Волны

•**Волновой процесс (**волна) – процесс распространения колебаний в среде (волны на поверхности жидкости, упругие волны, электромагнитные волны).

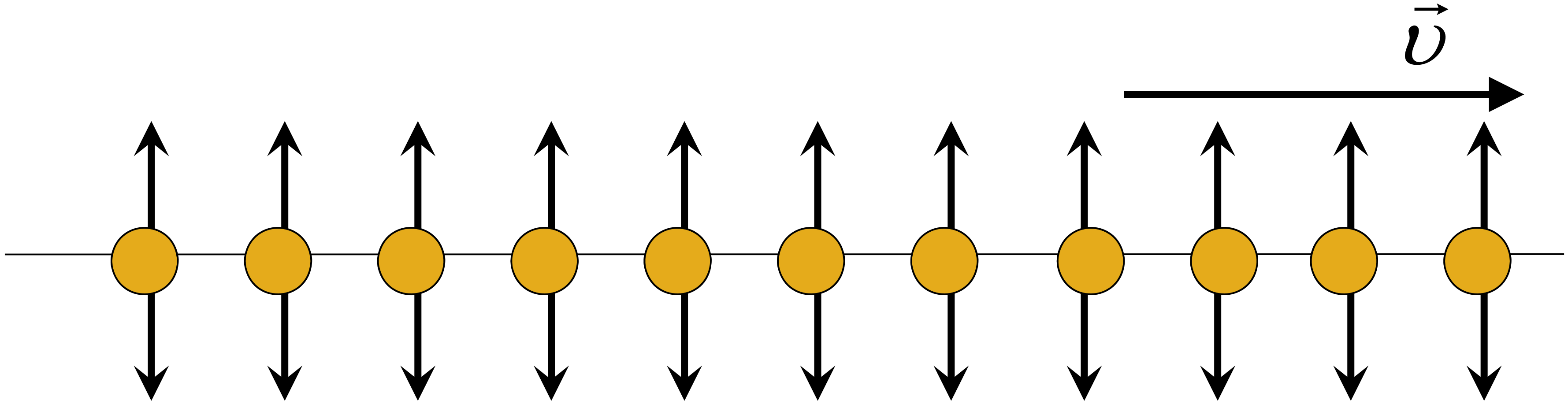
•При распространении волны не происходит распространение частиц, а происходит распространение состояния среды. (Волна не переносит вещество, но переносит энергию).

•Распространение волны происходит с конечной скоростью.

Упругие (механические) волны–механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде.

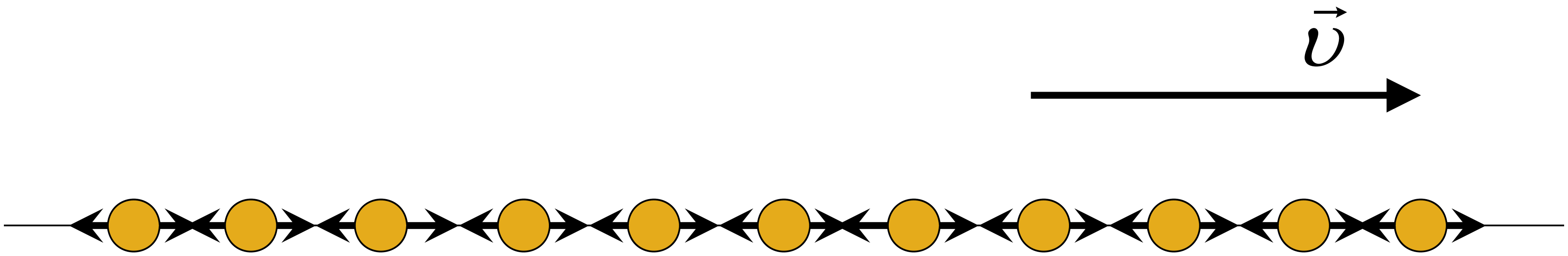
Упругие волны бывают <u>продольные</u> и <u>поперечные</u>.

Волны



Поперечная волна – это волна, в которой колебания происходят перпендикулярно направлению распространения волны. Поперечные волны могут распространяться в твердых телах и на границе двух сред.

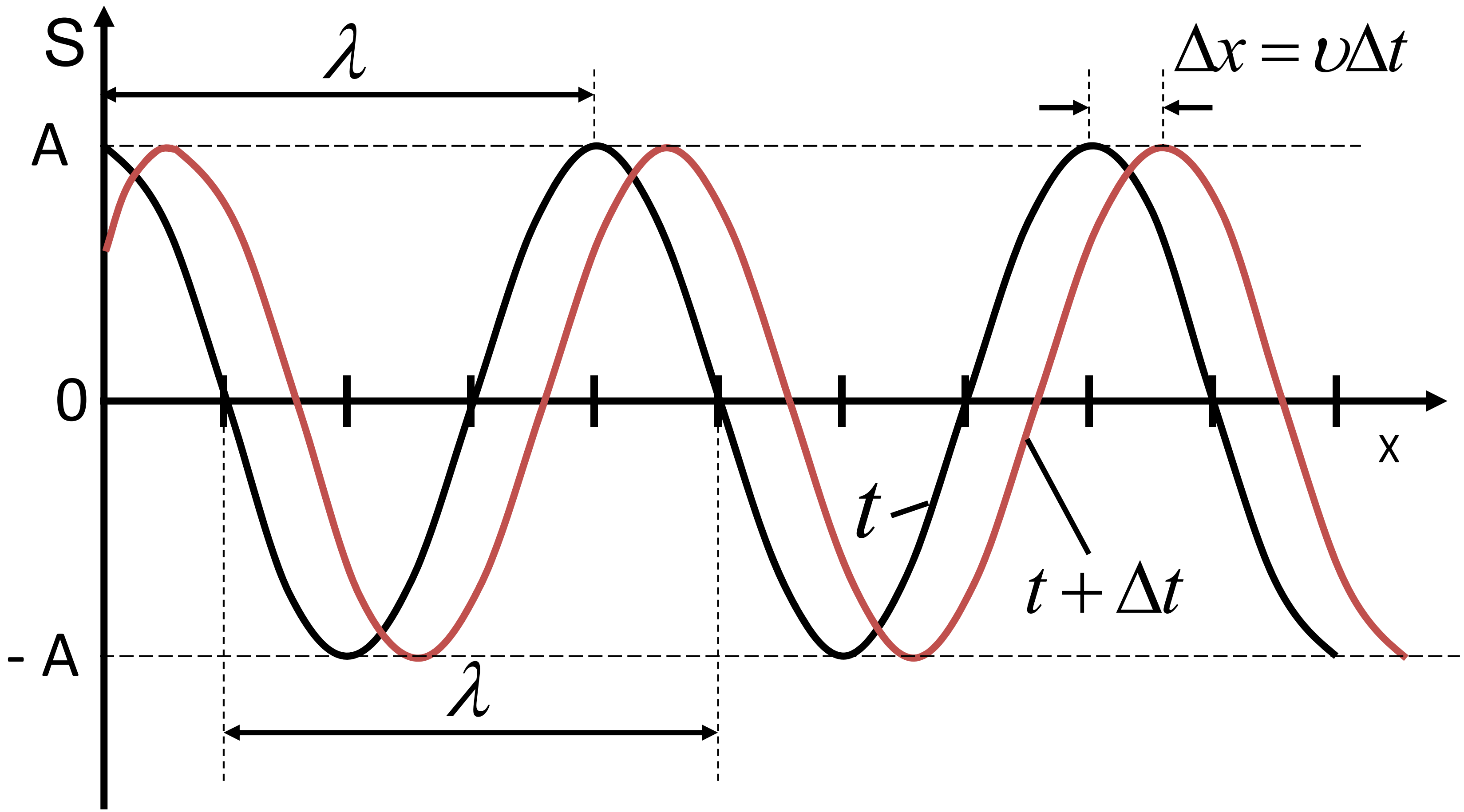
Волны



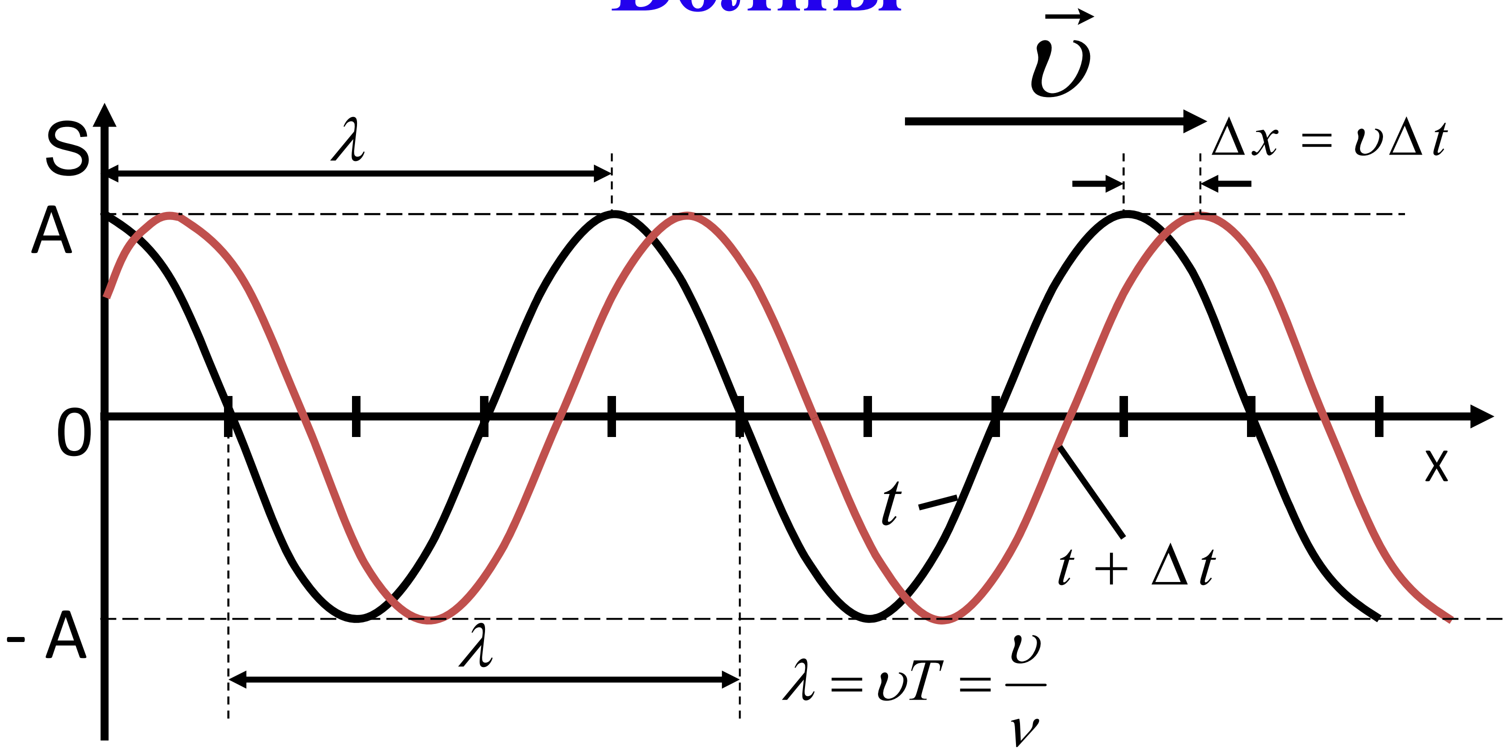
Продольная волна – это волна, в которой колебания происходят вдоль направления распространения волны.
Продольные волны могут распространяться в газах, жидкостях и твердых телах.

