

Сегодня: вторник, 20 мая 2014 г.

Колебания и волны

**Степанова Екатерина Николаевна,
доцент кафедры ОФ ФТИ ТПУ**

Литература

1. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. Физика, ч.3. Оптика, квантовая физика. – Изд.-во ТГУ, 2005
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. оптика, атомная и квантовая физика, физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2001.
5. Фейнман Р. Лекции по физике. – М.: Мир, 1977. Т.4
6. Ларионов В.В., Веретельник В.И., и др. Физический практикум. Ч.2: Электричество и магнетизм. Колебания и волны. – Томск: Изд.-во ТПУ, 2004. – 256 с.
7. Ларионов В.В., Веретельник В.И., и др. Физический практикум. Ч.3: Оптика, квантовая физика. – Томск: Изд.-во ТПУ, 2005. – 218 с.
8. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Наука.
9. Тюрин Ю.И., Ларионов В.В., Чернов И.П. Физика, сборник задач, ч.3. – Изд.-во ТПУ, 2004.

Тема 1. УПРУГИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

- 1. Распространение волн в упругой среде**
- 2. Эффект Доплера**
- 3. Генерация электромагнитных волн (ЭМВ)**
- 4. Дифференциальное уравнение ЭМВ**
- 5. Экспериментальное исследование ЭМВ**
- 6. Энергия и импульс ЭМП**

2.1. Распространение волн в упругой среде

Волна - изменение состояния среды или физического поля (возмущение), распространяющееся либо колеблющееся в пространстве и времени или в фазовом пространстве.

ИЛИ

Волна - изменяющееся со временем пространственное чередование максимумов и минимумов любой физической величины (плотности вещества, напряжённости электрического поля, температуры).

Волновой процесс может иметь самую разную физическую природу: **механическую, химическую, электромагнитную** и т.д.

При распространении волны частицы среды не движутся вместе с волной, а совершают колебания около своих положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частице передается лишь состояние колебательного движения и его энергии. *Основное свойство всех волн независимо от их природы - перенос энергии без переноса вещества.*

Перенос энергии волнами количественно характеризуется *вектором плотности потока энергии* – для упругих волн это *вектор Умова*. Направление этого вектора совпадает с направлением переноса энергии, а его модуль равен энергии, переносимой волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно распространению волн.

Виды волн:

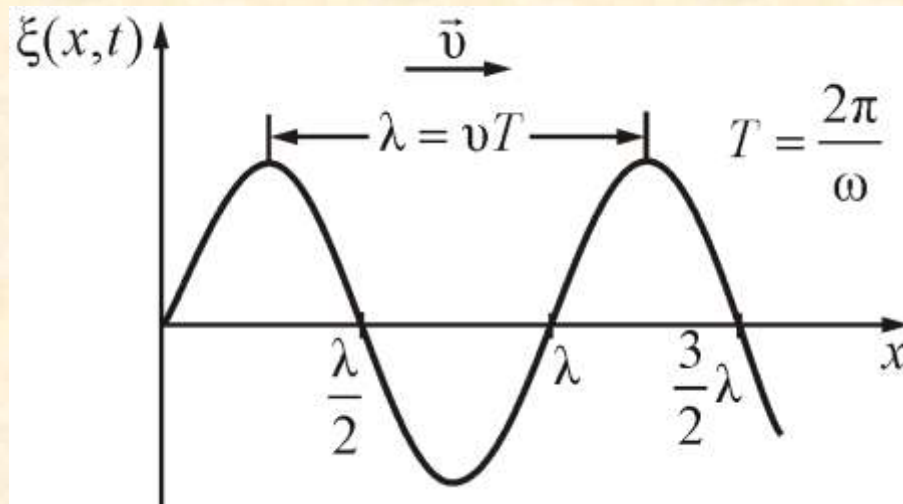
- **поперечные** (колебания происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения).

Наблюдаются в средах, где возникают упругие силы при деформации сдвига (твердых телах);

- **продольные** (сгущение и разряжение частиц среды происходят в направлении распространения). Возбуждаются в средах, где возникают упругие силы при деформации сжатия и растяжения (твердых, жидких и газообразных телах);

Фронт волны - граница, отделяющая колеблющиеся частицы от частиц, еще не начавших колебаться.

В однородной среде направление распространения перпендикулярно фронту волны.



