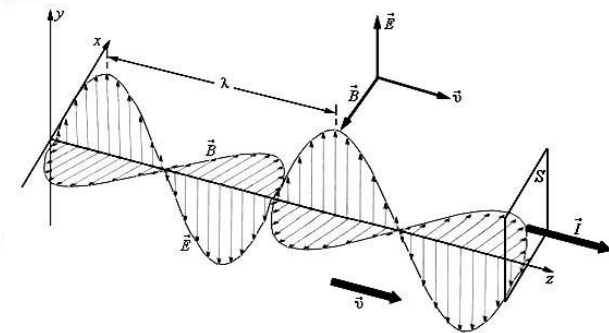
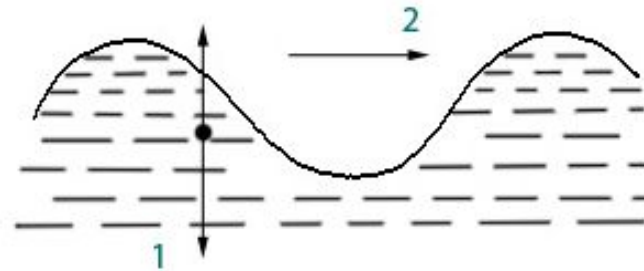
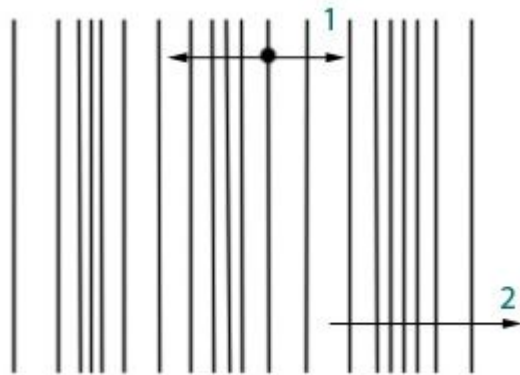
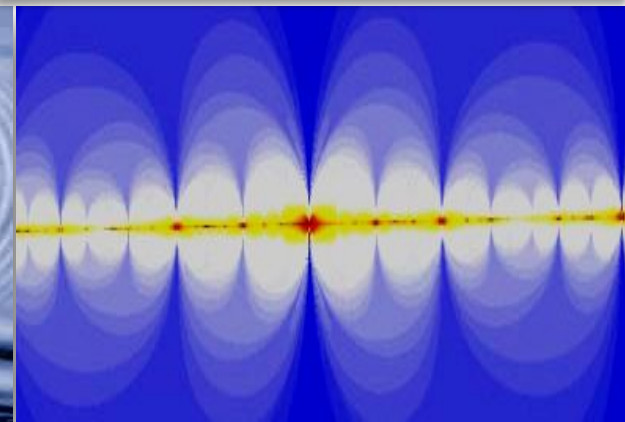


возбуждают



Упругие (механические) волны

Электромагнитные



звук

на поверхности жидкости

свет

# Условия возникновения упругих волн

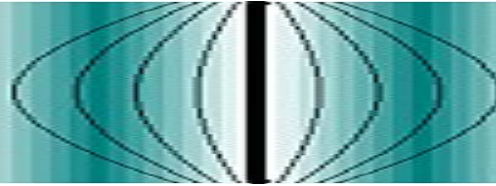
## 1. Источник волны

(частица, совершающая гармонические колебания)



## 2. Упругая среда

(частицы которой связаны между собой силами упругости)



**Рассматриваем среду (жидкость, газ, твердое тело) как сплошную, отвлекаясь от молекулярного и атомного строения материи**

**Единственное свойство среды,** которым она должна обладать для возникновения в ней волн –

**упругость**

т.е. **при малых деформациях среды внутренние силы, возникающие в среде должны быть пропорциональны деформациям**

Взаимосвязь между частицами среды осуществляется **силами упругости,** возникающими вследствие **деформации среды**

**физика колебательного процесса:**

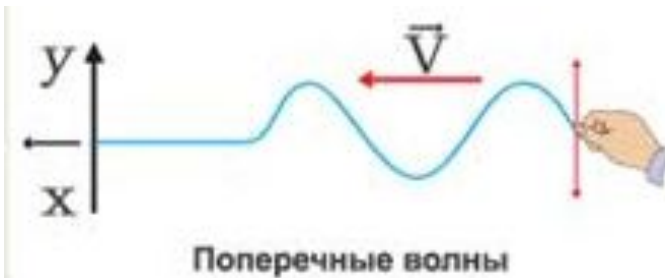
**частицы, колеблющиеся в одной точке (плоскости) среды, воздействуют на прилегающие, заставляя их участвовать в колебательном движении, тем самым передавая колебательный процесс дальше**



# Типы волн

## Поперечные

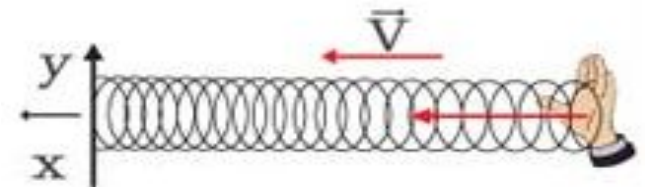
смещение частиц среды –  
**ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО**  
распространению волны



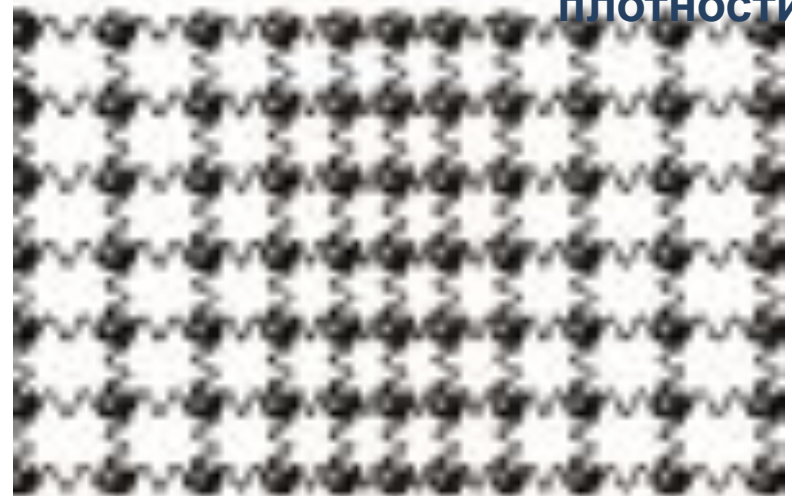
**Деформация сдвига** в твердых телах, на поверхности жидкости

## Продольные

смещение частиц среды –  
**ПО НАПРАВЛЕНИЮ**  
распространения волны



Сопровождается изменением  
**плотности**



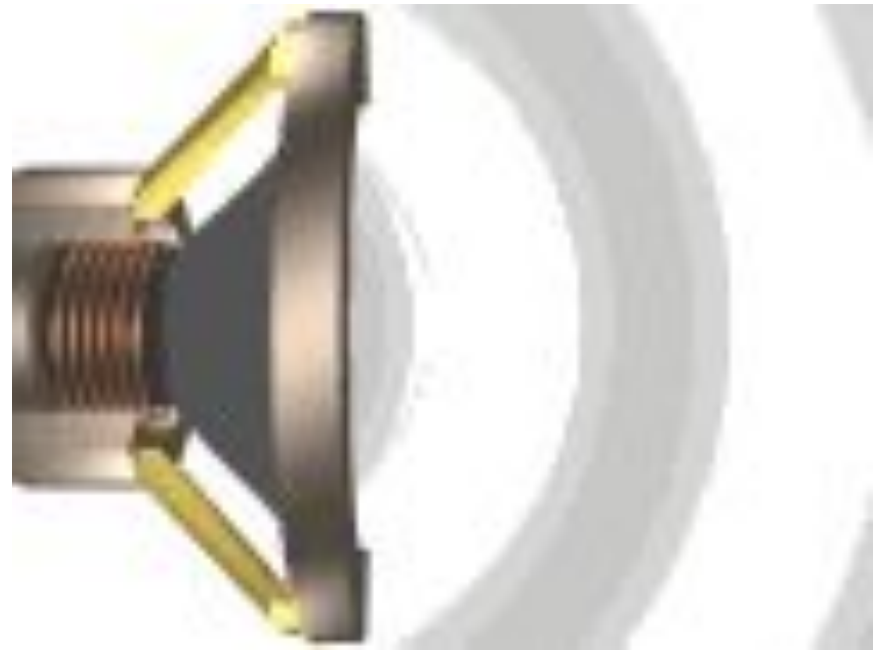
**Деформация сжатия** в газах, жидкостях, твердых телах

# Распространение волн в средах

	Твердое тело	Жидкость	Газ	Вакуум
Упругие (механич.)	Да	Да	Да	Нет
Электромагнитные.	Да	Да	Да	Да
Поперечные упруг.	Да	Нет	Нет	Нет
Продольные упруг.	Да	Да	Да	Нет

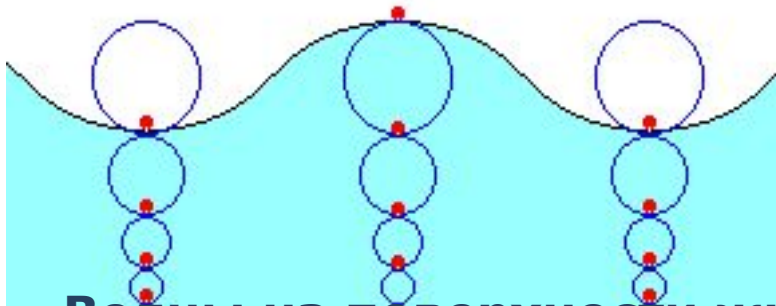
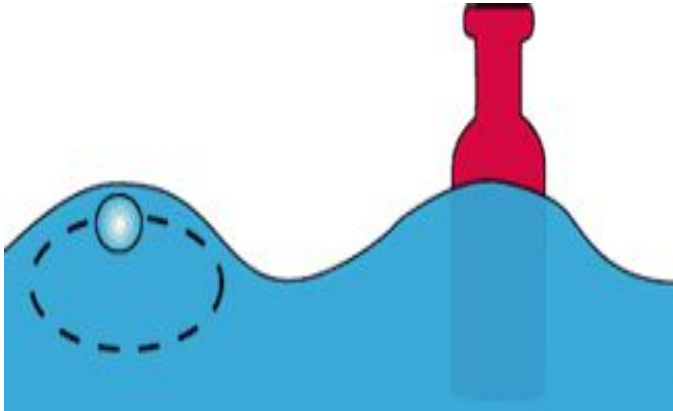


**Круговая волна на поверхности жидкости** от точечного источника



**Генерация акустической волны громкоговорителем**

# Волны на поверхности жидкости



- **Волны на поверхности жидкости не являются ни продольными, ни поперечными**
- **Если бросить на поверхность воды предмет, то можно увидеть, что он движется, покачиваясь на волнах, по круговой траектории**
- Таким образом, **волна на поверхности жидкости представляет собой результат сложения продольного и поперечного движения частиц воды**



# Упругие волны

Взаимосвязь между частицами среды осуществляется **силами упругости**, возникающими вследствие **деформации среды.**

При передаче колебаний от одних частиц к другим возникают упругие волны (звуковые, ультразвуковые, сейсмические и др. волны).

- *В жидкой и газообразной* средах возможно возникновение только **продольных** волн;
- *В твердой* среде возможно возникновение **как продольных, так и поперечных волн.**

# График волны

Плоская волна описывается законом *cos* или *sin*

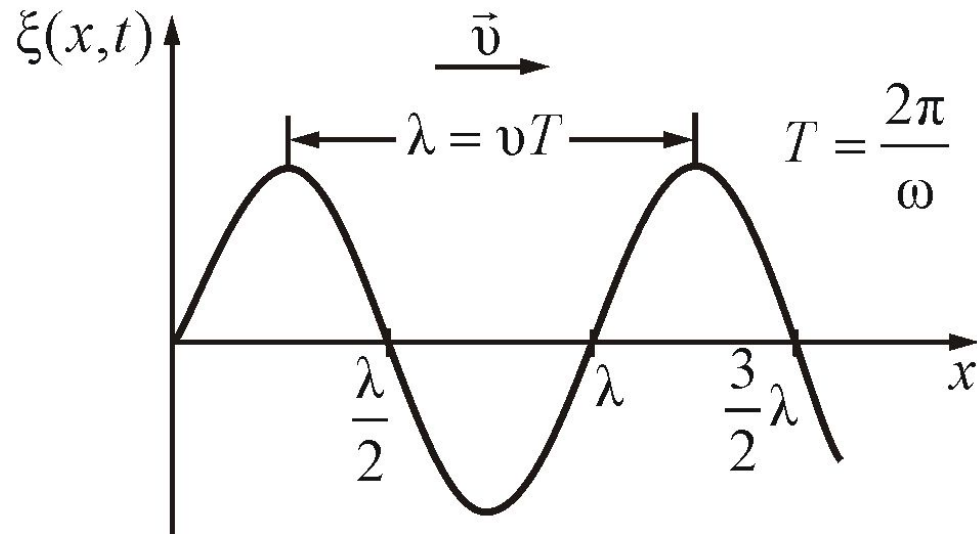


График колебаний:  $x = f(t)$

зависимость **смещения**  
**ДАННОЙ** частицы от времени

График волны:  $\xi = f(x, t)$

зависимость **смещения**  
**ВСЕХ** частиц среды  
от **расстояния** до источника  
в **данный** момент времени

Время, за которое фронт волны  
сместится на расстояние  $x$

$$\Delta\tau = \frac{x}{v}$$

при  $\Delta\tau = T$      $\lambda = vT$

$\lambda$

**Длина волны**

Расстояние между  
ближайшими частицами,  
колеблющимися  
в одинаковой фазе

Расстояние, которое волна  
проходит за время, равное  
периоду колебания источника

$v$

**Фазовая скорость**

Скорость распространения  
волны

# Волны в среде: определения

**Волновая  
(фазовая)  
поверхность**

**геометрическое место точек,  
колеблющихся в одинаковой фазе**

может быть  
**множество**

**Волновой фронт  
(фронт волны)**

**геометрическое место точек,  
до которых доходят колебания  
к данному моменту времени**

для одной  
волны  
**только  
один**

или

граница между волной и пространством,  
в котором волны еще нет

**Луч**

**линия, нормальная ( $\perp$ ) волновой поверхности,  
показывает направление распространения волны  
(направление переноса энергии)**