Волны

Упругая волна называется ***гармонической,*** если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими.



Волны



- Амплитуда (A) – максимальное отклонение частиц от положения равновесия.
- Длина волны (λ) – расстояние между двумя ближайшими точками, совершающими колебания в одной фазе.
- Период волны (T) – равен периоду колебаний источника волны. (За время равное периоду волна проходит расстояние, равное своей длине).
- Частота волны (ν) – величина обратная периоду. $\nu = \frac{1}{T}$
- Фаза – величина, характеризующая состояние среды в данной точке.

Волны

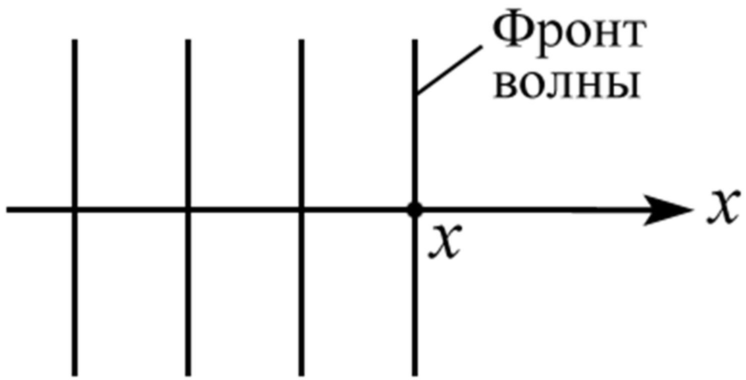
Волновой фронт – геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t.

Волновая поверхность – геометрическое место точек, в которых фаза колебаний имеет одно и то же значение (в простейшем случае плоская или сферическая).

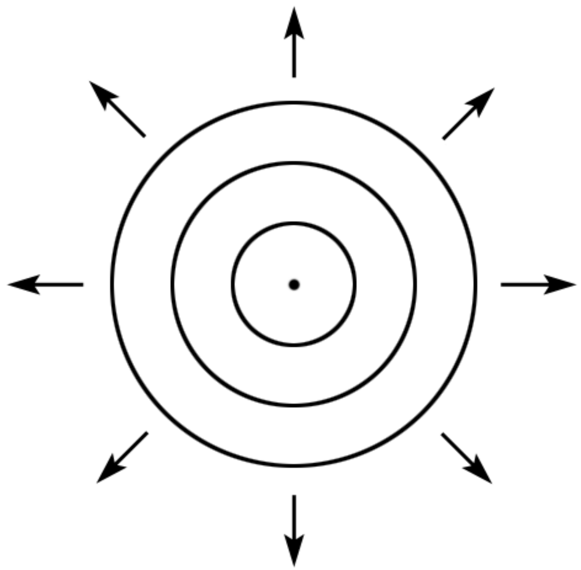
Волна называется **плоской,** если её волновые поверхности представляют совокупность плоскостей, параллельных друг другу.

В зависимости от формы волновой поверхности различают

• ***плоские волны***: волновые поверхности – параллельные плоскости:



• ***сферические волны***: волновые поверхности – концентрические сферы.



Бегущая волна

Бегущими волнами называются волны, которые переносят в пространстве энергию.

Перенос энергии в волнах количественно характеризуется вектором плотности потока энергии.

Этот вектор для упругих волн называется вектором Умова.

Уравнение бегущей волны – зависимость от координаты и времени скалярных или векторных величин, характеризующих колебания среды при прохождении в ней волны.

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

где υ — скорость распространения волны.

Бегущая волна

Введем ***волновое число*** $\boxed{k = \dfrac{2\pi}{\lambda}}$

$\lambda = \upsilon T$, тогда $k = \dfrac{2\pi}{\upsilon T} = \dfrac{2\pi\nu}{\upsilon} = \dfrac{\omega}{\upsilon}$

Отсюда $\boxed{\upsilon = \dfrac{\omega}{k}}$

Уравнение плоской волны

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

Бегущая волна

В общем случае уравнение плоской волны, распространяющейся вдоль положительного направления оси x в среде, не поглощающей энергию, имеет вид :

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

где A = const -- амплитуда волны,

ω -- циклическая частота,

φ_0–начальная фаза колебаний при t=0, x=0.

При поглощении средой энергии волны:

$$\boxed{\xi = Ae^{-\beta t}\cos(\omega t - kx + \phi_0)}$$

-***наблюдается затухание***;

β – коэффициент затухания;

A – амплитуда.

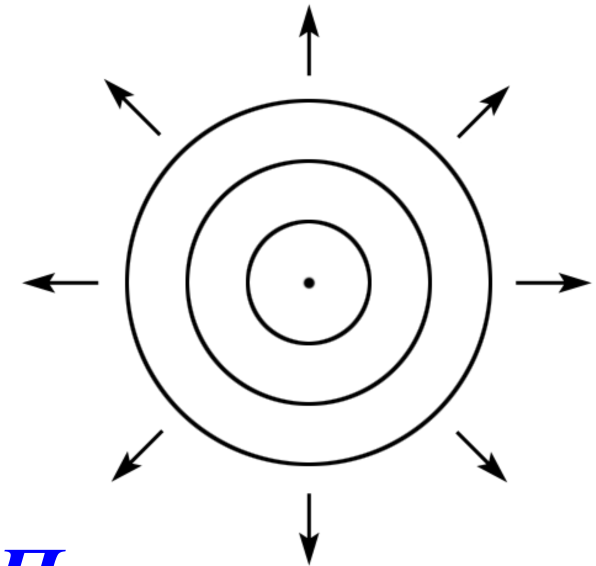
Сферическая волна

Пусть $\phi_0 = 0$

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

Уравнение сферической волны:

$$\boxed{\xi = \frac{A}{r}\cos\omega\left(t - \frac{r}{\upsilon}\right)}$$



или

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

При поглощении средой энергии волны:

$$\xi = \frac{\grave{A}}{r}e^{-\beta t}\cos(\omega t - kr + \phi_0)$$

β – коэффициент затухания.

Волновое уравнение

Распространение волн в однородной среде в общем случае ***описывается волновым уравнением*** – дифференциальным уравнением в частных производных:

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

или

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

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

оператор Лапласа

Всякая функция, *удовлетворяющая этому уравнению, описывает* ***некоторую волну****, где* υ *-фазовая скорость волны*

Волновое уравнение

Решением волнового уравнения $$\nabla^2\xi = \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}$$

является уравнение любой волны, например

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

или ***плоской*** : $$\xi = A\cos(\omega t - kr)$$

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

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

Фазовая скорость

– это скорость распространения фазы волны.

$$\boxed{\frac{\mathrm{d}\xi}{\mathrm{d}t} = \upsilon}$$

– скорость распространения фазы есть скорость распространения волны.

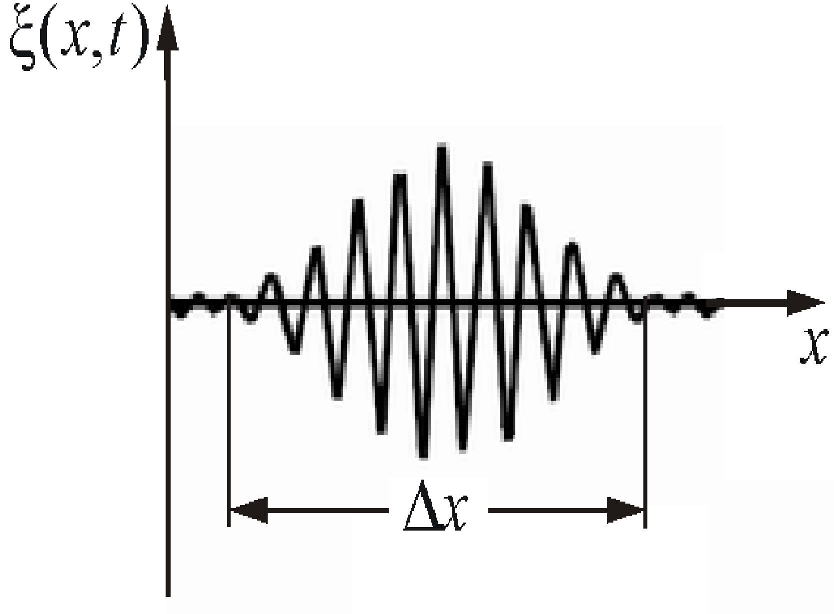
Для синусоидальной волны ***скорость переноса энергии равна фазовой скорости.***

Фазовая скорость

***Принцип суперпозиции* (наложения волн): при распространении в среде нескольких волн каждая из них распространяется так, как будто другие волны отсутствуют, а результирующее смещение частицы среды равно геометрической сумме смещений частиц.**

Волновой пакет

Суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте, называется волновым пакетом или группой волн:



Выражение для группы волн:

$$\xi(x,t) = \int\limits_{\omega-\frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega+\frac{\Delta\omega}{2}} A_{0\omega}\cos(\omega t - k_\omega x + \phi_\omega)\mathrm{d}\omega$$

Волновой пакет

Зависимость фазовой скорости в среде от частоты называется дисперсией

Скорость, с которой перемещается центр пакета (*точка с максимальным значением A*), ***называется групповой скоростью u.***

В ***недиспергирующей среде*** все плоские волны, образующие пакет, распространяются с ***одинаковой фазовой скоростью υ***.

Скорость перемещения пакета ***u*** совпадает со скоростью ***υ***: $u = \upsilon$

В диспергирующей среде $u \neq \upsilon$

Волновой пакет

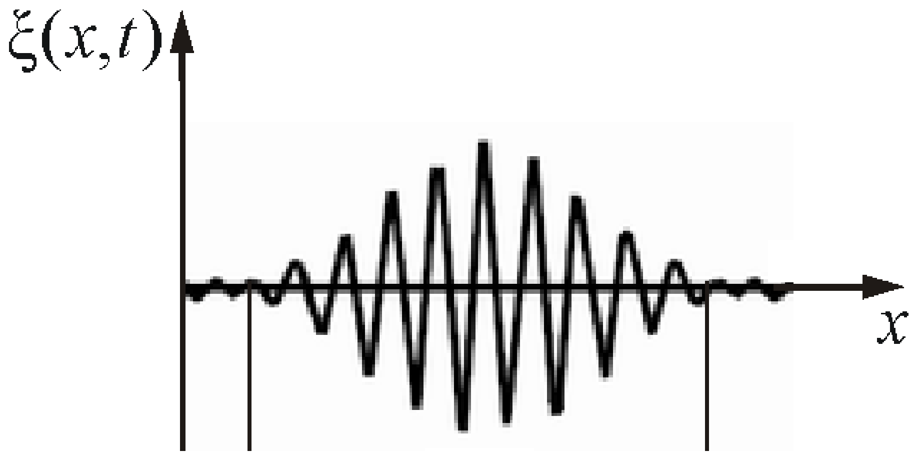
Если *дисперсия невелика то скорость перемещения пакета совпадает со скоростью υ*

В результате суперпозиции двух волн с близкими частотами ***суммарная волна (волновой пакет)*** имеет вид:

$$\xi = \left[2A_0 \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}x\right)\right]\cos(\omega t - kx)$$