Длина волны λ - расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе:

$$\lambda = v \cdot T$$

где v – скорость распространения волны; $T = \frac{1}{\nu}$ – период;
 ν – частота

Скорость распространения волны можно найти по формуле:

$$v = \lambda \nu$$

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

Волновые поверхности остаются неподвижными (они проходят через положение равновесия частиц, колеблющихся в одинаковой фазе).

Волновой фронт только один и все время перемещается.

В простейших случаях волновые поверхности имеют форму **плоскости** или **сферы**.

Уравнение волны – выражение, которое дает **смещение** колеблющейся точки ξ как функцию ее координат (x, y, z) и времени t .

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

Уравнение плоской волны

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

ИЛИ

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

где $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{2\pi v}{v} = \frac{\omega}{v}$ - волновое число

или в векторной форме $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}$

где \vec{k} – волновой вектор,
 \vec{n} – нормаль к волновой поверхности

Уравнение сферической волны

Сферическая волна – такая волна, скорость v которой во всех направлениях постоянна, а источник точечный.

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

Уравнение сферической волны:

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

r – расстояние от центра волны до рассматриваемой точки среды.

Фазовая скорость – это скорость распространения фазы

ВОЛНЫ.

если $\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) = \text{const}$, то $1 - \frac{1}{v} \frac{dx}{dt} = 0$

$\frac{dx}{dt} = v$ – скорость распространения фазы есть
скорость распространения волны

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.

Строго *монохроматическая* волна представляет собой бесконечную во времени и пространстве последовательность «горбов» и «впадин».

$$\xi = \xi_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

Фазовая скорость этой волны

$$v = \frac{\omega}{k} \quad \text{или} \quad v = \lambda \nu$$

Волновой пакет или группа волн - суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте.

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

Групповая скорость - скорость, с которой перемещается центр пакета (точка с максимальным значением амплитуды).

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

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

Максимум амплитуды будет определяться условием

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

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

$$v = \frac{\omega}{k} \text{ — фазовая скорость, то}$$

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta k} = u \text{ — групповая скорость}$$

В пределе $u = \frac{d\omega}{dk}$

$$\frac{dv}{d\lambda} = 0 \quad u = v$$

Когерентные волны - это волны, обладающие постоянной разностью фаз. При сложении когерентных волн возникает **явление интерференции**.

Пусть две плоских волны, распространяются в противоположных направлениях (начальная фаза равна 0):

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

Сложим уравнения и преобразуем.

Уравнение стоячей волны

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

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

В точках, где координаты удовлетворяют условию $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm n\pi$

$$(n = 1, 2, 3, \dots), \quad \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) = 1$$

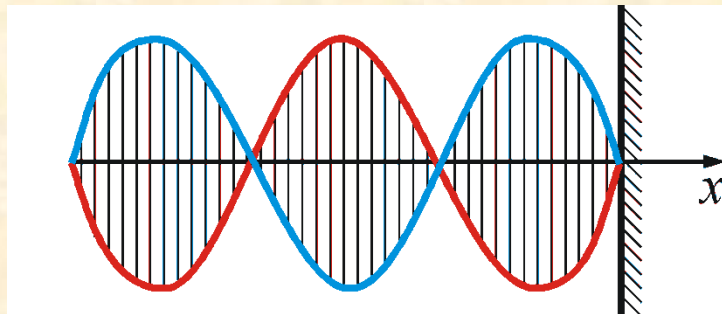
суммарная амплитуда равна максимальному значению: $A^* = 2A$, – это **пучности** стоячей волны.

Координаты пучностей: $x_{\text{пучн}} = \pm n\lambda / 2$

В точках, координаты которых удовлетворяют условию $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm(n + \frac{1}{2})\pi$

$\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = 0$ и суммарная амплитуда колебаний равна нулю $A^* = 0$, –

это **узлы** стоячей волны. **Координаты узлов:** $x_{\text{узл}} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}$