**Длина  
волны**

**расстояние между ближайшими частицами,  
колеблющимися в одинаковой фазе**

$$\lambda = \nu T$$

т.к.

$$T = \frac{1}{\nu}$$

то

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

и

$$\nu = \lambda \nu$$

# Классификация волн

По виду волновой поверхности волны разделяются на:

## Сферические

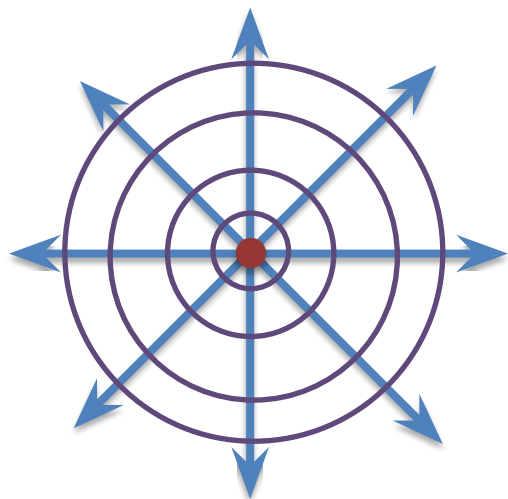
Форма  
волновой  
поверхности

**сфера** или  
**окружность**

источник  
**БЛИЗКО**  
(точечный)

амплитуда **ЗАВИСИТ**  
от координаты  
(расстояния от источника)

$A \searrow$  при  $\nearrow x$



## Плоские

Форма  
волновой  
поверхности

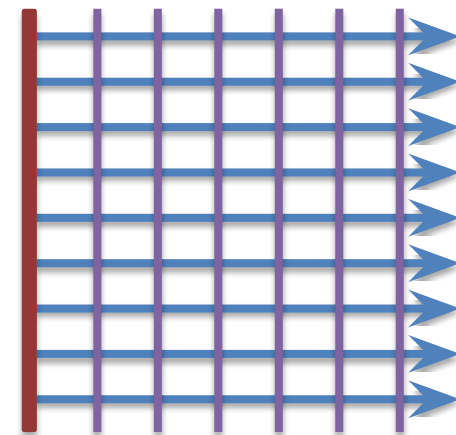
**плоскость**  
или **прямая**

источник  
**ДАЛЕКО**

В плоской волне, амплитуда  
**НЕ** зависит от координаты

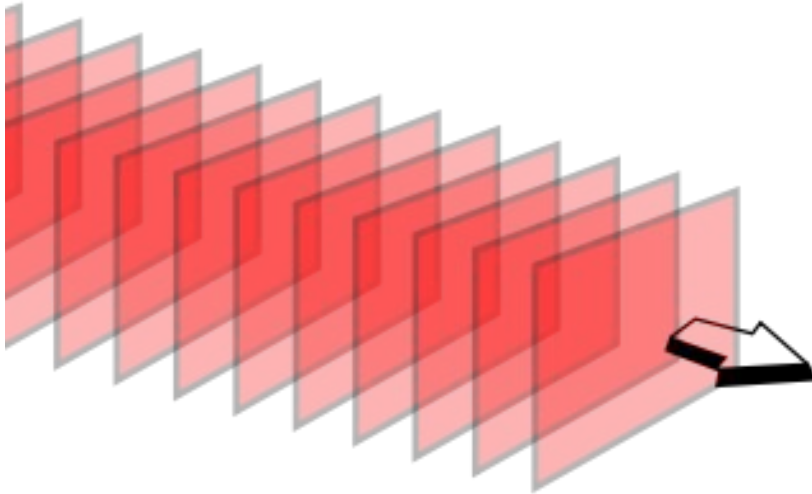
$$A = \text{const}$$

В случае непоглощающей среды

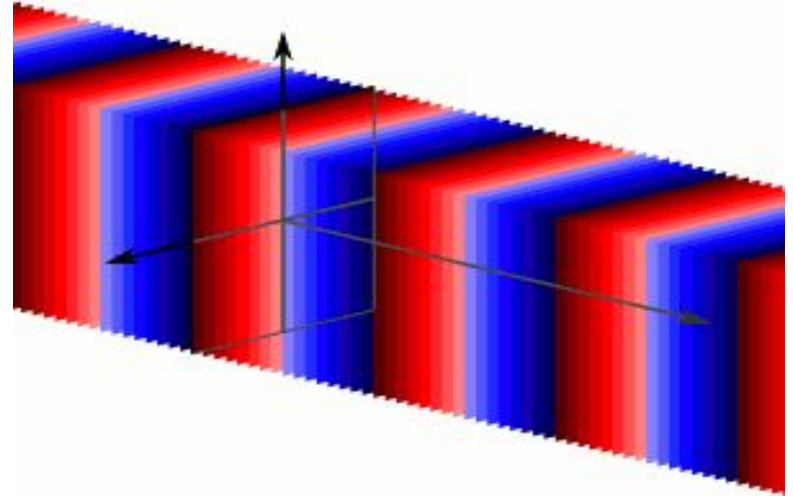


# Демонстрация типов волн

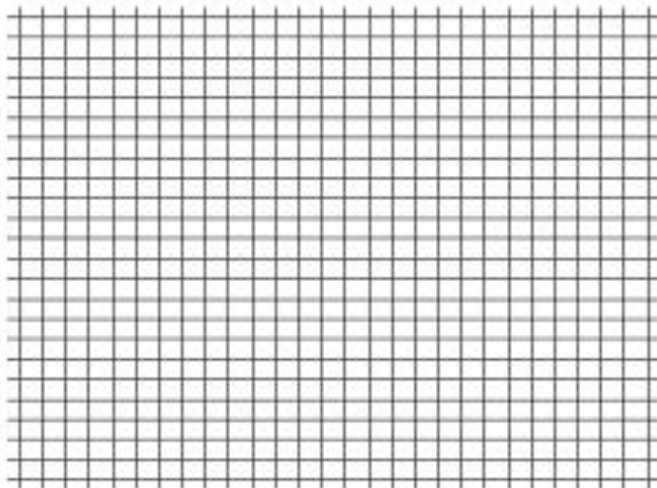
Продольная плоская



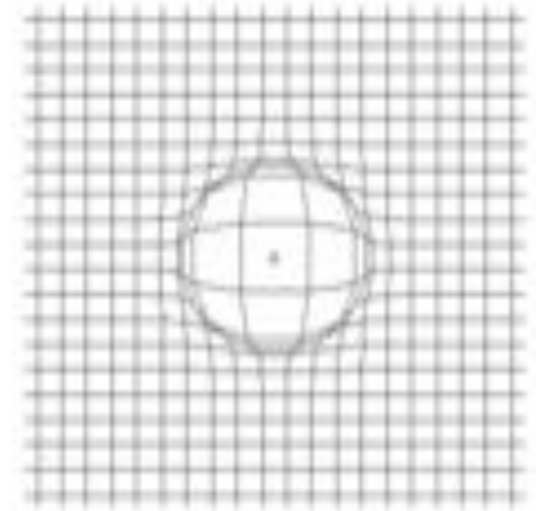
Продольная плоская



Продольная плоская



Продольная сферическая





# Уравнение бегущей волны

**Бегущая волна**

**волна, которая переносит в пространстве энергию**

Итак, пусть в момент  $t$  частицы среды, на расстоянии  $x = 0$  от источника (сам источник) колебались по закону:

$$\xi(x, t) = A \cos \omega t$$

Смещение частиц среды, находящихся на расстоянии  $x$  от источника в момент времени  $t$  определяется по закону:

$$\xi(x, t) = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) = A \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{x}{v} \right)$$

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx)$$

**Уравнение плоской бегущей волны в непоглощающей среде**

**Волновое число**

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}$$

# Уравнение волны в поглощающей среде

## Уравнение плоской бегущей волны,

распространяющейся в однородной изотропной непоглощающей среде

в «+» направлении оси

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

↓  
Смещение точки среды, отстоящей на расстоянии  $x$  от точки начала отсчета (от источника) в момент времени  $t$

**Если среда поглощает энергию волны:**

$$\xi(x, t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

$\beta$  – коэффициент затухания

$A_0$  – амплитуда при  $t = 0$

**наблюдается затухание волны**

(уменьшение интенсивности волны по мере удаления от источника)

# Уравнение сферической волны

Волновые поверхности – концентрические сферы

Амплитуда колебаний убывает по закону  $A \sim \frac{1}{r}$

$$\xi(r, t) = \frac{A_0}{r} \cos \omega \left( t - \frac{r}{v} \right)$$

Смещение точки среды, отстоящей на расстоянии  $r$  от источника в момент времени  $t$



Уравнение сферической волны  
в **НЕ**поглощающей среде

$$\xi(r, t) = \frac{A_0}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi_0)$$

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



Уравнение сферической волны  
в **поглощающей** среде

$$\xi(r, t) = \frac{A_0}{r} e^{-\beta t} \cos(\omega t - kr + \varphi_0)$$

# Дифференциальное волновое уравнение

## Уравнение плоской бегущей волны,

распространяющейся в однородной изотропной непоглощающей среде в «+» направлении оси

$$\xi = A \cos(\omega t - kx)$$

т.к. смещение частицы среды зависит

не только от времени, но и от расстояния до источника,  
то дифференцируем и по  $t$ , и по  $x$

$$\omega t - kx = \text{const}$$

$$\xi = f(x, t)$$

Получаем дифференциальное уравнение в частных производных:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = -Ak^2 \cos(\omega t - kx)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -A\omega^2 \cos(\omega t - kx)$$

Разделим левое уравнение на правое:

$\xi$  – волновая функция

$$\frac{\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}}{\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}} = \frac{k^2}{\omega^2} = \left(\frac{\frac{2\pi}{\lambda}}{\frac{2\pi}{T}}\right)^2 = \left(\frac{T}{\lambda}\right)^2 = \frac{1}{v^2}$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

Решением этого уравнения являются уравнения волны, рассмотренные выше

# Волновое уравнение

Распространение волн в однородной среде

в общем случае описывается **волновым уравнением** – **дифференциальным уравнением в частных производных**:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

$v$  – фазовая  
скорость  
волны

Для волны, распространяющейся вдоль оси  $x$ , волновое уравнение упрощается:

Всякая функция, удовлетворяющая этому уравнению, описывает некоторую волну,

т.е. решением волнового уравнения является уравнение любой волны:

$$\xi = A \cos(\omega t - kx)$$

**плоская волна**

$$\xi = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr)$$

**сферическая волна**

оператор набла,  
оператор  
Гамильтона

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$$

оператор  
Лапласа  
(лапласиан):

$$\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$



# Перенос энергии бегущей волной

Энергия волны в упругой среде состоит из кинетической энергии частиц, совершающих колебания около положения равновесия, и потенциальной энергии упругой деформации.

Смещение частицы  $\xi = A \cos(\omega t - kx)$

Скорость частицы  $\dot{\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial t} = -\omega A \sin(\omega t - kx)$

Деформация  $\frac{\partial \xi}{\partial x} = kA \sin(\omega t - kx)$

**Плотность кинетической энергии  
(энергия на единицу объема)**

$$\bar{\omega}_{\text{КИН}} = \frac{\rho}{2} (\dot{\xi})^2 = \frac{\rho \omega^2 A^2}{2} \sin^2(\omega t - kx)$$

**Плотность потенциальной энергии  
(энергия на единицу объема)**

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_{\text{ПОТ}} &= \frac{\rho}{2} v_{\text{ФАЗ}}^2 \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 = \frac{\rho}{2} \left( \frac{\omega^2}{k^2} \right) k^2 A^2 \sin^2(\omega t - kx) = \\ &= \frac{\rho \omega^2 A^2}{2} \sin^2(\omega t - kx) \end{aligned}$$

## Средняя (за период) объемная плотность полной энергии

$$\begin{aligned}\overline{\omega}_{\text{ПОЛН}} &= \overline{\omega}_{\text{КИН}} + \overline{\omega}_{\text{ПОТ}} = \\ &= \overline{\rho\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t - kx)} = \\ &= \frac{\rho\omega^2 A^2}{2}\end{aligned}$$

# Энергия упругих волн

**Среда**, в которой распространяется волна, **обладает запасом энергии**

**Поток энергии**

Количество энергии, переносимой волной через некоторую поверхность за 1 с

$$\frac{W}{t}$$

**Плотность потока энергии**

$$w = \frac{W}{t \cdot S}$$

Среднее по времени значение энергии колебаний:

$$W_{\text{cp}} = \frac{m\omega^2 A^2}{2}$$

**Объемная плотность энергии**

$$w_{\text{cp}} = \frac{W_{\text{cp}}}{V} = \frac{m\omega^2 A^2}{2 \cdot V} = \frac{\rho\omega^2 A^2}{2}$$

# Энергия упругих волн

## Перенос энергии

- характеризуется **вектором Умова**:
- совпадает с направлением скорости распространения волны

$$\vec{I} = w_{\text{cp}} \vec{v}$$

## Монохроматическая волна

**Энергия, переносимая волной за 1 с через единичную площадку,  $\perp$  направлению распространения волны волна, имеющая постоянную амплитуду и постоянную частоту**

**Для монохроматической волны среднее по времени значение вектора Умова**

$$I = \frac{\rho \omega^2 A^2}{2} V_{\text{ФАЗ}}$$

## Интенсивность волны

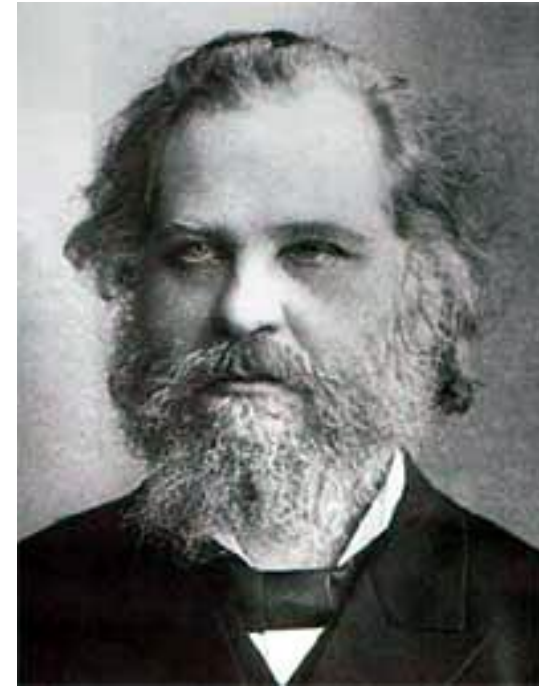
**среднее по времени значение плотности потока энергии, т.е. энергии, переносимой волной за 1 с через площадку  $1 \text{ м}^2$ ,  $\perp$  направлению распространения волны**