Эта волна отличается от гармонической тем, что её амплитуда – есть медленно изменяющаяся функция x и t **:**

$$A = \left|2A_0 \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}x\right)\right|$$

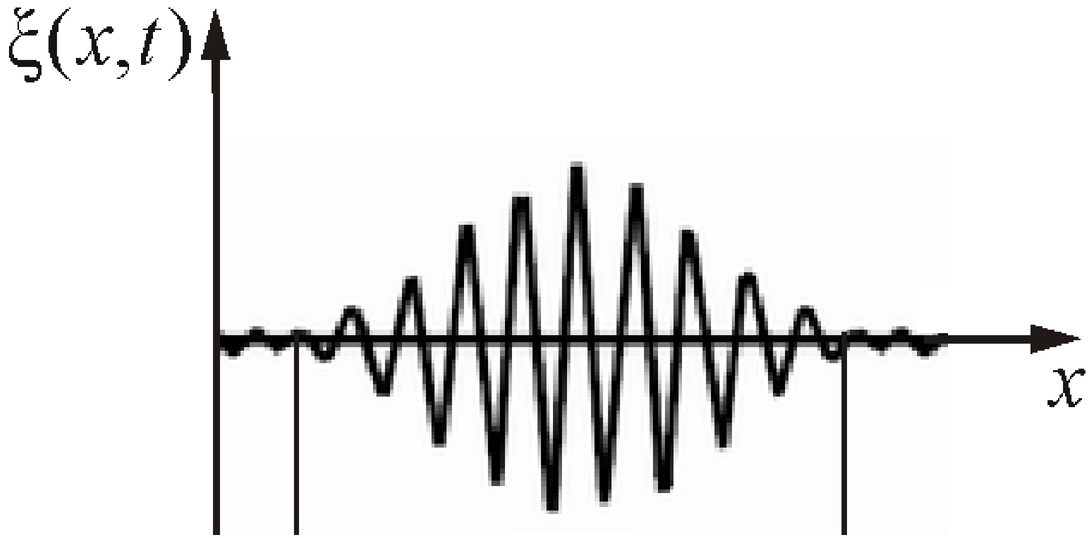


Максимум амплитуды *:*

$$\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}x_{\max} = \pm m\pi$$

$$x_{\max} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}t + \text{const}$$

- координаты максимума



За скорость распространения волнового пакета u принимают скорость максимума амплитуды, т.е. центра пакета:

$$\upsilon = \frac{\omega}{k}$$ *– фазовая скорость*

$$u = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}k}$$ *– групповая скорость*

Связь между групповой и фазовой скоростью:

$$u = \upsilon - \lambda \frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}\lambda}$$

u ***может быть как меньше, так и больше*** υ

В недиспергирующей среде:

$$\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}\lambda} = 0$$ ***поэтому*** $u = \upsilon$

В диспергирующей среде:

$$u \neq \upsilon$$

Групповая скорость может быть $u > c$ Фазовая скорость $\upsilon < c$

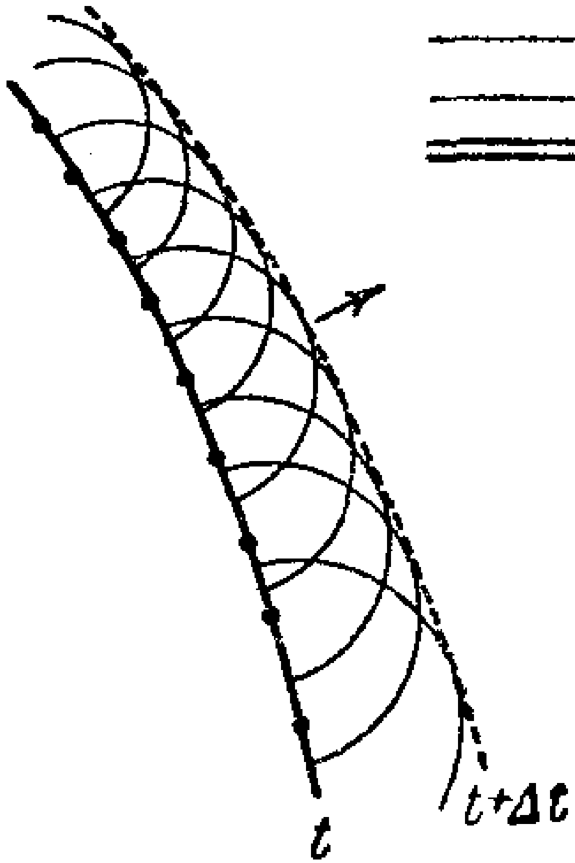
Интерференция и дифракция волн

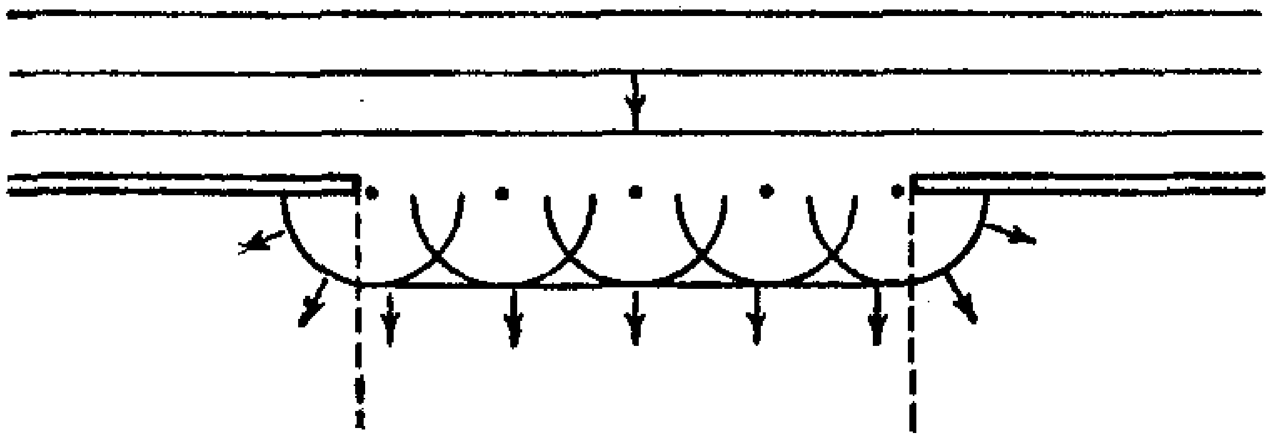
Две волны называются ***когерентными****, если разность их фаз не зависит от t.*

Интерференция волн *– явление наложения волн, при котором происходит устойчивое во времени их взаимное* *усилие* в одних точках *пространства и* *ослабление в других* *в зависимости от соотношения между фазами этих волн.*

Интерференция и дифракция волн

Волны, встретив на своем пути препятствие, огибают его. Это явление называется **дифракция.**





Стоячие волны

Частным случаем интерференции волн являются ***стоячие волны*** – волны, образующиеся в результате наложения 2-х бегущих гармонических волн, которые распространяются навстречу друг другу и имеют одинаковые a и ω.

$$\left.\begin{aligned} \xi_1 &= a\cos(\omega t - kx) \\ \xi_2 &= a\cos(\omega t + kx) \end{aligned}\right\}$$

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2a\cos kx \cos\omega t$$

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

$$\boxed{\xi = 2a\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\cos\omega t}$$

уравнение стоячей волны

$$a_{cm} = \left|2a\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\right|$$

амплитуда стоячей волны

Стоячие волны

$$a_{cm} = \left| 2a\cos\frac{2\pi x}{\lambda} \right|$$

Точки среды, где

$$2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm n\pi \qquad (n = 0, 1, 2, \ldots)$$

называются ***пучностями***.

$$\boxed{a_{cm} = 2a}$$

амплитуда максимальная

Точки среды, где

$$2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm\left(n + \frac{1}{2}\right)\pi \qquad (n = 0, 1, 2, \ldots)$$

называются ***узлами***.

$$\boxed{a_{cm} = 0}$$

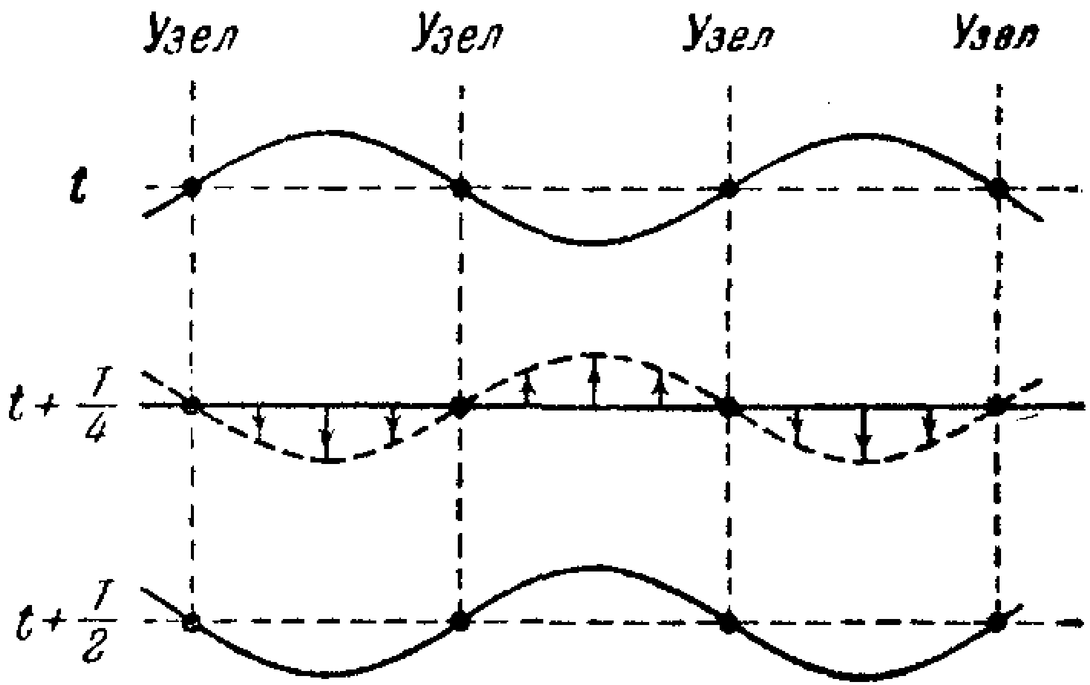
амплитуда минимальная

Стоячие волны

Координаты пучностей $x_{пучн} = \pm n\dfrac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, ...)$

Координаты узлов $x_{узл} = \pm\left(n + \dfrac{1}{2}\right)\dfrac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, ...)$

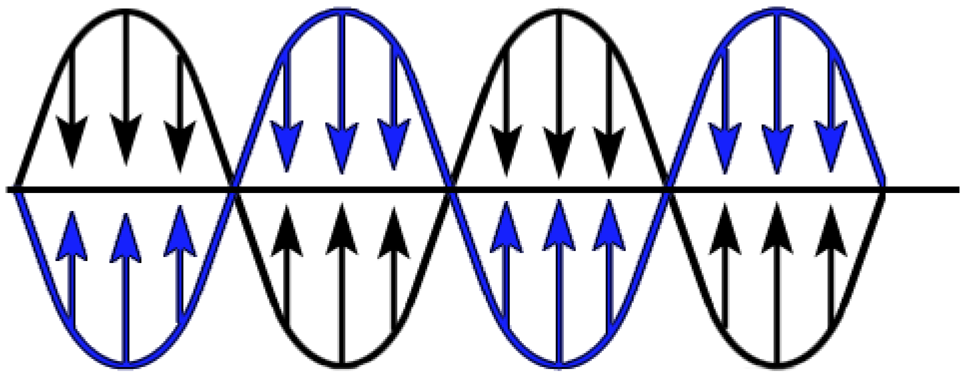
Расстояние между двумя соседними пучностями и двумя соседними узлами одинаковое и равно $\lambda/2$.



