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

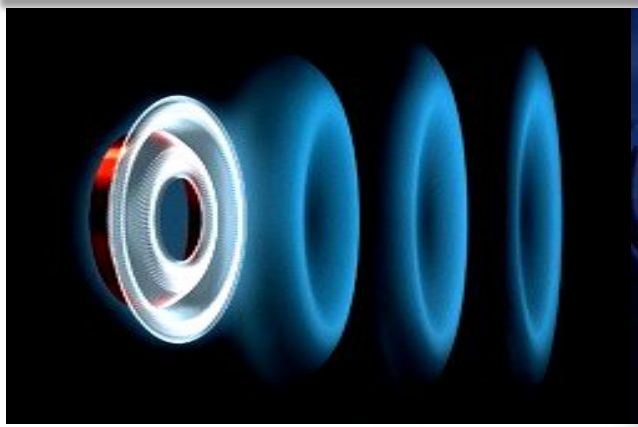
По физической природе и типу колеблющейся величины

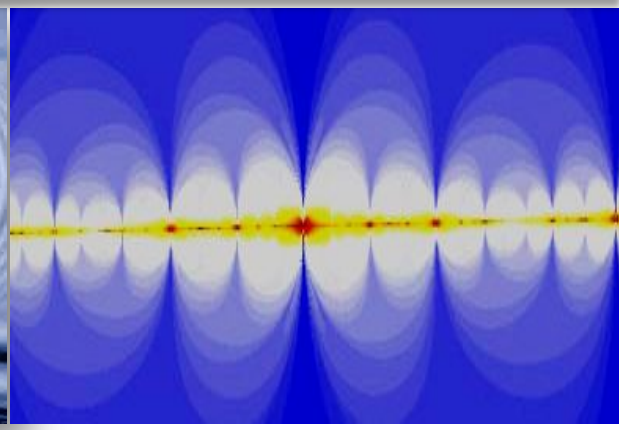
Физическая природа колебаний	Колеблющаяся величина
Механические	**Координата** **Скорость** **Ускорение** **Угол поворота**
Упругие **звук**	**Плотность** **Давление**
Электрические	**Заряд** **Сила тока** **Напряжение**
Электромагнитные **свет**	**Вектор напряженности электрического поля** **Вектор магнитной индукции**
Поверхностные	под действием $F_{тяж}$ и поверхностного натяжения

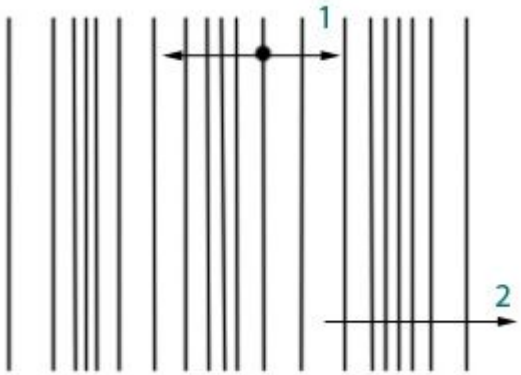
Физическая природа волн

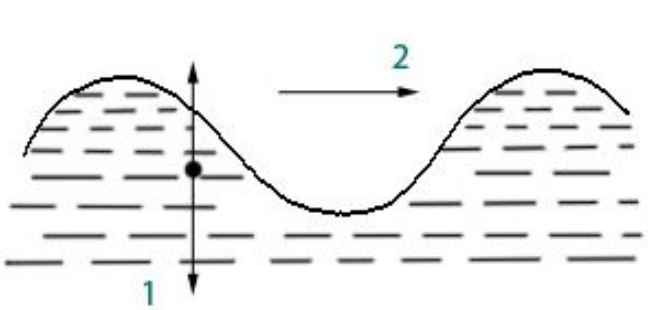
Колебания вещества — возбуждают → **Упругие (механические) волны**

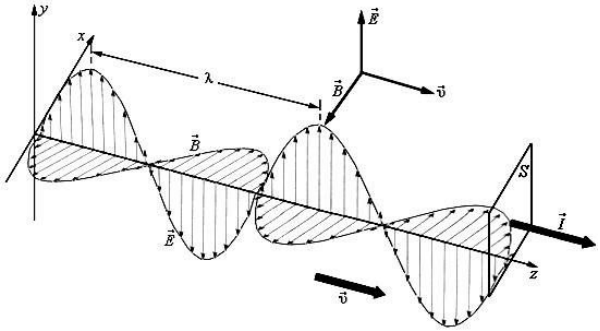
Колебания ЭМ поля → **Электромагнитные**











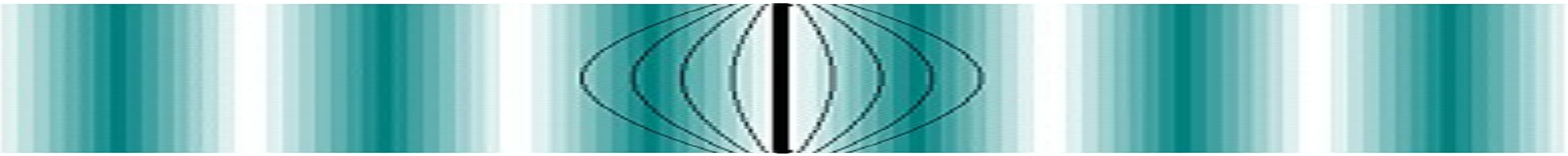
звук **на поверхности жидкости** **свет**

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

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

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

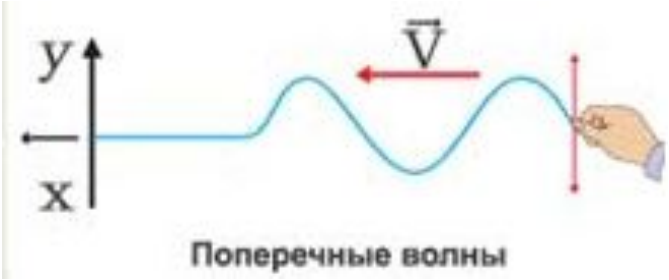
физика колебательного процесса:

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

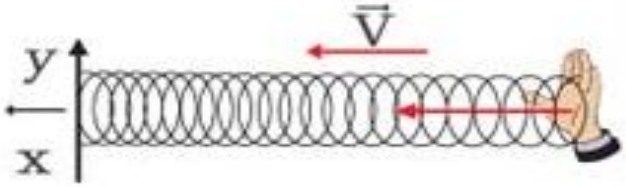


Поперечные волны

Деформация сдвига в твердых телах, на поверхности жидкости

Продольные

смещение частиц среды – ПО НАПРАВЛЕНИЮ распространения волны



Продольные волны

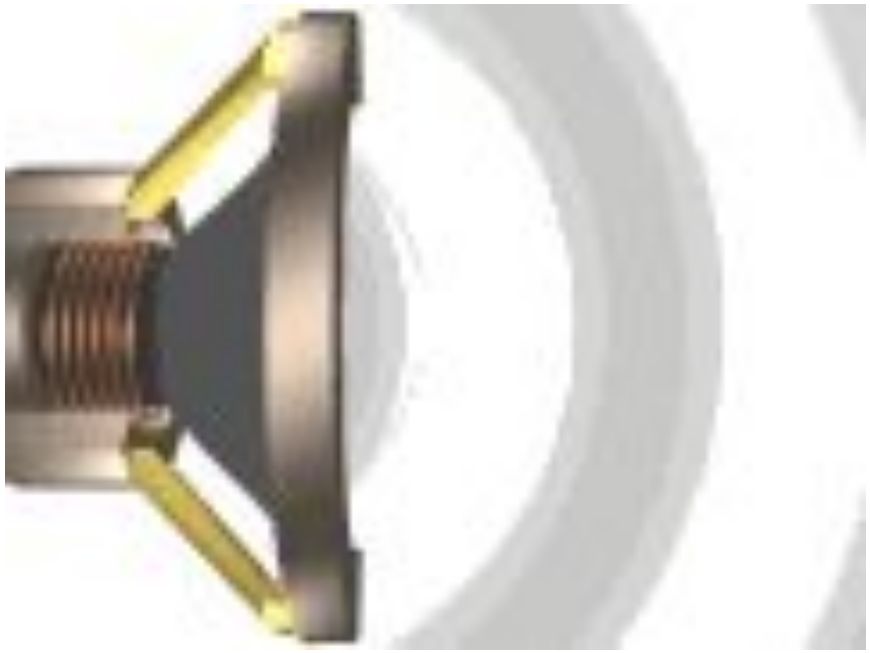
Сопровождается изменением плотности

Деформация сжатия в газах, жидкостях, твердых телах

Распространение волн в средах

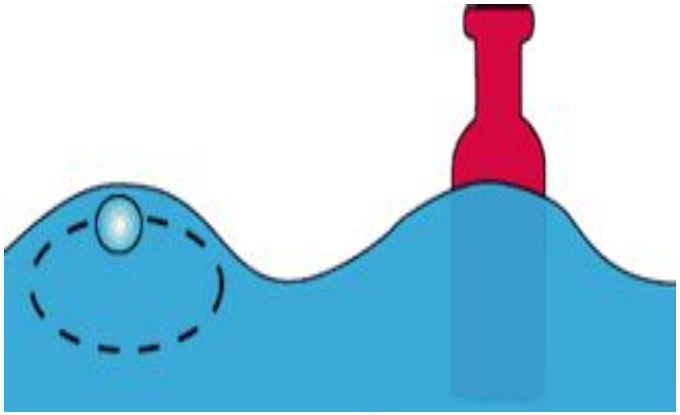
	Твердое тело	Жидкость	Газ	Вакуум
Упругие (механич.)	Да	Да	Да	Нет
Электромагнитные.	Да	Да	Да	Да
Поперечные упруг.	Да	Нет	Нет	Нет
Продольные упруг.	Да	Да	Да	Нет

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

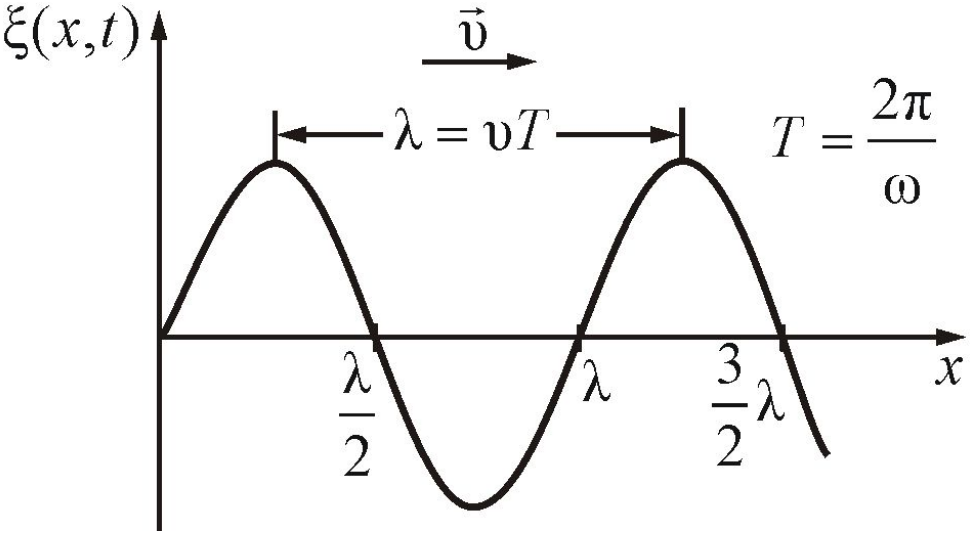
Взаимосвязь между частицами среды осуществляется ***силами упругости***, возникающими вследствие ***деформации среды.***

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



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

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

при $\Delta\tau = T$ $\quad \lambda = \upsilon T$

λ **Длина волны**

Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе

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

υ **Фазовая скорость**

Скорость распространения волны

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

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 (⊥) волновой поверхности, показывает **направление распространения волны (**направление **переноса энергии)**

Длина волны

расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе

$\lambda = vT$ **т.к.** $T = \frac{1}{\nu}$ **то** $\lambda = \frac{v}{\nu}$ **и** $\boxed{v = \lambda\nu}$

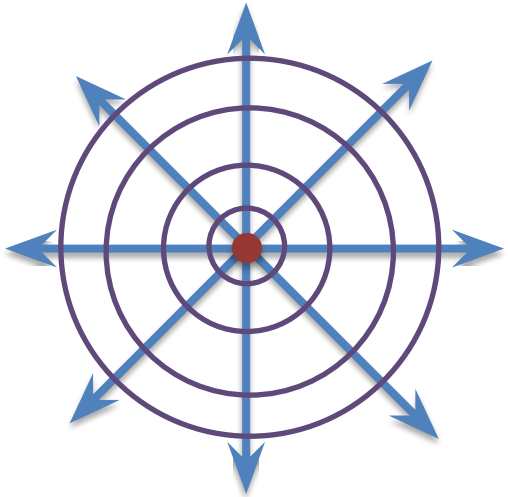
Классификация волн

По виду волновой поверхности волны разделяются на:

Сферические

Форма волновой поверхности

сфера или **окружность**



источник БЛИЗКО (точечный)

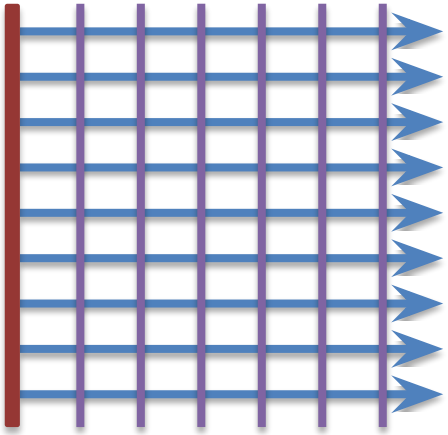
амплитуда ЗАВИСИТ от координаты (расстояния от источника)

$A \searrow$ **при** $\nearrow x$

Плоские

Форма волновой поверхности

плоскость или **прямая**



источник ДАЛЕКО

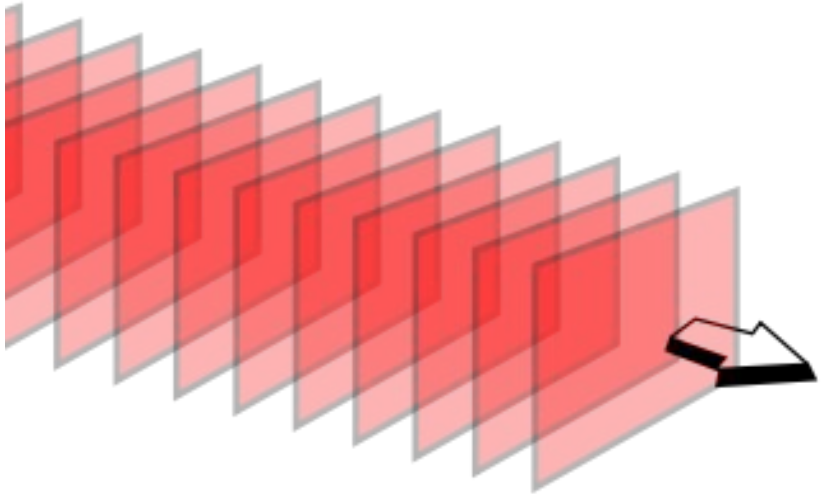
В плоской волне, амплитуда НЕ зависит от координаты

$$A = const$$

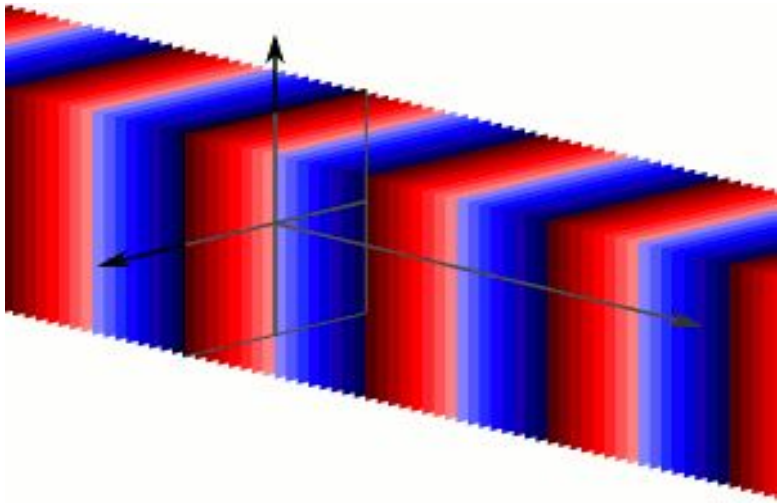
В случае непоглощающей среды

Демонстрация типов волн

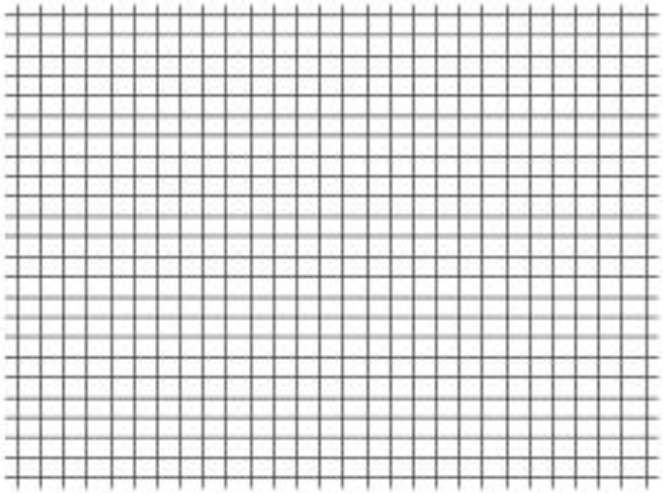
Продольная плоская



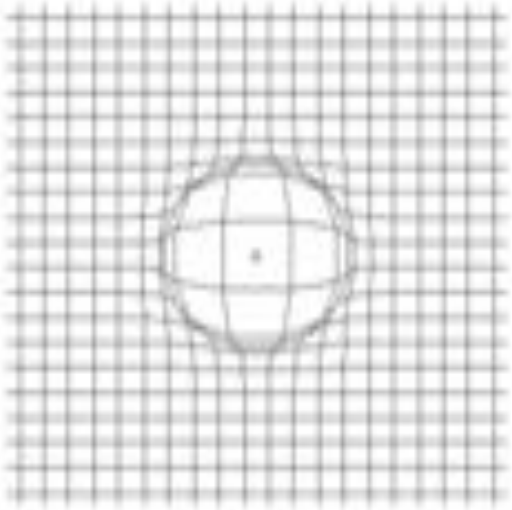
Продольная плоская



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:

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

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

Уравнение плоской бегущей волны в непоглощающей среде

Волновое число

$$\boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\upsilon T} = \frac{\omega}{\upsilon}}$$

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:

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

β **– 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 НЕпоглощающей среде

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

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

Уравнение сферической волны
в поглощающей среде

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

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*

$$\omega t - kx = const$$

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

Получаем дифференциальное уравнение в частных производных:

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

Разделим левое уравнение на правое:

ξ – волновая функция

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

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:**

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

υ **– фазовая скорость волны**

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

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

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

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

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

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

Плотность кинетической энергии (энергия на единицу объема)

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

Плотность потенциальной энергии (энергия на единицу объема)

$$\varpi_{ПОТ} = \frac{\rho}{2}v_{ФАЗ}^2\left(\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^2 = \frac{\rho}{2}\left(\frac{\omega^2}{k^2}\right)k^2A^2\sin^2(\omega t - kx) =$$

$$= \frac{\rho\omega^2 A^2}{2}\sin^2(\omega t - kx)$$

Средняя (за период) объемная плотность полной энергии

$$\varpi_{ПОЛН} = \varpi_{КИН} + \varpi_{ПОТ} =$$

$$= \rho\omega^2 A^2 \overline{\sin^2(\omega t - kx)} =$$

$$= \frac{\rho\omega^2 A^2}{2}$$

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:

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

Объемная плотность энергии

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

Энергия упругих волн

Перенос энергии

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

$$\boxed{\vec{I} = w_{\text{ср}}\vec{v}}$$

Энергия, переносимая волной за 1 с через единичную площадку, ⊥ направлению распространения волны

Монохроматическая волна

волна, имеющая постоянную амплитуду и постоянную частоту

Для монохроматической волны среднее по времени значение вектора Умова

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

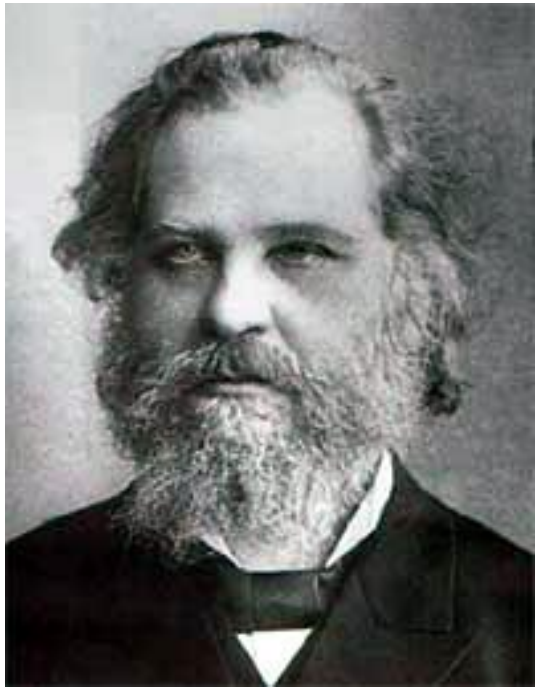
Интенсивность волны

среднее по времени значение плотности потока энергии, т.е. энергии, переносимой волной за 1 с через площадку 1 м^2, ⊥ 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

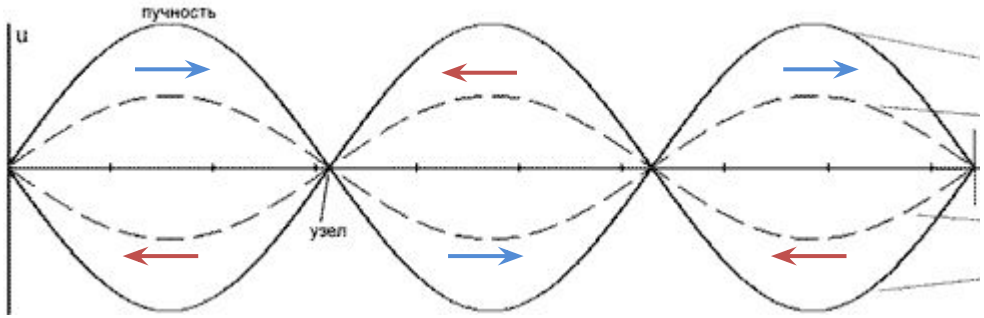
Стоячие волны

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:

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

$$\neq f(t)$$

Амплитуду можно представить:

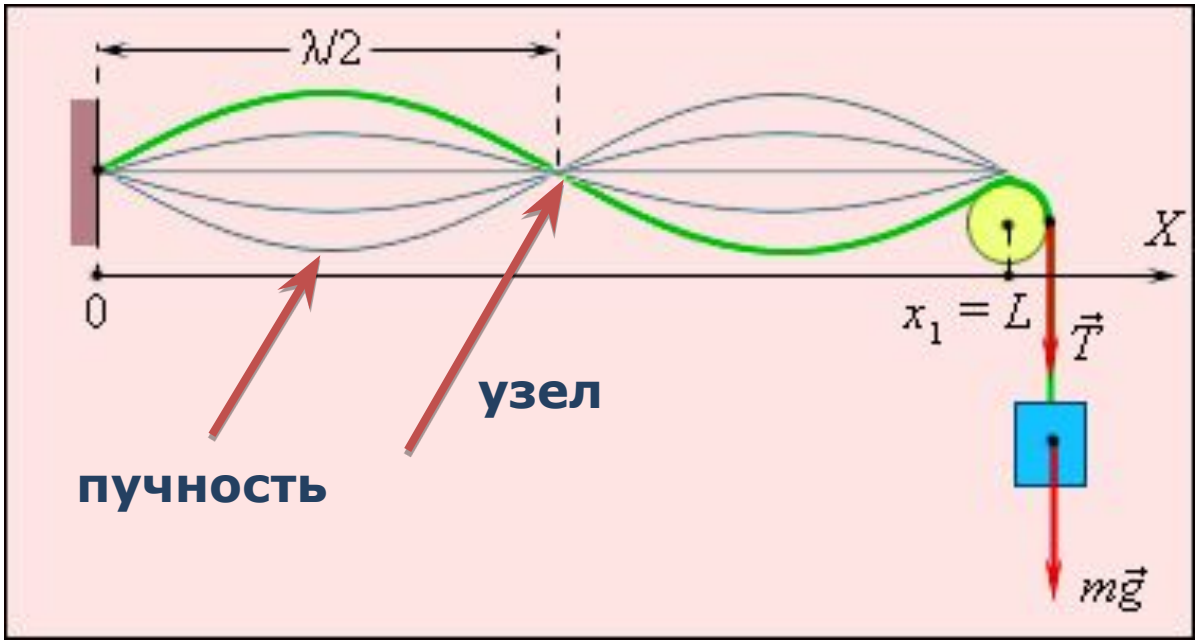
$$\boxed{y = B\cos \omega t}$$

где $B = 2A\cos kx$

max: $B = 2A$ **– пучность**

min: $B = 0$ **– узел**

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**

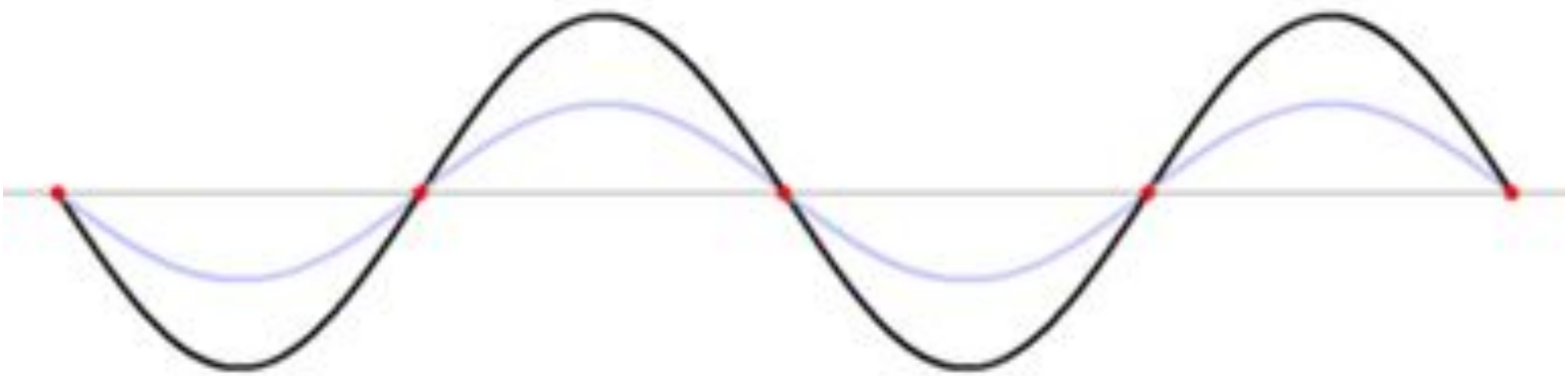
Свойство стоячей волны

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

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

где λ – **длина бегущей волны**

- **В отличии 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 2ω) перекачивается от узлов смещения, где сосредоточена потенциальная энергия (максимум 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

$$B = 2A\cos kx \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

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

$B = 0$

$$\boxed{x_{\text{узл}} = \pm\left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2}} \qquad n = 0, 1, 2, \ldots$$

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

$B = 2A$

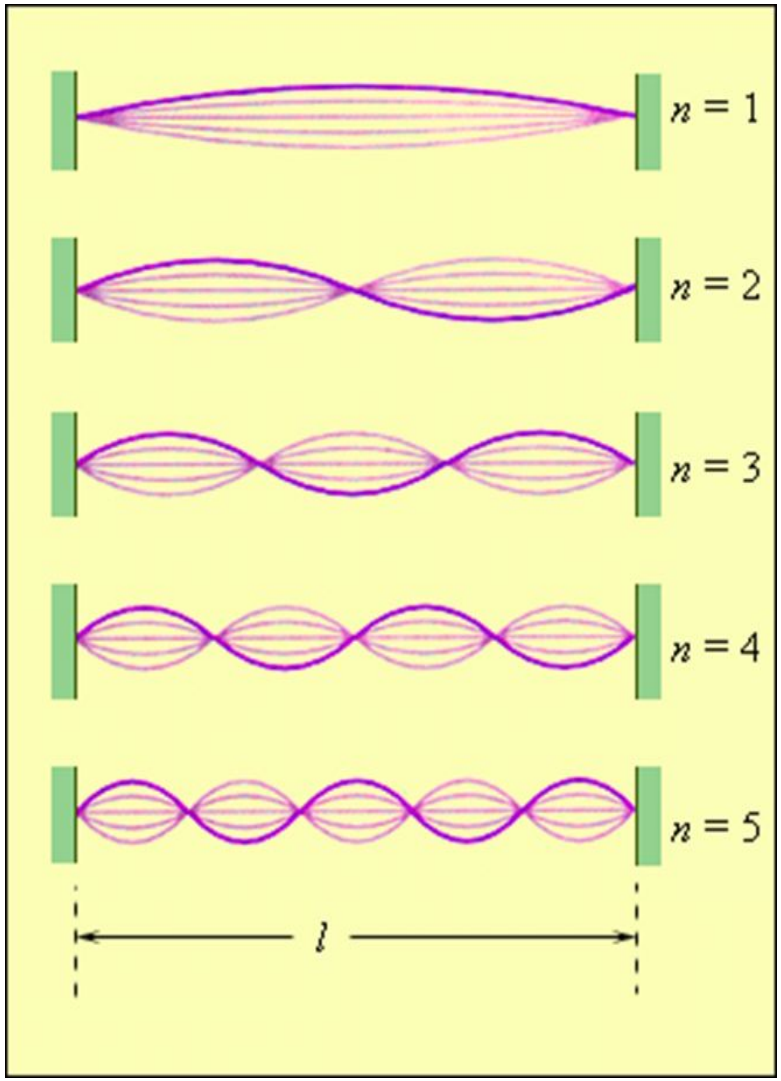
$$\boxed{x_{\text{пуч}} = \pm n\frac{\lambda}{2}} \qquad n = 0, 1, 2, \ldots$$

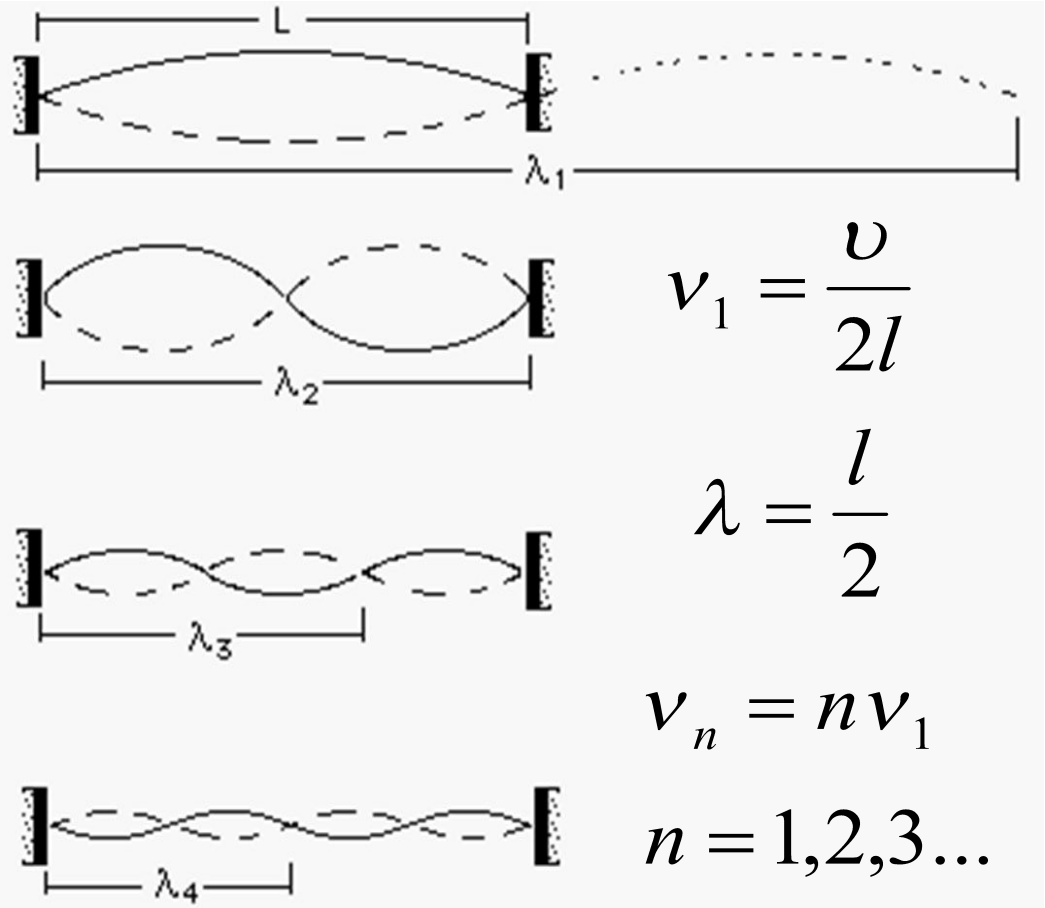
Стоячие волны в ограниченных средах

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





$$\nu_1 = \frac{\upsilon}{2l}$$

$$\lambda = \frac{l}{2}$$

$$\nu_n = n\nu_1$$

$$n = 1,2,3\ldots$$

Первые четыре моды колебаний идеальной закрепленной струны

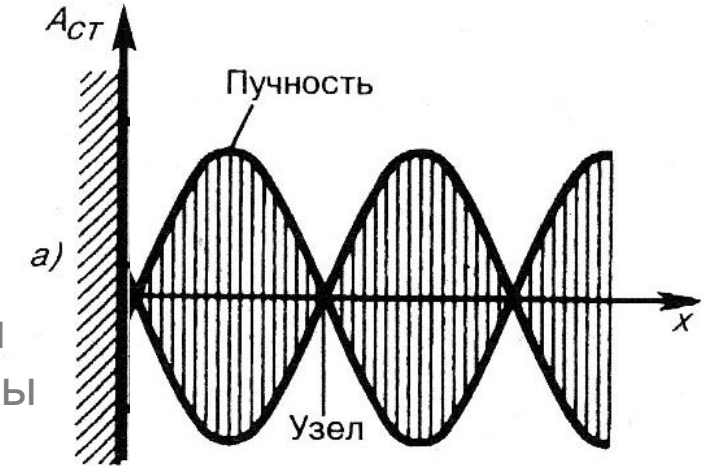
Роль граничных условий

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

- **при отражении от менее плотной среды образуется пучность**

Примеры:

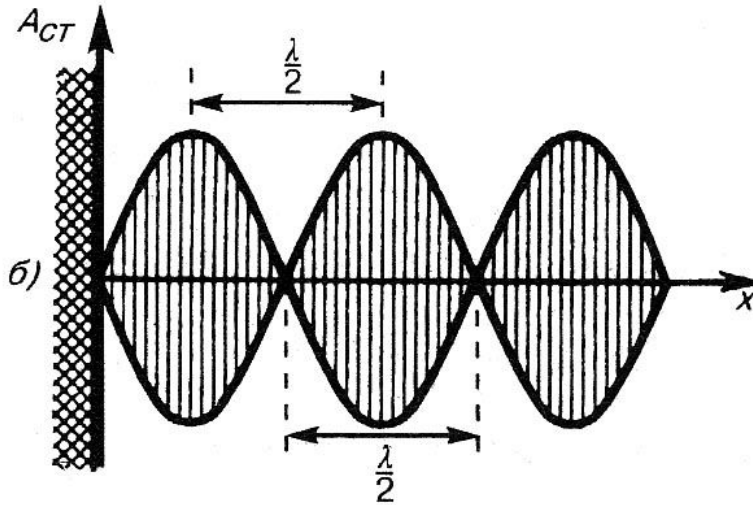
- струна, закрепленная с одной стороны
- звук в трубе, закрытой с одной стороны

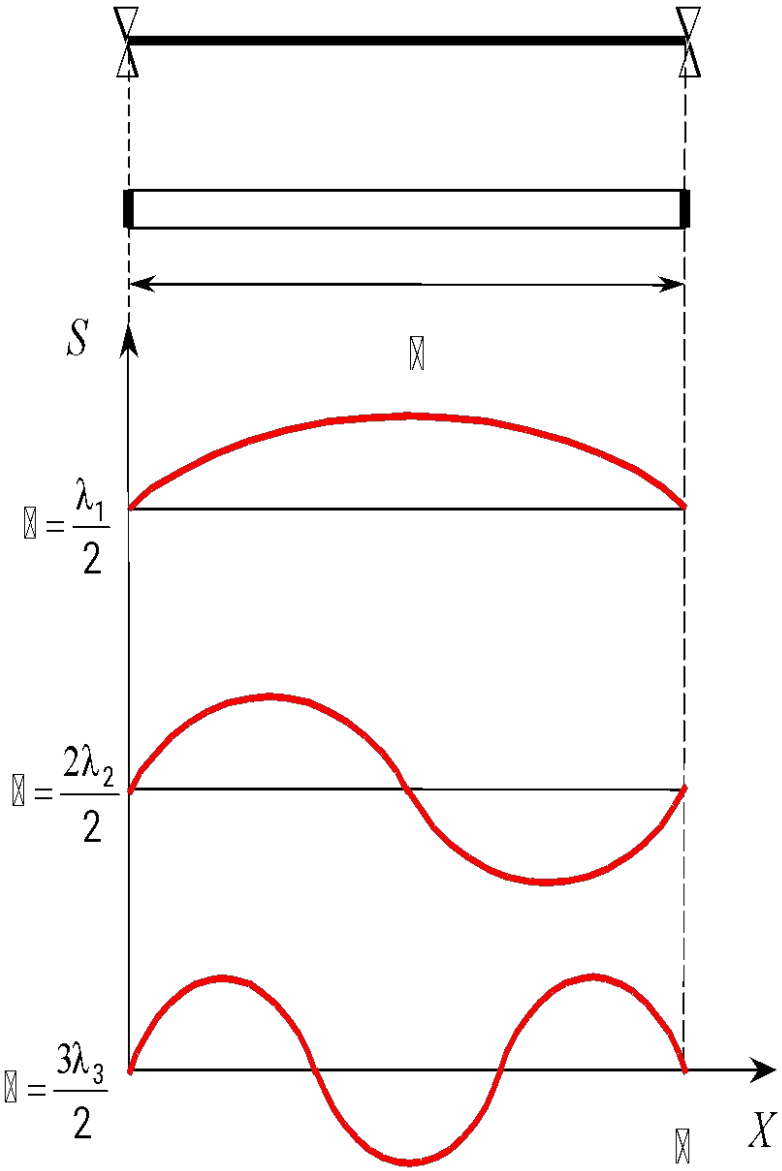


- **при отражении от более плотной среды на границе возникает узел**

Примеры:

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



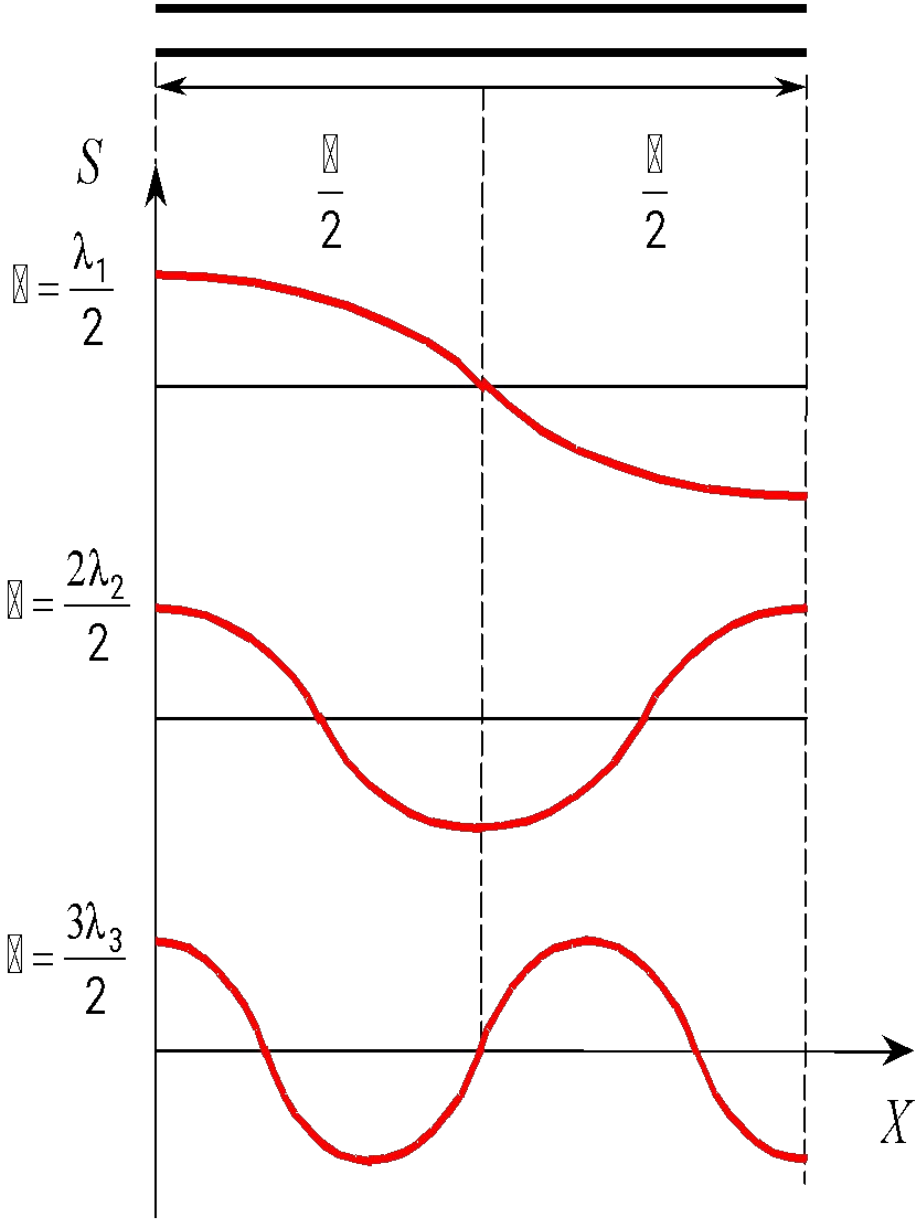


Труба закрыта с обоих концов **(струна или стержень закреплены на обоих концах)**

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

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

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

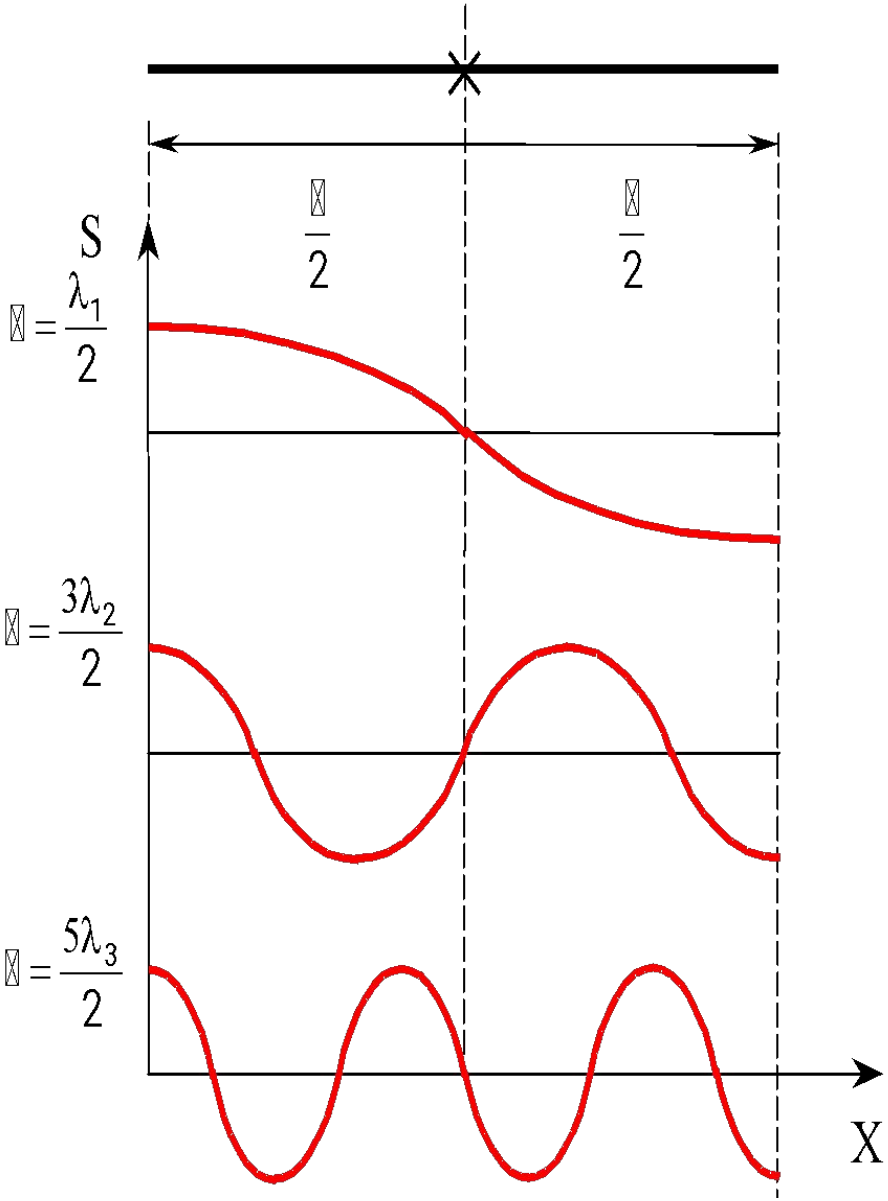


Труба открыта с обоих концов

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

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

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

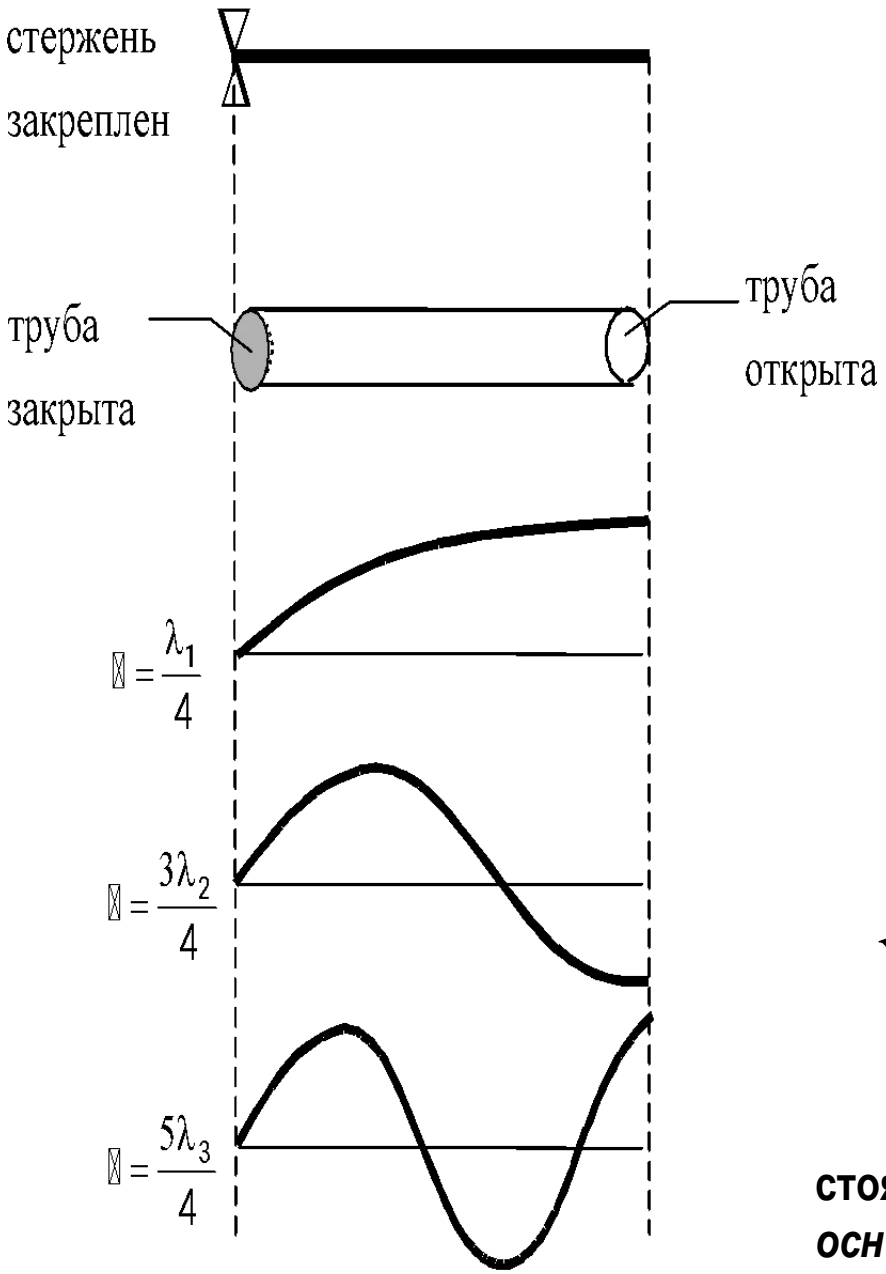


Стержень закреплен в средней точке

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

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

$$\nu_m = \frac{\upsilon}{\lambda_m} = \frac{\upsilon}{2\ell}\cdot(2m-1)$$



Стержень закреплен консольно (труба открыта с одного конца)