# ← Николай Алексеевич Умов

## Русский физик и мыслитель

- 1875 – решил в общем виде задачу о распределении электрических токов на проводящих поверхностях произвольного вида
- 1888-1891 – экспериментально исследовал диффузию веществ в водных растворах, поляризацию света в мутных средах, открыл эффект хроматической деполяризации лучей света, падающих на матовую поверхность
- 1900-е гг. - провел анализ многих формул Гаусса в теории земного магнетизма, что позволило определить вековые изменения магнитного поля Земли
- Впервые ввел в науку такие основополагающие понятия, как **скорость и направление движения энергии, плотность энергии в данной точке среды, пространственная локализация потока энергии** (для упругих сред)
- В 1884 г. понятие потока ЭМ энергии ввел Д. Пойнтинг, используя для описания распространения энергии вектор, называемый в российской научной традиции «**вектором Умова-Пойнтинга**» (в западной научной традиции — «вектор Пойнтинга»)



**23 января 1846 –  
15 января 1915  
Россия**

# Стоячие волны

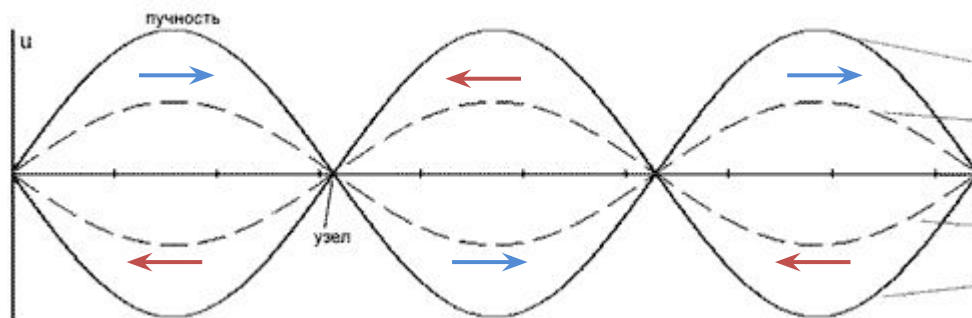
# Стоячие волны

Пусть две плоские волны бегут навстречу друг другу

Их уравнения движения:

$$y_1 = A \cos(\omega t - kx)$$

$$y_2 = A \cos(\omega t + kx)$$



Волны накладываются друг на друга

принцип  
суперпозиции

Результирующая волна:

$$y = A[\cos(\omega t - kx) + \cos(\omega t + kx)] = (2A \cos kx) \cdot \cos \omega t$$



Амплитуду можно  
представить:

$$y = B \cos \omega t$$

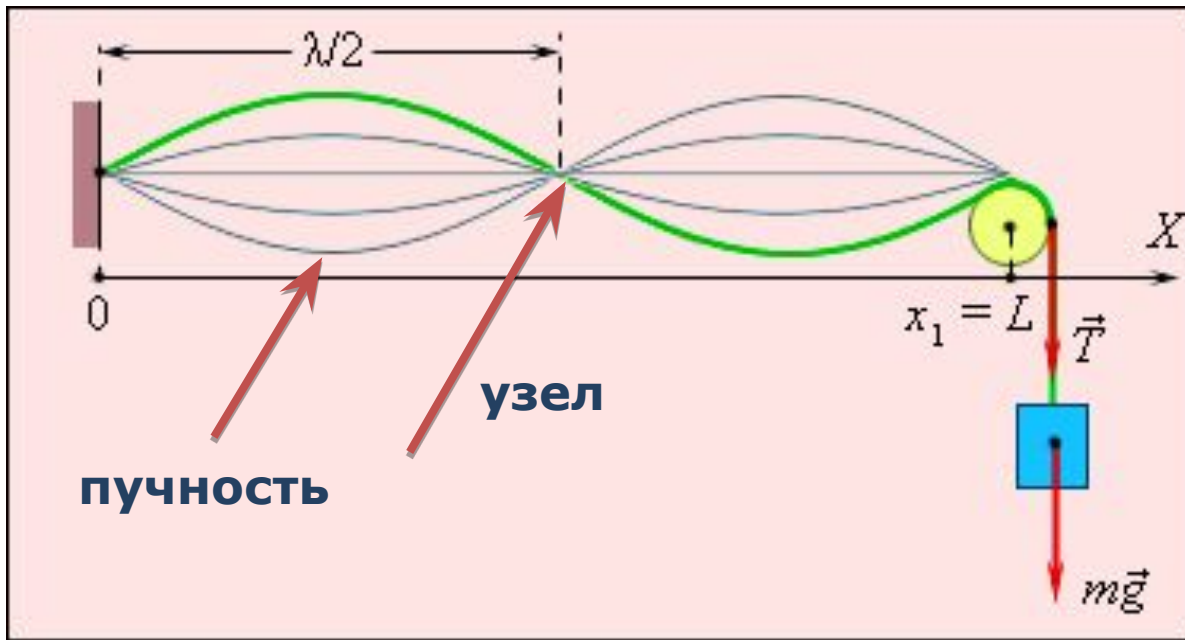
где  $B = 2A \cos kx$

max:  $B = 2A$  - пучность

min:  $B = 0$  - узел

$\neq f(t)$

# Стоячие волны



- возникают при отражениях от преград и неоднородностей в результате наложения отраженной волны на падающую
  - важное значение в месте отражения имеют частота, фаза и коэффициент затухания волны
    - характерное расположение чередующихся max (пучностей) и min (узлов) амплитуды

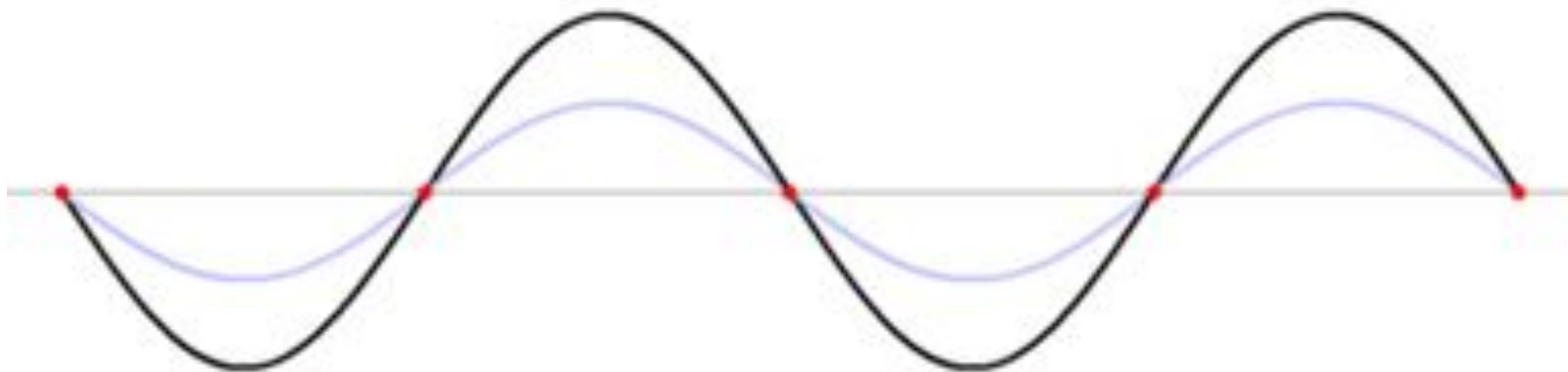
# СВОЙСТВО СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Расстояние между соседними узлами или пучностями – длина волны для стоячей волны:

$$\lambda_{\text{ст}} = \frac{\lambda}{2}$$

где  $\lambda$  – длина бегущей волны

- В отличие от бегущих волн, в стоячей волне **отсутствует перенос энергии**, т.к. положение узлов и пучностей не меняется со временем
- Отсутствие переноса энергии является следствием того, что прямая и обратная волна переносят энергию в противоположенных направлениях



**Образовавшаяся в результате интерференции волна является стоячей – через узлы энергия не переносится.**

Происходит превращение энергии то полностью в потенциальную, то в кинетическую, как при колебаниях маятника.

Энергия стоячей волны периодически (с частотой  $2\omega$ ) перекачивается от узлов смещения, где сосредоточена потенциальная энергия (пучности деформации) к пучностям смещения, где сосредоточена кинетическая (пучности скорости).

Дважды за период происходит переход потенциальной энергии в кинетическую.

# Координаты узлов и пучностей

Найдем координаты  
узлов и пучностей

$$B = 2A \cos kx$$

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

**Узлы:**  $\cos kx = \cos \frac{2\pi}{\lambda} x = 0 \Rightarrow \frac{2\pi}{\lambda} x = \pm \left( \frac{\pi}{2} + \pi n \right)$   
 $B = 0$

$$x_{\text{узел}} = \pm \left( n + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{2}$$

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

**Пучности:**  $\cos kx = 1 \Rightarrow \frac{2\pi x}{\lambda} = \pm \pi n$

$$B = 2A$$

$$x_{\text{пуч}} = \pm n \frac{\lambda}{2}$$

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

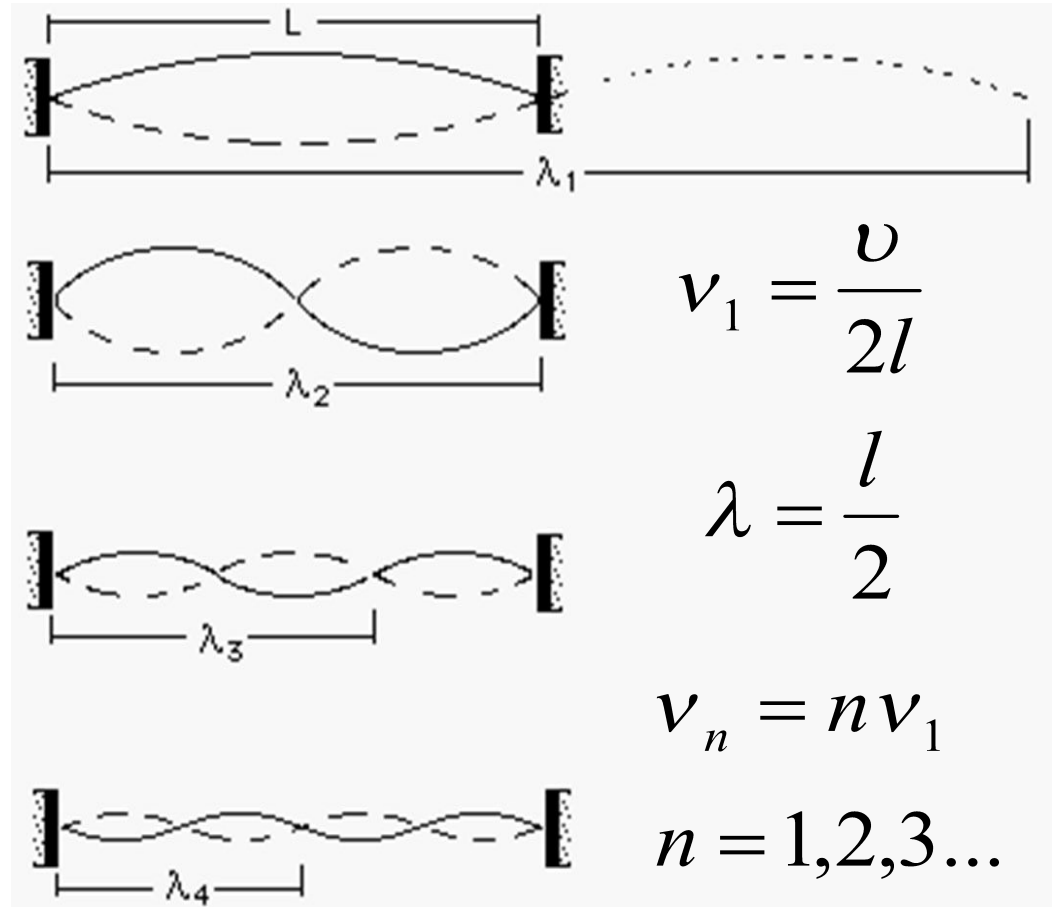
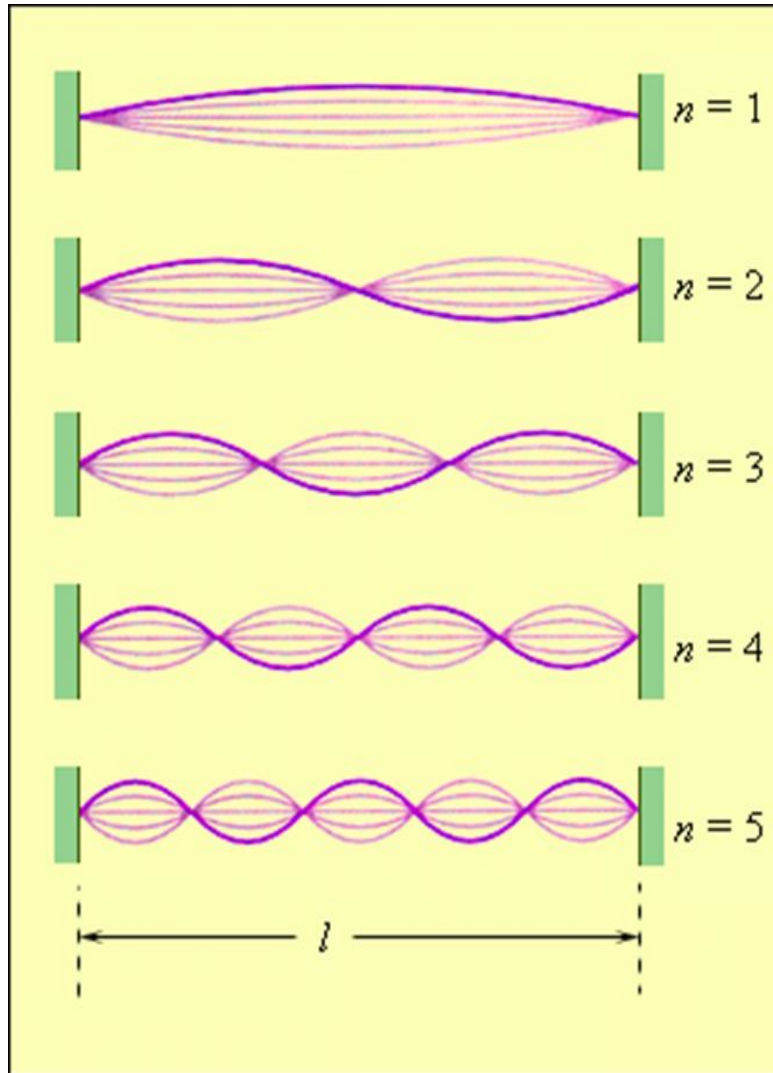
# Стоячие волны в ограниченных средах

*Краевые условия:*

- в точках закрепления струны или стержня, а также на заглушках труб, всегда возникают узлы смещения стоячей волны (в этих местах волна отражается от более плотной среды);
- на свободных концах стержня и на открытых концах труб всегда возникают пучности смещения стоячей волны (в этих местах волна отражается от менее плотной среды).



