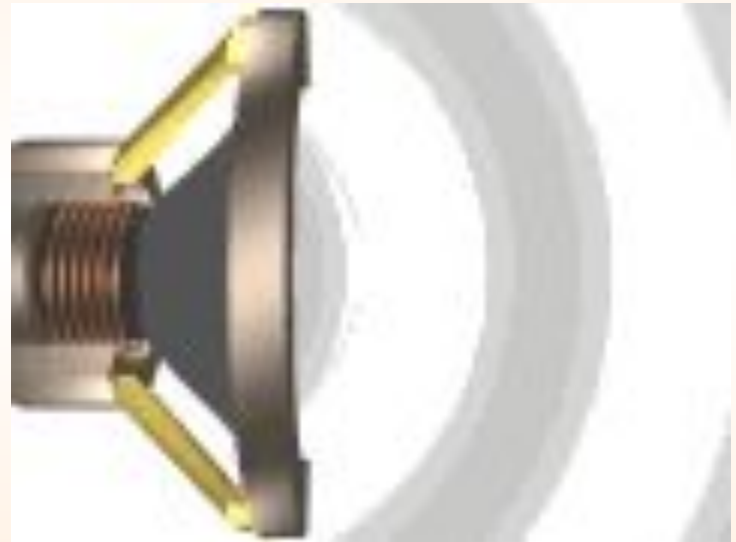


Упругие и электромагнитные волны

1. Распространение волн в упругой среде
2. Уравнение плоской и сферической волны.
Волновое уравнение.
3. Фазовая скорость. Групповая скорость.
4. Стоячие волны
5. Эффект Доплера
6. Генерация ЭМВ
7. Дифференциальное уравнение ЭМВ
8. Экспериментальное исследование ЭМВ
9. Энергия и импульс ЭМП

1. Распространение волн в упругой среде

Колеблющееся тело, помещенное в упругую среду, является **источником колебаний**, распространяющихся от него во все стороны.



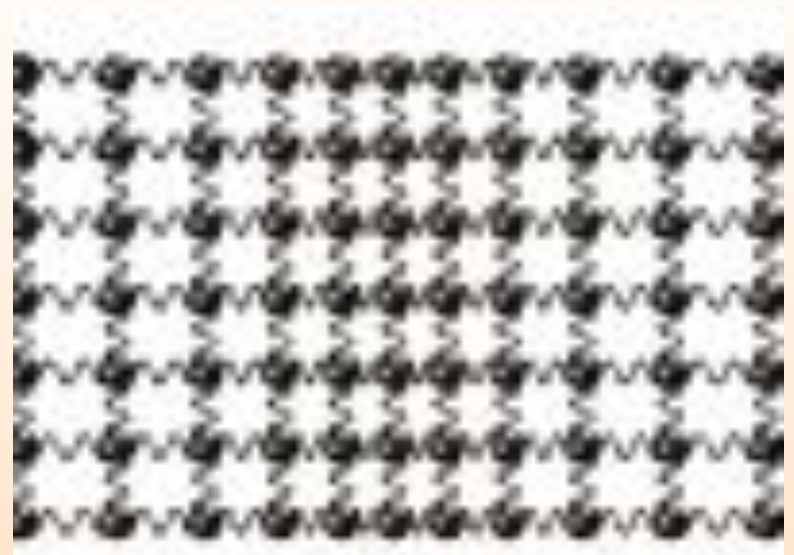
Процесс распространения колебаний в пространстве называется **волной**

При распространении волны, частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия.

Вместе с волной от частицы к частице, передается лишь состояние колебательного движения и его энергия.

Основным свойством всех волн независимо от их природы является **перенос энергии без переноса вещества.**

Волны бывают поперечными (колебания происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения), и **продольными** (сгущение и разряжение частиц среды происходят в направлении распространения).



Если взаимосвязь между частицами среды осуществляется **силами упругости**, возникающими вследствие **деформации среды** при передаче колебаний от одних частиц к другим, то волны называются **упругими** (звуковые, ультразвуковые, сейсмические и др. волны).

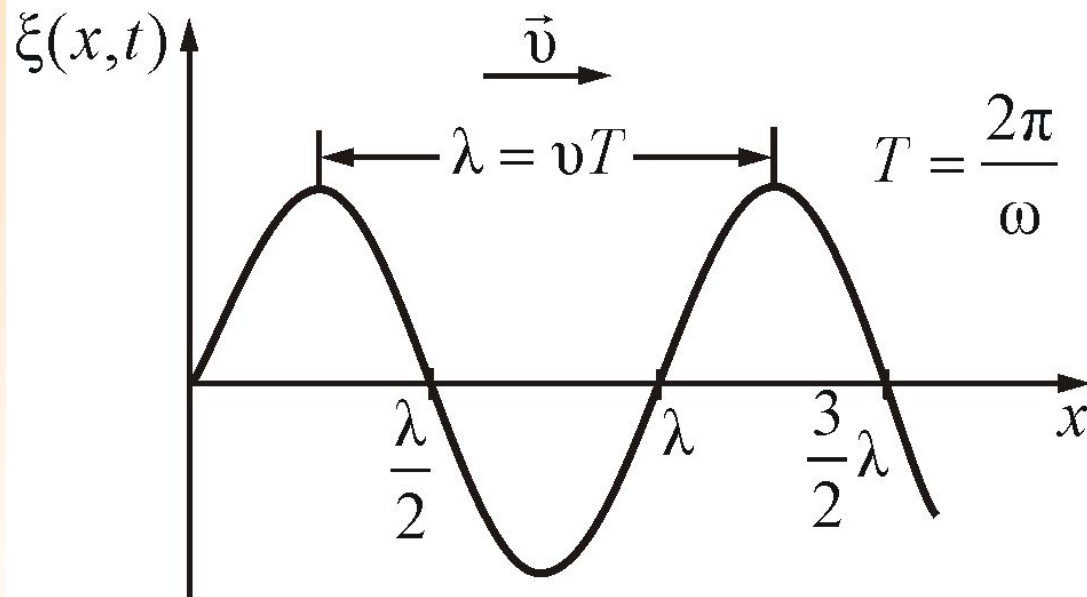
Упругие поперечные волны возникают в среде, обладающей сопротивлением сдвигу,

вследствие этого:

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

Волновая функция

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



Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется **длиной волны λ** :

$$\lambda = vT$$

v – частота

$$T = \frac{1}{v} \quad \text{– период}$$

$v = \lambda \nu$ – скорость распространения волны :

Фронт волны – геометрическое место точек, до которых доходит возмущение в момент времени t .

В однородной среде направление распространения перпендикулярно фронту волны .

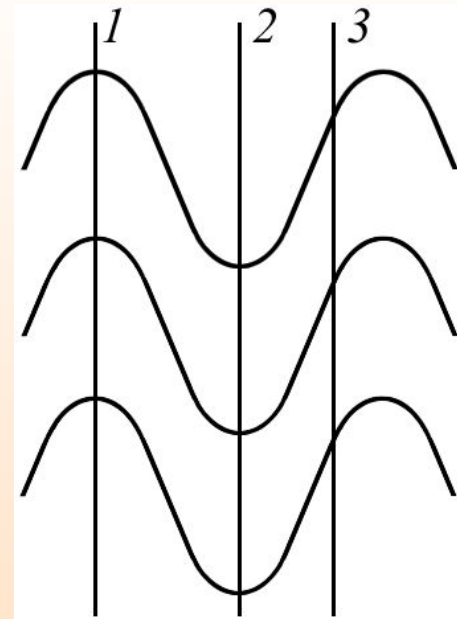
Волновая поверхность – геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе.

Число волновых поверхностей – бесконечно.

Фронт волны – один.

Волновые поверхности неподвижны.

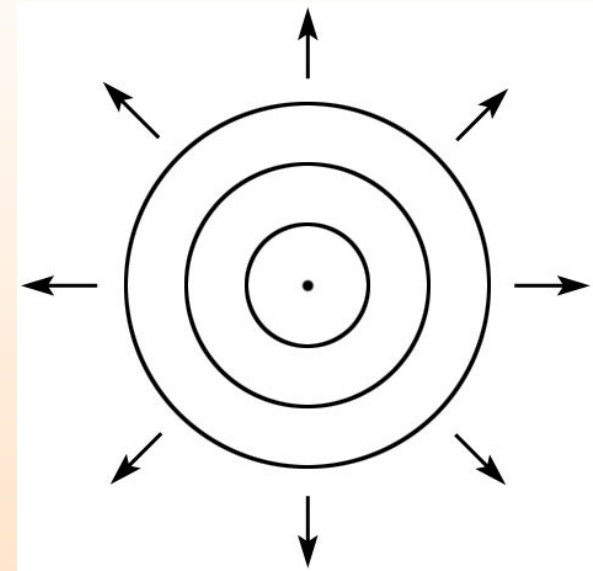
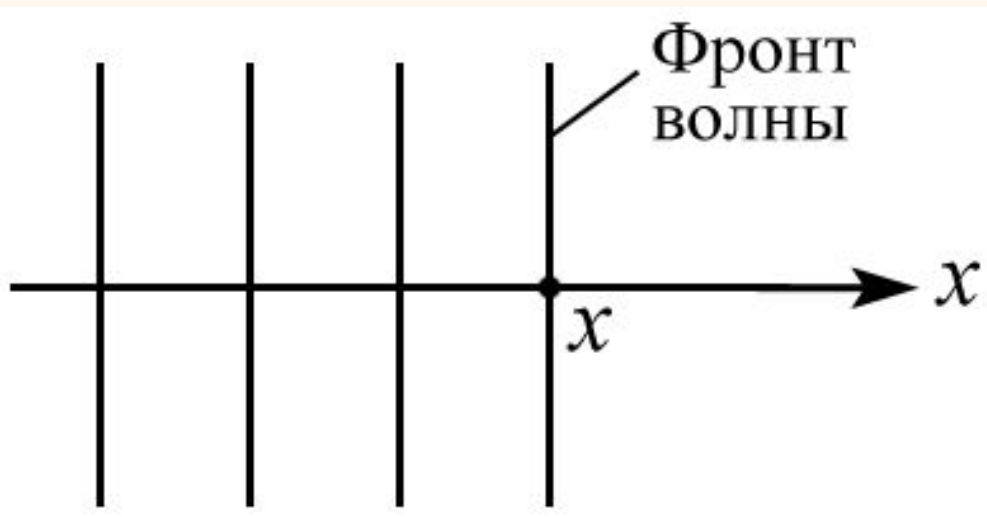
Фронт волны все время перемещается



В зависимости от формы волновой поверхности различают

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

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



2. Уравнение плоской и сферической волны. Волновое уравнение.

Уравнением волны — называется выражение, которое дает *смещение колеблющейся точки* как функцию ее координат (x, y, z) и времени t .