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

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

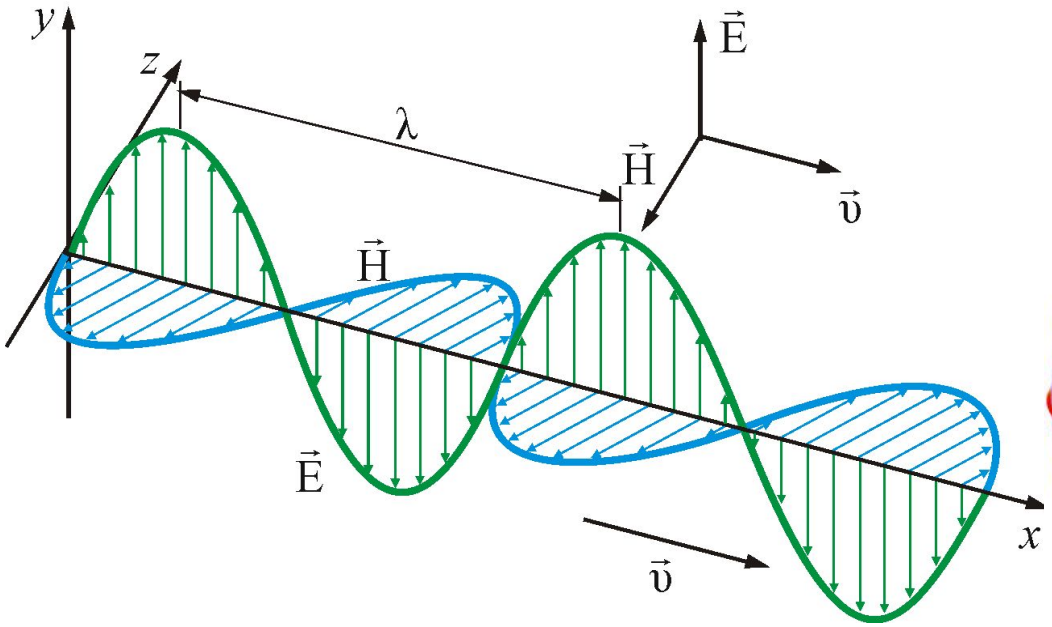
$$\nu_m = \frac{\upsilon}{\lambda_m} = \frac{\upsilon}{4\ell}\cdot(2m-1)$$

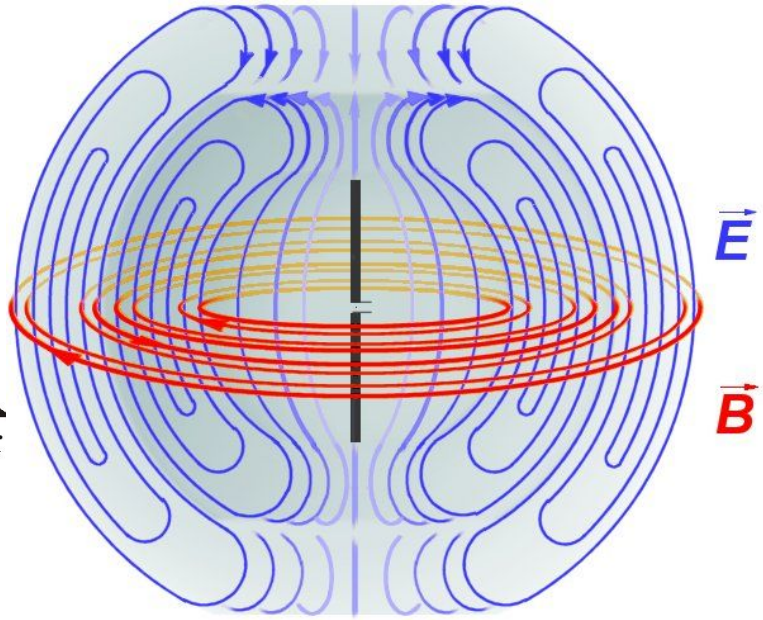
Наименьшие возможные частоты стоячих волн (при *m* = 1) называются *основными*, более высокие частоты называются *обертонами*.

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

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

ρ – плотность заряда

Источником ЭП являются заряды

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

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$$

D – элект. смещение

E – напряженность ЭП

ε – диэлектрическая проницаемость среды

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

B – магнитная индукция

H – напряженность МП

μ – магнитная проницаемость среды

Теорема Гаусса для МП

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

Источников МП НЕ существует

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

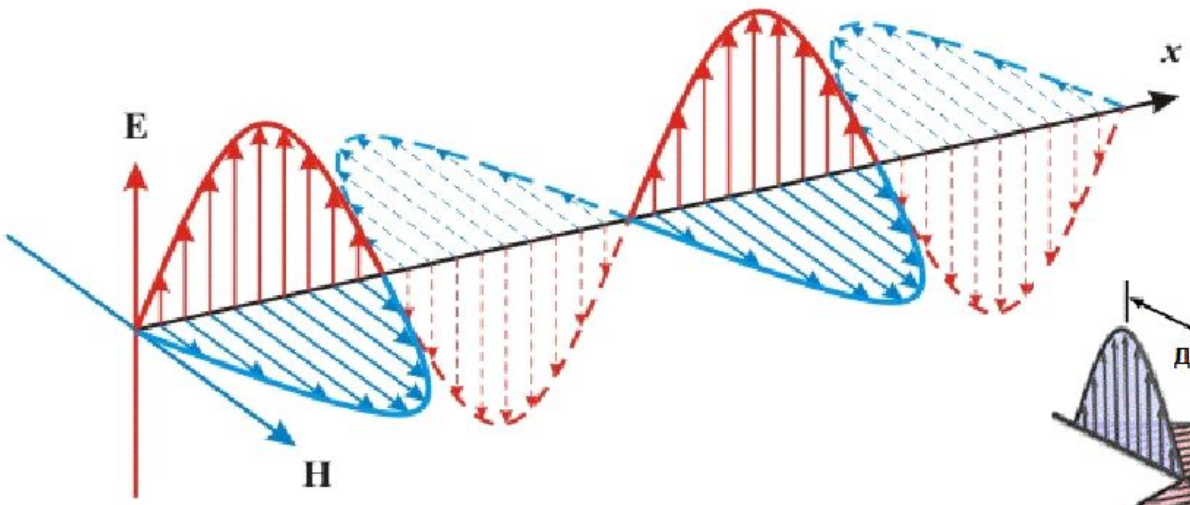
Электрический ток и изменение эл.индукции порождают вихревое МП

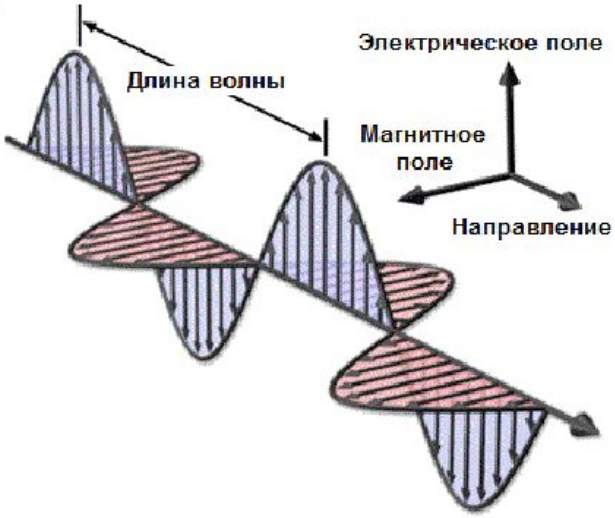
Закон Ома в диф.форме

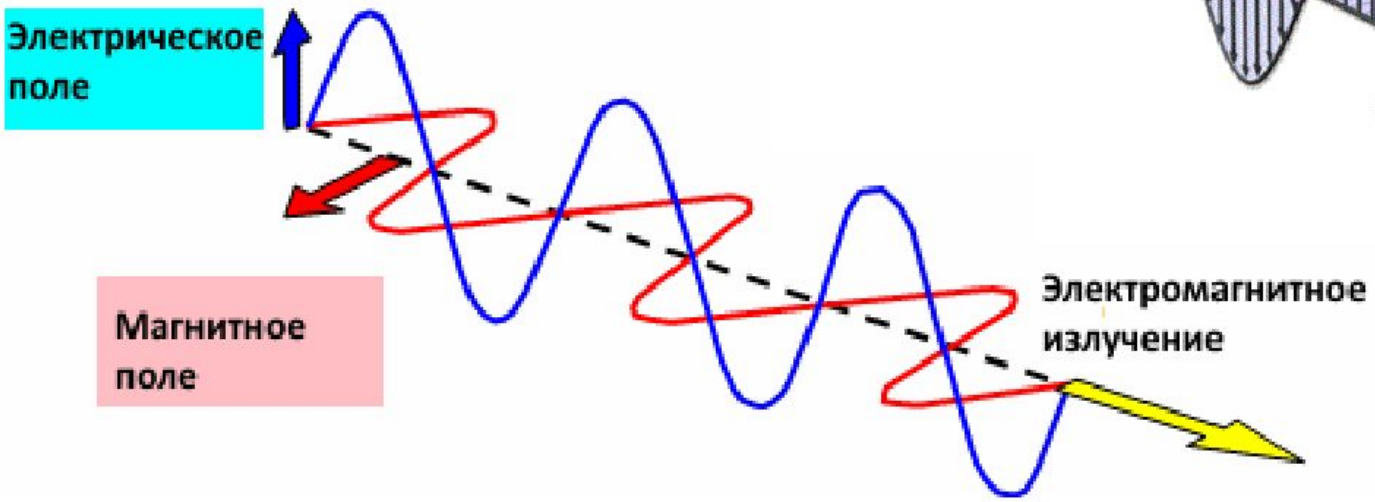
$$\vec{j} = \sigma\vec{E}$$

σ – 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**

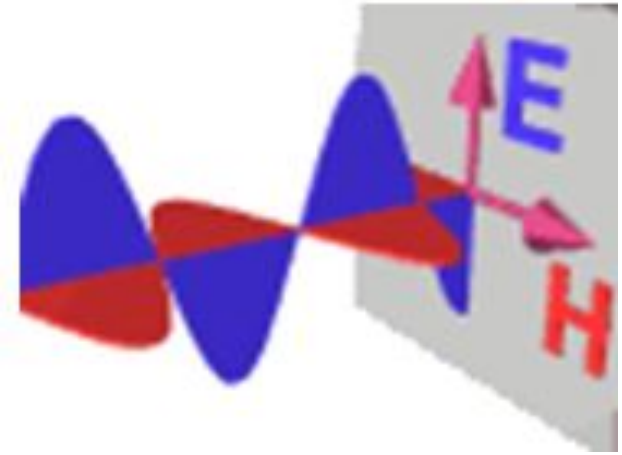
3. **ЭМ волны – ПОПЕРЕЧНЫЕ волны**

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 (⊥) и ⊥ направлению распространения** и образуют правовинтовую (➡) систему

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



Дифференциальное уравнение ЭМВ

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

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

Решения уравнений:

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

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

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

ω **– круговая частота**

φ_0 **– начальная фаза колебаний**

$k = \dfrac{\omega}{\upsilon}$ **– волновое число**

$$\upsilon_{\text{фаз}} = \frac{\omega}{k}$$

- **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

$$\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \Rightarrow n = \frac{c}{\upsilon}$$

Скорость ЭМ волн в вакууме

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \, м/с$$

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

показатель преломления среды *n*

вакуум: $\varepsilon = \mu = 1 \Rightarrow \upsilon = c$

другие среды: $\varepsilon\mu > 1 \Rightarrow \upsilon < c$

показывает,

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

***C* =299 792 456,2 ± 1,1 м/с**

Ивенсон, США (1972)

$\varepsilon_0 = 8{,}85419 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

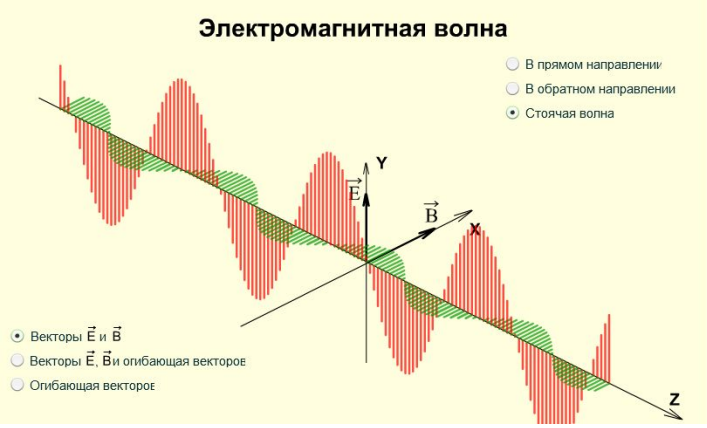
$\mu_0 = 1{,}25664 \cdot 10^{-6}$ Гн/м

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 λ**

3. Зная λ и частоту колебаний вибратора, Герц **определил скорость ЭМ волн**, которая **оказалась близкой к скорости света**