# Типы колебаний (моды) струны



**Первые четыре моды колебаний идеальной закрепленной струны**

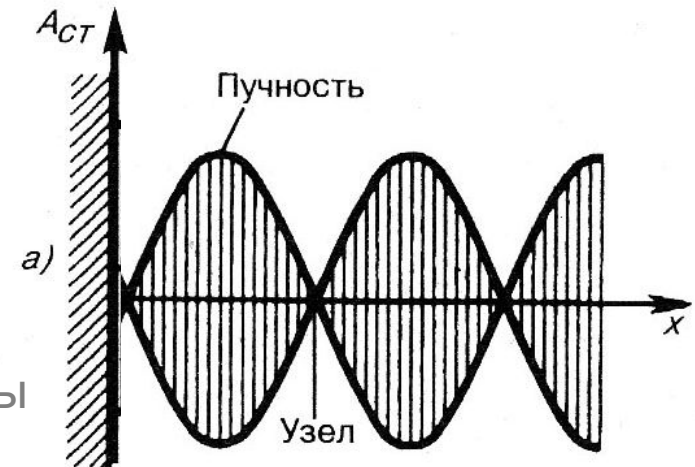
# Роль граничных условий

При отражении от границы раздела сред возникает разность фаз, которая зависит от условий отражения:

- при отражении от менее плотной среды образуется пучность

Примеры:

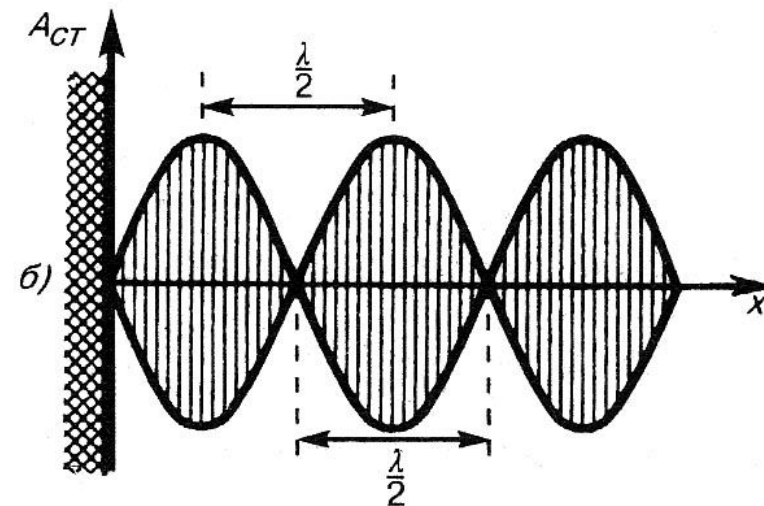
- струна, закрепленная с одной стороны
- звук в трубе, закрытой с одной стороны



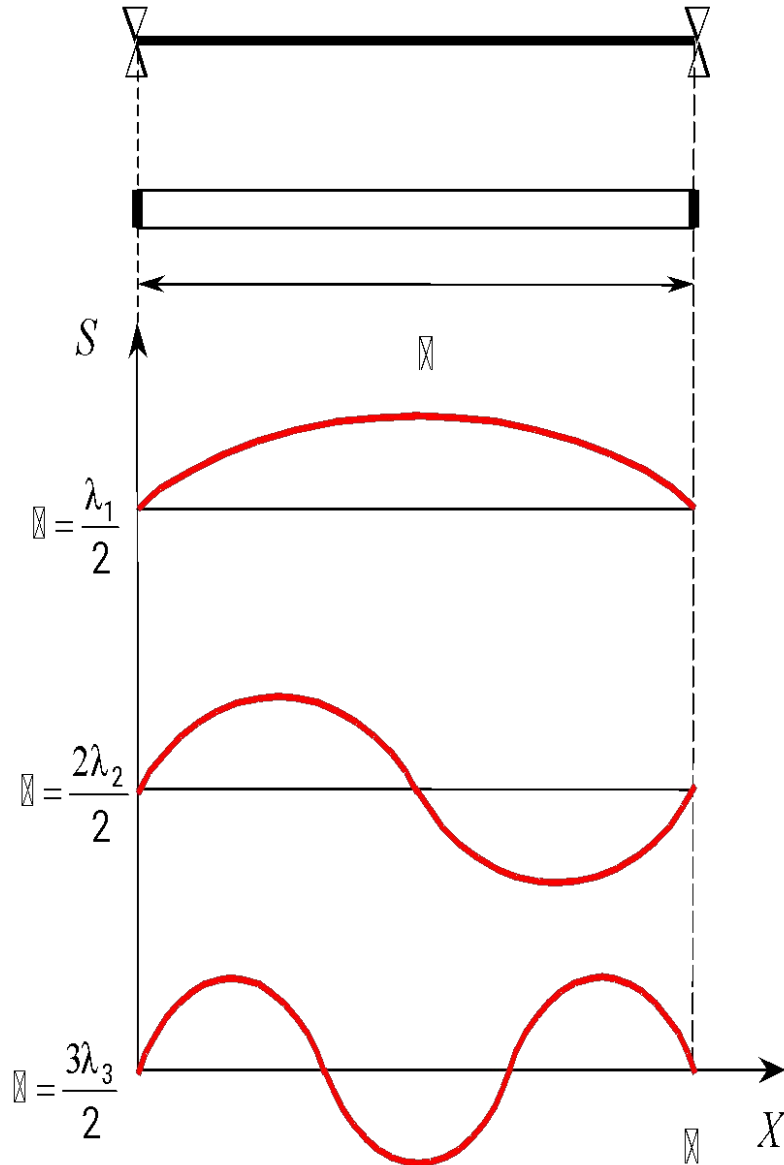
- при отражении от более плотной среды на границе возникает узел

Примеры:

- струна, закрепленная с двух сторон
- звук в трубе, закрытой с двух сторон



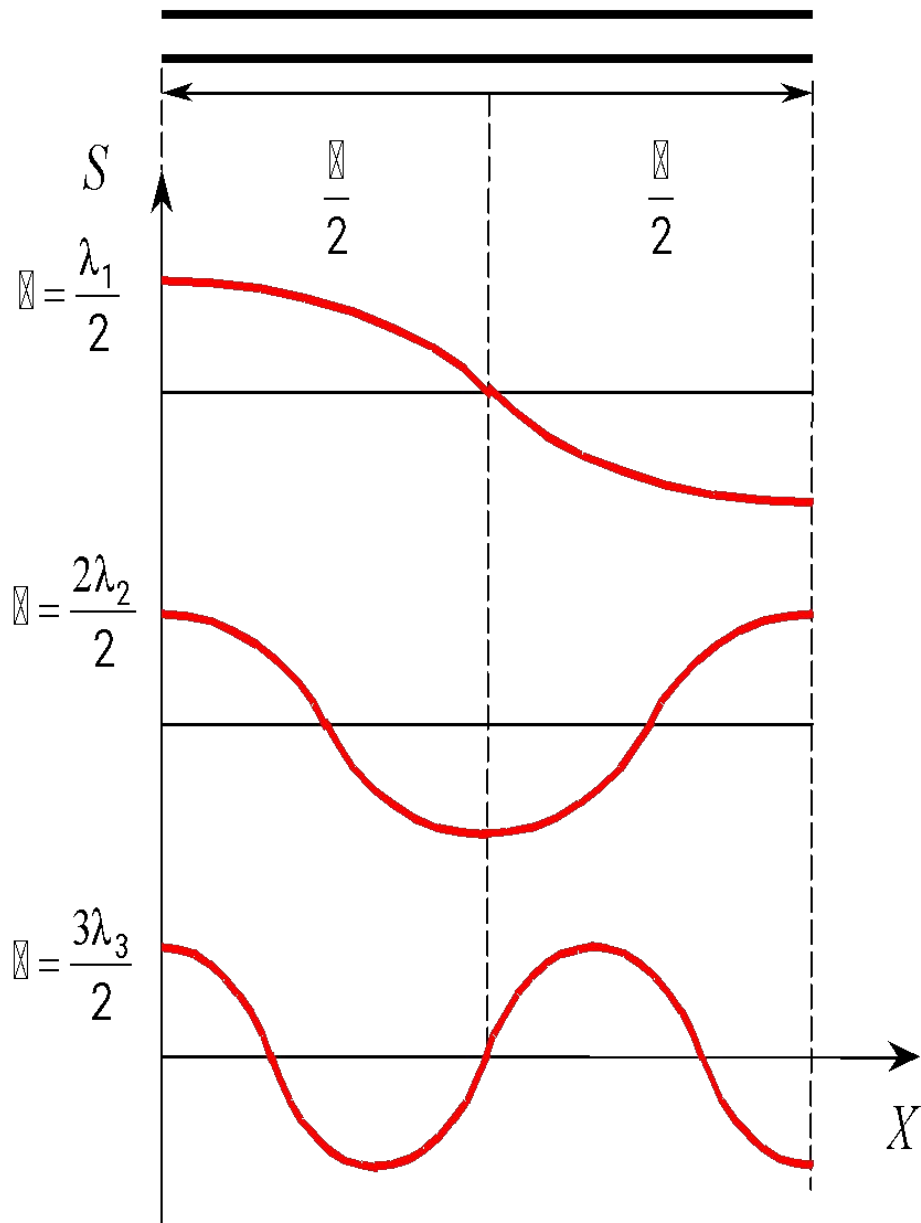
**Труба закрыта с обоих  
концов (струна или стержень  
закреплены на обоих концах)**