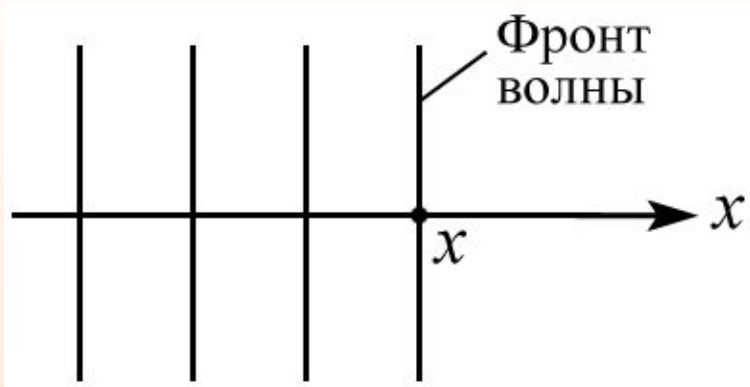
$$\xi = f(x, y, z, t) = \xi(x, y, z, t)$$

Уравнение плоской волны

Найдем вид волновой функции, ξ в случае плоской волны предполагая, что колебания носят гармонический характер: $\xi = A \cos(\omega t + \phi_0)$

Пусть $\phi_0 = 0$ $\xi = \xi(0, t) = A \cos \omega t$

Чтобы пройти путь x необходимо время $\tau = \frac{x}{v}$



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

— ЭТО *уравнение плоской волны.*

Введем ***волновое число***

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

или в векторной форме

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

Так как $\lambda = \nu T$, то $k = \frac{2\pi}{\nu T} = \frac{2\pi\nu}{\nu} = \frac{\omega}{\nu}$

Отсюда

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

Тогда ***уравнение плоской волны*** запишется так:

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

$$\xi = A \cos(\omega t - kx + \phi_0)$$

*При поглощении **средой** энергии волны:*

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

*-наблюдается **затухание** **волны*** (уменьшение интенсивности волны по мере удаления от источника колебаний);

β – коэффициент затухания;

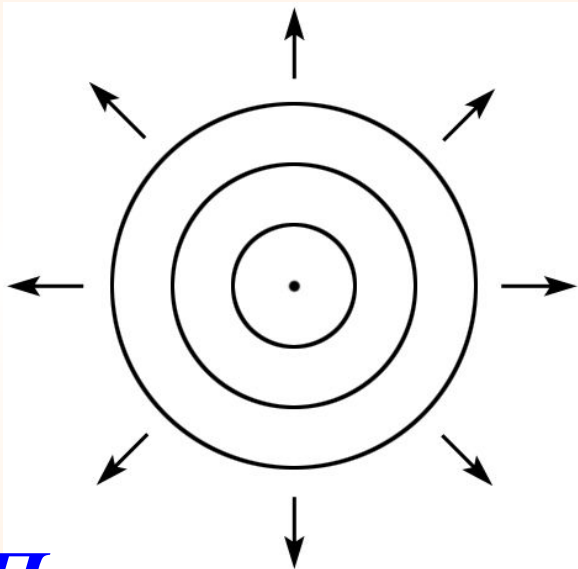
A – амплитуда.

Уравнение сферической волны

Пусть $\phi_0 = 0$

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

Уравнение сферической волны:



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

ИЛИ

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

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

При поглощении средой энергии волны:

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

β – коэффициент затухания.

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

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

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

Всякая функция, удовлетворяющая этому уравнению, описывает **некоторую волну**, причем v – фазовая скорость волны

Решением волнового уравнения 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:

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

оператор Лапласа:
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

3. Фазовая скорость. Групповая скорость.

Фазовая скорость – это скорость распространения фазы волны. (*скорость распространения волны*)

$$\frac{dx}{dt} = v$$

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

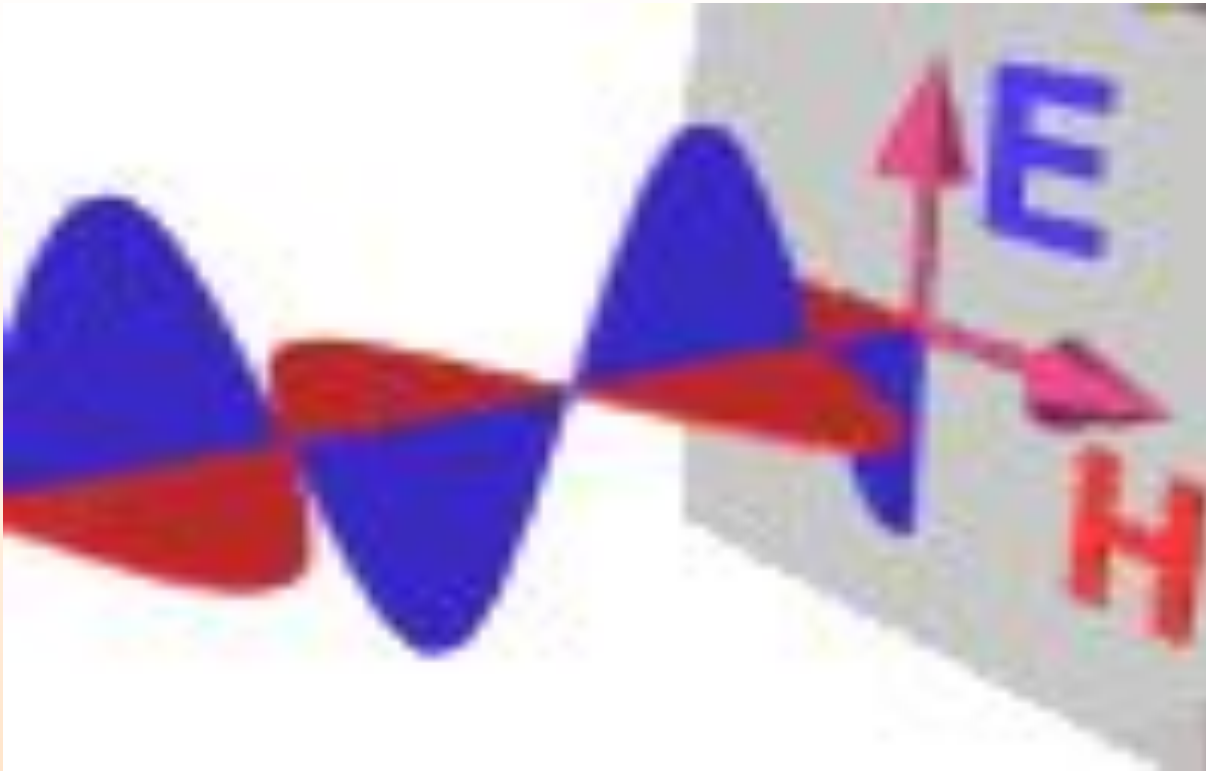
Принцип суперпозиции (наложения волн): при распространении в среде нескольких волн каждая из них распространяется так, как будто другие волны отсутствуют, а результирующее смещение частицы среды равно геометрической сумме смещений частиц.

Любая волна может быть представлена в виде волнового пакета или группы волн.

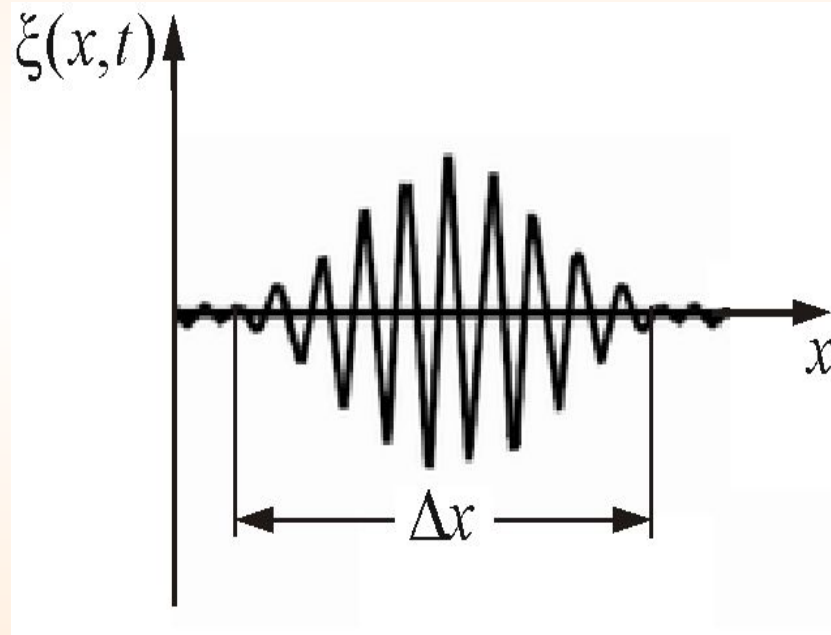
Монохроматическая волна представляет собой бесконечную во времени и пространстве последовательность «горбов» и «впадин».

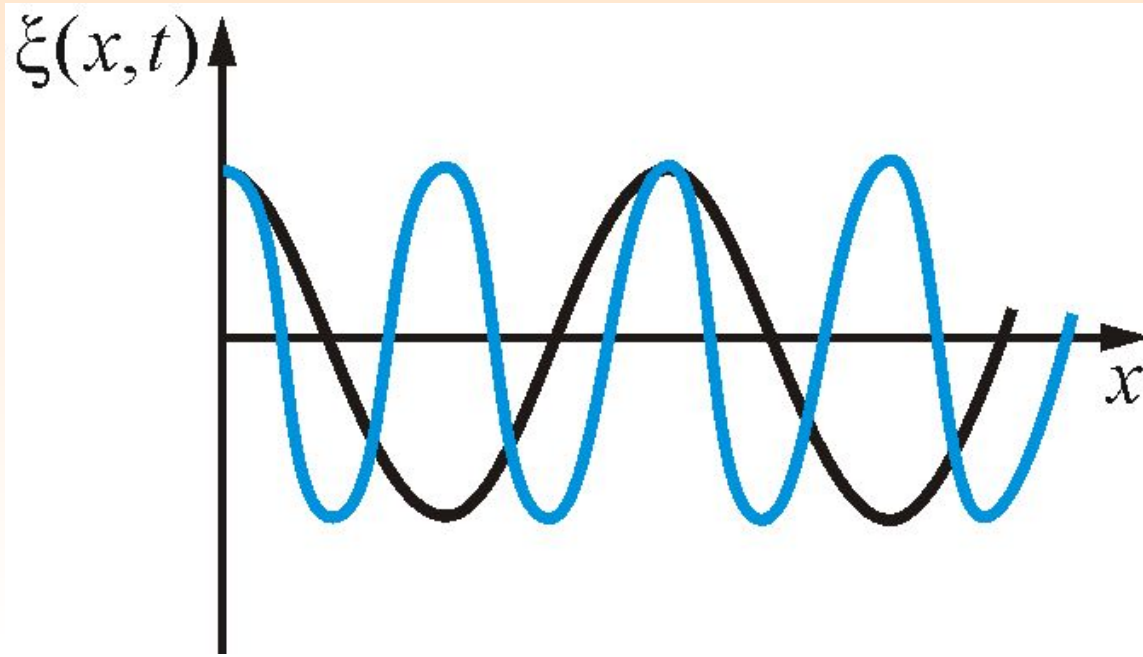
$$\xi = A_0 \cos(\omega t - kx + \phi)$$

Фазовая скорость этой волны $v = \lambda \nu$ или $v = \frac{\omega}{k}$



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





Там где фазы совпадают, наблюдается усиление амплитуды, где нет – гашение (результат интерференции).

необходимо условие $\Delta\omega \ll \omega_0$

Дисперсия – это зависимость фазовой скорости в среде от частоты.

В **недиспергирующей среде** все плоские волны, образующие пакет, распространяются с **одинаковой фазовой скоростью v** . Скорость перемещения пакета **u** совпадает со скоростью **v** : $u = v$

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

В диспергирующей среде $u \neq v$

4. Стоячие волны

Если в среде распространяется несколько волн, то колебания частиц среды оказываются геометрической суммой колебаний, которые совершали бы частицы при распространении каждой из волн в отдельности.

Если две волны, приходящие в какую либо точку пространства, **обладают постоянной разностью фаз**, такие волны называются **когерентными**.