Стоячие волны

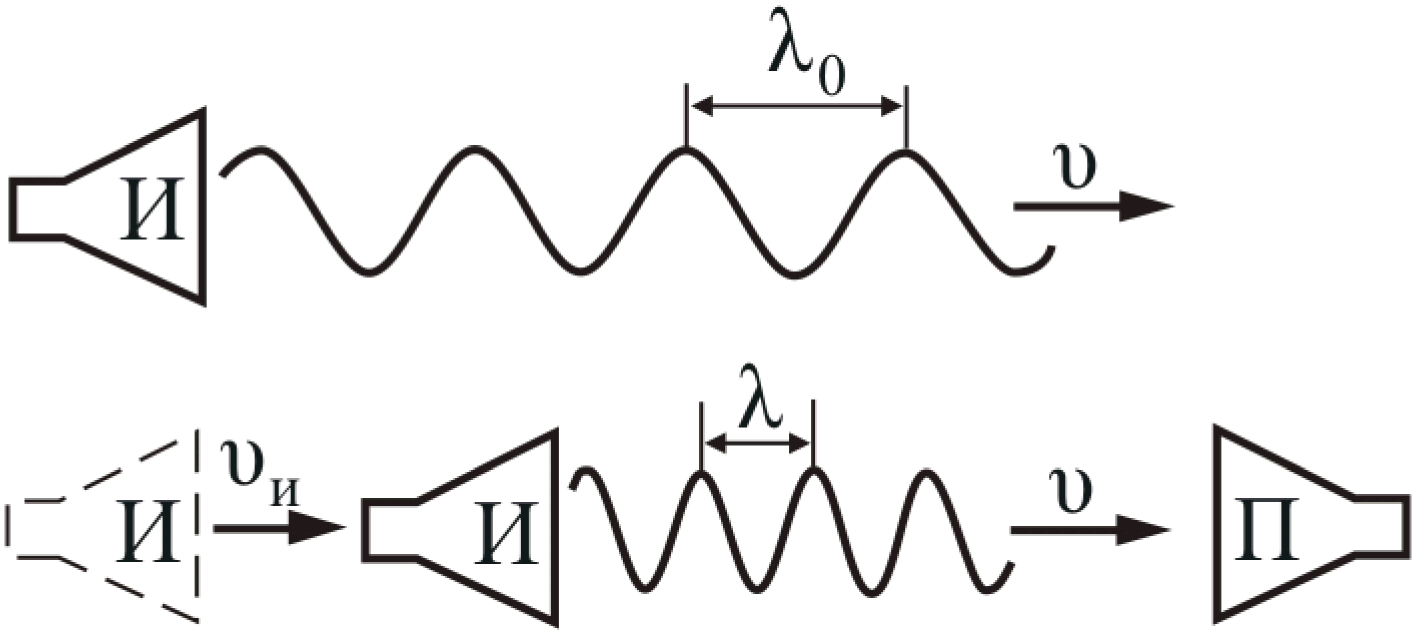
Если рассматривать ***бегущую волну***, то в направлении ее распространения ***переносится энергия*** колебательного движения.

В случае же ***стоячей волны переноса энергии нет***, т.к. падающая и отраженная волны одинаковой амплитуды несут одинаковую энергию в противоположных направлениях.



Эффект Доплера

Эффектом Доплера называется изменение частоты волн, регистрируемых приемником, которое происходит вследствие движения источника этих волн и приемника.



Источник, двигаясь к приемнику как бы сжимает пружину – волну

Процесс образования электромагнитных волн

Волновое уравнение для электромагнитных волн

Волновое уравнение

Распространение волн в однородной среде в общем случае ***описывается волновым уравнением*** – дифференциальным уравнением в частных производных:

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

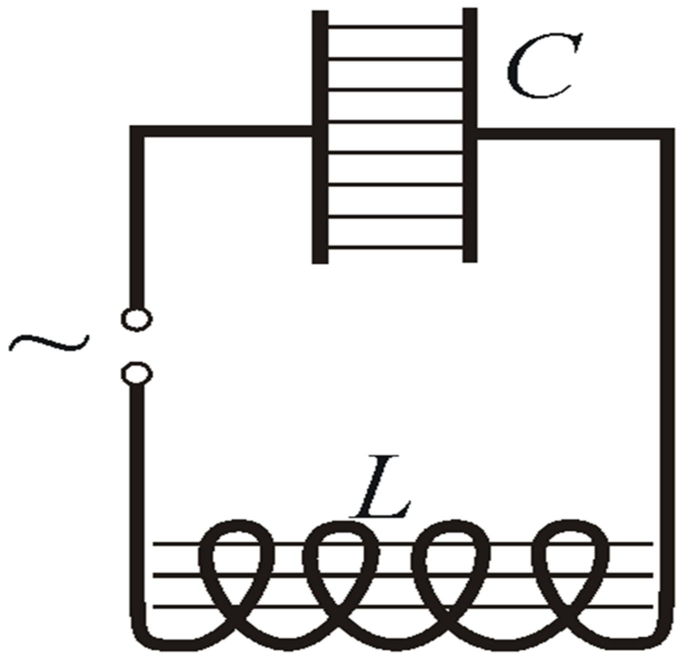
$$\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

оператор Лапласа

Электромагнитная волна

–процесс распространения электромагнитного поля в пространстве с конечной скоростью.

В колебательном контуре, образованном конденсатором C и катушкой L ***электрическое поле сосредоточено в зазоре между обкладками, а магнитное – внутри катушки***.

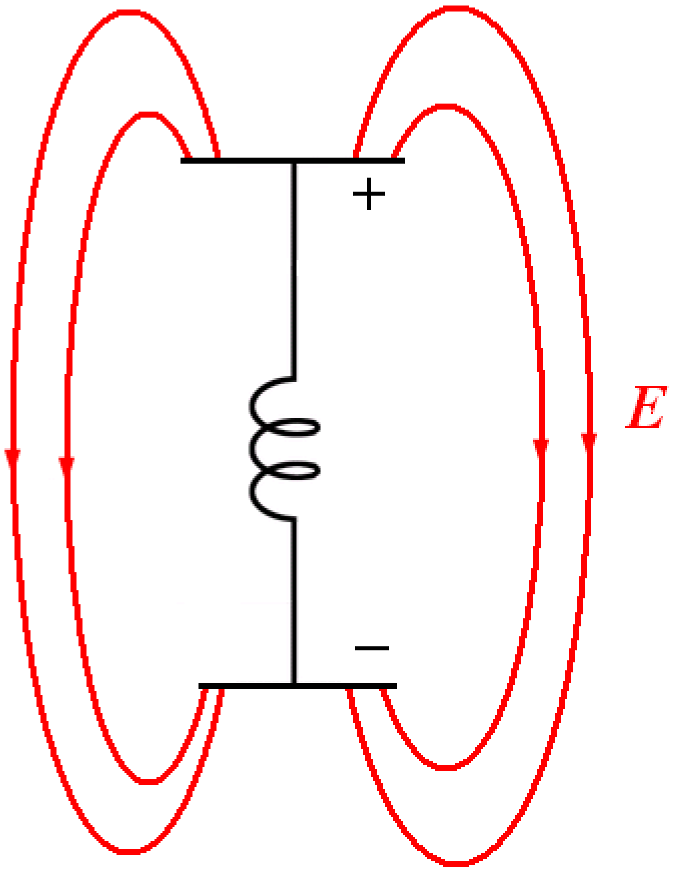


В окружающем конденсатор и катушку пространстве поля практически равны нулю.

Герц Генрих Рудольф (1857 – 1894) – ***немецкий физик***. Окончил Берлинский университет (1880 г.) и был ассистентом у Г. Гельмгольца. В 1885 – 89 гг. – профессор Высшей технической школы в Карлсруэ. Основные работы относятся к электродинамике, одним из основоположников которой он является, и механике.

В 1888г. экспериментально ***доказал существование электромагнитных волн***, распространяющихся в свободном пространстве, предсказанных теорией Максвелла. Экспериментируя с электромагнитными волнами, наблюдал их отражение, преломление, интерференцию, поляризацию. Установил, что скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света.

Вибратор Герца –открытый колебательный контур



Переменное электрическое поле заполняет окружающее пространство и порождает переменное магнитное поле и т.д.

ВАЖНО: Существование электромагнитных волн вытекает из уравнений Максвелла

Пусть среда, в которой распространяются электромагнитные волны,

-однородная и нейтральная, *ρ=0,*

-непроводящая, *j=0.* Тогда

$$rot\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}. \quad rot\vec{H} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} + \underbrace{\vec{j}}_{0} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}. \qquad (1)$$

$$div\vec{D} = \underbrace{\rho}_{0} = 0. \qquad div\vec{B} = 0.$$

Если среда – однородный и изотропный диэлектрик, то $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$; $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$.

С учетом этого систему (1) можно переписать в виде:

$$rot\vec{E} = \left[\nabla\vec{E}\right] = -\mu\mu_0\frac{\partial\vec{H}}{\partial t}; \qquad rot\vec{H} = \left[\nabla\vec{H}\right] = \varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t};$$

$$div\vec{E} = \nabla\vec{E} = 0; \qquad div\vec{H} = \nabla\vec{H} = 0. \qquad (2)$$

Возьмем ротор от обеих частей 1-го уравнения системы (2).

$$\left[\nabla,\left[\nabla\vec{E}\right]\right]=-\mu\mu_0\left[\underbrace{\nabla}_{\substack{\text{диф.по}\\ \text{координате}}},\frac{\partial\vec{H}}{\partial t}\right].$$

Меняем местами дифференцирование по координате и времени:

$$\left[\nabla,\frac{\partial\vec{H}}{\partial t}\right]=\frac{\partial}{\partial t}\left[\nabla\vec{H}\right],$$

$$\left[\nabla\vec{H}\right]=\varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}.\qquad\Rightarrow\qquad\left[\nabla,\left[\nabla\vec{E}\right]\right]=-\mu\mu_0\frac{\partial}{\partial t}\left(\varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\right)=$$

$$=-\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}.(3)$$

$$\left[\nabla,\left[\nabla\vec{E}\right]\right] = rotrot\vec{E} = \nabla\left(\underbrace{\nabla\vec{E}}_{\substack{yp.(2)\\=0}}\right) - \Delta\vec{E} =$$

$$= graddiv\vec{E} - \Delta\vec{E} = 0 - \Delta\vec{E}.(4)$$

Оператор Лапласа: $\Delta = \dfrac{\partial^2}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2}{\partial z^2}.$

Приравняем правые части уравнений (3) и (4):

$$\left.\begin{array}{l} \Delta\vec{E} = \varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0\dfrac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}. \\ \text{Скорость света в вакууме} \quad c = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}. \end{array}\right\}$$

$$\Delta\vec{E} = \varepsilon\mu\underbrace{\varepsilon_0\mu_0}_{\frac{1}{c^2}}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}.$$

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

Аналогично:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2}=\frac{\varepsilon\mu}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.\\
&\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2}=\underbrace{\frac{\varepsilon\mu}{c^2}}_{\frac{1}{v^2}}\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}.
\end{aligned}\right\}$$

Волновые уравнения определяют изменение векторов ***E*** и ***H*** в пространстве и времени.

$$v=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

- фазовая скорость.