$$\ell = m \cdot \frac{\lambda_m}{2}$$

$$\lambda_m = \frac{2\ell}{m}$$

$$v_m = \frac{v}{\lambda_m} = \frac{v}{2\ell} \cdot m$$



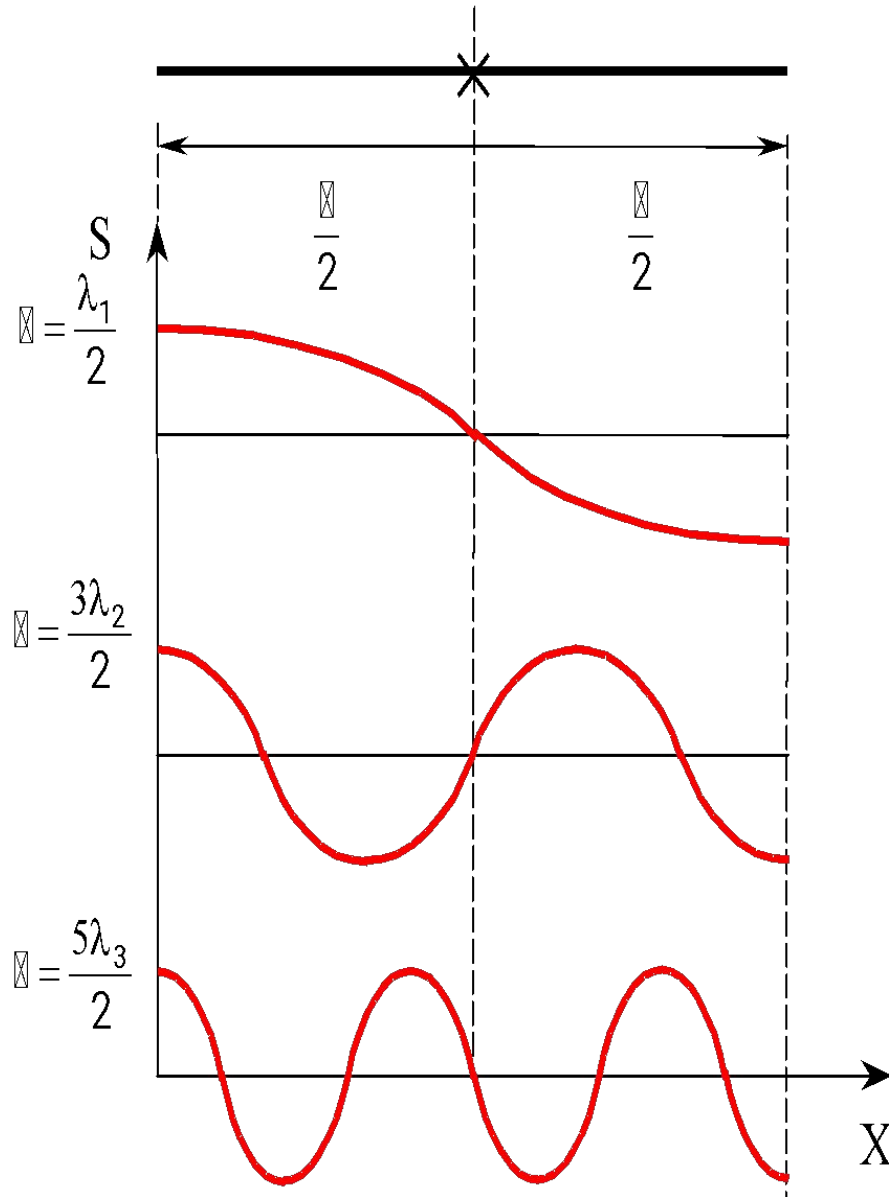
**Труба открыта с  
обоих концов**

$$l = m \cdot \frac{\lambda_m}{2}$$

$$\lambda_m = \frac{2l}{m}$$

$$v_m = \frac{v}{\lambda_m} = \frac{v}{2l} \cdot m$$

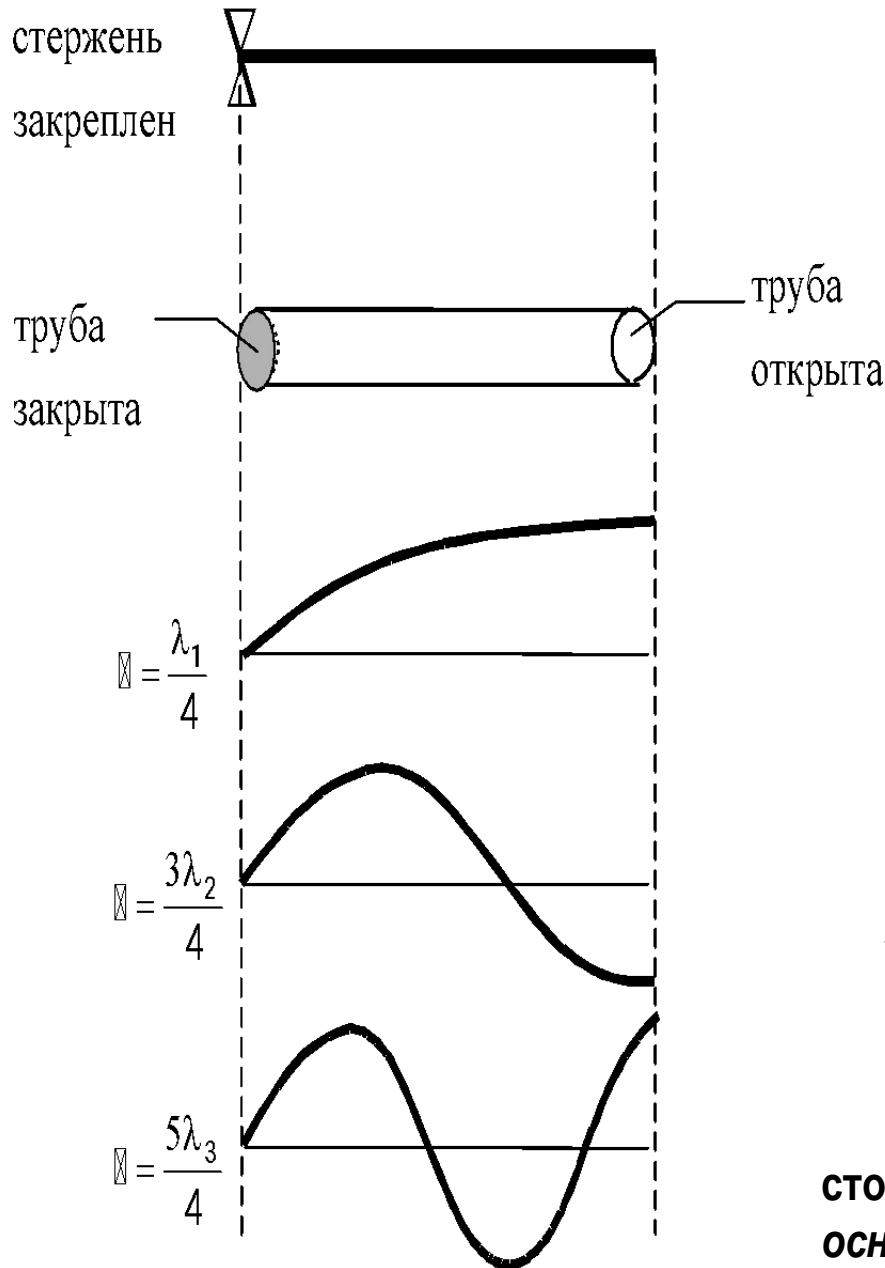
**Стержень закреплен  
в средней точке**



$$l = (2m - 1) \cdot \frac{\lambda_m}{2}$$

$$\lambda_m = \frac{2l}{(2m - 1)}$$

$$v_m = \frac{v}{\lambda_m} = \frac{v}{2l} \cdot (2m - 1)$$



**Стержень закреплен консольно (труба открыта с одного конца)**

$$l = (2m - 1) \cdot \frac{\lambda_m}{4}$$

$$\lambda_m = \frac{4l}{(2m - 1)}$$

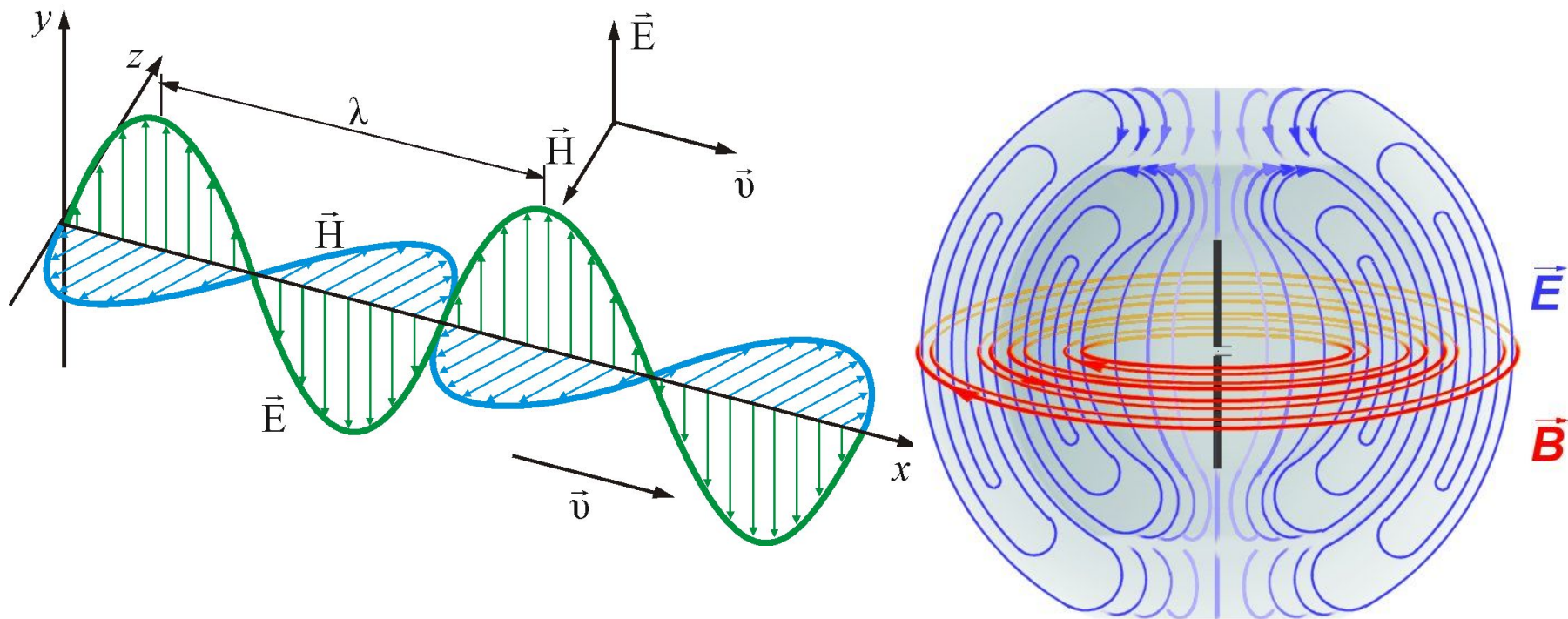
$$v_m = \frac{v}{\lambda_m} = \frac{v}{4l} \cdot (2m - 1)$$

Наименьшие возможные частоты стоячих волн (при  $m = 1$ ) называются **основными**, более высокие частоты называются **обертонами**.

# **Электромагнитные волны**

# Электромагнитные волны

- **Возможность существования ЭМ волн предсказывал еще Майкл Фарадей в 1832 г.,** обобщая известные к тому времени данные по изучению электричества и магнетизма
- **Теоретически обосновал это предположение Джеймс Клерк Максвелл**





# Джеймс Клерк Максвелл

## Британский физик и математик

- Член Лондонского королевского общества (1861)

## Сферы научных интересов:

- Молекулярная физика и термодинамика
- Механика (теория упругости и др.)
- Оптика
- Математика

## Кроме того:

- автор принципа цветной фотографии
- подготовил к публикации рукописи работ Генри Кавендиша
- вопросы популяризации науки
- сконструировал ряд научных приборов

**Основное научное достижение –  
создание в 1860–1865  
теории электромагнитного поля**

**Уравнения Максвелла описывают  
все основные закономерности  
электромагнитных явлений**

**James Clerk Maxwell**



**(13 июня 1831 –  
5 ноября 1879)  
Шотландия, Англия**

# Система уравнений

## Максвелла

**Теорема Гаусса  
для ЭП**

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV$$

$\rho$  – плотность заряда

**Источником ЭП  
являются заряды**

**Теорема Гаусса  
для МП**

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

**Источников МП НЕ  
существует**

**Закон Фарадея**

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{S}$$

**Изменение магнитной  
индукции порождает  
вихревое ЭП**

**Обобщенный закон  
Био-Савара-Лапласа**

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left( \vec{j} + \frac{d\vec{D}}{dt} \right) d\vec{S}$$

$j$  – плотность тока

**Электрический ток  
и изменение эл.индукции  
порождают вихревое МП**

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$$

$D$  – элект. смещение  
 $E$  – напряженность ЭП  
 $\epsilon$  – диэлектрическая  
проницаемость среды

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$$

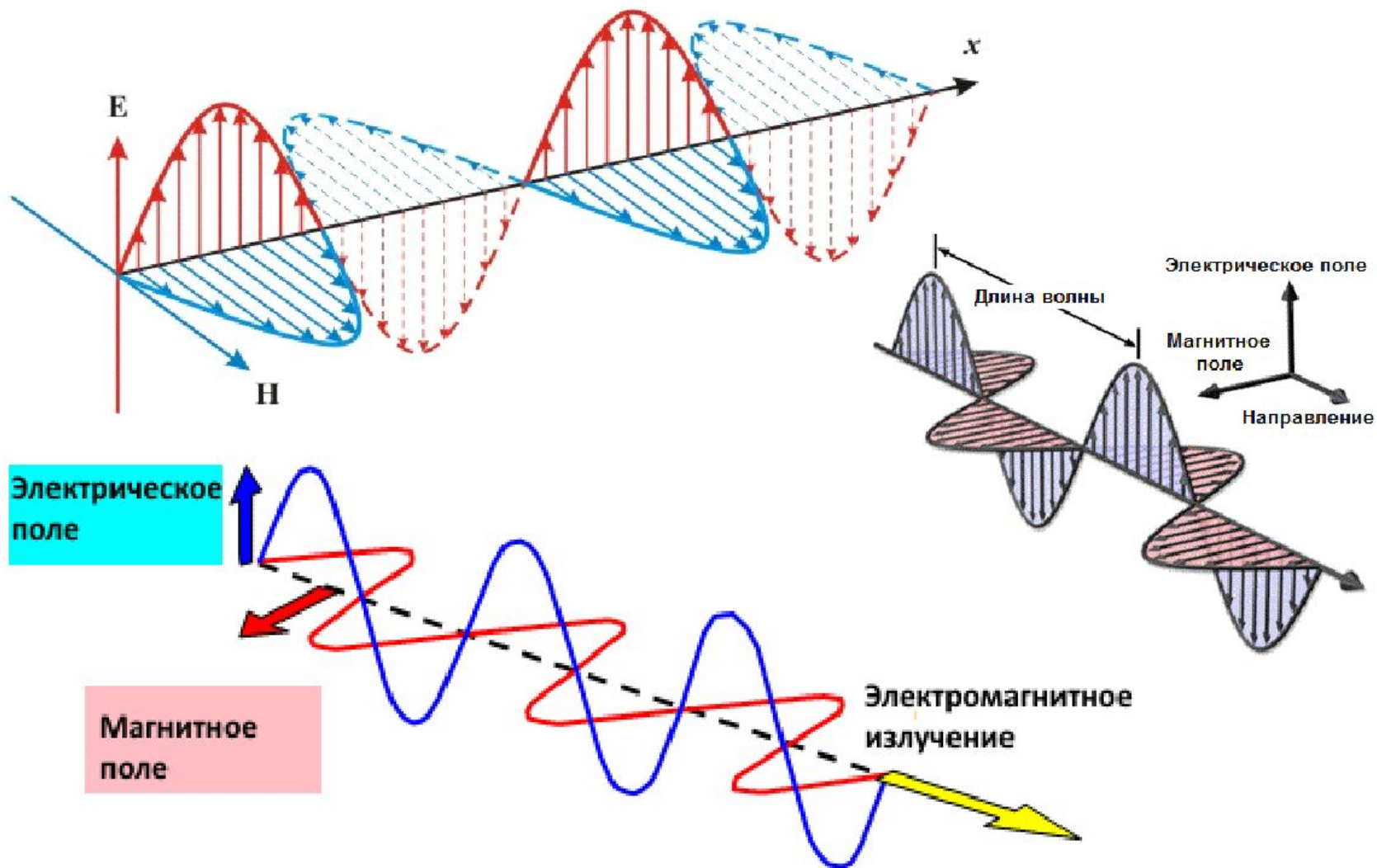
$B$  – магнитная  
индукция  
 $H$  – напряженность МП  
 $\mu$  – магнитная  
проницаемость среды

**Закон Ома  
в диф.форме**

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$\sigma$  – уд.проводимость

# «Портрет» ЭМ волны



# ЭМ волна и ее свойства

1. ЭМ волны излучаются движущимся электрическим зарядом

2. в ЭМ волнах происходят колебания полей, а не вещества, как в случае упругих волн