$$\lambda \nu = \upsilon = c$$

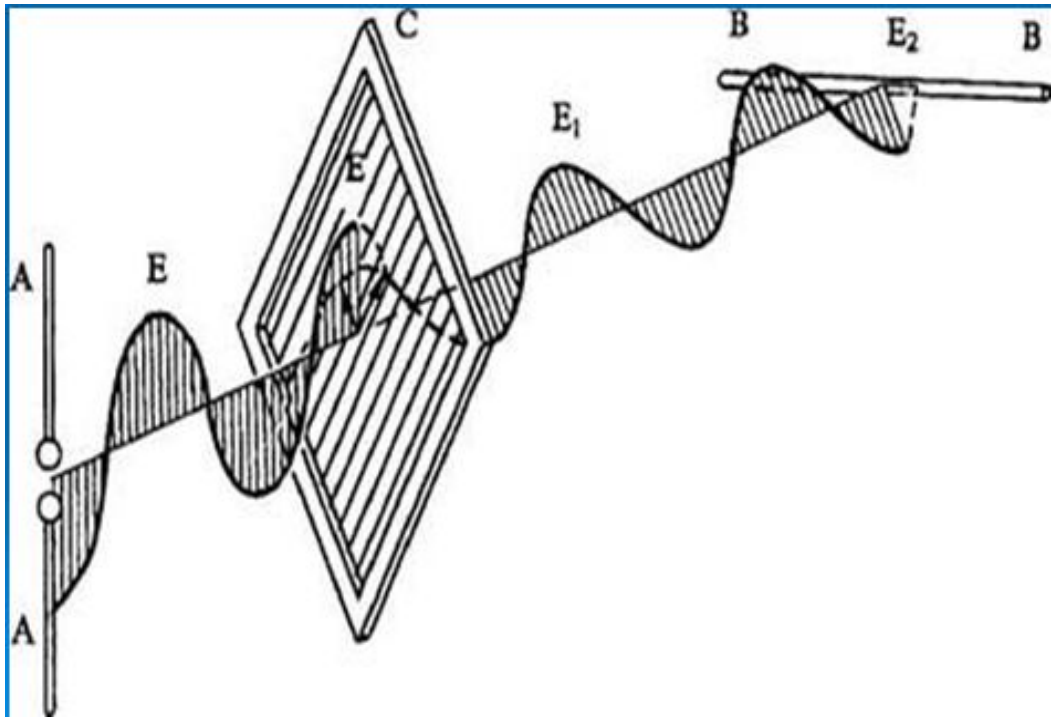
⇨ Сделал вывод, что **свет – ЭМ волна**

Экспериментальное исследование ЭМВ

- **Опыты Герца подтвердили соотношение, следующее из теории Максвелла**

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

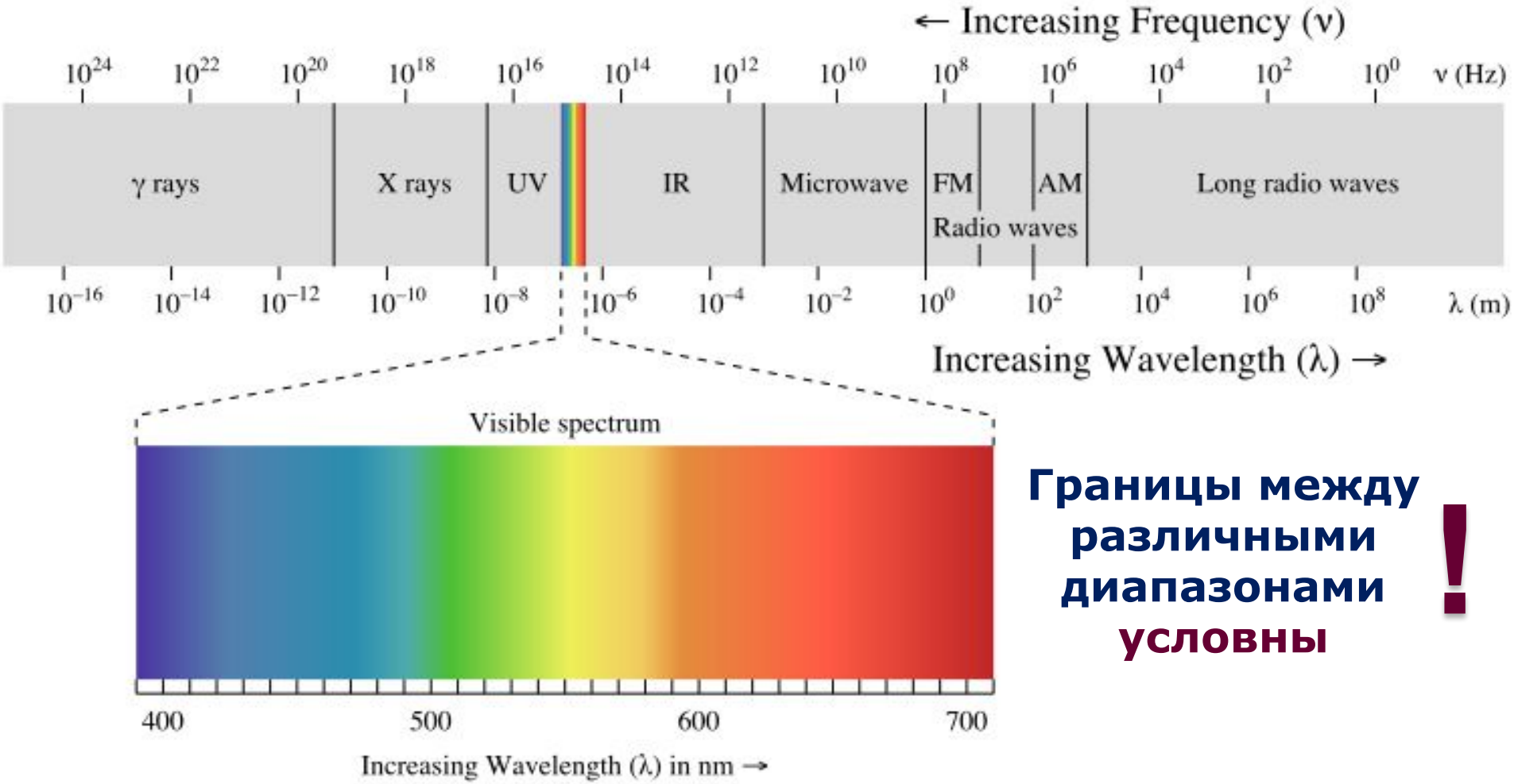
- **Герц расположил на пути волн решетку из параллельных друг другу медных проволок,**



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

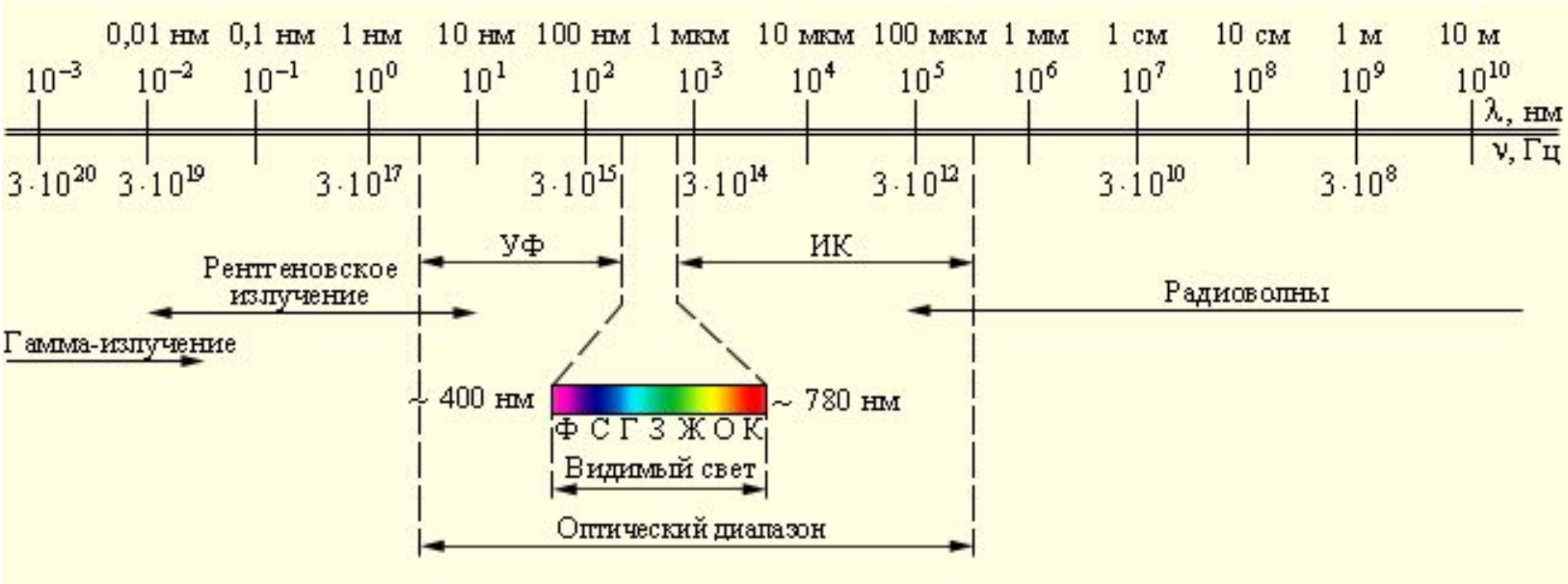
⇨ **Подтвердил поперечность ЭМ волн**

Шкала электромагнитных волн



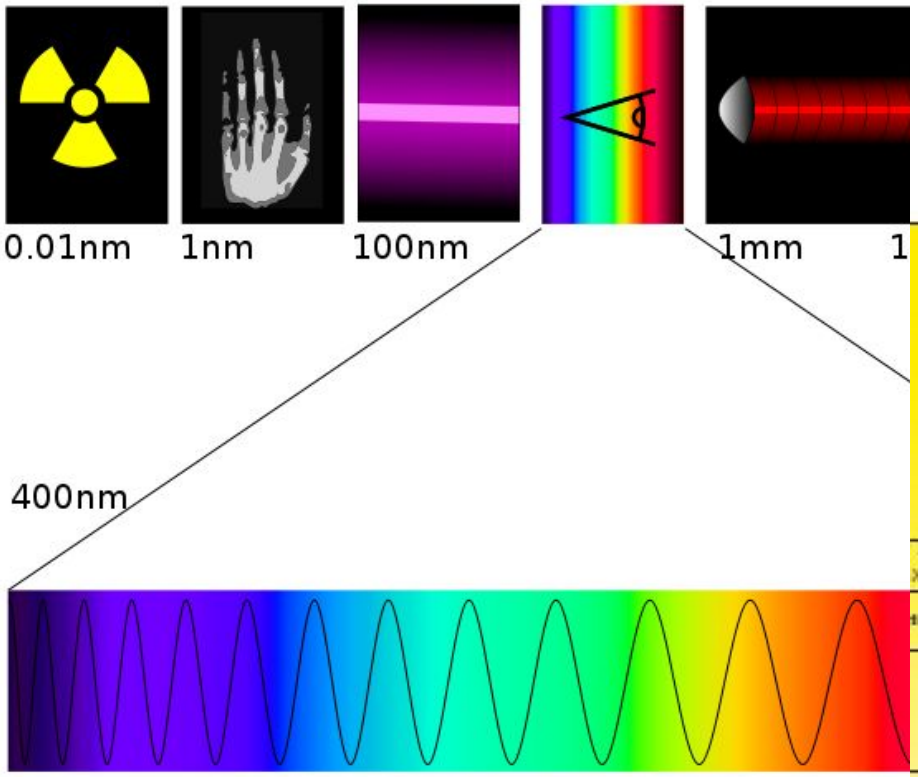
Границы между различными диапазонами условны !