В вакууме $\varepsilon=1, \quad \mu=1 \quad \Rightarrow \quad v=c.$

Свойства электромагнитных волн

вытекают из уравнений Максвелла

1.Скорость распространения электромагнитных волн

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c}{n}$$

где *n–показатель преломления среды.*

Т.е.

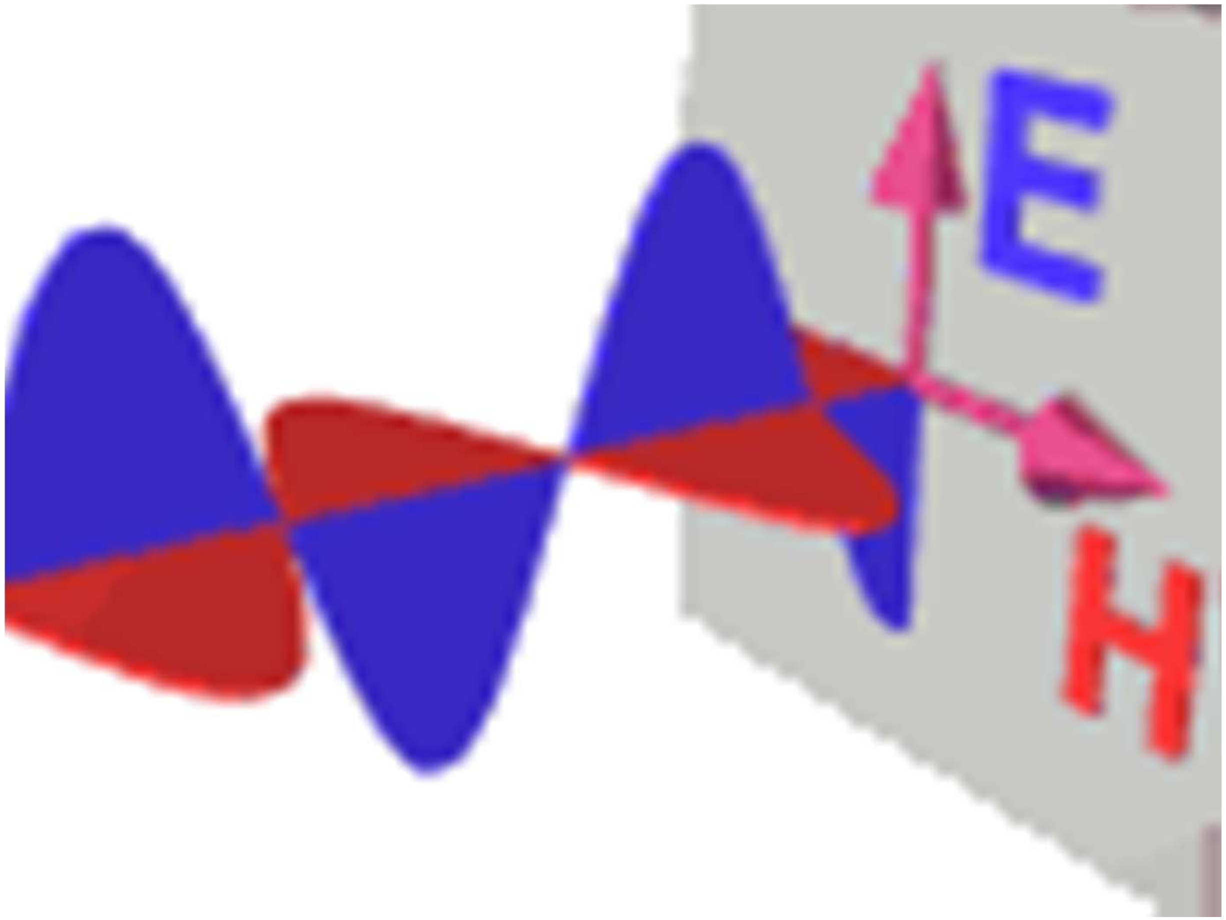
• скорость распространения электромагнитных волн в среде меньше, чем в вакууме,

• среда влияет на распространение электромагнитных волн, они преломляются, отражаются, поглощаются.

Свойства электромагнитных волн

2. Электромагнитная волна –поперечная, вектора ***E*** и ***H*** *лежат в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны, т.е. к вектору* ***v*** *в рассматриваемой точке поля.*

3. Вектора ***E*** и ***H*** *взаимно перпендикулярны, причем вектора* ***E***, ***H*** и ***v*** *образуют правовинтовую тройку.*


E
H

Свойства электромагнитных волн

4. Вектора ***E*** и ***H*** *колеблются в одной фазе – одновременно обращаются в нуль и одновременно достигают max.*

5. Мгновенные значения векторов ***E*** и ***H*** *связаны соотношением*

$$\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}E = \sqrt{\mu\mu_0}H.$$

Для вакуума соотношение

$$\frac{E_0}{H_0} \approx 377$$

Свойства электромагнитных волн

Дифференциальное уравнение электромагнитной волны (плоской), распространяющейся вдоль оси *x*

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}. \qquad \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}.$$

Этим уравнениям удовлетворяет, в частности, плоская монохроматическая электромагнитная волна:

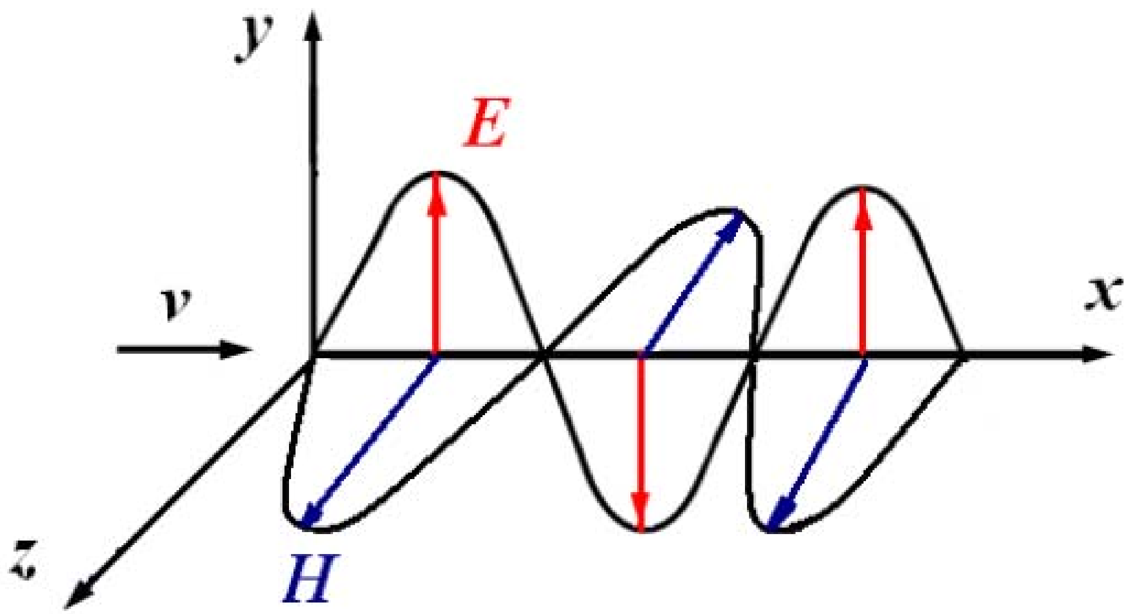
$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kx),$$

$$H_z = H_0 \cos(\omega t - kx). \qquad k = \frac{\omega}{v}$$

волновое число

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kx),$$

$$H_z = H_0 \cos(\omega t - kx).$$



Свойства электромагнитных волн

6. Электромагнитная волна переносит энергию (электромагнитную волну можно обнаружить)

7. Электромагнитная волна оказывает на тело давление. Например, заряженные частицы тела в магнитном поле волны начинают двигаться под действием силы Лоренца

$$\vec{F}_{Л} = q\left[\vec{v}, \vec{B}\right].$$

Энергия электромагнитной волны. Вектор Умова-Пойнтинга

Объемная плотность энергии электромагнитной волны

$$\omega = \omega_E + \omega_H = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}.$$

$$\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} E = \sqrt{\mu\mu_0} H,$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}.$$

$$\omega = 2\omega_E = 2\omega_H = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2 = \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0} EH =$$

$$= \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{c} EH = \frac{1}{v} EH.$$

Плотность потока энергии

равна объемной плотности энергии умноженной на скорость волны:

$$j = S = \omega v = EH.$$

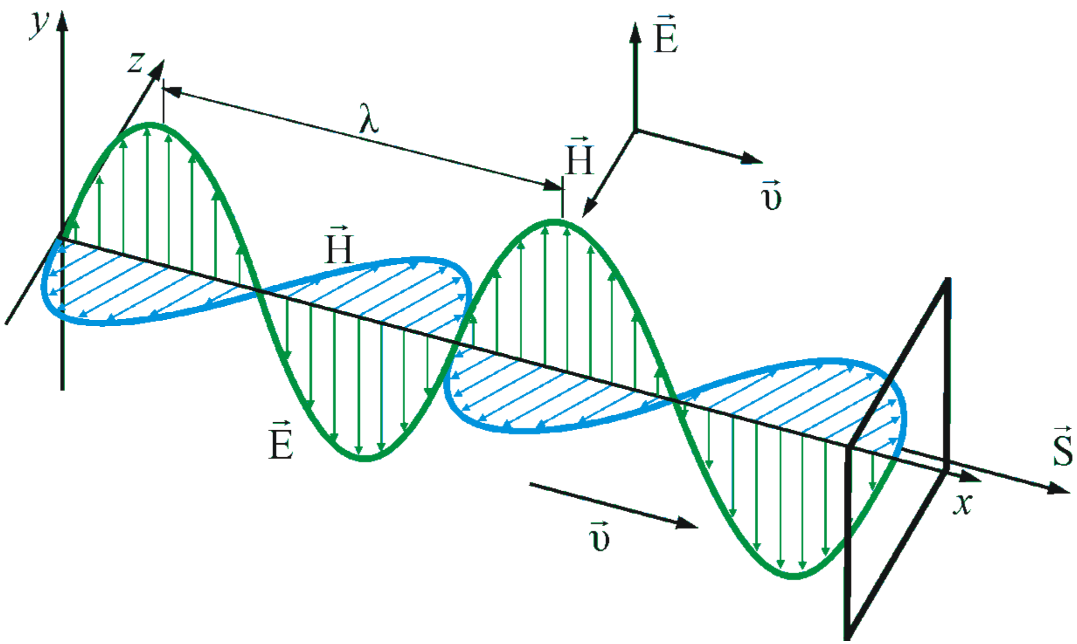
Вектора ***E***, ***H***, ***v*** образуют правовинтовую тройку, следовательно, векторное произведение $\left[\vec{E}, \vec{H}\right]$ совпадает с направлением переноса энергии, т.е. с вектором ***v***. Как следствие, плотность потока энергии - векторная величина:

$$\vec{S} = \omega\vec{v}$$

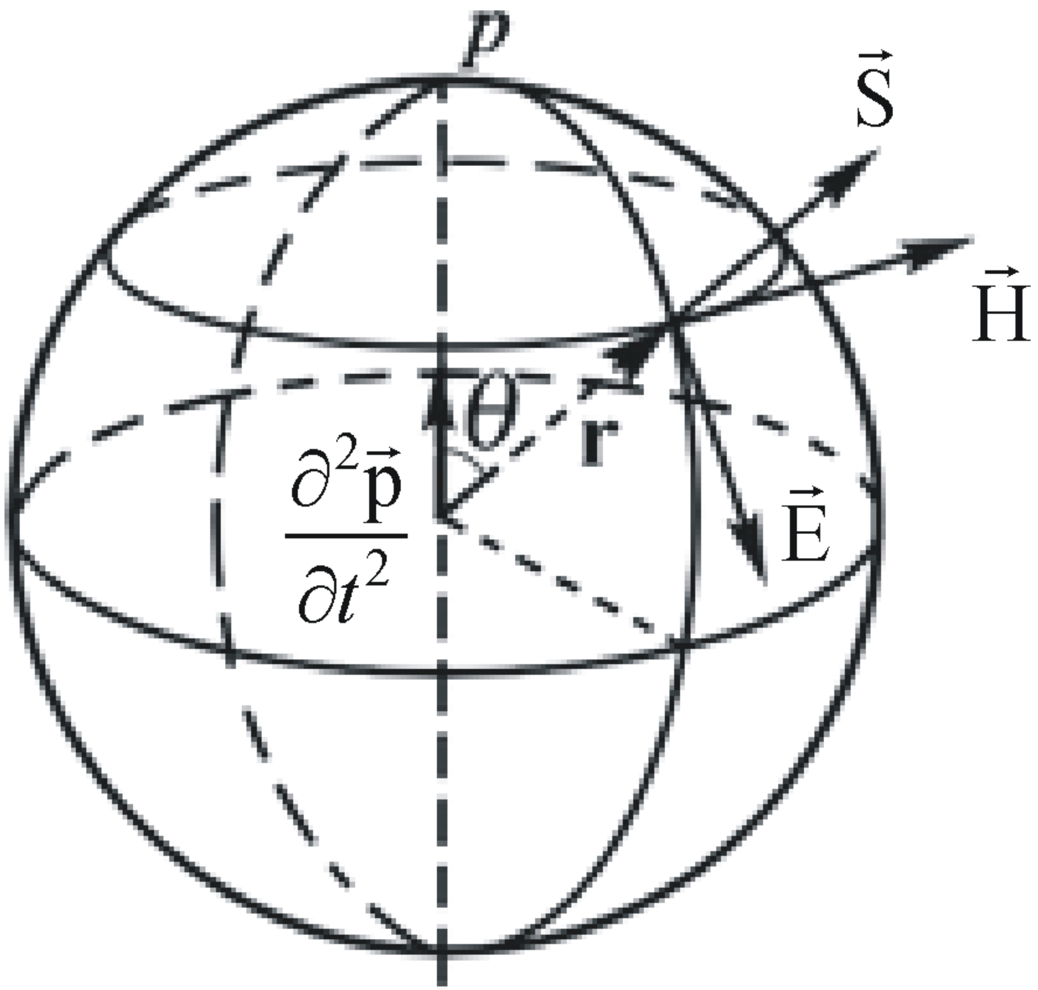
Вектор Умова-Пойнтинга

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

Вектор $\vec{S}$ ***направлен в сторону распространения электромагнитной волны***, *а его модуль равен энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.*

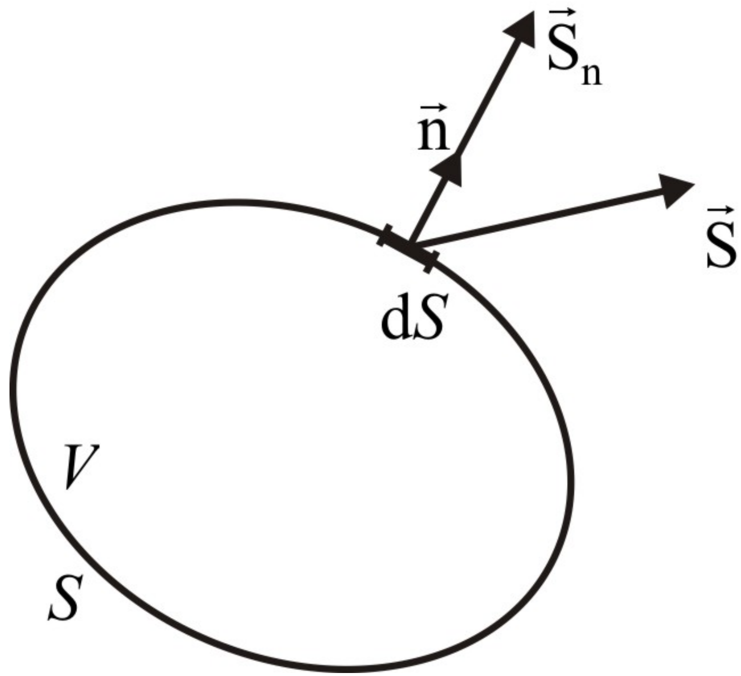


В сферической электромагнитной волне, излучаемой ускоренно двигающимися зарядами, векторы $\vec{H}$ направлены по параллелям, векторы $\vec{E}$ – по меридианам, а поток энергии $\vec{S}$ – по нормали $\vec{n}$



Поток энергии через площадку *dS*:

$$\mathrm{d}\Phi = S_n \cdot \mathrm{d}S \qquad S_n = S \cdot \cos\alpha$$



Теорема Умова - Пойнтинга:

$$-\frac{\partial W}{\partial t} = \oint_S \vec{\mathrm{S}}_\mathrm{n} \mathrm{d}S$$

- уменьшение полной энергии внутри объема *V* за единицу времени должно быть равно энергии, выходящей через поверхность S за единицу времени наружу – ***закон сохранения э/м энергии***.

Давление электромагнитных волн

Поглощаясь каким-либо телом, электромагнитная волна сообщает этому телу некоторый импульс, т.е. оказывает на него давление.

Электромагнитная масса и импульс

Существование давления ЭМВ приводит к выводу о том, что ***электромагнитному полю присущ электромагнитный импульс и масса***.

$$\vec{\mathrm{p}} = m\vec{\upsilon} \qquad\qquad E = mc^2$$

$$\Downarrow$$

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

Излучение электромагнитных волн. Излучение диполя

- Процесс возбуждения электромагнитных волн какой-либо системой в окружающее пространство называется ***излучением электромагнитных волн.***
- Простейшая излучающая система – ***электрический диполь****, дипольный момент* $\boldsymbol{pl}$ *которого изменяется с течением времени.*
- Такой диполь называется ***осциллятором*** *или элементарным* ***вибратором.***

Осциллятором пользуются для моделирования и расчета полей реальных систем.

Если размеры излучающей системы малы по сравнению с длиной λ излучаемых волн, то в *волновой зоне*, т.е. в точках, отстоящих от системы на $r >> \lambda$, поле излучения близко к полю излучения осциллятора, имеющего такой же электрический момент, как и вся излучающая система.

Линейный гармонический осциллятор

– электрический диполь, момент которого изменяется по гармоническому закону

$$\vec{p}_l = \vec{p}_0 \cos \omega t; \qquad \left|\vec{p}_0\right| = const = q \cdot l.$$

Если поле распространяется в однородной, изотропной среде, то во всех точках, находящихся на одинаковом расстоянии *r* от диполя, фаза гармонических колебаний одинакова. Следовательно, волновой фронт сферический, и волна, излучаемая диполем, *сферическая*.

Амплитуда колебаний векторов ***E*** и ***H*** пропорциональна

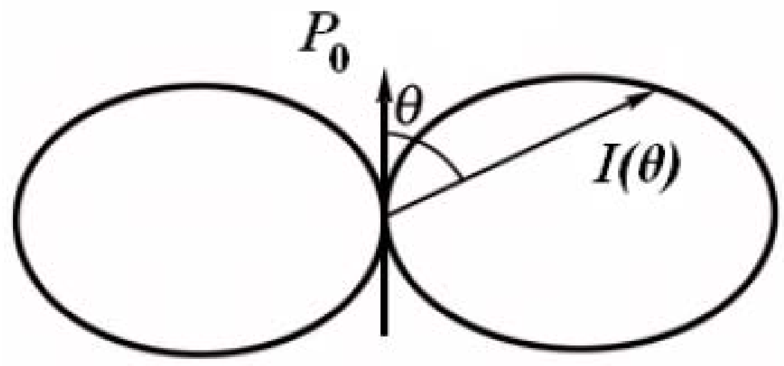
$$\frac{1}{r}\sin\theta, \qquad \theta -$$ угол между вектором ***r*** и осью диполя.

- Интенсивность излучения

$$I \sim A^2 \sim \frac{\sin^2\theta}{r^2}.$$

В полярных координатах $(\vec{r}, \theta)$ зависимость интенсивности излучения от угла θ, называемая

диаграммой направленности излучения диполя



- Диполь сильнее всего излучает в направлении, составляющем угол $\theta = \frac{\pi}{2}$,

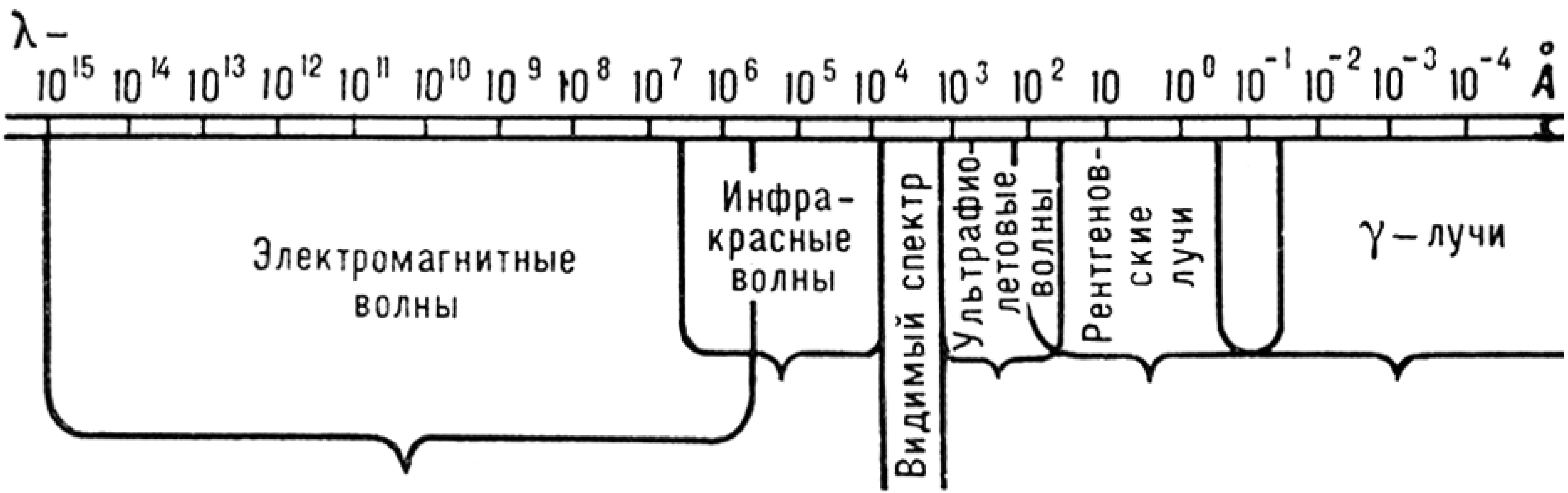
  т.е. в плоскости, проходящей через середину диполя перпендикулярно его оси.
- Вдоль своей оси $\theta = 0; \pi$ диполь не излучает совсем.