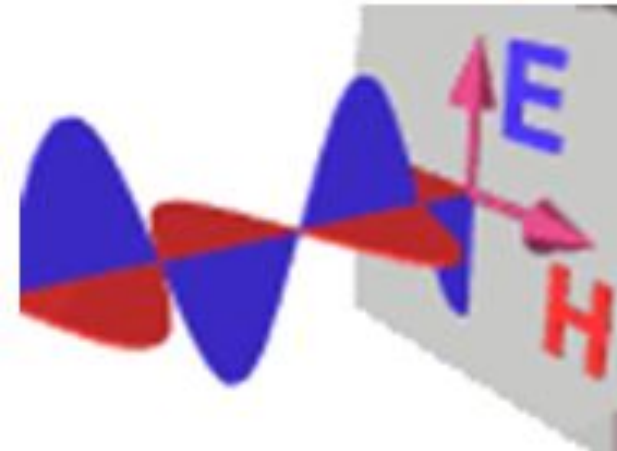
3. ЭМ волны – **ПОПЕРЕЧНЫЕ** волны

4. Электрическая  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  магнитная составляющие распространяются в **одном направлении**

5. Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  колеблются в **одинаковых фазах** (т.е. они достигают максимума и обращаются в нуль в одних и тех же точках)

6. В любой точке пространства **векторы напряженности ЭП и МП взаимно перпендикулярны ( $\perp$ ) и  $\perp$  направлению распространения** и образуют правовинтовую ( $\blacktriangleright$ ) систему

$$\vec{E} \rightarrow \vec{H} \rightarrow \vec{v}$$



# Дифференциальное уравнение ЭМВ

Векторы напряженности  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  ЭМ поля удовлетворяют волновым уравнениям:

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Решения уравнений:

$$\rightarrow E_z = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

$$\rightarrow H_y = H_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

$\omega$  – круговая частота

$$v_{\text{фаз}} = \frac{\omega}{k}$$

$\varphi_0$  – начальная фаза колебаний

$k = \frac{\omega}{v}$  – волновое число

- скорость распространения фазы
- скорость распространения волны (фазового фронта)
- при  $A = const$  фазовая скорость равна скорости переноса энергии

# Скорость распространения ЭМ волн

Скорость распространения ЭМ волн в среде зависит от электрических и магнитных свойств среды

Из теории Максвелла:

Скорость ЭМ волн в среде

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

Скорость ЭМ волн в вакууме

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$
$$n = \sqrt{\epsilon\mu}$$

показатель преломления среды  $n$

вакуум:  $\epsilon = \mu = 1 \Rightarrow v = c$

показывает,

другие среды:  $\epsilon\mu > 1 \Rightarrow v < c$

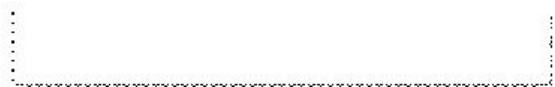
во сколько раз скорость света в среде МЕНЬШЕ, чем в вакууме

$c = 299\,792\,456,2 \pm 1,1 \text{ м/с}$   
Ивенсон, США (1972)

$\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$   
 $\mu_0 = 1,25664 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$

# Источники света

---



---





# Приемники света






--



# Экспериментальное исследование ЭМВ

1. С помощью излучающей антенны, помещенной в фокусе вогнутого зеркала и плоского зеркала **Герц получил стоячую ЭМ волну**

**Стоячая ЭМ волна  
состоит из двух стоячих волн –  
электрической и магнитной**

**Суперпозиция  
падающей и  
отраженной волн:**

$$\begin{cases} E_y = 2E_0 \cos kx \cos \omega t \\ H_z = 2H_0 \sin kx \sin \omega t \end{cases}$$

2. Измерив расстояние между узлами и пучностями волны, Герц нашел **длину волны  $\lambda$**
3. Зная  $\lambda$  и частоту колебаний вибратора, Герц **определил скорость ЭМ волн**, которая **оказалась близкой к скорости света**

$$\lambda \nu = v = c$$



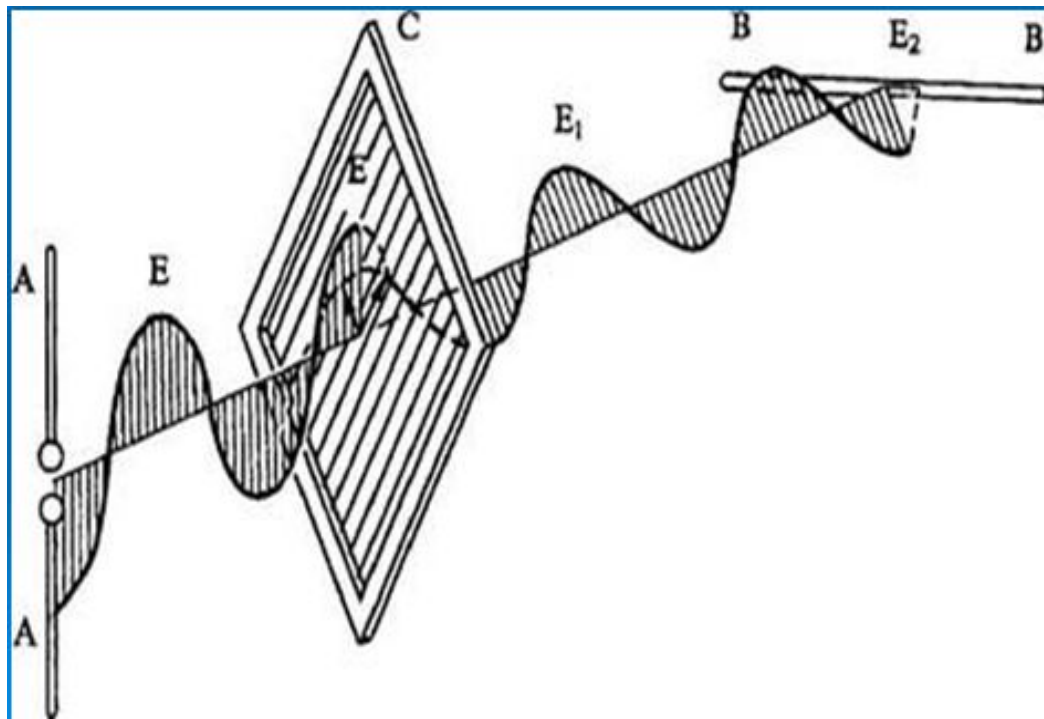
Сделал вывод, что  
**свет – ЭМ волна**

# Экспериментальное исследование ЭМВ

- Опыты Герца подтвердили соотношение, следующее из теории Максвелла

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}$$

- Герц расположил на пути волн решетку из параллельных друг другу медных проволок,

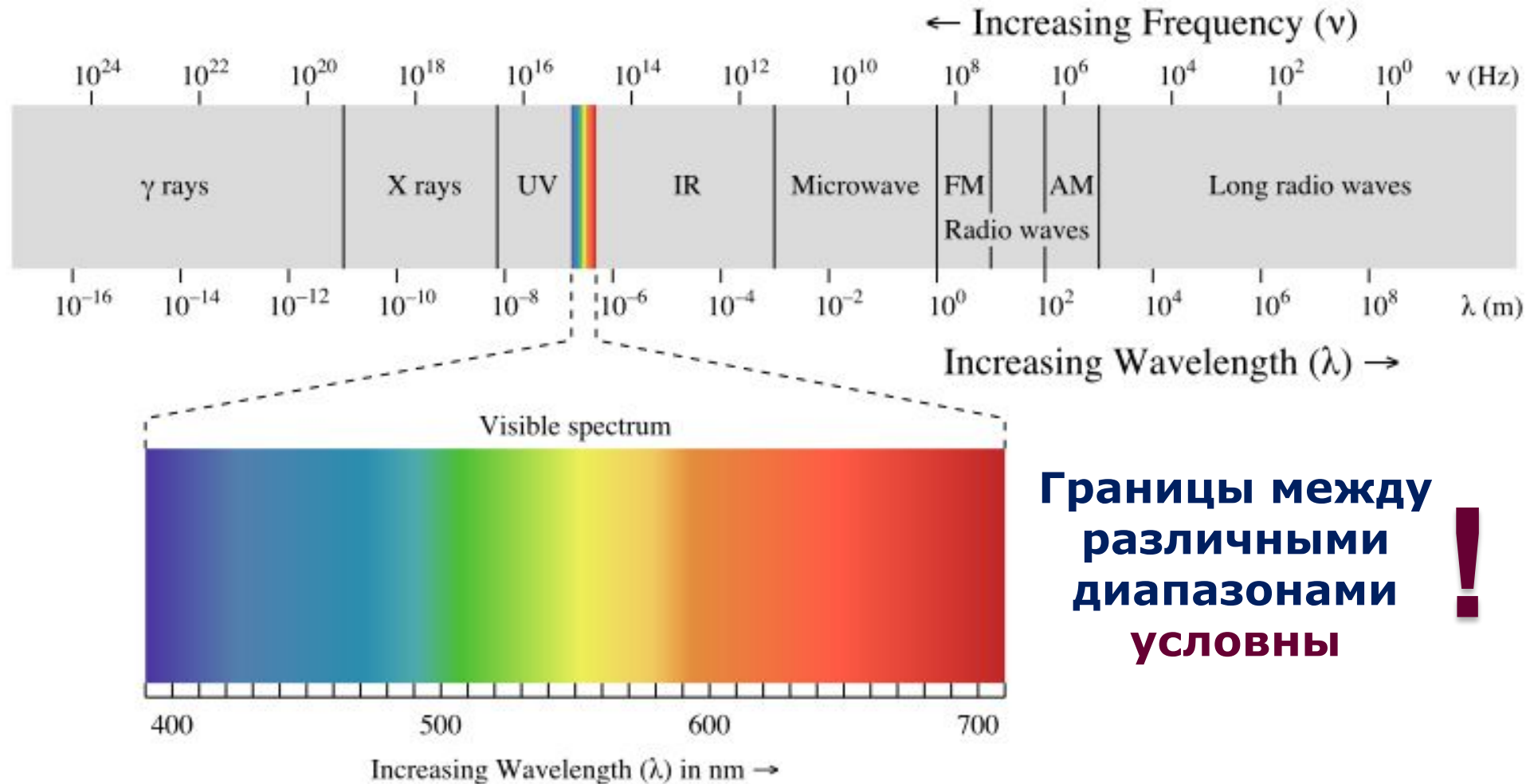


обнаружил, что при вращении решетки вокруг луча интенсивность волн, прошедших сквозь решетку, сильно изменяется