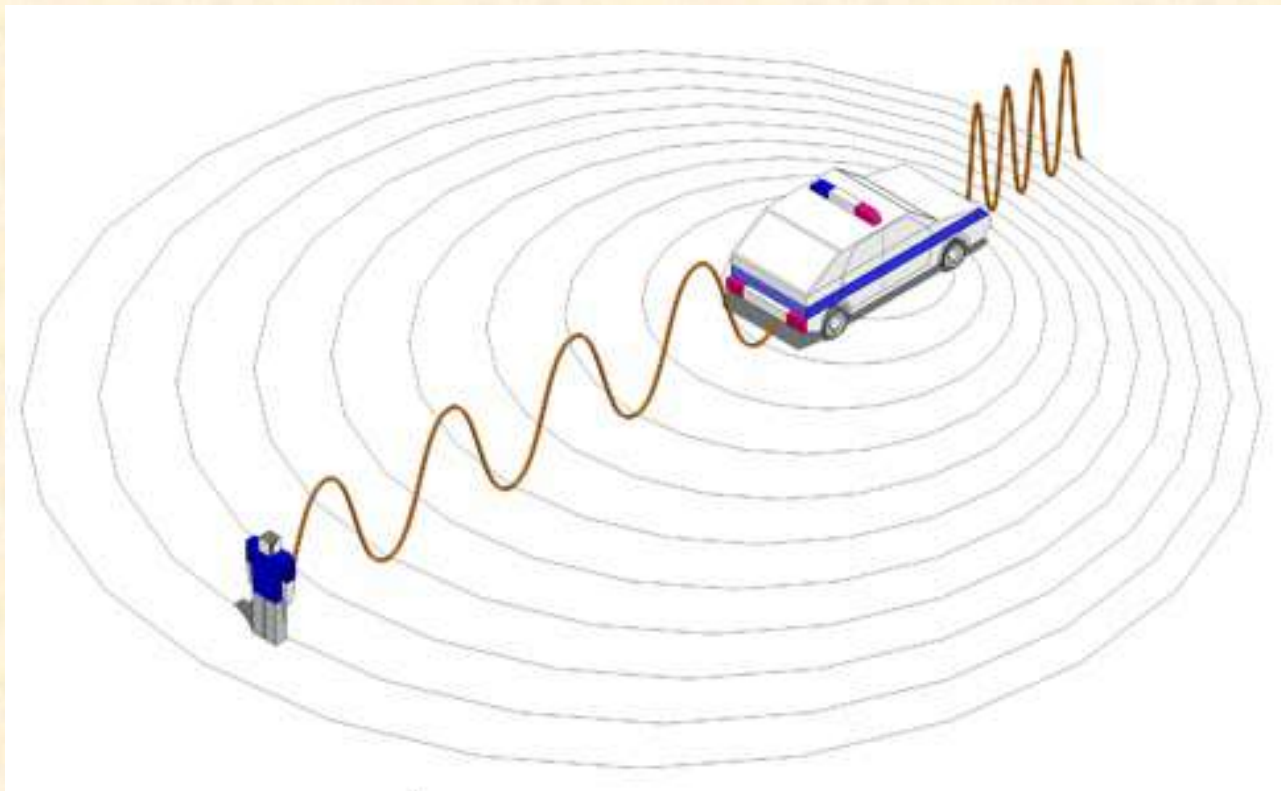


2.2. Эффект Доплера



Доплер Христиан (1803 – 1853), австрийский физик и астроном, член Венской АН (1848 г.). Учился в Зальцбурге и Вене. С 1847 г. профессор Горной академии в Хемнице, с 1850 г. профессор Политехнического института и университета в Вене.

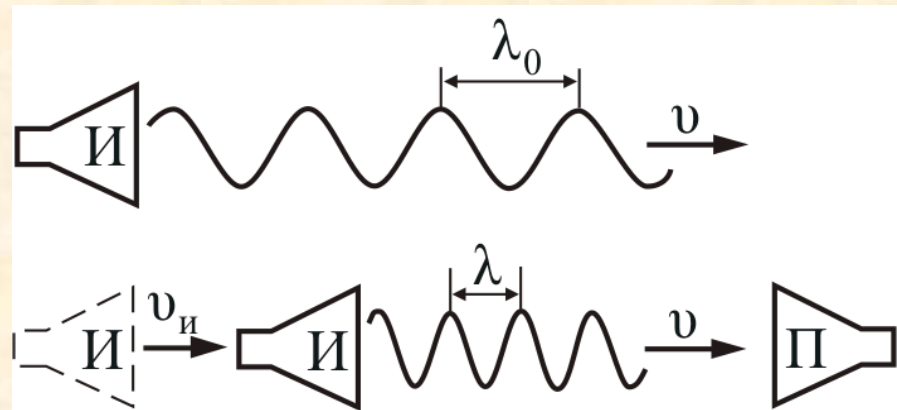
Основные труды посвящены абберации света, теории микроскопа и оптического дальномера, теории цветов и др. В 1842 г. теоретически обосновал зависимость частоты колебаний, воспринимаемых наблюдателем, от скорости и направления движения наблюдателя относительно источника колебаний.