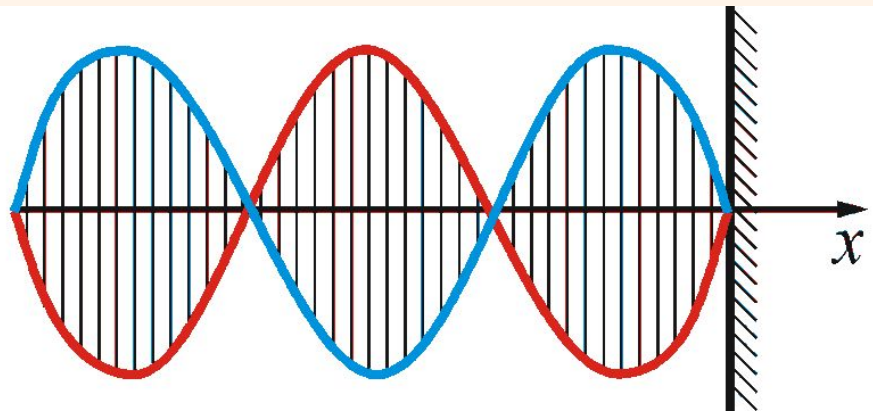
При сложении когерентных волн возникает **явление интерференции**.

При наложении двух встречных плоских волн с одинаковой амплитудой возникает колебательный процесс называемый **стоячей волной.**

Практически стоячие волны возникают при отражении от преград.

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

$$\xi = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos \omega t$$



или $\xi = A^* \cos \omega t$

- уравнение стоячей волны – частный случай интерференции

$$\xi = A^* \cos \omega t \quad A^* = 2A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \quad \text{- суммарная амплитуда}$$

Если $A^* = 2A$ - это **пучности** стоячей волны

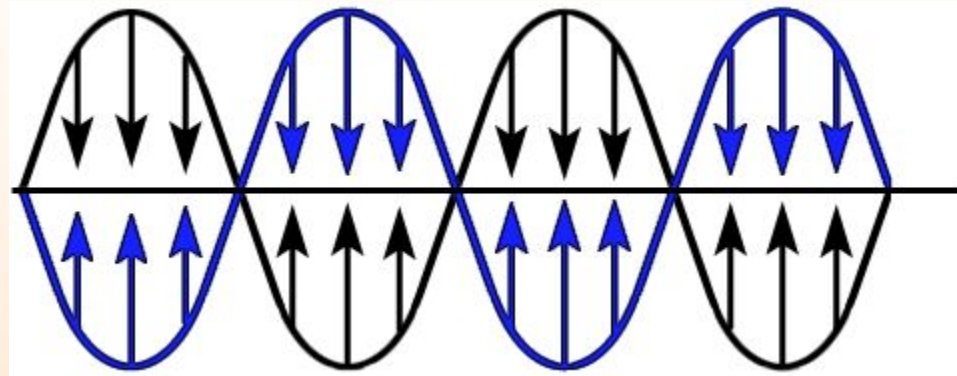
Координаты пучностей: $x_{\text{пучности}} = \pm n\lambda / 2 \quad (n=0, 1, 2..)$

Если $A^* = 0$ - это **узлы** стоячей волны.

Координаты узлов: $x_{\text{узлы}} = \pm \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{2}$

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.



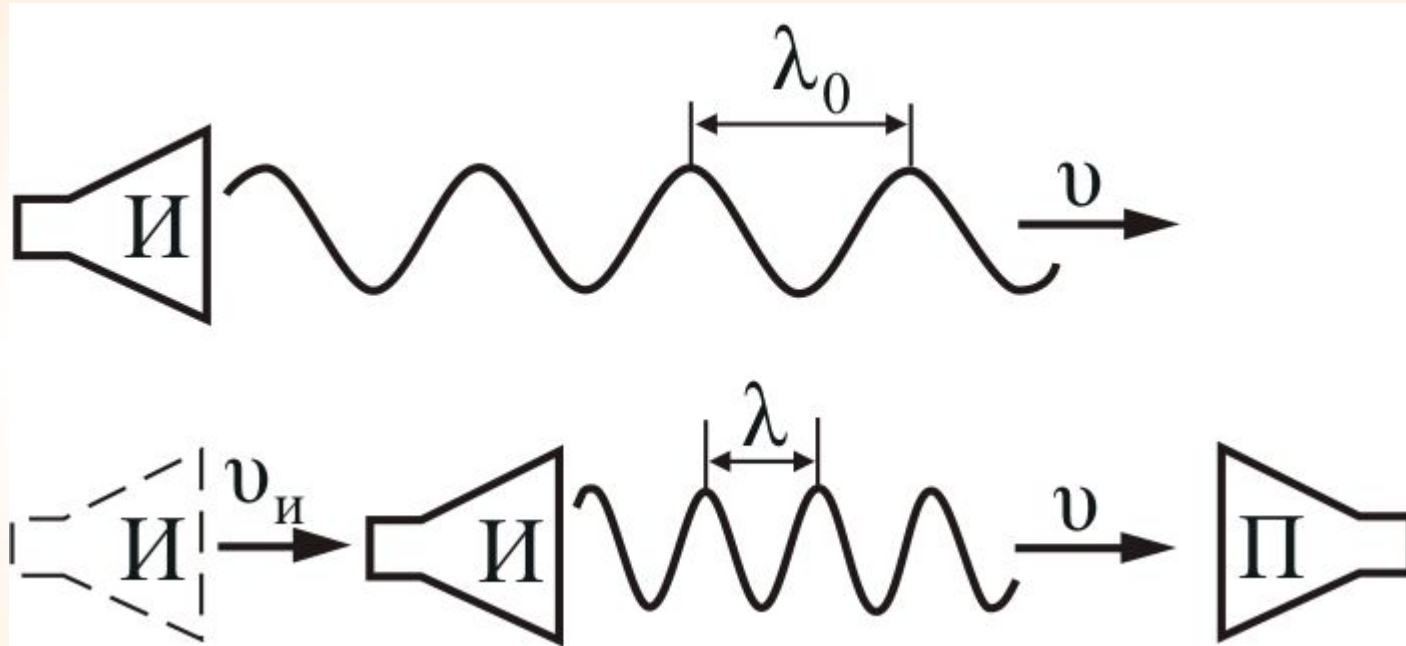
5. Эффект Доплера



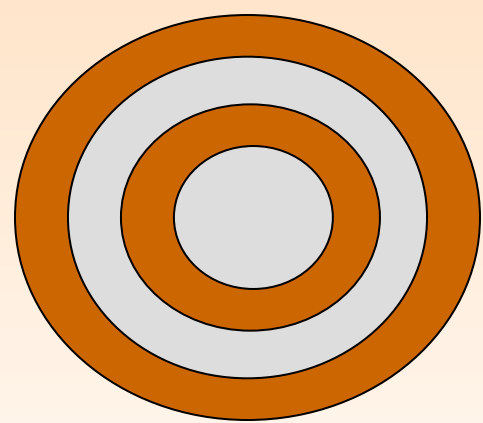
Доплер **Христиан** (1803 – 1853),
австрийский физик и астроном,
С 1847 г. профессор Горной академии в
Хемнице

Основные труды посвящены абберации света, теории микроскопа и оптического дальномера, теории цветов и др. В 1842 г. теоретически обосновал зависимость частоты колебаний, воспринимаемых наблюдателем, от скорости и направления движения наблюдателя относительно источника колебаний.

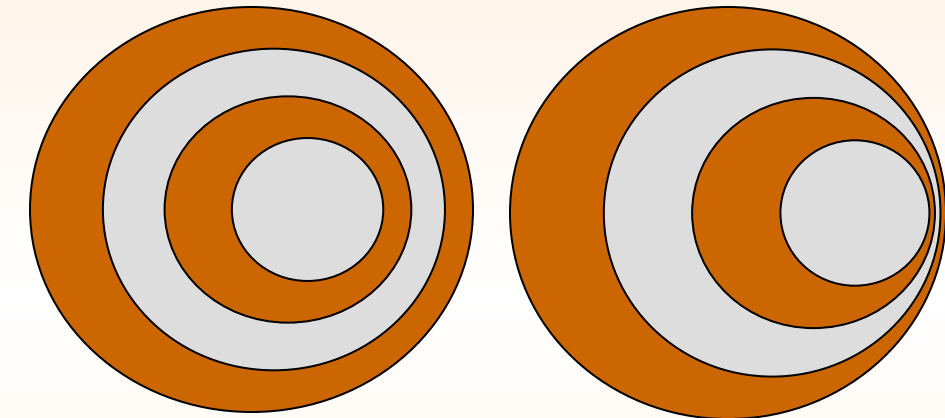
Эффектом Доплера называется изменение частоты волн, регистрируемых приемником, которое происходит вследствие движения источника этих волн и приемника.



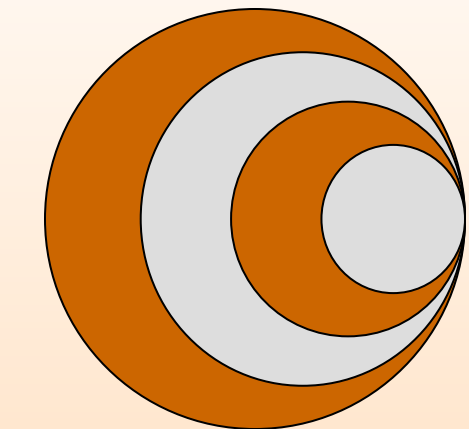
Источник, двигаясь к приемнику как бы сжимает пружину – волну



Неподвижный источник.



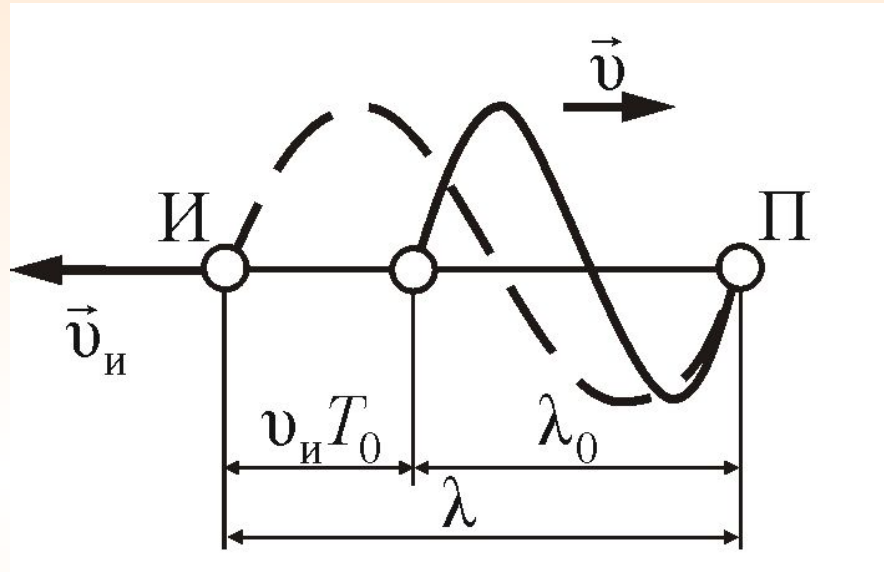
Источник движется
вправо



Скорость равна фазовой
скорости

Акустический эффект Доплера

1. Источник движется относительно приемника



Источник смещается в среде за время, равное периоду его колебаний T_0 , на расстояние