Шкала электромагнитных волн

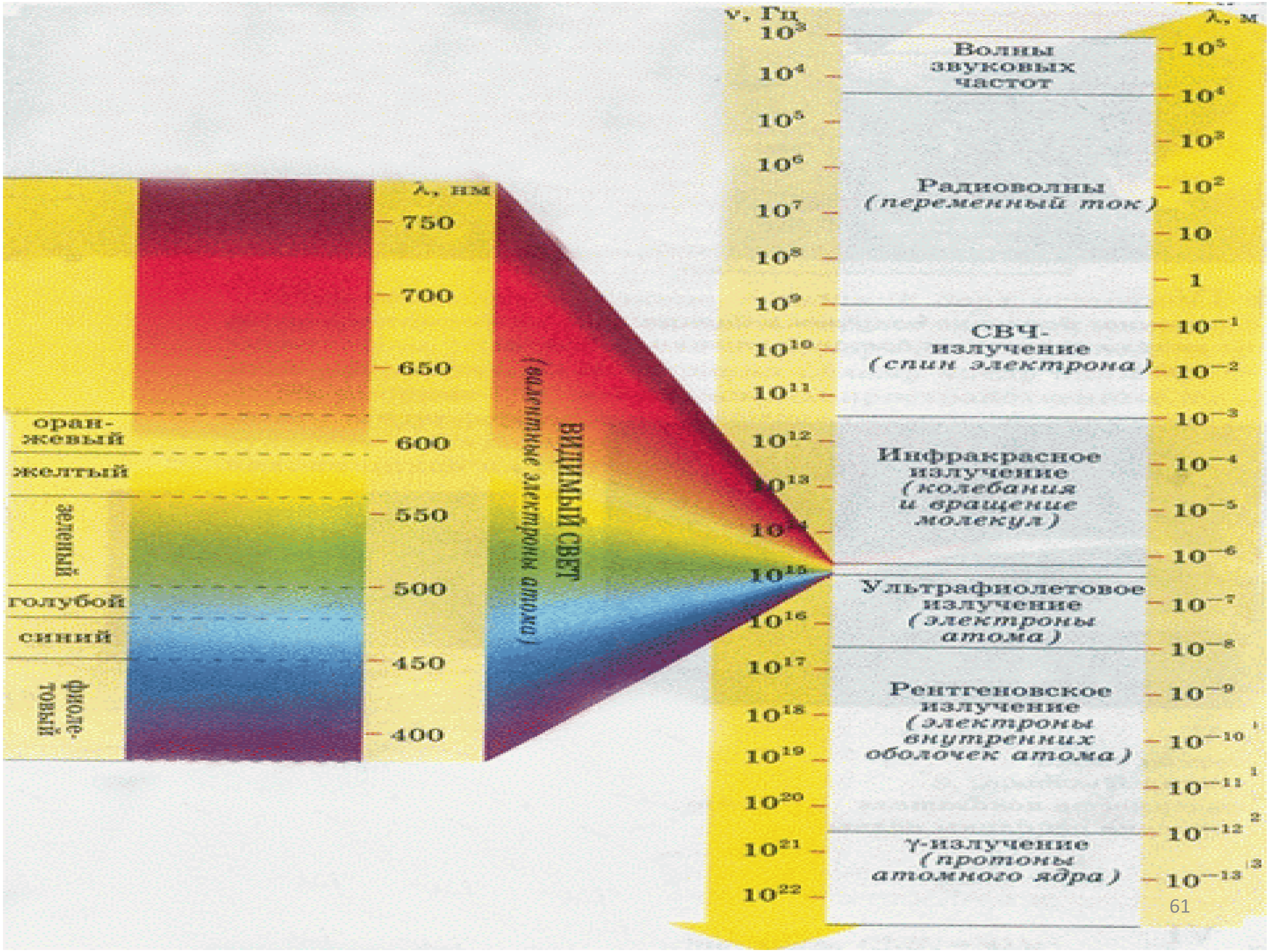
- В зависимости от частоты (или длины волны $\lambda = \frac{c}{\upsilon}$) , а так же способа излучения и регистрации, различают несколько видов электромагнитных волн.
- Радиоволны
- Оптическое излучение (световые волны
- Рентгеновское излучение
- Гамма-излучение

Длина	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

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ
Длина волны, м
Частота, Гц
низкочастотные колебания
радиоволны
инфракрасное излучение
видимое излучение
ультрафиолетовое излучение
рентгеновское излучение
гамма-излучение
irodal.ru



λ –
10^{15} 10^{14} 10^{13} 10^{12} 10^{11} 10^{10} 10^{9} 10^{8} 10^{7} 10^{6} 10^{5} 10^{4} 10^{3} 10^{2} 10 10^{0} 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4} Å
Электромагнитные волны
Инфра-красные волны
Видимый спектр
Ультрафиолетовые волны
Рентгеновские лучи
γ – лучи



ν, Гц
λ, м
Волны звуковых частот
Радиоволны (переменный ток)
СВЧ-излучение (спин электрона)
Инфракрасное излучение (колебания и вращение молекул)
Ультрафиолетовое излучение (электроны атома)
Рентгеновское излучение (электроны внутренних оболочек атома)
γ-излучение (протоны атомного ядра)
λ, нм
750
700
650
600
550
500
450
400
оран-жевый
желтый
зеленый
голубой
синий
фиоле-товый
ВИДИМЫЙ СВЕТ
(валентные электроны атома)

В связи с особенностями распространения и генерации весь диапазон радиоволн принято делить на 9 поддиапазонов:

1	сверхдлинные	$\lambda > 10^5$ м,
2	длинные волны	$10^4 - 10^3$ м,
3	средние волны	$10^3 - 10^2$ м,
4	короткие волны	$10^2 - 10$ м,
5	метровые	$10 - 1$ м,
6	дециметровые	$1 - 0{,}1$ м,
7	сантиметровые	$0{,}1 - 0{,}01$ м,
8	миллиметровые	$10^{-2} - 10^{-3}$ м,
9	субмиллиметровые	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-5}$ м.

Оптическое излучение:

- ***инфракрасное излучение*** –электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами,

  λ=1мм –770 нм.

- ***видимое излучение*** (видимый свет) способно вызывать зрительное ощущение в глазе,

  λ=770 нм –380 нм.

- ***ультрафиолетовое излучение***, *λ=380–10 нм.*

- ***Рентгеновское излучение****(рентгеновские лучи) –электромагнитное излучение, которое возникает при взаимодействии элементарных частиц и фотонов с атомами вещества*
- ***Гамма-излучение*** *(гамма лучи) испускается возбуждѐнными атомными ядрами при радиоактивных превращениях и ядерных реакциях, при распаде частиц, аннигиляции частица-античастица и других процессах*

Принцип радиосвязи

Радиосвязь–передача какой-либо информации с помощью радиоволн.

В радиовещании осуществляется передача речи, музыки, телеграфных сигналов.

В телевидении –изображения.

Радиосвязь производится путѐм излучения радиопередатчиком модулированных электромагнитных волн и их демодуляция в радиоприѐмнике.

Модуляцией электромагнитных волн называется изменение еѐ параметров с частотами, значительно меньшими частоты самой электромагнитной волны.

Модулируемая волна называется несущей, а еѐ частота –несущей частотой.

- *Амплитудная модуляция*: изменяется только амплитуда волны.

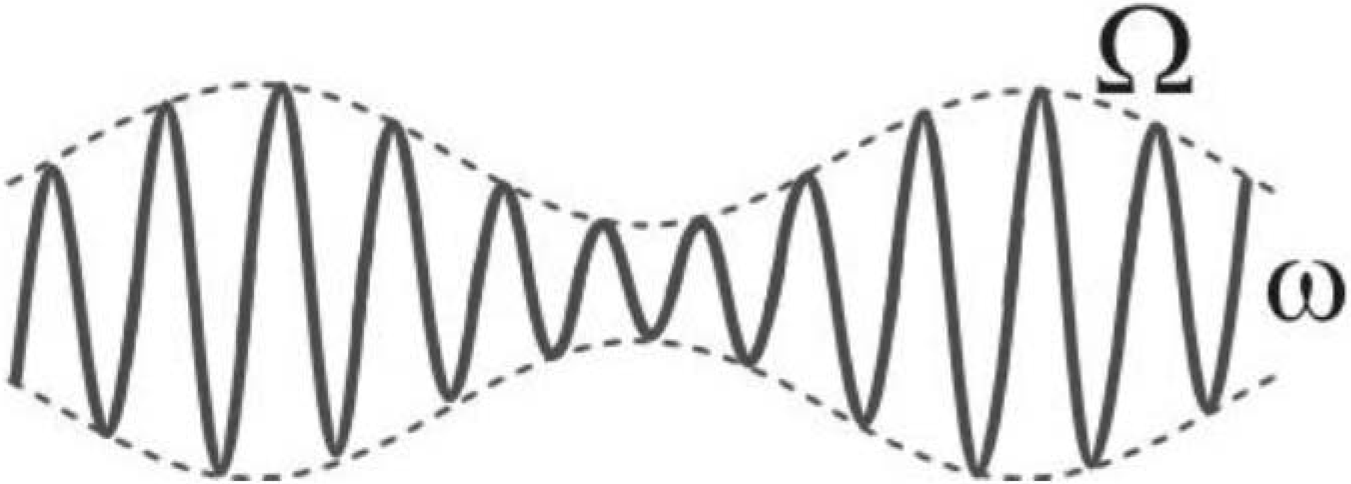
$$A = A_0\left(1 + m_A \cos\Omega t\right),$$

$$x = A_0\left(1 + m_A \cos\Omega t\right)\cos\left(\omega t + \varphi_0\right),$$

ω – частота несущей волны,

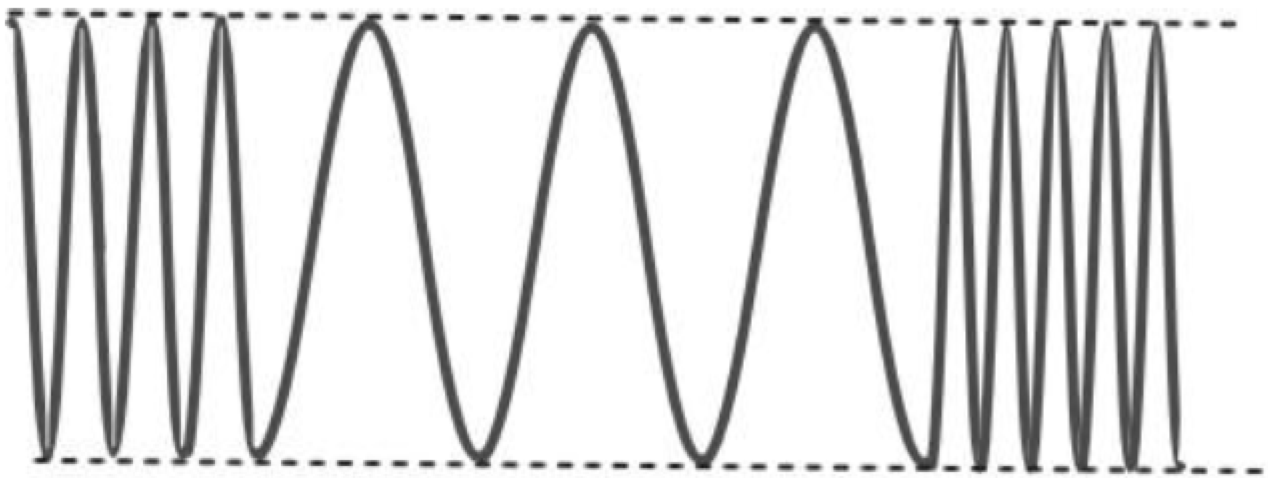
Ω – частота модуляции, $\Omega \ll \omega$,

mA – коэффициент модуляции (глубина модуляции).