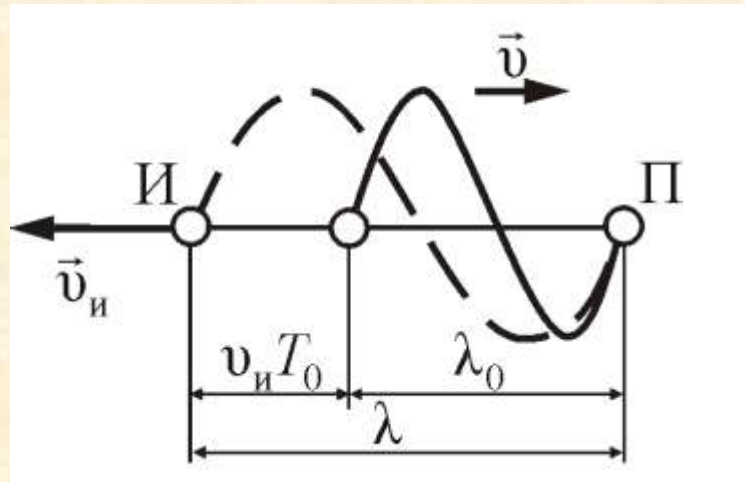
Машина «с мигалкой», проезжающая мимо неподвижного наблюдателя, то звук сирены меняется: **когда машина вас обгоняет, тон становится ниже.** Это и есть **эффект Доплера.**

Эффект Доплера – изменение частоты (длины волны), регистрируемой приёмником, вызванное движением источника этих волн и приёмника.

Если источник волн движется относительно среды, то длина волны зависит от скорости и направления движения. Если источник движется по направлению к приёмнику, то есть «догоняет» испускаемые им волны (как бы сжимает пружину – волну), то длина волны уменьшается. Если удаляется – длина волны увеличивается.



Рассмотрим несколько случаев проявления **акустического эффекта Доплера**.



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

$$v_И T_0 = \frac{v_И}{v_0},$$

где v_0 – частота колебаний источника.

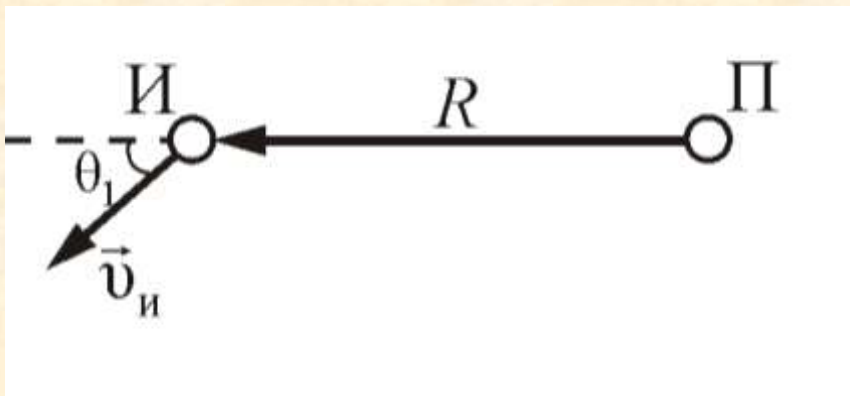
$$\lambda = \lambda_0 + v_{\text{И}} T_0 = (v + v_{\text{И}}) T_0 = \frac{(v + v_{\text{И}})}{v_0}$$

v – фазовая скорость волны в среде.