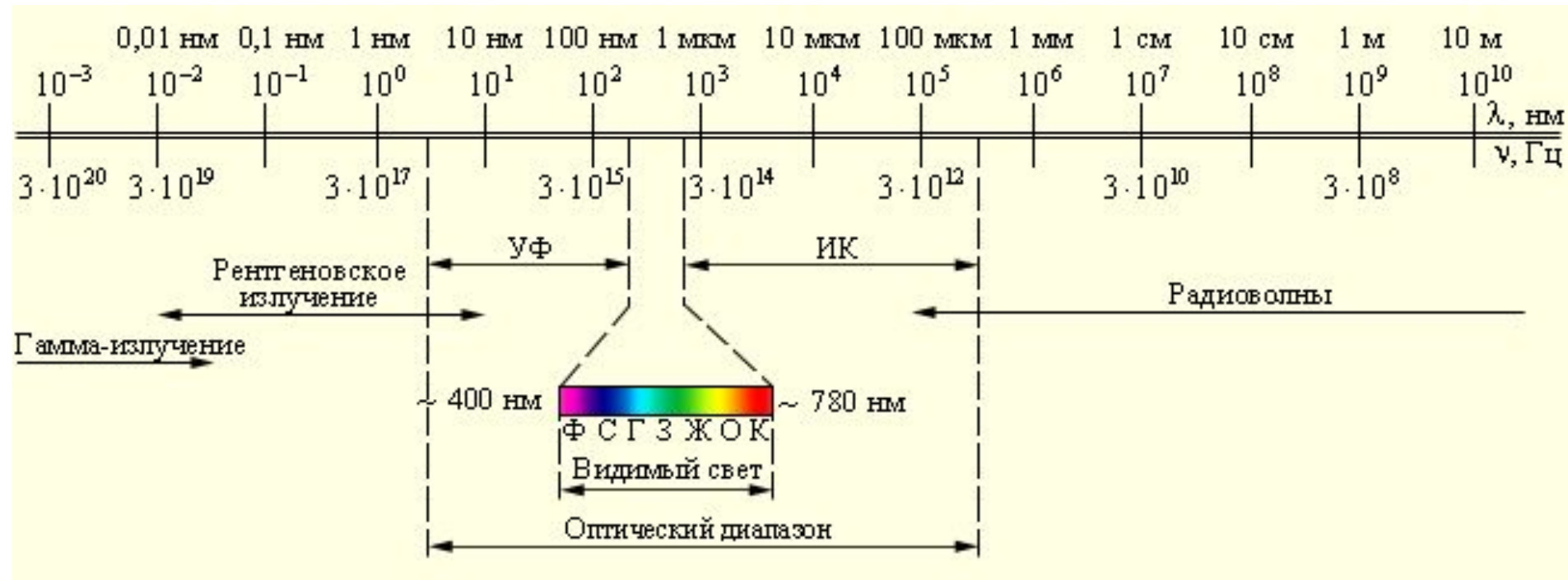
**Подтвердил  
поперечность  
ЭМ волн**

# Шкала электромагнитных волн



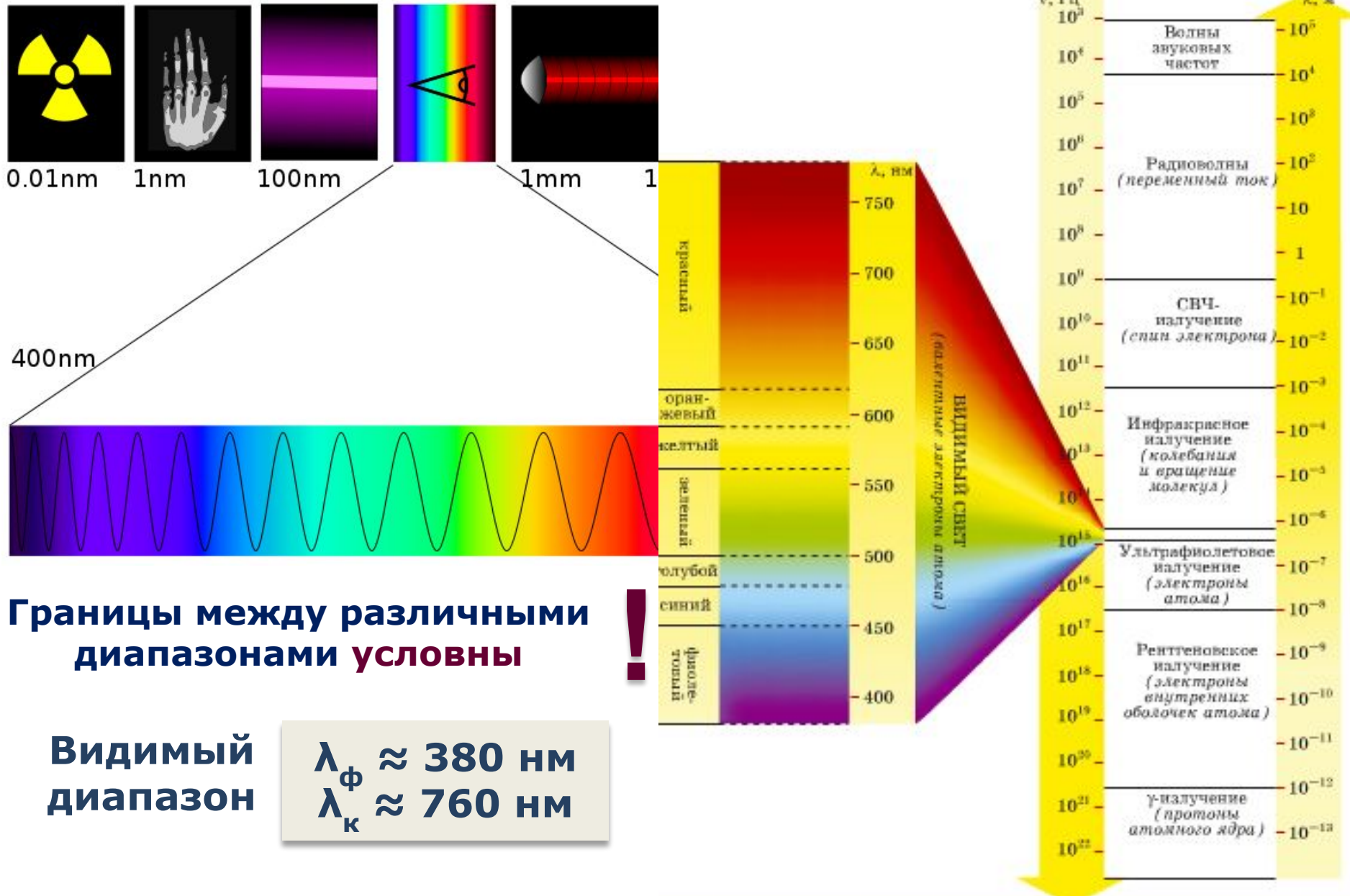
**Границы между  
различными  
диапазонами  
условны** !

# Шкала электромагнитных волн



**Границы между  
различными  
диапазонами  
условны** !

# Шкала электромагнитных волн



# Диапазоны ЭМ излучения

Название диапазона		Длины волн, $\lambda$	Частоты, $\nu$	Источники
<b>Радиоволны</b>	Сверхдлинные	$> 10$ км	$< 30$ кГц	Атмосферные и магнитосферные явления
	Длинные	10 км – 1 км	30 кГц – 300 кГц	
	Средние	1 км – 100 м	300 кГц – 3 МГц	
	Короткие	100 м – 10 м	3 МГц – 30 МГц	
	Ультракороткие	10 м – 1 мм	30 МГц – 300 ГГц	Радиосвязь
<b>Инфракрасное излучение</b>		1 мм – 780 нм	300 ГГц – 380 ТГц	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях
<b>Видимое излучение</b>		<b>780 – 380 нм</b>	380 ТГц – 790 ТГц	
<b>Ультрафиолетовое</b>		380 – 10 нм	$7,9 \cdot 10^{14}$ Гц – $3 \cdot 10^{16}$ Гц	Излучение атомов под воздействием ускоренных электронов
<b>Рентгеновские</b>		10 нм – 5 пм	$3 \cdot 10^{16}$ – $6 \cdot 10^{19}$ Гц	Атомные процессы при воздействии ускоренных заряженных частиц
				Ядерные и космические

<b>Длина волны</b>	<b>Название</b>	<b>Частота</b>
<b>более 100 км</b>	<b>Низкочастотные электрические колебания</b>	<b>0 – 3 кГц</b>
<b>100 км – 1 мм</b>	<b>Радиоволны</b>	<b>3 кГц – 3 ТГц</b>
<b>100 – 10 км</b>	<b>мираметровые (очень низкие частоты)</b>	<b>3 – 3-кГц</b>
<b>10 – 1 км</b>	<b>километровые (низкие частоты)</b>	<b>30 – 300 кГц</b>
<b>1 км – 100 м</b>	<b>гектометровые (средние частоты)</b>	<b>300 кГц – 3 МГц</b>
<b>100 – 10 м</b>	<b>декаметровые (высокие частоты)</b>	<b>3 – 30 МГц</b>
<b>10 – 1 м</b>	<b>метровые (очень высокие частоты)</b>	<b>30 – 300МГц</b>
<b>1 м – 10 см</b>	<b>дециметровые (ультравысокие)</b>	<b>300 МГц – 3 ГГц</b>
<b>10 – 1 см</b>	<b>сантиметровые (сверхвысокие)</b>	<b>3 – 30 ГГц</b>
<b>1 см – 1 мм</b>	<b>миллиметровые (крайне высокие)</b>	<b>30 – 300 ГГц</b>
<b>1 – 0.1 мм</b>	<b>децимиллиметровые (гипервысокие)</b>	<b>300 ГГц – 3 ТГц</b>
<b>2 мм – 760 нм</b>	<b>Инфракрасное излучение</b>	<b>150 ГГц – 400 ТГц</b>
<b>760 – 380 нм</b>	<b>Видимое излучение (оптический спектр)</b>	<b>400 – 800 ТГц</b>
<b>380 – 3 нм</b>	<b>Ультрафиолетовое излучение</b>	<b>800 ТГц – 100 ПГц</b>
<b>10 нм – 1пм</b>	<b>Рентгеновское излучение</b>	<b>30 ПГц – 300 ЭГц</b>
<b>&lt;10 пм</b>	<b>Гамма-излучение</b>	<b>&gt;30 ЭГц</b>



<b>Виды излучений</b>	<b>Длина волны</b>	<b>Получение</b>	<b>Регистрация</b>	<b>Характеристика, свойства</b>	<b>Применение</b>
<b>Радиоволны</b>	10 км ( $3 \times 10^4$ – $3 \times 10^{12}$ Гц)	Транзисторные цепи	Резонатор Герца, Когерер, антенна	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Связь и навигация
<b>Инфракрасное излучение</b>	0,1м – 770нм ( $3 \times 10^{12}$ – $4 \times 10^{14}$ Гц)	Электрический камин	Болометр, Фотоэлемент термостолбик	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Приготовл. пищи Нагревание, сушка, фотокопирование
<b>Видимый свет</b>	770 – 380 нм ( $4 \times 10^{14}$ – $8 \times 10^{14}$ Гц)	Лампа накаливания Молнии, Пламя	Спектрограф, Болометр	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Наблюдение за видимым миром
<b>Ультрафиолетовое излучение</b>	380 – 5 нм ( $8 \times 10^{14}$ – $6 \times 10^{16}$ Гц)	Разрядная трубка, углеродная дуга	Фотоэлемент Люминесценция, болометр	Фотохимические реакции	Медицина
<b>Рентгеновское излучение</b>	$5 - 10^{-2}$ нм ( $6 \times 10^{16}$ – $3 \times 10^{19}$ Гц)	Рентгеновская трубка	Фото-пластинка	Проникающая способность Дифракция	Рентгенография, радиология, обнаружение подделок
<b><math>\gamma</math> - излучение</b>	$5 \times 10^{-11}$ - $10^{-15}$ м	Циклотрон Кобальт - 60	Трубка Гейгера	Порождаются космически ми объектами	Стерилизация, Медицина (лечение рака)



# Диапазоны электромагнитных волн

Диапазон	Длина волны $\lambda$ , нм	Энергия фотона $E_{\text{ф}}$ , эВ
$\gamma$ - излучение	$<0,0012$	$>10^6$
Рентгеновское излучение	$0,0012\dots12$	$100\dots 10^6$
Ультрафиолетовое излучение	$12\dots380$	$3,2\dots100$
<b>Видимое излучение</b>	<b><math>380\dots780</math></b>	<b><math>1,6\dots3,2</math></b>
Инфракрасное излучение	$780\dots10^6$	$1,2\cdot10^{-3}\dots1,6$
Радиоволны	$>10^6$	$<1,2\cdot10^{-3}$

**Все виды излучений имеют, по существу,  
одну и ту же физическую природу**

*Луи де Бройль*

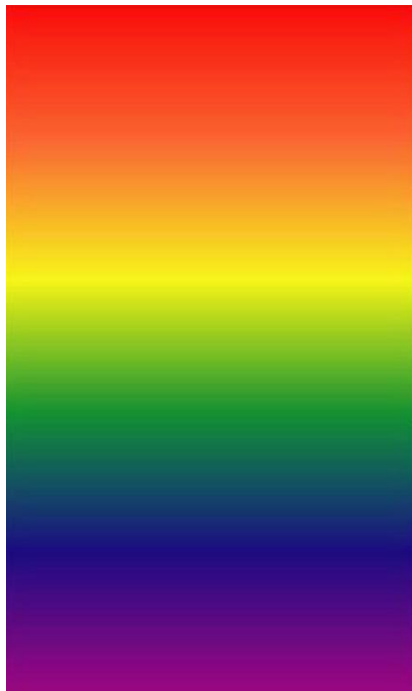
# Спектр видимого излучения

**Спектр**

распределение интенсивности ЭМ волн по длинам или частотам

**Монохроматическая волна**

волна, имеющая постоянную амплитуду и постоянную частоту



**Каждый**

**Охотник**

**Желает**

**Знать**

**Где**

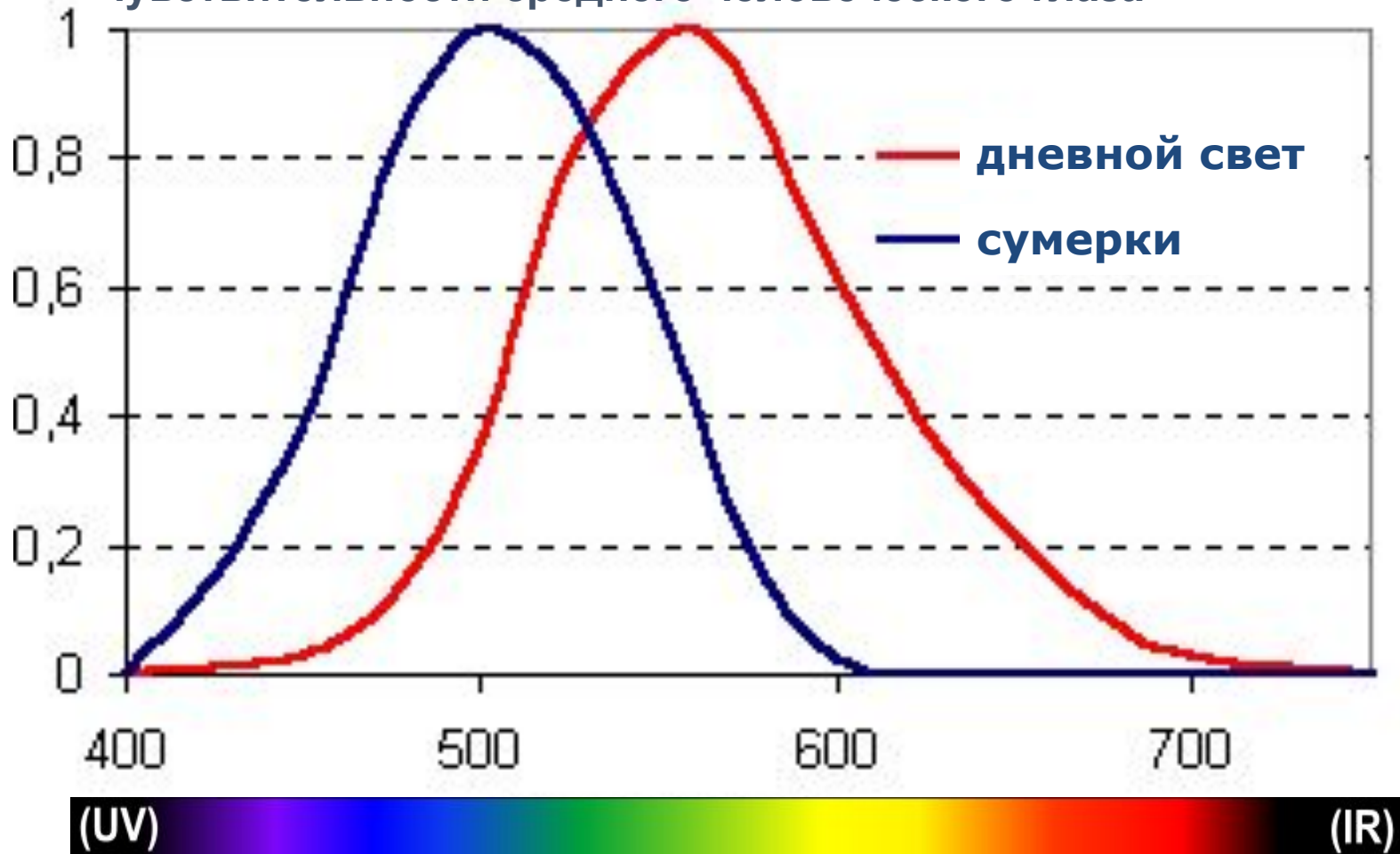
**Сидит**

**Фазан**

Цвет	Длина волны $\lambda$ , нм
Красный	620...760
Оранжевый	590...620
Желтый	550...590
Зеленый	500...550
Голубой	480...500
Синий	450...480
Фиолетовый	380...450