Частотная модуляция: изменяется только частота волны

$$\omega = \omega_0 \left(1 + m_\omega \cos\Omega t\right)$$



Фазовая модуляция: изменяется начальная фаза волны

$$\varphi = \varphi_0 \left(1 + m_\varphi \cos \Omega t \right)$$

В случае радиовещания частота модуляции невелика (частота слышимых звуков 20 Гц ÷ 20 кГц), поэтому нет жёстких ограничений на выбор несущей частоты ω.

- ***Радиопередатчик состоит:*** *генератор незатухающих электромагнитных колебаний несущей частоты, модулятора и передающей антенны, осуществляющей излучение радиоволн в нужном направлении.*

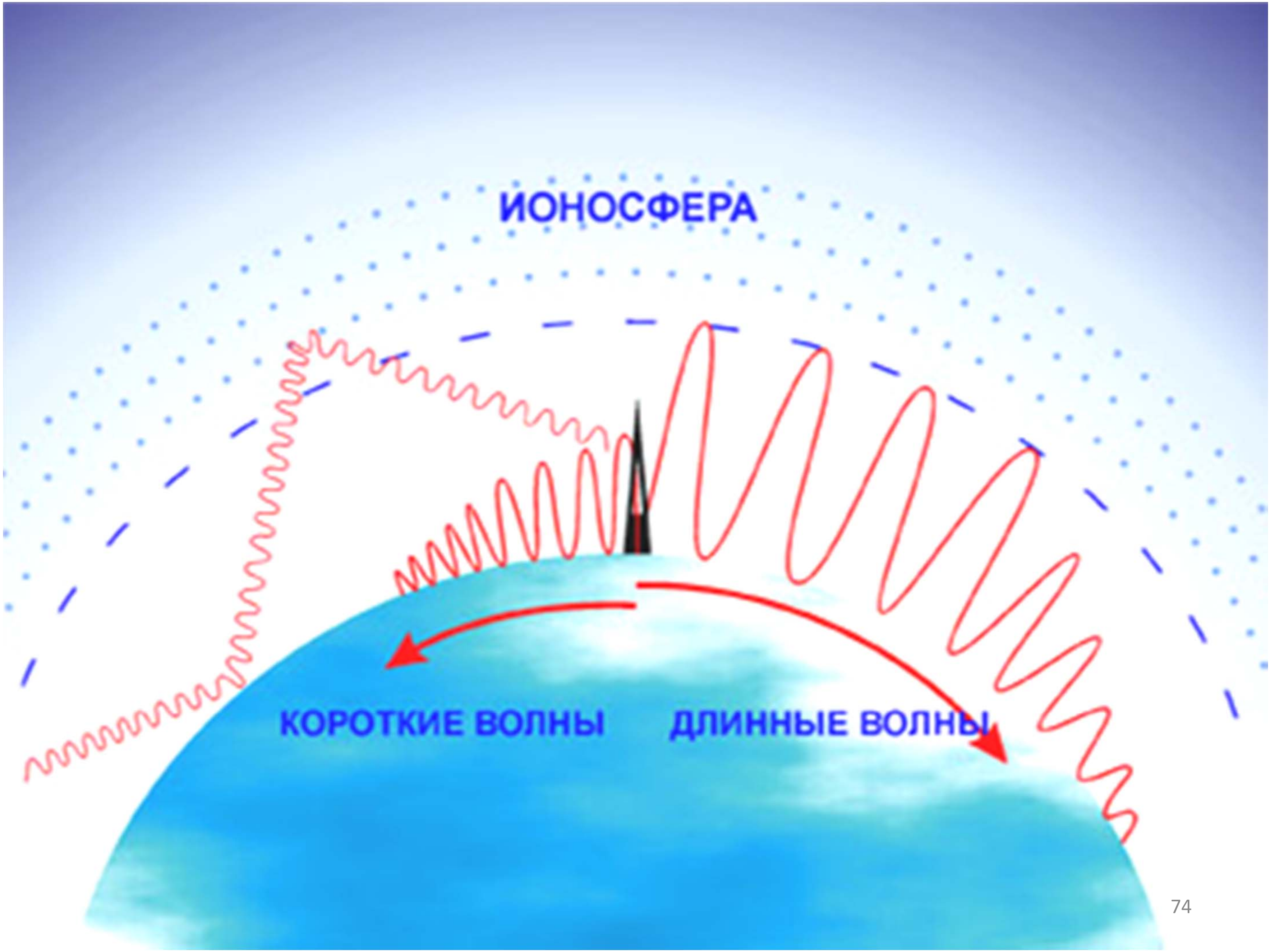
- ***Приёмное устройство состоит:*** *приѐмная антенна и радиоприѐмник. Приѐмная антенна преобразует энергию радиоволн в энергию высокочастотных электромагнитных колебаний.*

  Радиоприѐмник выделяет из этих колебаний те, которые возбуждаются нужным радиопередатчиком (явление резонанса), усиливает и демодулируетих, т.е. отделяет модулирующие колебания низкой частоты (НЧ) от высокочастотных (ВЧ) несущих колебаний.

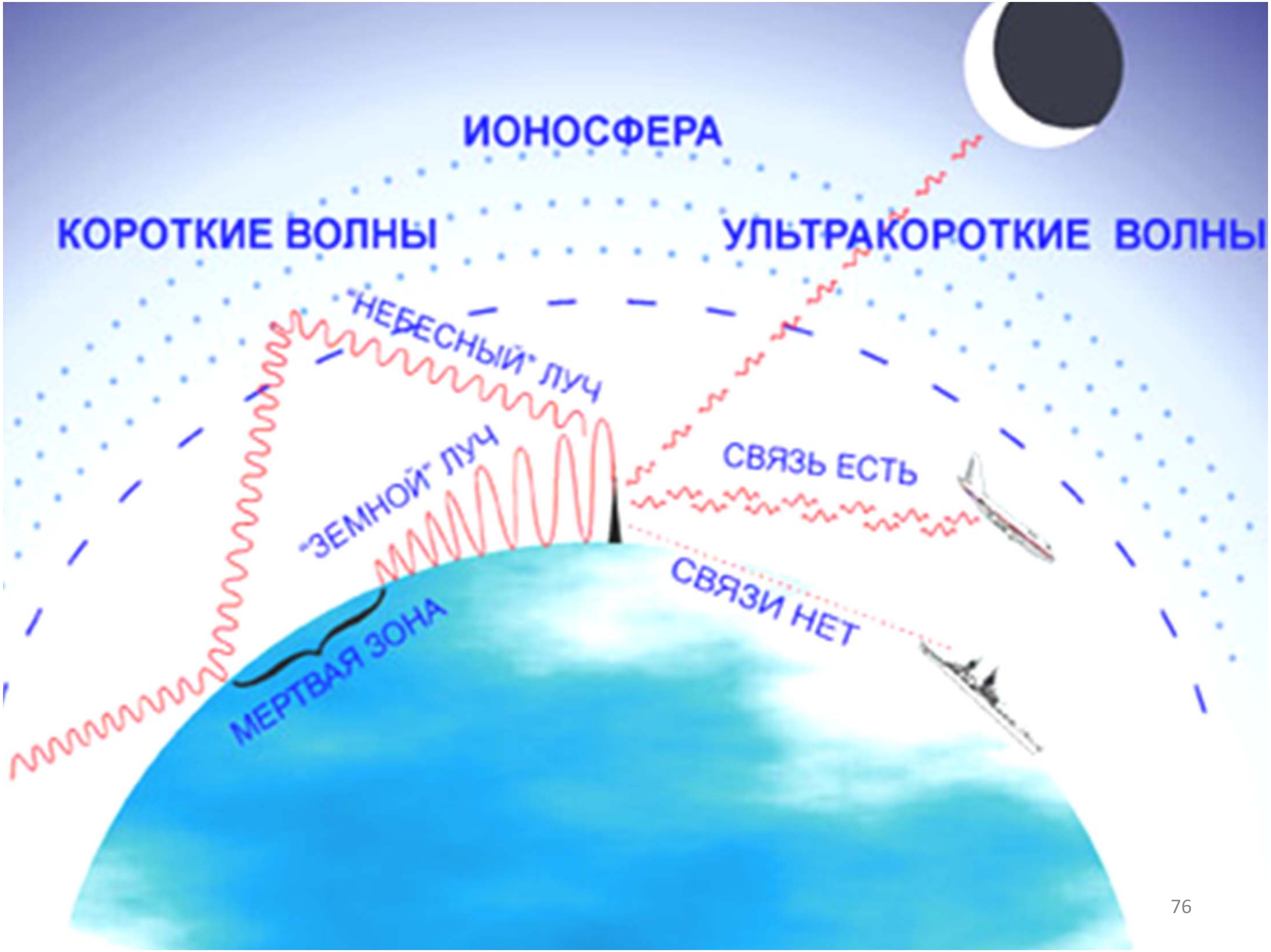
На распространение радиоволн в атмосфере существенно влияет явление *дифракции радиоволн, поглощение в атмосфере и земной поверхности, отражение от Земли, поглощение, преломление и отражение от ионосферы– верхней части атмосферы.*

Наиболее устойчивая дальняя радиосвязь осуществляется на длинных радиоволнах, которые огибают земную поверхность вследствие дифракции и преломления в нижних слоях атмосферы.

Средние и короткие волны радиоволны отражаются от слоѐв ионосферы, следовательно, возможна дальняя радиосвязь.


ИОНОСФЕРА
КОРОТКИЕ ВОЛНЫ
ДЛИННЫЕ ВОЛНЫ

Ультракороткие радиоволны, $\lambda<5$ *м (телевидение) в обычных условиях не отражаются от ионосферы. Следовательно, надѐжный приѐм ультракоротких волн возможен в пределах прямой видимости. Для дальнего телевидения применяется последовательная цепь ретрансляционных станций или ретрансляционные спутники.*


ИОНОСФЕРА
КОРОТКИЕ ВОЛНЫ
УЛЬТРАКОРОТКИЕ ВОЛНЫ
"НЕБЕСНЫЙ" ЛУЧ
"ЗЕМНОЙ" ЛУЧ
СВЯЗЬ ЕСТЬ
СВЯЗИ НЕТ
МЕРТВАЯ ЗОНА