$$v_{\dot{\epsilon}} T_0 = \frac{v_{\dot{\epsilon}}}{v_0}$$

где v_0 – частота колебаний источника, v – фазовая скорость волны

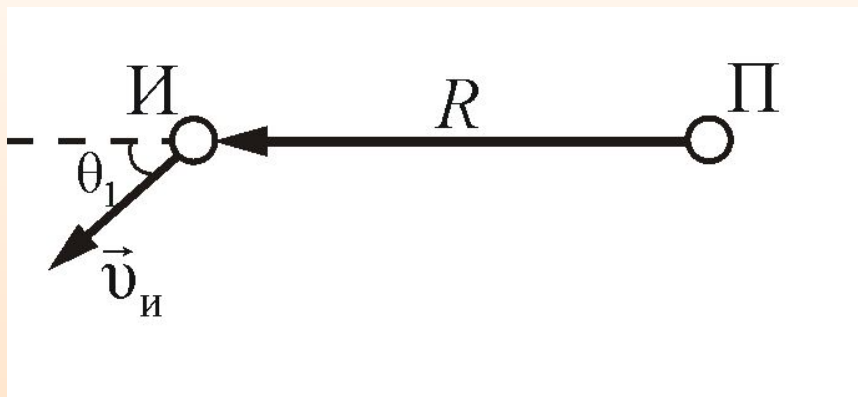
Длина волны, регистрируемая приемником,

$$\lambda = \lambda_0 + v_{\text{и}} T_0 = (v + v_{\text{и}}) T_0 = \frac{(v + v_{\text{и}})}{v_0}$$

$$v = \frac{v}{\lambda} = \frac{v_0}{1 + v_{\text{и}} / v}$$

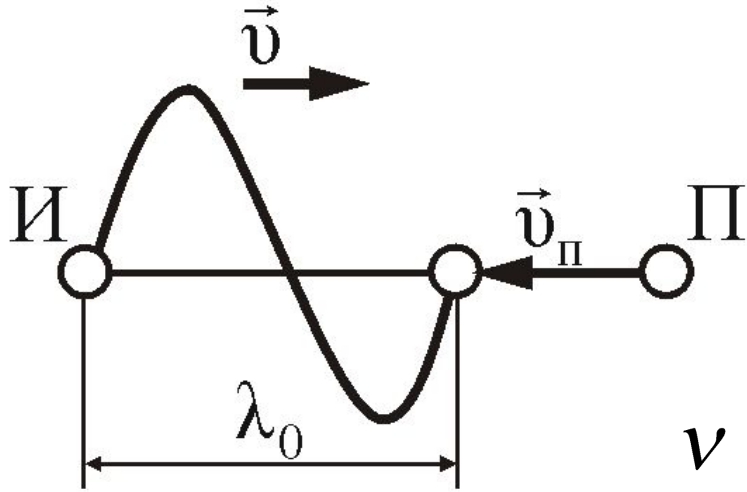
Частота волны,
регистрируемая приемником

Если вектор $v_{\text{и}}$ скорости источника **направлен под** произвольным **углом** θ_1 к радиус-вектору R



$$v = \frac{v_0}{1 + (v_{\text{и}} / v) \cos \theta_1}.$$

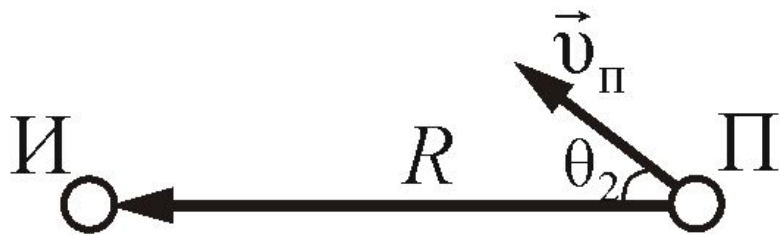
2. Приемник движется относительно источника



Частота волны,
регистрируемая
приемником:

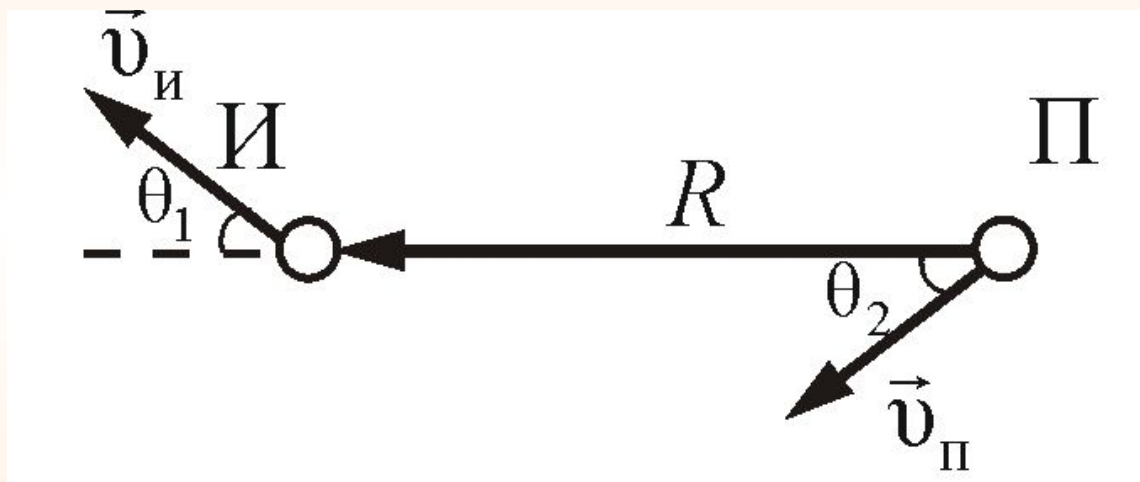
$$\nu = (\nu + \nu_{\dot{i}}) / \lambda_0 = \nu_0 (1 + \nu_{\dot{i}} / \nu).$$

Если приемник движется относительно источника
под углом:



$$\nu = \nu_0 [1 + (\nu_{\dot{i}} / \nu) \cos \theta_2]$$

3. В общем случае, когда и приемник и источник звуковых волн движутся относительно среды с произвольными скоростями.



$$v = v_0 \frac{1 + (v_i / v) \cos \theta_2}{1 + (v_e / v) \cos \theta_1}$$

Если $v_e \ll v$

$$v \approx v_0 [1 - (v'/v) \cos \theta]$$

где $\vec{v}' = \vec{v}_e - \vec{v}_i$

– скорость источника волны относительно приемника, а θ – угол между векторами \vec{v}' и \vec{R}

Величина $v' \cos \theta$, равная проекции \vec{v}' на направление \vec{R} , называется ***лучевой скоростью источника.***

Эффект Доплера нашел широкое применение в науке и технике. Особенно большую роль это явление играет в *астрофизике*. На основании доплеровского смещения линий поглощения в спектрах звезд и туманностей можно определять лучевые скорости $v \cos \theta$ этих объектов по отношению к Земле: при $v \ll c$

$$v \cos \theta \approx (1 - v / v_0) c$$

Американский астроном **Э. Хаббл** обнаружил в 1929 г. явление, получившее название ***космологического красного смещения*** и состоящее в том, что линии в спектрах излучения внегалактических объектов смещены в сторону меньших частот (больших длин волн).

65млн. св. лет



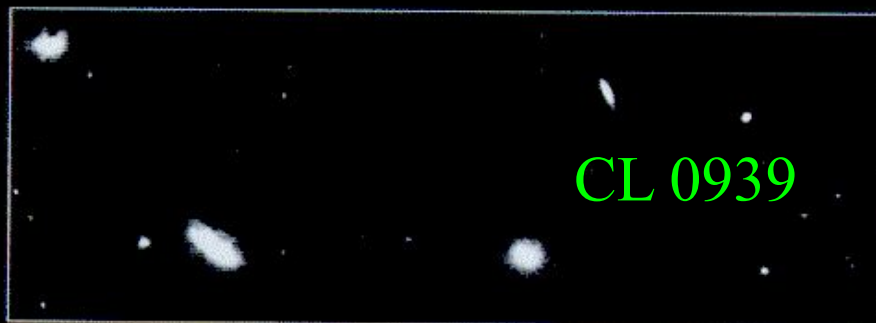
Дева

325млн. св. лет



Персей

4 млрд. св. лет



CL 0939

Космологическое красное смещение есть эффект Доплера. Оно свидетельствует о том, что Метагалактика расширяется, так что внегалактические объекты удаляются от нашей Галактики.

Под метагалактикой понимают 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 z галактик растёт пропорционально расстоянию r до них.*

Закон Хаббла:

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

$H = 73,2$ км/(год·Мп) — постоянная Хаббла.

1 пк (парсек) — расстояние, которое свет проходит в вакууме за 3,27 лет

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

6. Генерация ЭМВ

Возможность существования
электромагнитных волн предсказывал еще
Майкл Фарадей в 1832 г.

Теоретически обосновал это предположение
Дж. Максвелл.

Полная система уравнений Максвелла в дифференциальной и интегральной формах имеет вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad \oint_L (\mathbf{H}, d\mathbf{l}) = \int_S \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\mathbf{S}$$

- обобщенный закон Био-Савара-Лапласа

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \oint_L (\mathbf{E}, d\mathbf{l}) = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}$$

закон Фарадея

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}, \quad \oint_S (\mathbf{D}, d\mathbf{S}) = \int_V \rho dV$$

теорема Гаусса

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \oint_S (\mathbf{B}, d\mathbf{S}) = 0$$

отсутствие магн. зарядов

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H},$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E},$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}_{\text{нòд}}$$

Уравнения в классическом виде

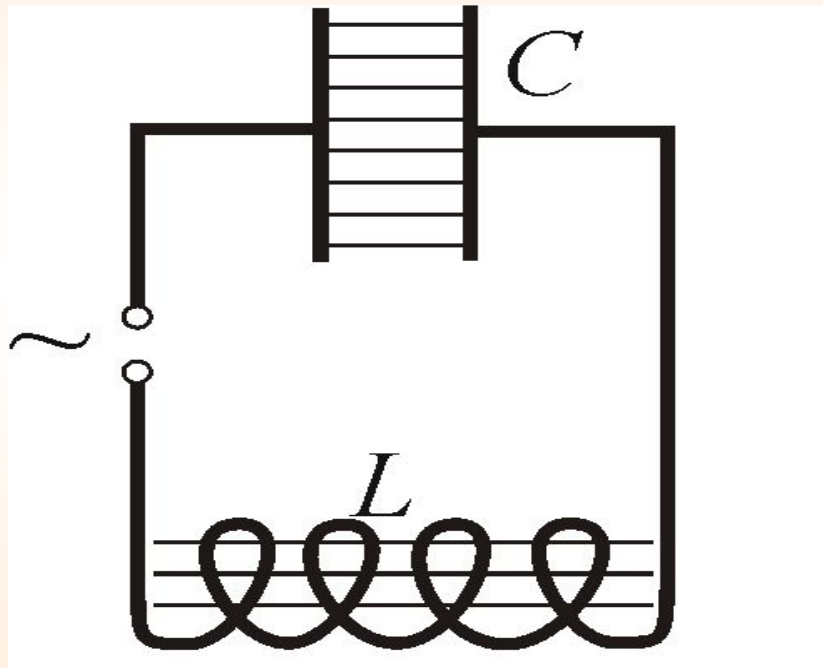
Название	Дифференциальная форма	Интегральная форма	Примерное словесное выражение
Закон индукции Фарадея	$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$	Изменение магнитной индукции порождает вихревое электрическое поле
Закон Ампера (с добавкой от Максвелла)	$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{encl}} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s}$	Электрический ток и изменение электрической индукции порождают вихревое магнитное поле
Теорема Гаусса	$\text{div } \mathbf{D} = \rho$	$\int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q_{\text{encl}}$	Электрический заряд является источником электрической индукции
Теорема Гаусса	$\text{div } \mathbf{B} = 0$	$\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$	Магнитная индукция не расходится (не имеет источников) (не применима к монополям)



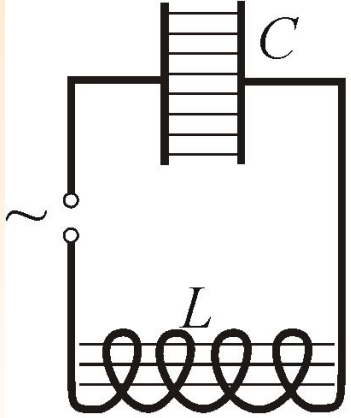
Герц Генрих Рудольф (1857 – 1894) –
немецкий физик.