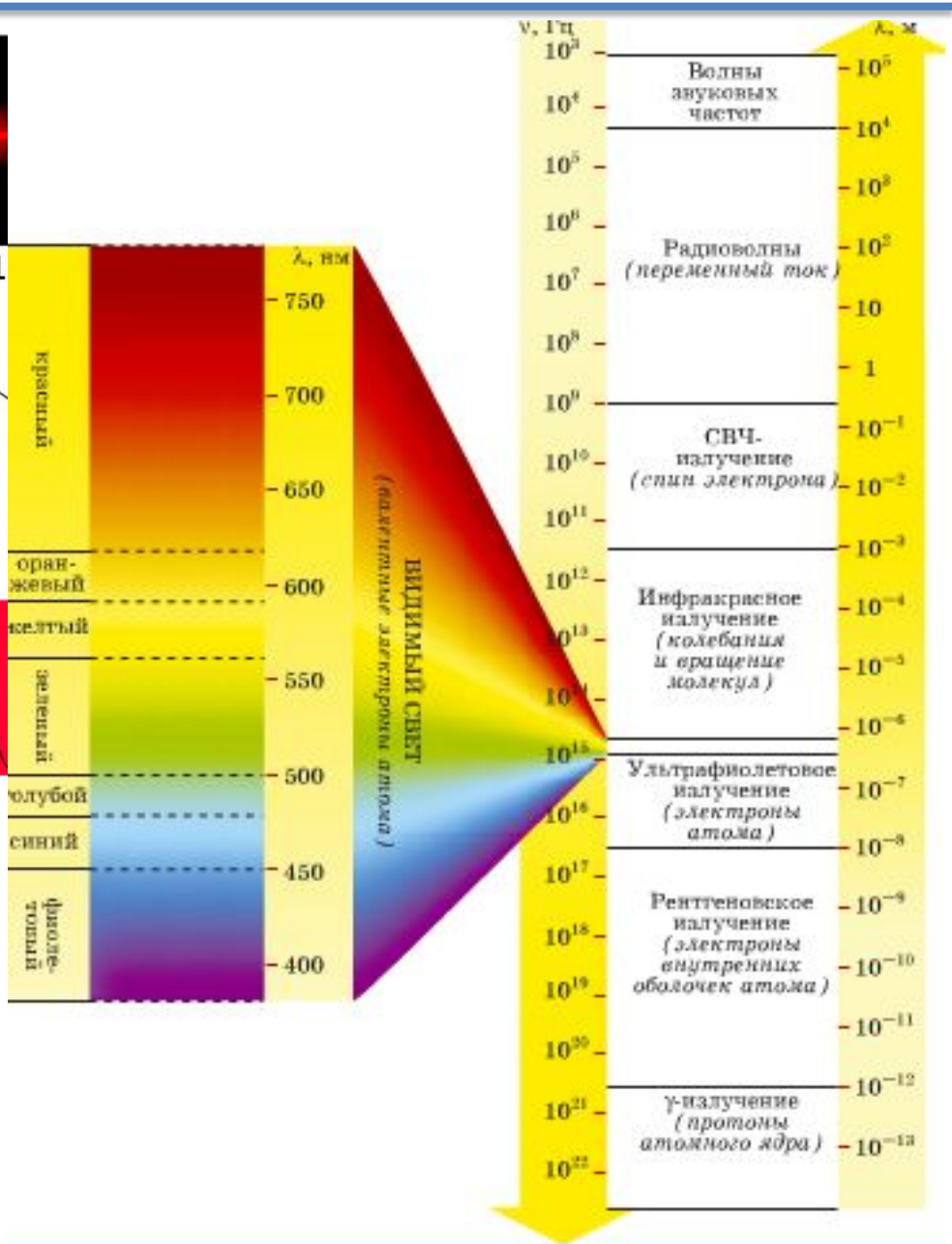
Шкала электромагнитных волн



Границы между различными диапазонами условны !

Шкала электромагнитных волн





Границы между различными диапазонами условны

!

Видимый диапазон

$\lambda_ф \approx 380$ нм

$\lambda_к \approx 760$ нм

Диапазоны ЭМ излучения

Название диапазона		Длины волн, λ	Частоты, ν	Источники
Радиоволны	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	
	Ультракоротке	10 м – 1 мм	30 МГц – 300 ГГц	Радиосвязь
Инфракрасное излучение		1 мм – 780 нм	300 ГГц – 380 ТГц	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях
Видимое излучение		**780 – 380 нм**	380 ТГц – 790 ТГц	
Ультрафиолетовое		380 – 10 нм	$7{,}9 \cdot 10^{14}$ Гц – $3 \cdot 10^{16}$ Гц	Излучение атомов под воздействием ускоренных электронов
Рентгеновские		10 нм – 5 пм	$3 \cdot 10^{16}$ – $6 \cdot 10^{19}$ Гц	Атомные процессы при воздействии ускоренных заряженных частиц
				Ядерные и космические

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

Виды излучений	Длина волны	Получение	Регистра-ция	Характери-стика, свойства	Применение
Радио-волны	10 км ($3x10^4$ – $3x10^{12}$ Гц)	Транзистор-ные цепи	Резонатор Герца, Когерер, антенна	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Связь и навигация
Инфра-красное излучение	0,1м – 770нм ($3x10^{12}$ – $4x10^{14}$ Гц)	Электричес-кий камин	Болометр, Фотоэлемент термостолбик	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Приготовл. пищи Нагревание, сушка, фото-копирование
Видимый свет	770 – 380 нм ($4x10^{14}$ – $8x10^{14}$ Гц)	Лампа накаливания Молнии, Пламя	Спектрограф, Болометр	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Наблюдение за видимым миром
Ультра-фиолето-вое излучение	380 – 5 нм ($8x10^{14}$ – $6x10^{16}$ Гц)	Разрядная трубка, углеродная дуга	Фотоэлемент Люминесцен-ция, болометр	Фотохимиче-ские реакции	Медицина
Рентге-новское излучение	5 – 10^{-2} нм ($6x10^{16}$ – $3x10^{19}$ Гц)	Рентгеновс-кая трубка	Фото-пластинка	Проникаю-щая способность Дифракция	Рентгенография, радиология, обнаружение подделок
γ - излучение	$5x10^{-11}$ - 10^{-15} м	Циклотрон Кобальт - 60	Трубка Гейгера	Порождаются космически ми объектами	Стерилизация, Медицина (лечение рака)

Диапазоны
электромагнитных волн

Диапазон	Длина волны λ, нм	Энергия фотона $E_ф$, эВ
γ - излучение	<0,0012	$>10^6$
Рентгеновское излучение	0,0012…12	100… 10^6
Ультрафиолетовое излучение	12…380	3,2…100
Видимое излучение	380…780	1,6…3,2
Инфракрасное излучение	780…10^6	$1,2\cdot10^{-3}$…1,6
Радиоволны	$>10^6$	$<1,2\cdot10^{-3}$

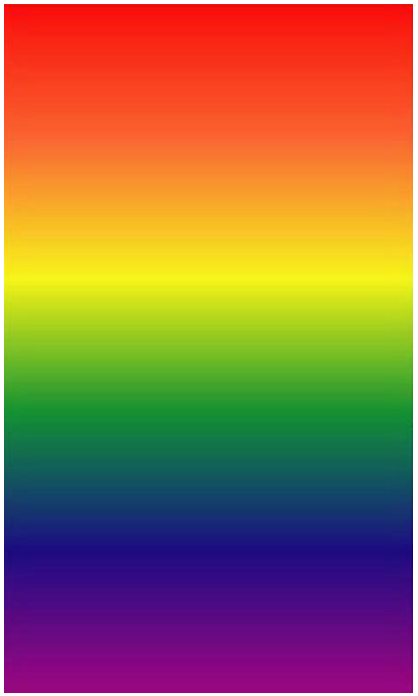
Все виды излучений имеют, по существу, одну и ту же физическую природу

Луи де Бройль

Спектр видимого излучения

Спектр — **распределение интенсивности ЭМ волн по длинам или частотам**

Монохроматическая волна — **волна, имеющая постоянную амплитуду и постоянную частоту**

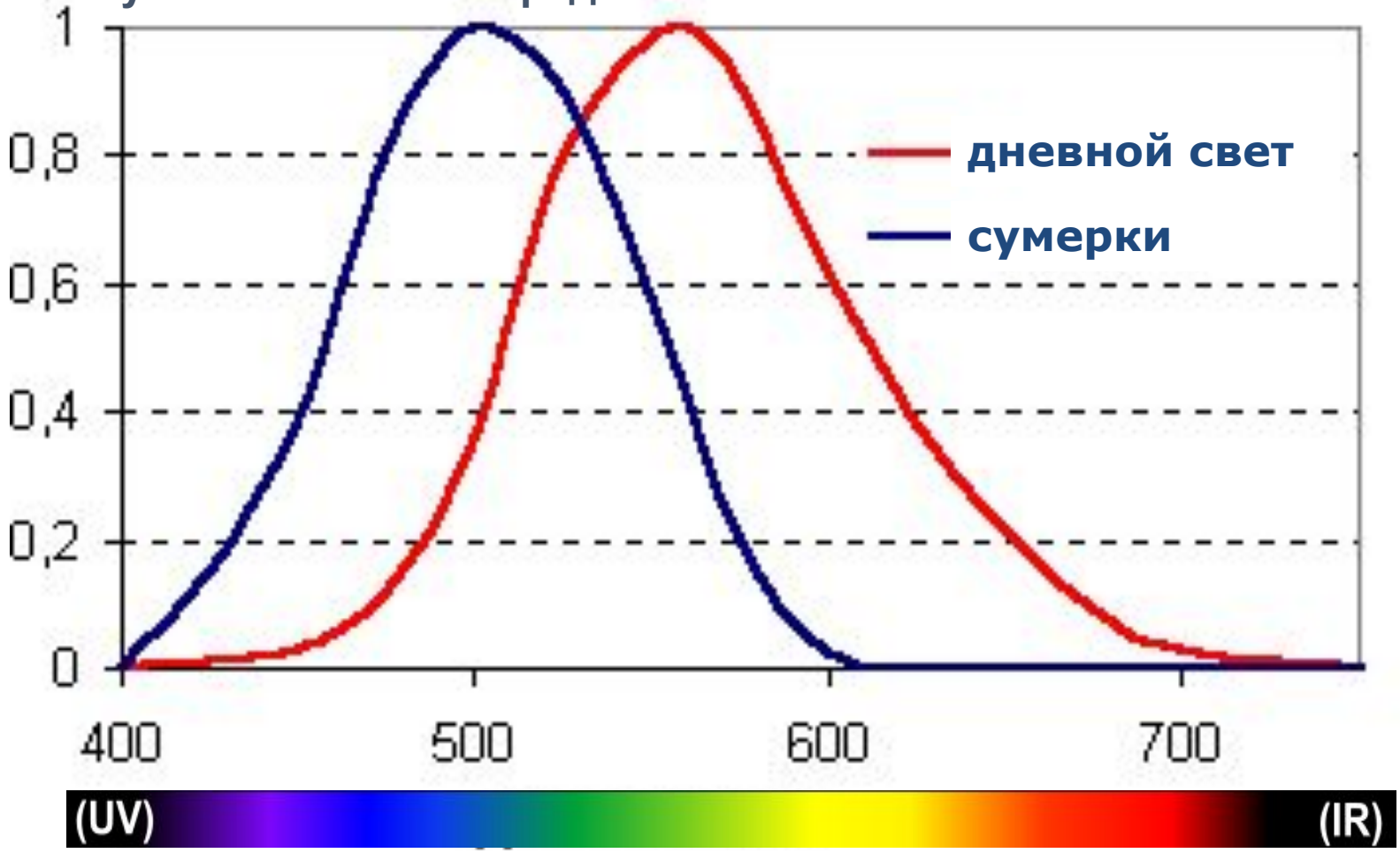


Каждый
Охотник
Желает
Знать
Где
Сидит
Фазан

Цвет	Длина волны λ, нм
Красный	620…760
Оранжевый	590…620
Желтый	550…590
Зеленый	500…550
Голубой	480…500
Синий	450…480
Фиолетовый	380…450

Кривая видности

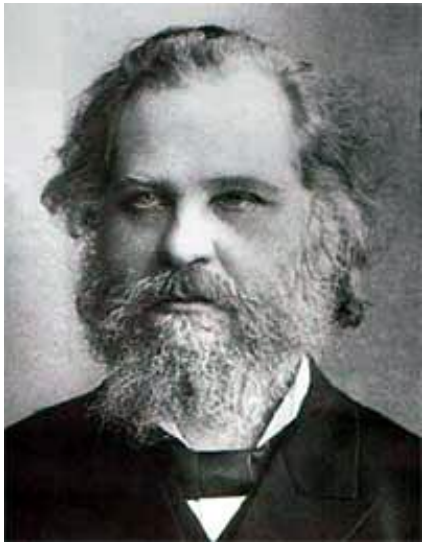
Спектральная зависимость относительной чувствительности среднего человеческого глаза



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

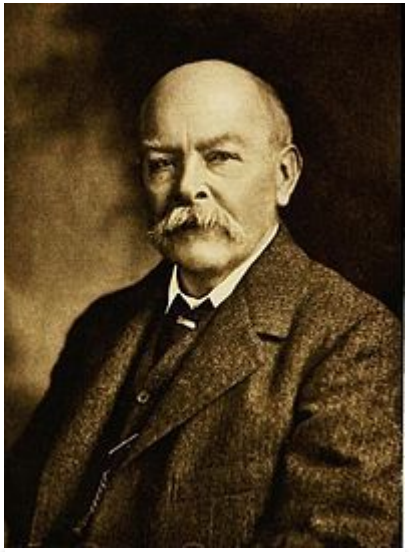
Энергия и импульс ЭМ волны

- **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**



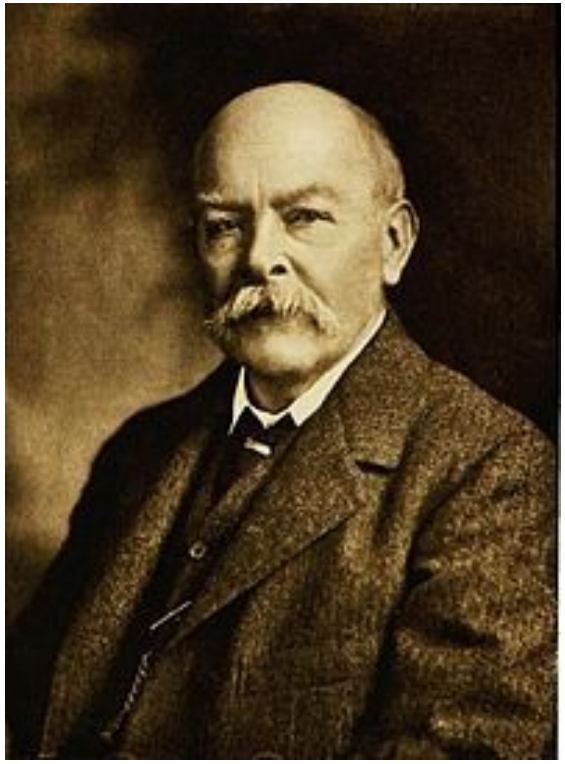
Джон Генри Пойнтинг

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:

$$w = w_э + w_м = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

Поток энергии за 1 с через единичную площадку (S=1м2), ⊥ направлению распространения волны:

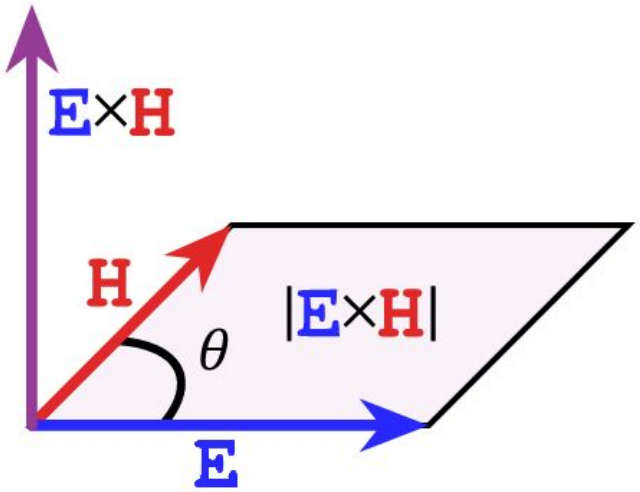
$$S = w\upsilon = EH$$

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

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

Вектор Умова-Пойнтинга $\vec{S}$

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



ЭМ масса и импульс

ЭМ полю присущи ЭМ импульс и масса

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

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

$$\boxed{E = mc^2}$$

Эффект Доплера

Акустический эффект Доплера ➡
Оптический эффект:

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

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

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

Источник и приемник **удаляются**

$$(\theta = \pi)$$

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

Источник и приемник **взаимно сближаются**

$$(\theta = 0)$$

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

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**

$$\boldsymbol{\upsilon \cos \theta}$$

при

$$\upsilon << c$$

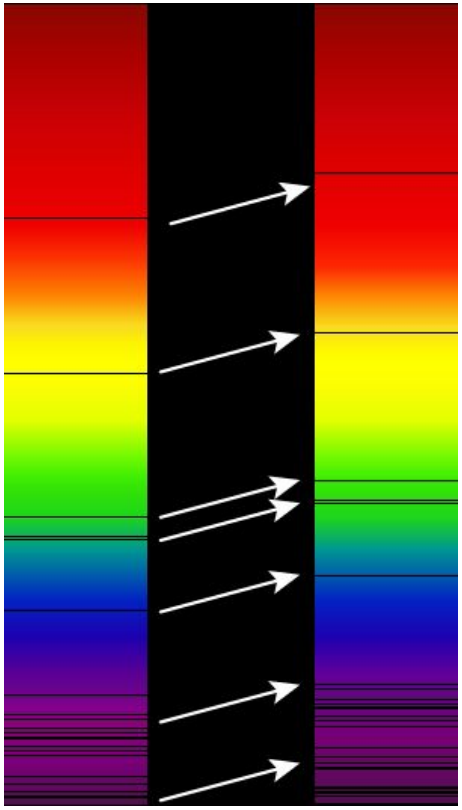
$$\boldsymbol{\upsilon \cos \theta \approx \left(1 - \frac{\nu}{\nu_0}\right) c}$$

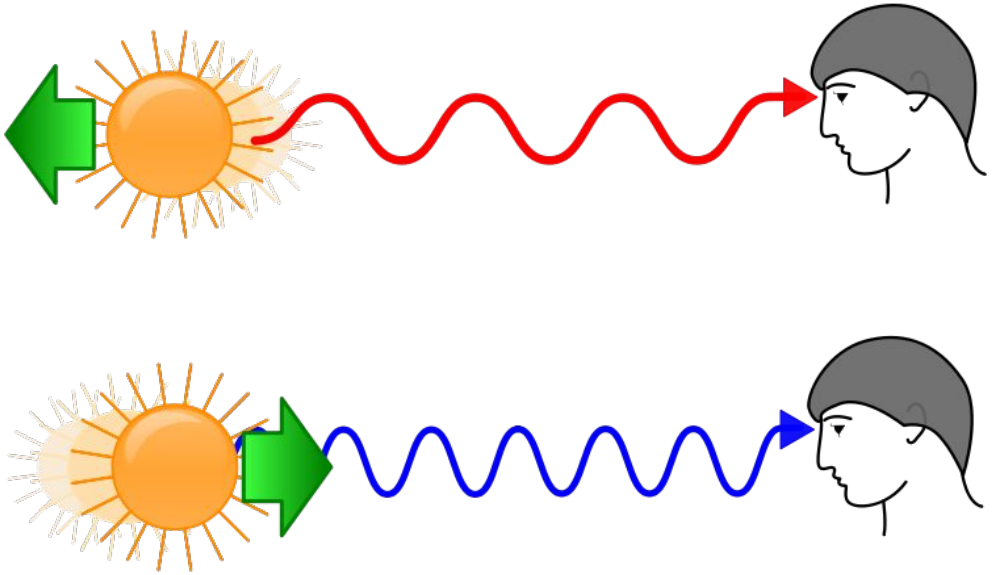
«Красное смещение»

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)

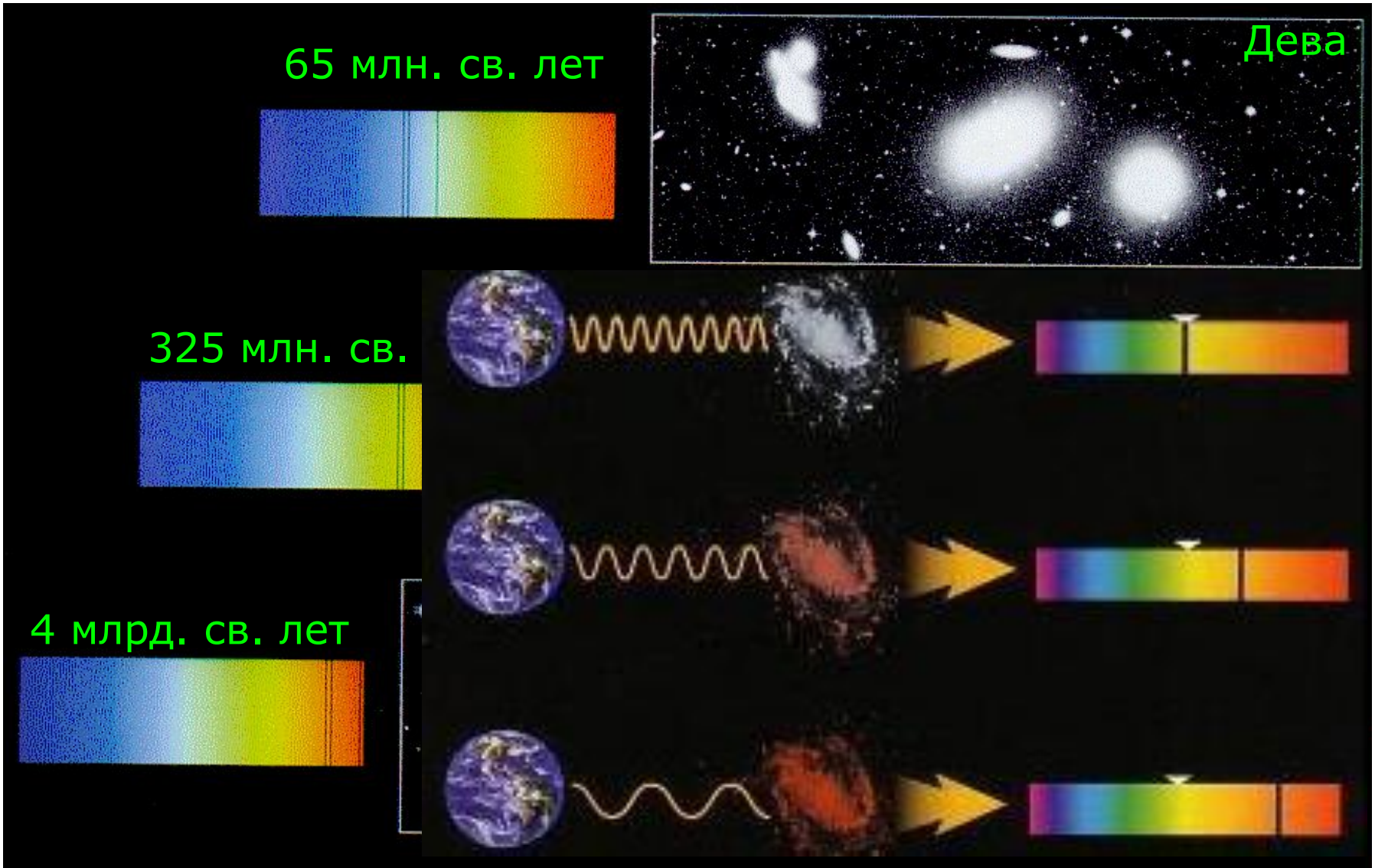




теория расширяющейся Вселенной

Расширяющаяся Вселенная

Красное космологическое смещение линий спектра водорода



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:

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

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

– постоянная Хаббла

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

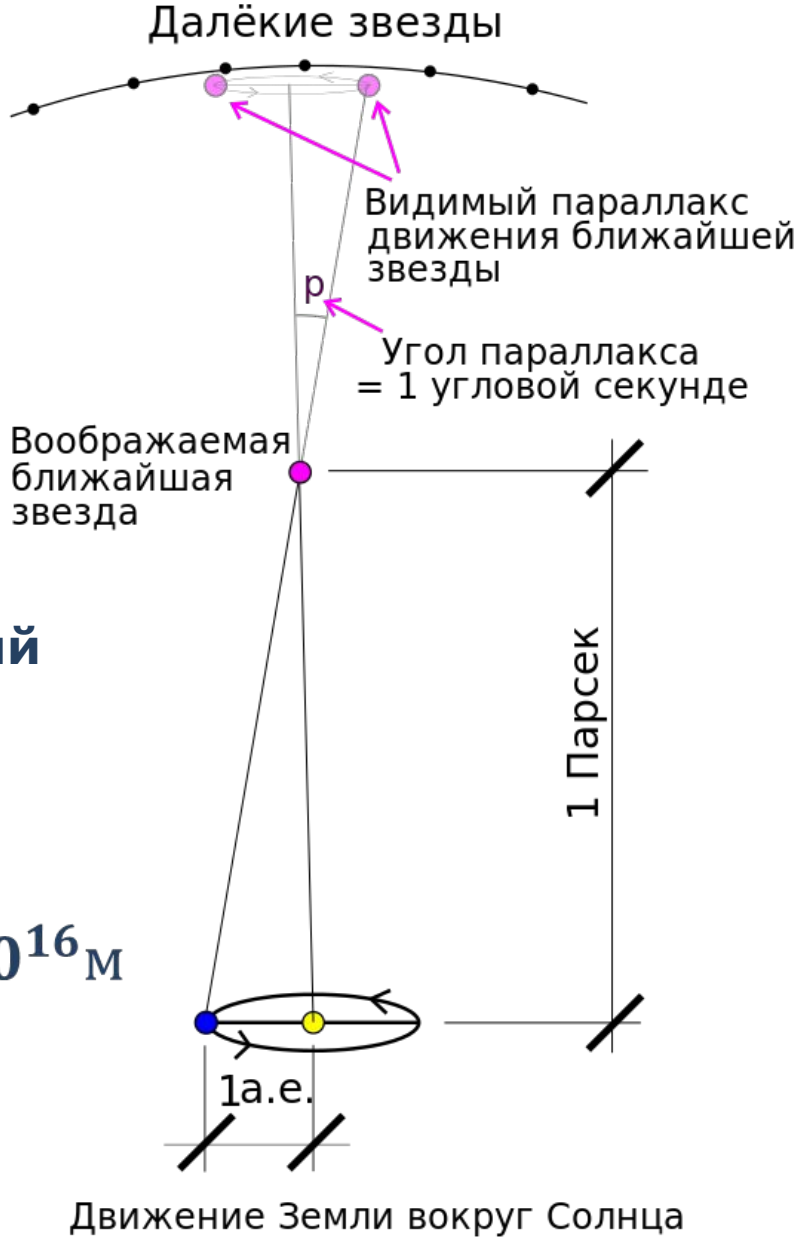
$$1\text{пк} \approx 3,09 \cdot 10^{16}\text{м}$$

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