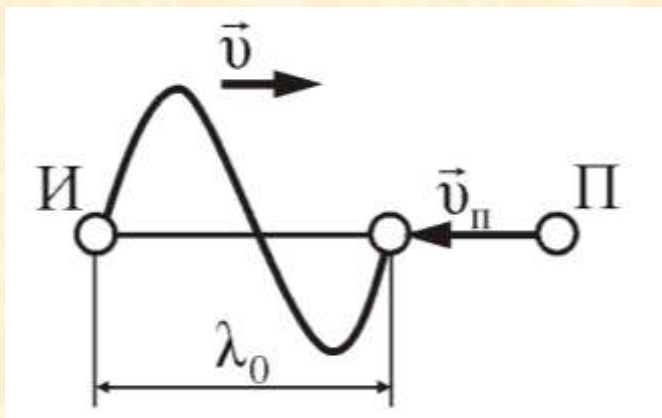
Частота волны, регистрируемая приемником,

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

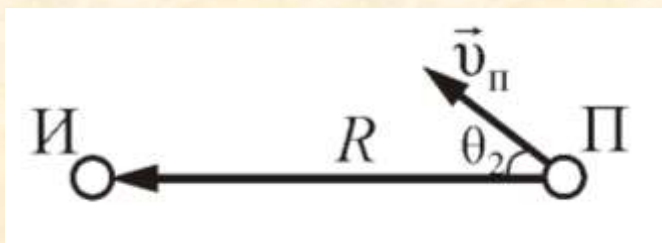
Если вектор $\vec{v}_{\text{И}}$ скорости источника направлен под произвольным углом θ_1 к радиус-вектору \vec{R} .



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

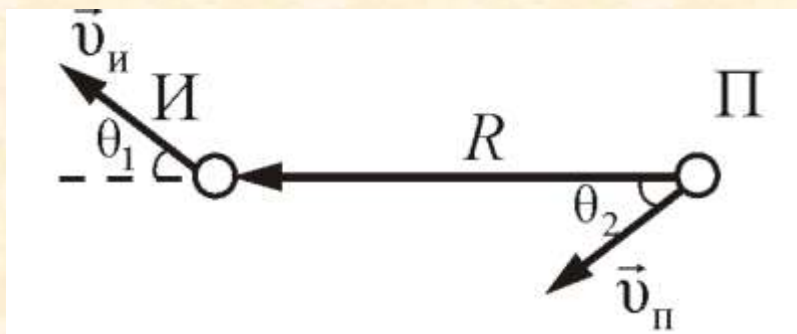


$$v = (v + v_{\text{П}}) / \lambda_0 = v_0 (1 + v_{\text{П}} / v).$$



$$v = v_0 [1 + (v_{\text{П}} / v) \cos \theta_2]$$

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



$$v = v_0 \frac{1 + (v_{\text{П}} / v) \cos \theta_2}{1 + (v_{\text{И}} / v) \cos \theta_1}$$

Оптический эффект Доплера

Закономерности этого явления для электромагнитных волн можно установить только на основе специальной теории относительности.

Соотношение, описывающее эффект Доплера для электромагнитных волн в вакууме, с учетом преобразований Лоренца, имеют вид:

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

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

В случае сближения источника и приемника ($\theta = \pi$)

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} > v_0$$

а в случае их взаимного удаления ($\theta = 0$)