В 1888 г. 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. В 1887 наблюдал внешний фотоэффект.

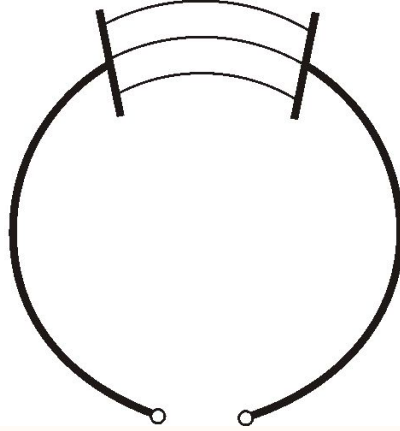
В колебательном контуре, образованном конденсатором C и катушкой L электрическое поле сосредоточено в зазоре между обкладками, а магнитное – внутри катушки.



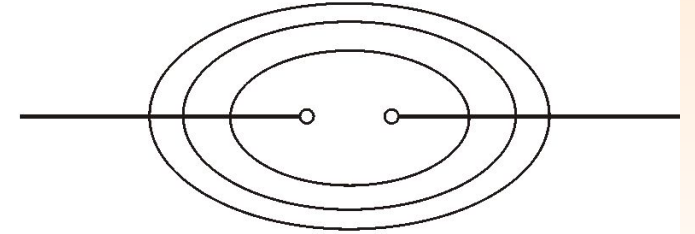
В окружающем конденсатор и катушку пространстве поля практически равны нулю.



а)

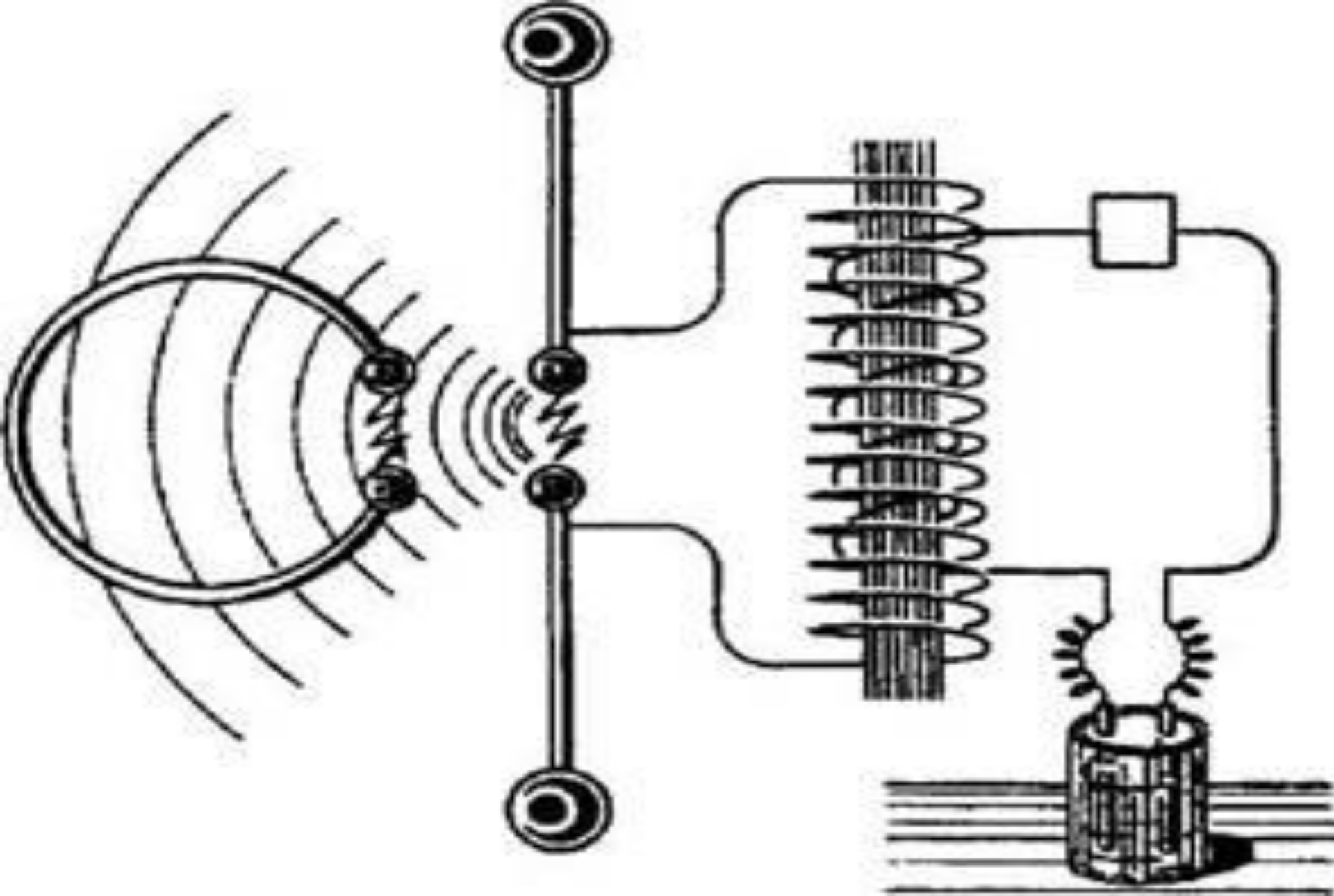


б)

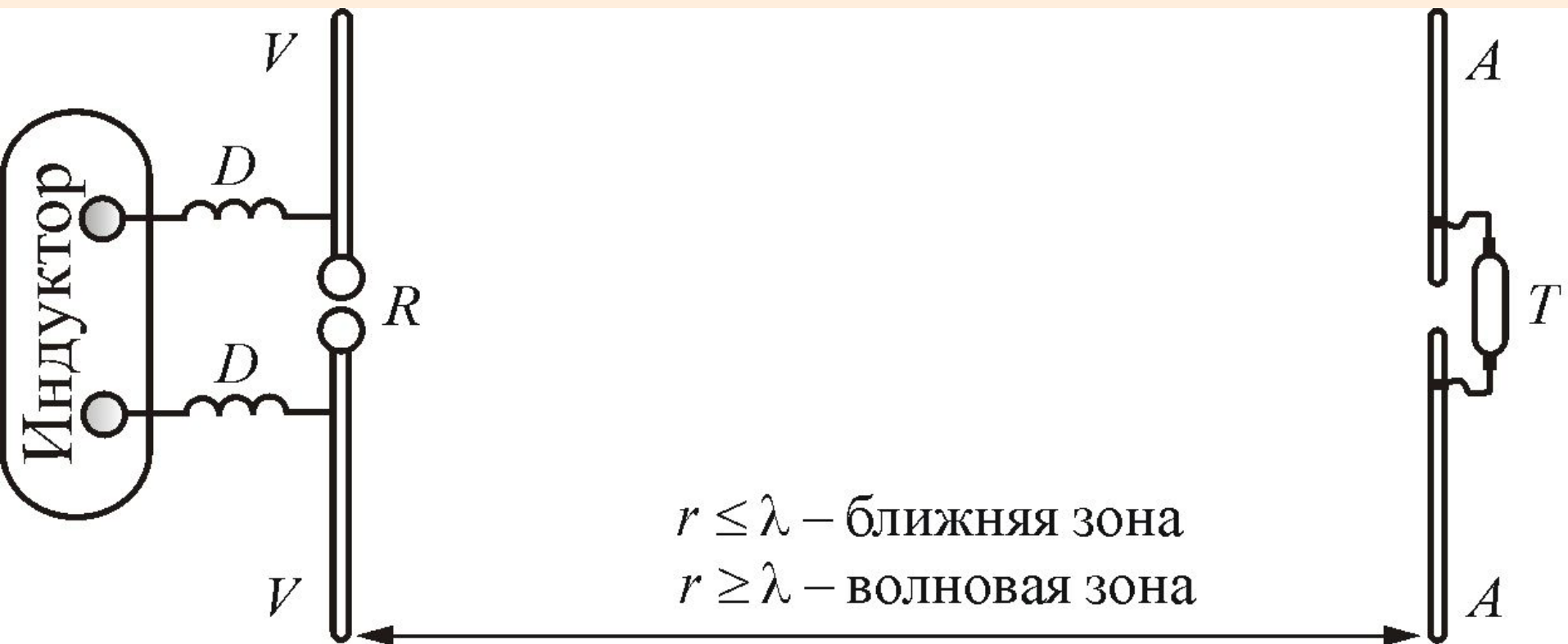


в)

«вибратор Герца»

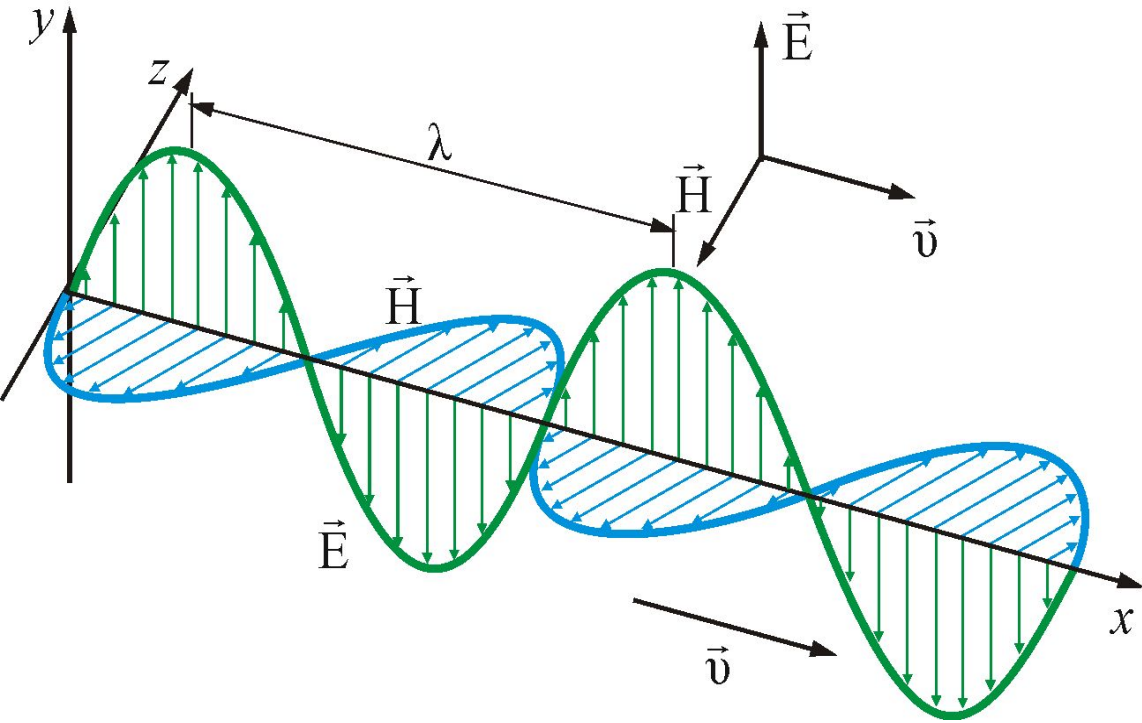


Вибратор Герца и приемник.



**Вибрато
р**

Резонатор



1. В любой точке векторы напряженности электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению распространения волны, т.е. образуют правовинтовую систему.