# Кривая видности

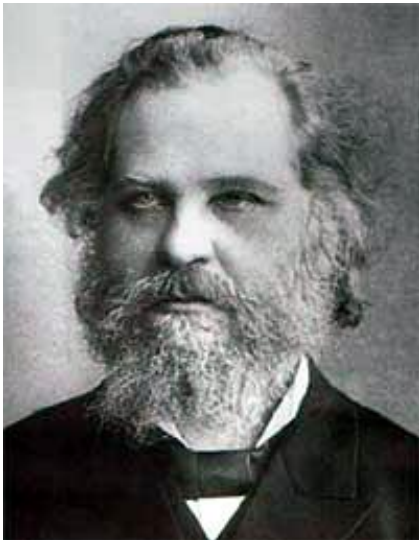
Спектральная зависимость относительной чувствительности среднего человеческого глаза



С.И. Вавилов: в области наибольшей чувствительности ( $\lambda=555$  нм) глаз начинает реагировать на свет при попадании на зрачок примерно 100 фотонов в секунду

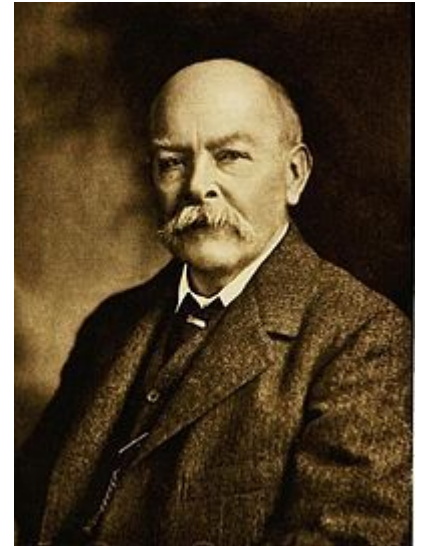
# Энергия и импульс ЭМ волны

- Распространение ЭМ волн связано с **переносом энергии** (подобно тому, как распространение упругих волн в веществе связано с переносом механической энергии)
- Сама **возможность обнаружения ЭМ волн указывает на то, что они переносят энергию**



Николай  
Алексеевич  
Умов

- В 1874 г. для характеристики переносимой волной энергии русский ученый **Н.А. Умов** ввел понятия **скорость и направление движения энергии, поток энергии**
- В 1884 г. английский ученый **Джон Пойнтинг** описал процесс переноса энергии с помощью **вектора плотности потока энергии**



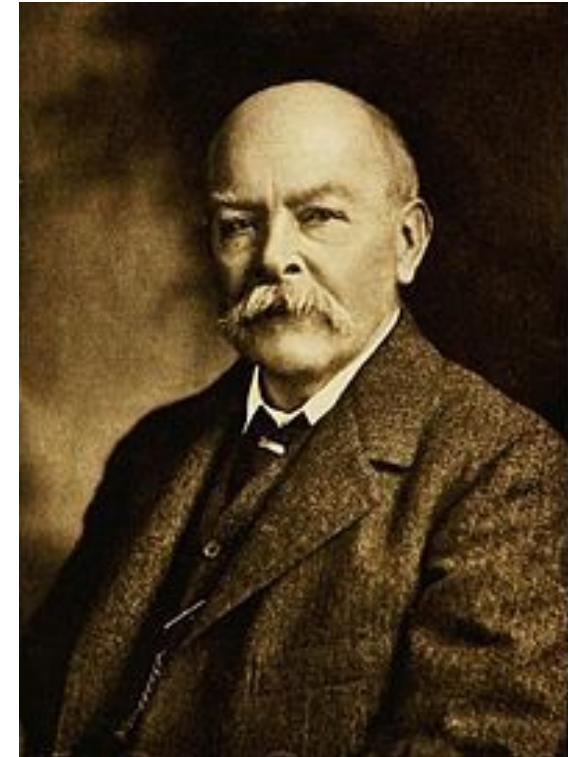
Джон  
Генри  
Пойнтинг

# Джон Генри Пойнтинг

## Английский физик

- 1883 – выполнил точные измерения гравитационной постоянной из закона всемирного тяготения Ньютона
- 1884 – разработал теорию вектора, описывающую направление и величину потока энергии ЭМ поля (**Теорема Пойнтинга о сохранении энергии электрического и магнитного полей**)
- 1903 – осознал, что космическая пыль в Солнечной системе падает по спирали на Солнце (позднее этот эффект был назван эффектом Пойнтинга-Робертсона)
- В 1884 – занимался анализом цен на товары на фьючерсной бирже с помощью **методов математической статистики**
- В 1905-1906 являлся президентом Лондонского Общества Физиков
- Кратеры на Марсе и Кратер Пойнтинга на Луне названы в его честь, так же как и главное здание физического факультета Бирмингемском университете

## John Henry Poynting



**9 сентября 1852 –  
30 марта 1914  
Англия**

# Вектор Умова-Пойнтинга

**Объемная плотность энергии ЭМ волны:**

$$w = w_{\text{э}} + w_{\text{м}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

**Поток энергии за 1 с через единичную площадку ( $S=1\text{м}^2$ ),  $\perp$  направлению распространения волны:**

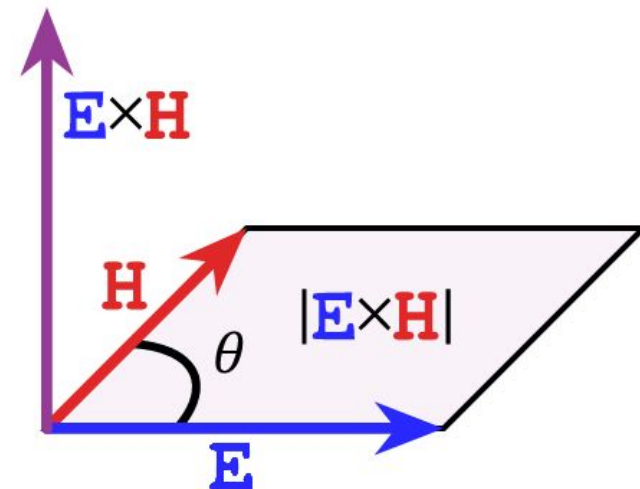
$$S = wv = EH$$

**Вектор плотности потока ЭМ энергии называется вектором Умова-Пойнтинга:**

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$$

**Вектор Умова-Пойнтинга  $\vec{S}$**

- **направлен в сторону распространения ЭМ волны,**
- **его модуль равен энергии, переносимой ЭМ волной за единицу времени ( $t=1\text{ с}$ ) через единичную площадку ( $S=1\text{ м}$ ),  $\perp$  направлению распространения волны**



# ЭМ масса и импульс

---

⇒ ЭМ полю присущи **ЭМ импульс и масса**

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

$$p = mc = \frac{E}{c}$$

$$E = mc^2$$

# Эффект Доплера

**Акустический эффект Доплера** ➔

**Оптический эффект:**

Соотношение, описывающее **эффект Доплера для ЭМ волн** в вакууме, с учетом преобразований Лоренца, имеет вид:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta}$$

Если источник движется относительно приемника вдоль соединяющей их прямой, то наблюдается **продольный эффект Доплера:**

Источник и приемник **удаляются**

$$(\theta = \pi)$$

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} > \nu_0$$

Источник и приемник **взаимно сближаются**

$$(\theta = 0)$$

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} < \nu_0$$



# Поперечный эффект

## Доплера

Наблюдается при

$$\theta = \frac{\pi}{2}$$

$$\theta = \frac{3}{2}\pi$$

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < \nu_0$$

**Поперечный эффект**

$$\sim \frac{v^2}{c^2}$$

**Продольный эффект**

$$\sim \frac{v}{c}$$

➔ **Поперечный эффект значительно слабее**

Впервые **экспериментальная проверка** существования **эффекта Доплера** и правильности релятивистской формулы была осуществлена американскими физиками Г.Айвсом и Д.Стилуэллом **в 30-х гг. XX в.**

# Применение эффекта Доплера

Эффект Доплера нашел широкое применение в науке и технике, например на нем основаны:

- радиолокационные лазерные методы измерения скоростей различных объектов на Земле (например, автомобиля, самолета и др.)

Особенно большую роль это явление играет в астрофизике:

- на основании доплеровского смещения линий поглощения в спектрах звезд и туманностей можно определять **лучевые скорости** этих **объектов по отношению к Земле**

$$v \cos \theta$$

при

$$v \ll c$$

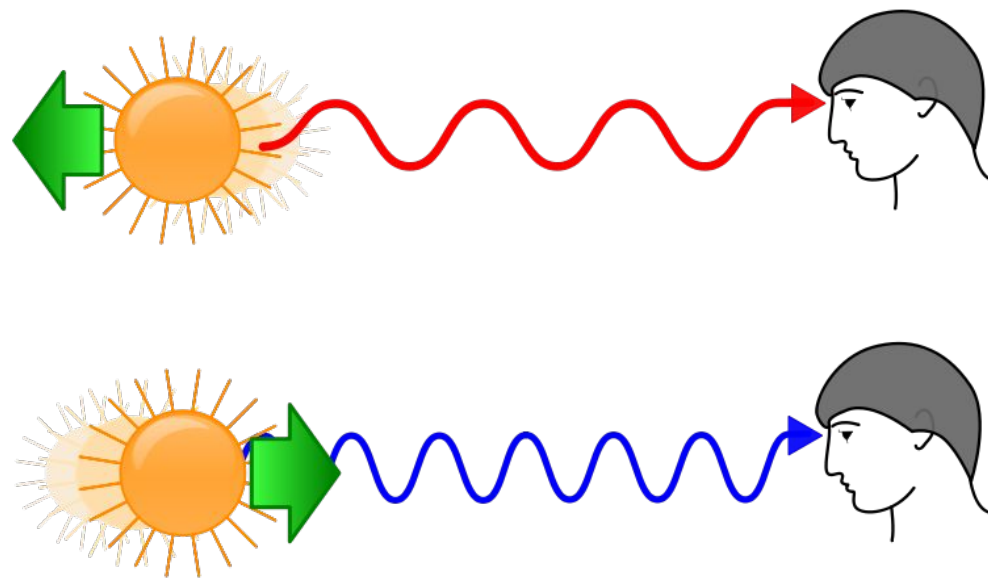
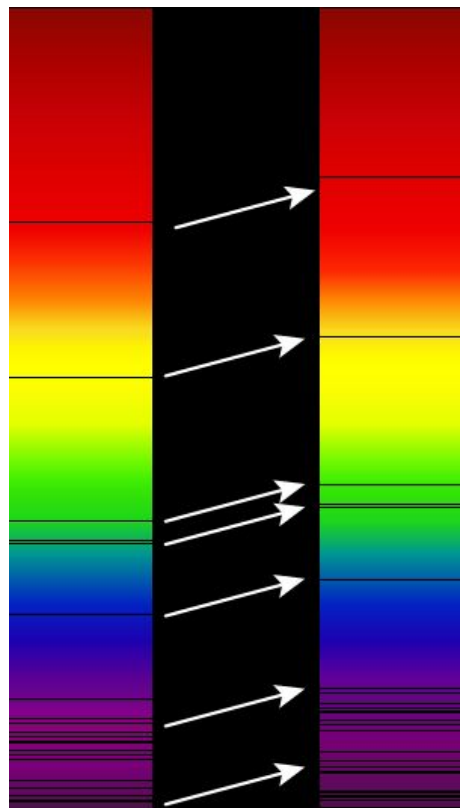
$$v \cos \theta \approx \left( 1 - \frac{v}{v_0} \right) c$$

# «Красное смещение»

Американский астроном **Эдвин Хаббл**  
в **1929 г.** обнаружил явление

**Космологическое  
красное смещение  
(«красное смещение»)**

линии в спектрах излучения  
внегалактических объектов  
смещены в сторону меньших  
частот (больших длин волн)

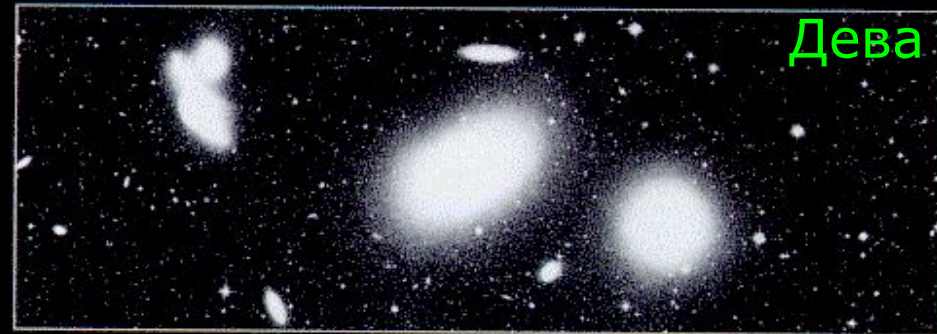


теория расширяющейся  
Вселенной

# Расширяющаяся Вселенная

Красное космологическое смещение  
линий спектра водорода

65 млн. св. лет



325 млн. св.



4 млрд. св. лет



# Расширяющаяся Вселенная

«Красное смещение» - проявление эффекта Доплера  
говорит о том, что Метагалактика расширяется,  
и объекты удаляются от нашей Галактики

**Метагалактика** – совокупность всех звездных систем

В современные телескопы можно  
наблюдать часть Метагалактики,  
оптический радиус которой равен

$$R = 1,12 \cdot 10^{23} \text{ км}$$

---

Хаббл установил закон, согласно которому,  
**относительное красное смещение галактик  $Z$**   
растет пропорционально расстоянию  $r$  до них

Закон  
Хаббла:

$$v \cos \theta \approx cz = Hr$$

$$H = 73,2 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}$$

1 пк (парсек) – расстояние, которое  
свет проходит в вакууме за 3,26 лет

$$1 \text{ пк} \approx 3,09 \cdot 10^{16} \text{ м}$$

– постоянная Хаббла

# Парсек

**Параллакс угловой секунды** – расстояние до объекта, годичный параллакс которого равен одной угловой секунде

или:

**Парсек** – расстояние, с которого средний радиус земной орбиты (равный 1 а.е.), перпендикулярный лучу зрения, виден под углом в одну угловую секунду (1")

$$1_{\text{пк}} = \frac{360 \cdot 60 \cdot 60}{2\pi} \text{ а. е.} \approx 3,09 \cdot 10^{16} \text{ м}$$

**1 астрономическая единица (а.е.)** составляет  $4,848 \cdot 10^{-6}$  парсека