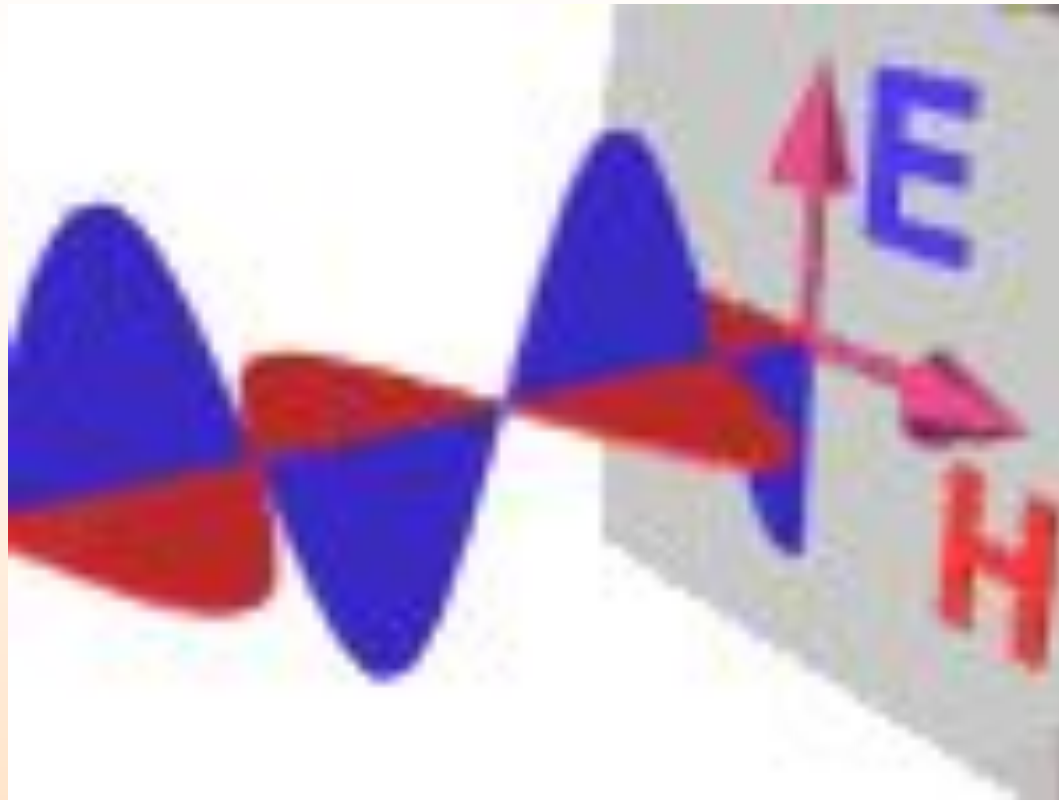
2. Поля изменяют свое направление в пространстве.

3. Электрическое и магнитное поля находятся в фазе.

Движущийся с ускорением электрический заряд испускает электромагнитные волны.

ЭМВ представляют собой поперечные волны и аналогичны другим типам волн.

В ЭМВ происходят колебания полей, а не вещества, как в случае волн на воде или в натянутом шнуре.



7. Дифференциальное уравнение ЭМВ

Векторы напряженности E и H электромагнитного поля удовлетворяют волновым уравнениям типа:

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2}$$

Решение

уравнений:

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 \vec{H}}{dt^2}$$

$$H = H_0 \cos(\omega t - kx + \phi)$$

ϕ – начальная фаза колебаний;

ω – круговая частота

$$k = \frac{\omega}{v} \text{ — волновое число;}$$

Оператор Лапласа -
$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$$

Фазовая скорость ЭМВ:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$$

где $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ – скорость света в вакууме

$$\varepsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$\mu_0 = 1,256637061 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

В веществе скорость распространения электромагнитных волн меньше в n раз.

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

Скорость распространения электромагнитных волн в среде **зависит от ее электрической и магнитной проницаемостей.**

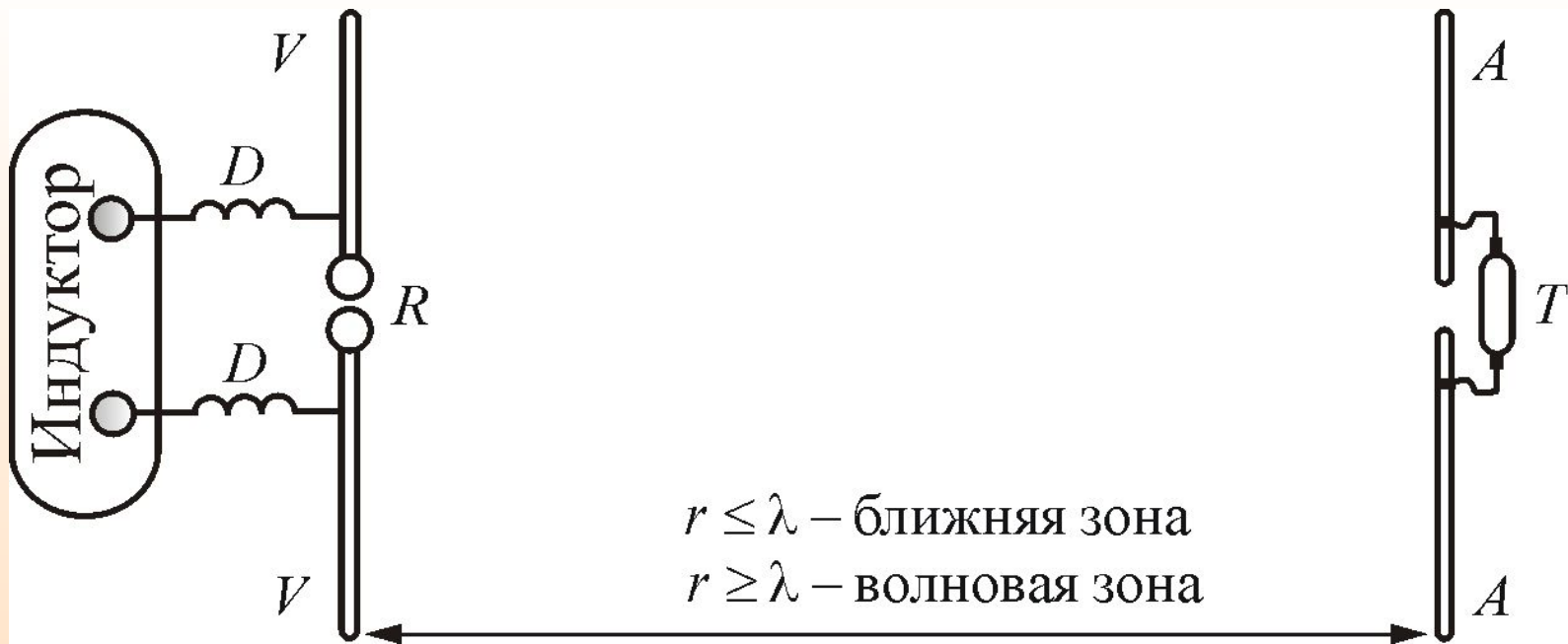
$n = \sqrt{\epsilon\mu}$ - абсолютный показатель преломления.

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

Следовательно, показатель преломления есть физическая величина, равная отношению скорости электромагнитных волн в вакууме к их скорости в среде.

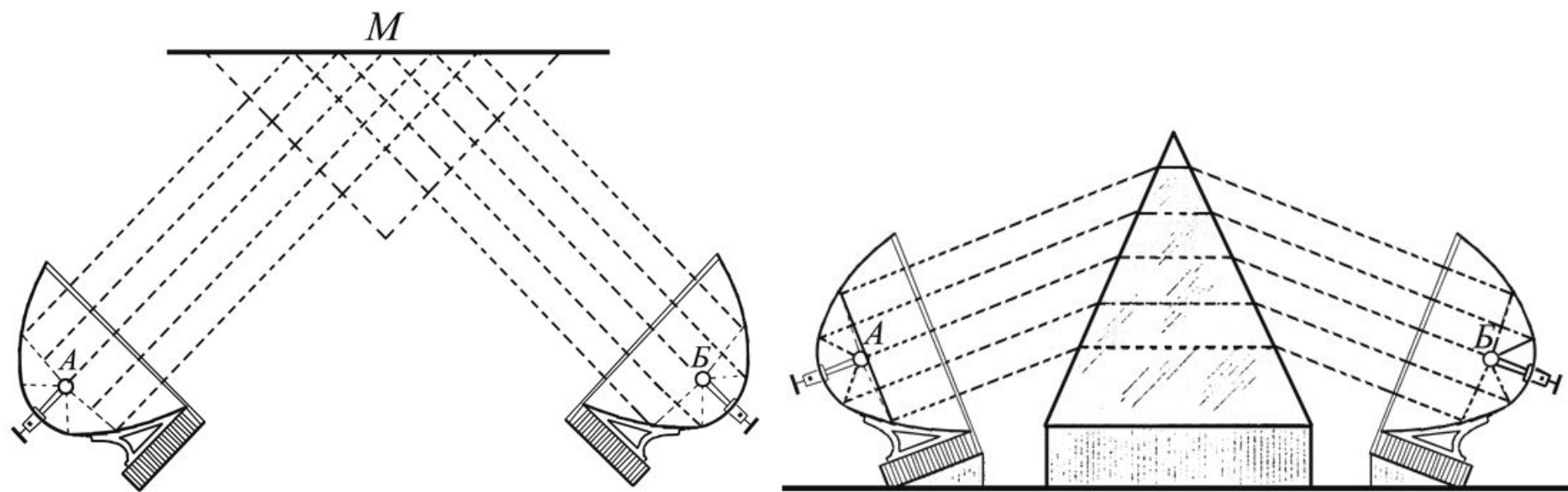
8. Экспериментальное исследование ЭМВ

В ходе своих исследований Герц обнаружил, что **если расстояние между вибратором и приемником (резонатором) меньше одного метра, то поле вибратора в этой области соответствует излучению поля диполем и убывает обратно пропорционально кубу расстояния (эту зону называли ближней зоной).**



На расстояниях более трех метров поле убывает значительно медленнее (это волновая зона) и неодинаково в различных направлениях.

В направлении оси вибратора поле практически исчезает на расстоянии четырех метров, а в направлении, перпендикулярном к оси вибратора, достигает расстояния двенадцати метров и более.



В своих опытах Герц установил **полную аналогию** электромагнитных и световых волн

Было показано, что для электромагнитных волн справедлив закон отражения и преломления

С помощью излучающего вибратора, помещенного в фокусе вогнутого зеркала и плоского зеркала Герц получил **стоячую волну**.

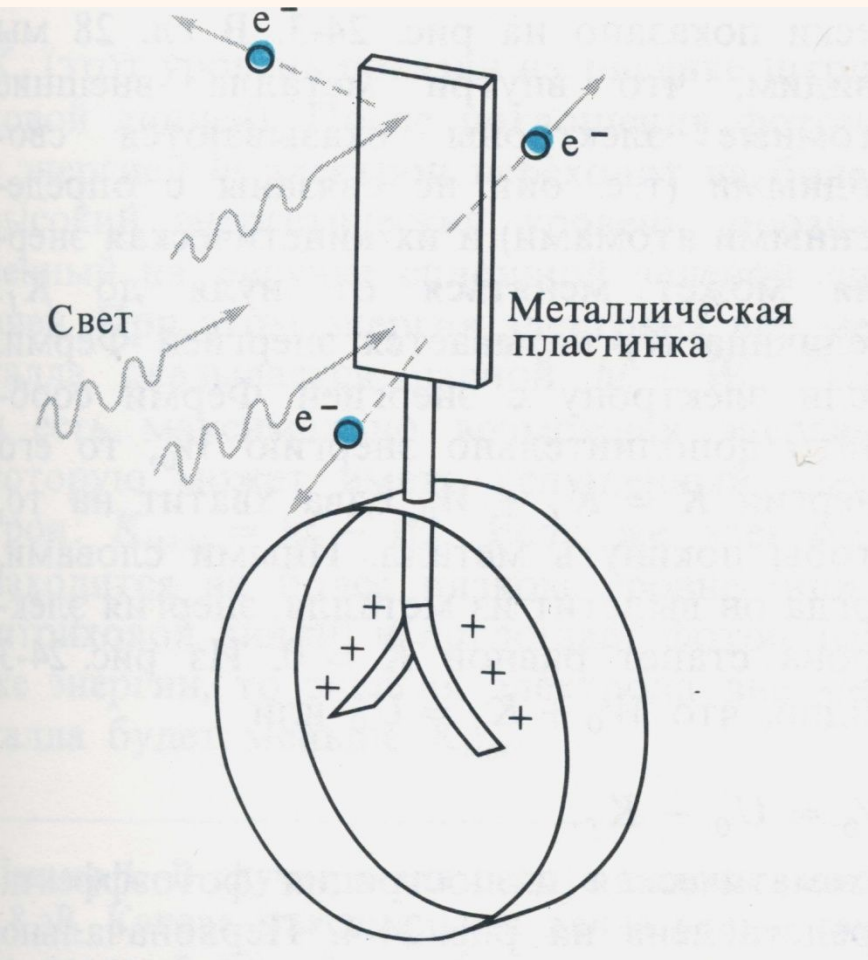
Суперпозиция падающей и отраженной волн:

$$E_y = 2E_0 \cos kx \cos \omega t \quad H_z = 2H_0 \sin kx \sin \omega t$$

Стоячая электромагнитная волна состоит из двух стоячих волн – электрической и магнитной.

Измерив расстояние между узлами и пучностями волны, Герц нашел **длину волны λ**

Герц сделал еще одно **важнейшее открытие** – **фотоэлектрический эффект** (вырывание электрических зарядов с поверхности металлов под действием света).



Нейтральный электроскоп, соединенный с металлической пластинкой.

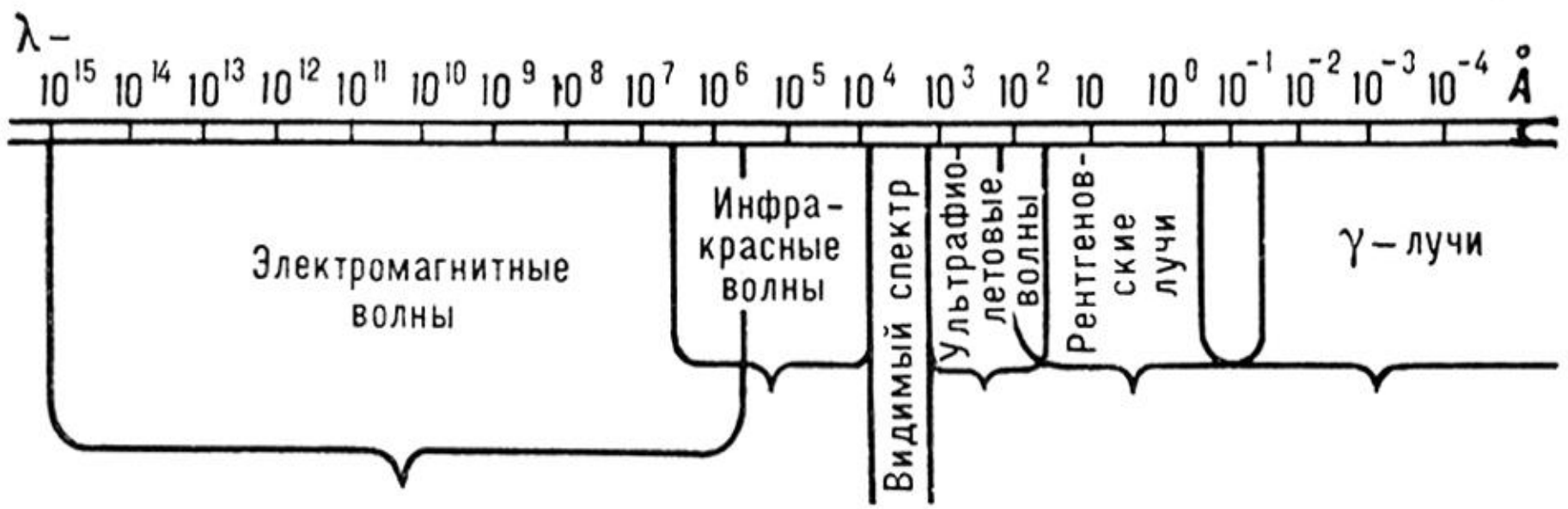
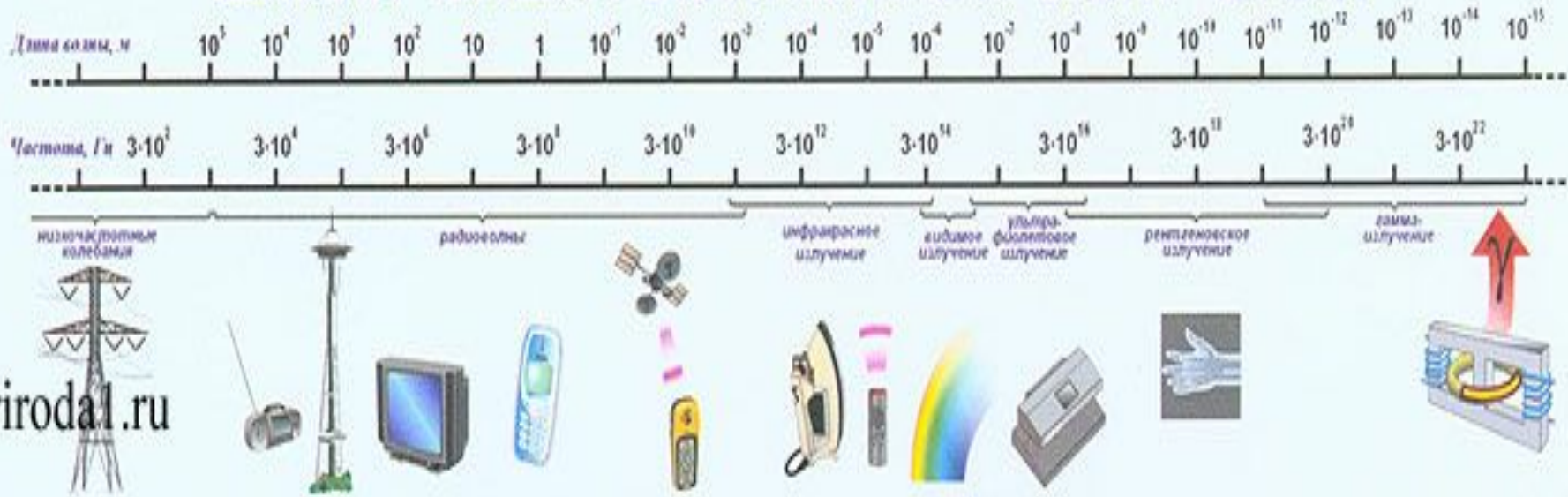
При освещении пластинки светом из нее выбиваются фотоэлектроны, и листочки заряжаются положительно

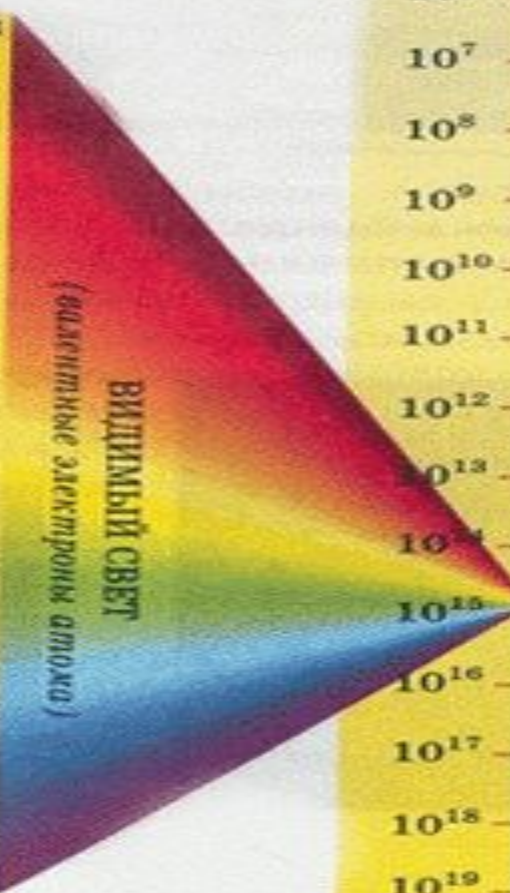
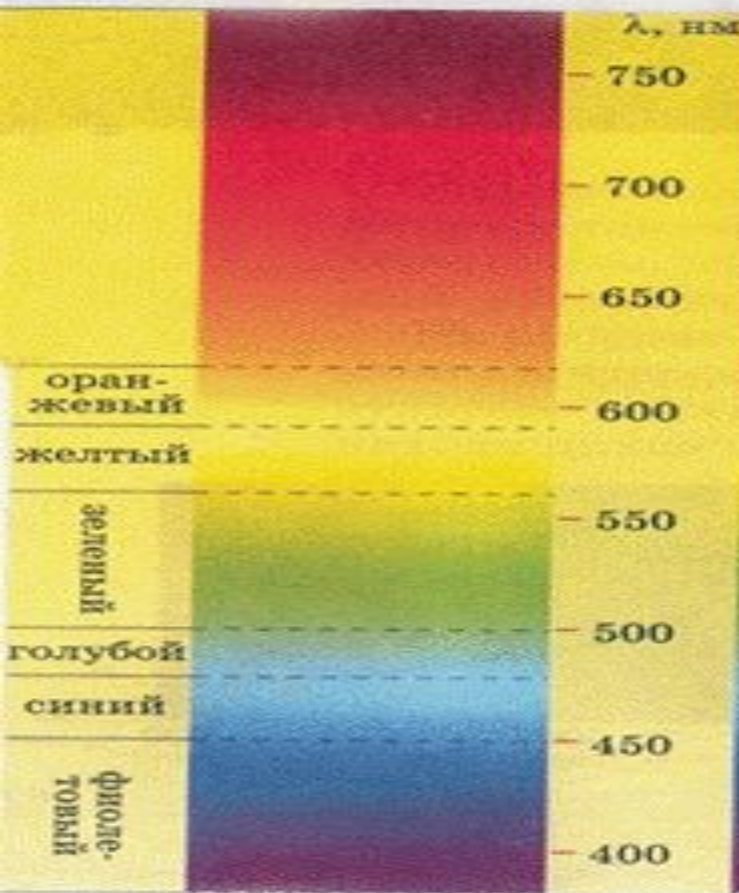
Усовершенствовав вибратор Герца и применив свой приемник, профессор Петербургского электротехнического института **А.С. Попов** 1896 г. впервые в мире наладил опытную радиотелеграфную связь и осуществил с помощью электромагнитных волн передачу сообщения на расстояние около 250 м (**были переданы слова «Генрих Герц»**).

В 1899 г. Попов довел расстояние беспроволочной передачи сигналов **до 50 км**.

Длина	Название	Частота
более 100 км	Низкочастотные электрические колебания	0 – 3 кГц
100 км – 1 мм	Радиоволны	3 кГц – 3 ТГц
100 – 10 км	мираметровые (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 – 300 МГц
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 – 1 пм	Рентгеновское излучение	30 ПГц – 300 ЭГц
<10 пм	Гамма-излучение	>30 ЭГц

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ





Электромагнитные излучения

радиоволны

Инфракрасное
излучение

Видимый
свет

Ультрафиолетовое
излучение

Рентгеновское
излучение

Гамма -
излучение

Шкала электромагнитных излучений.

Шкала электромагнитных волн простирается от **длинных радиоволн** до **гамма – лучей**.

Электромагнитные волны различной длины условно делят на диапазоны по различным признакам (способу получения, способу регистрации, характеру взаимодействия с веществом).

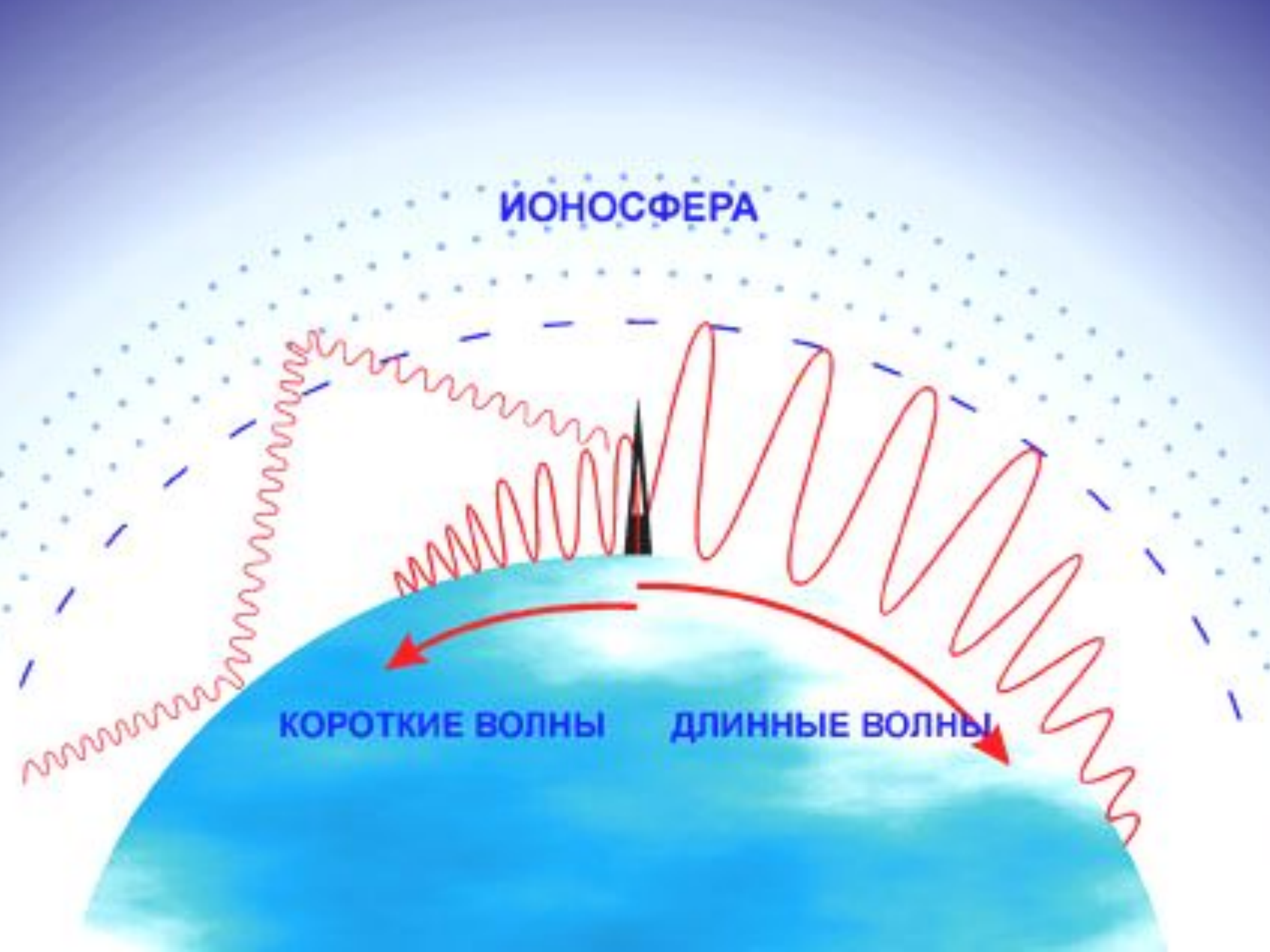


Виды излучений	Длина волны	Получение	Регистрация	Характеристика, свойства	Применение
Радиоволны	10 км ($3 \times 10^4 - 3 \times 10^{12}$ Гц)	Транзисторные цепи	Резонатор Герца, Когерер, антенна	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Связь и навигация
Инфракрасное излучение	0,1 м – 770 нм ($3 \times 10^{12} - 4 \times 10^{14}$ Гц)	Электрический камин	Болометр, Фотоэлемент термостолбик	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Приготовл. пищи Нагревание, сушка, фотокопирование
Видимый свет	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, путем отражения
Ультрафиолетовое излучение	380 – 5 нм ($8 \times 10^{14} - 6 \times 10^{16}$ Гц)	Разрядная трубка, углеродная Дуга	Фотоэлемент Люминесценция, болометр	Фотохимические реакции	Лечение заболеваний кожи, уничтожение бактерий, сторож. устройства
Рентгеновское излучение	5 нм – 10^{-2} нм ($6 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$ Гц)	Рентгеновская трубка	Фотопластинка	Проникающая способность Дифракция	Рентгенография, радиология, обнаружение подделок
γ - излучение	$5 \times 10^{-11} - 10^{-15}$ м	Циклотрон Кобальт - 60	Трубка Гейгера	Порождаются космическими объектами	Стерилизация, Медицина, лечение рака

ИОНОСФЕРА

КОРОТКИЕ ВОЛНЫ

ДЛИННЫЕ ВОЛНЫ



ИОНОСФЕРА

КОРОТКИЕ ВОЛНЫ

УЛЬТРАКОРОТКИЕ ВОЛНЫ

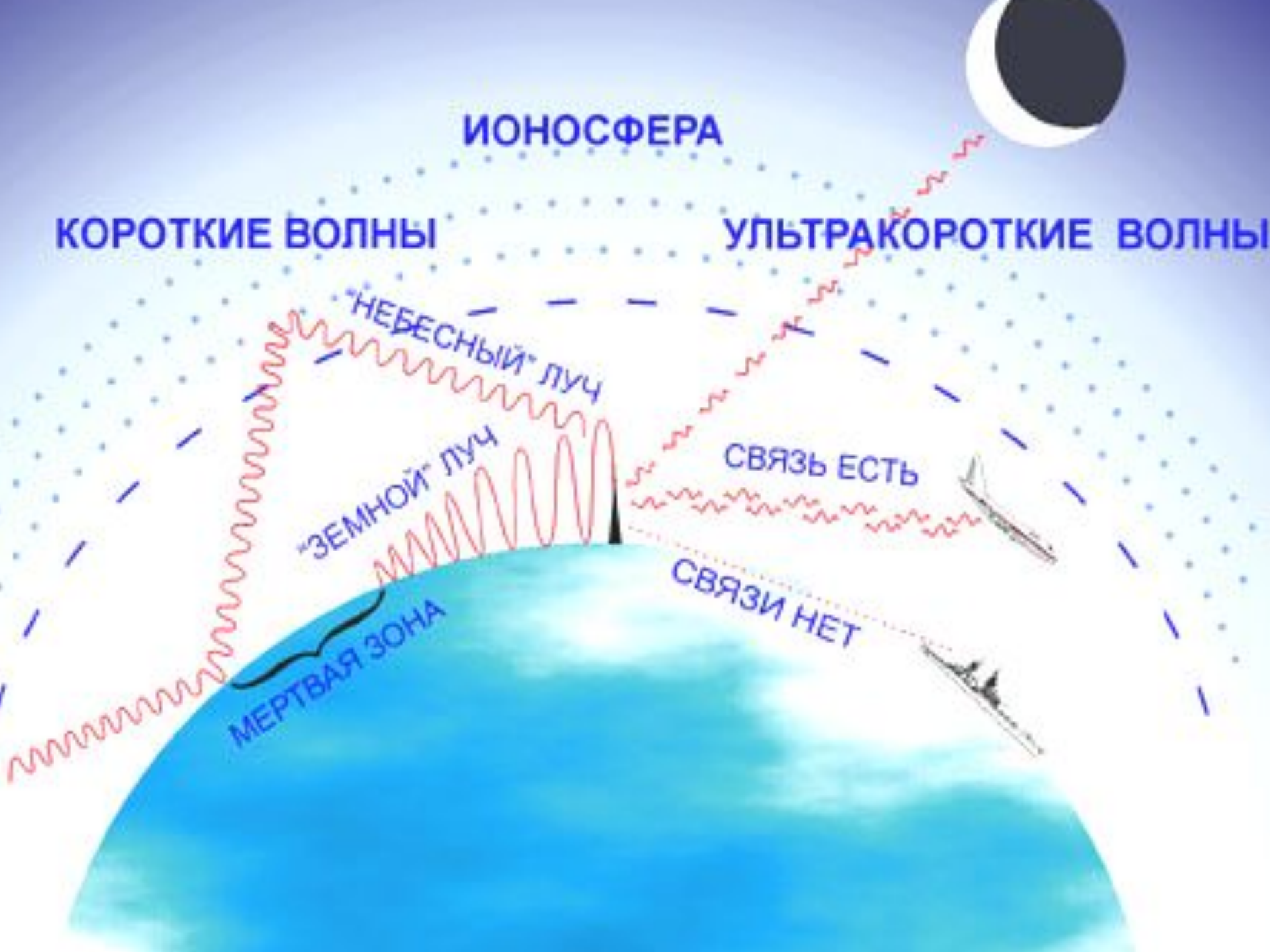
"НЕБЕСНЫЙ" луч

"ЗЕМНОЙ" луч

СВЯЗЬ ЕСТЬ

СВЯЗИ НЕТ

МЕРТВАЯ ЗОНА



Давление света

Световое давление было впервые обнаружено и измерено в 1899 г. в Москве русским ученым П.Н. Лебедевым (1866–1912).

Давление света можно рассчитать по формуле:

$$P = J \frac{1 + K}{c}$$

J — интенсивность света,
 K — коэффициент отражения.

При наклонном падении волны:

$$P = \frac{J}{c} (1 + K) \cos \theta$$

Давление света и электромагнитный импульс настолько малы, что непосредственное их измерение затруднительно.

Так, зеркало, расположенное на расстоянии 1 м от источника света в миллион свечей (кандел), испытывает давление 10^{-7} Н/м².

Давление излучения Солнца на поверхность Земли равно $4,3 \cdot 10^{-6}$ Н/м²

Общее давление излучения Солнца на Землю равно $6 \cdot 10^8$ Н, что в 10^{13} раз меньше силы притяжения Солнца.

9. Энергия ЭМП

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

Для характеристики переносимой волной энергии русским ученым **Н.А Умовым** были введены понятия о скорости и направлении движения энергии, о потоке энергии. Спустя десять лет после этого, в 1884 г. английский ученый **Джон Пойнтинг** **описал** процесс переноса энергии с помощью вектора плотности потока энергии.

Объемная плотность энергии w электромагнитной ВОЛНЫ

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

Поток энергии через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны в единицу времени:

$$S = wv = EH$$

Вектор плотности потока электромагнитной энергии называется вектором Умова - Пойнтинга:

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

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.