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}} < v_0$$

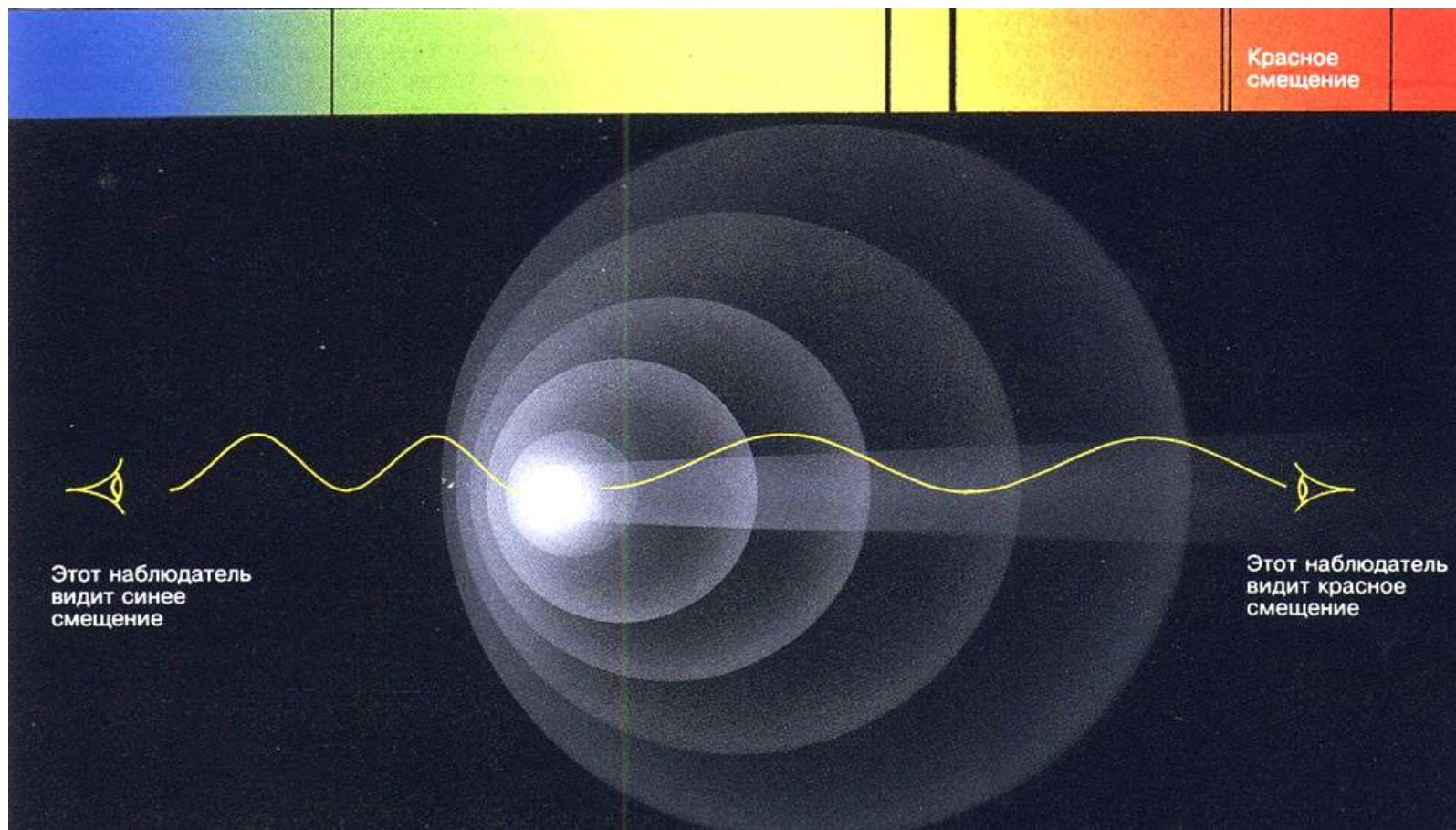
Из релятивистской теории эффекта Доплера следует также существование ***поперечного эффекта Доплера***, наблюдающегося при $\theta = \pi/2$ и $\theta = 3\pi/2$.

$$v = v_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} < v_0$$

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: $v \ll c$ по формуле (1)

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

Эффект Доплера



Зависимость частоты и длины волны от
относительной скорости движения

Американский астроном Эдвин Хаббл, впервые измеряя расстояния до ближайших галактик на новейшем телескопе, одновременно обнаружил в 1929 г. в спектре их атомного излучения красное доплеровское смещение, состоящее в том, что линии в спектрах излучения внегалактических объектов смещены в сторону меньших частот (больших длин волн). Исходя из этого был сделан вывод, что галактики удаляются от нас (Закон Хаббла).

Когда же Хаббл обнаружил, что чем дальше галактика, тем сильнее красное смещение (и тем быстрее она от нас улетает), оно понял, что

Вселенная расширяется.

Это стало первым шагом на пути к теории **Большого взрыва**.

Космологическое красное смещение есть не что иное, как 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 растет пропорционально расстоянию r до них.*

Закон Хаббла можно записать в виде:

$$v \cdot \cos\theta \approx c \cdot z = H \cdot r$$

где H – постоянная Хаббла. По самым современным оценкам, проведенным в 2003 г., $H = 73,2$ км(с·Мпк).

(1 пк (парсек) – расстояние, которое свет проходит в вакууме за 3,27 лет (1 пк $\approx 3,09 \cdot 10^{16}$ м)).

На эффекте Доплера основаны радиолокационные лазерные методы измерения скоростей различных объектов на Земле (например, автомобиля, самолета и др.).

2.3. Генерация ЭМВ

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

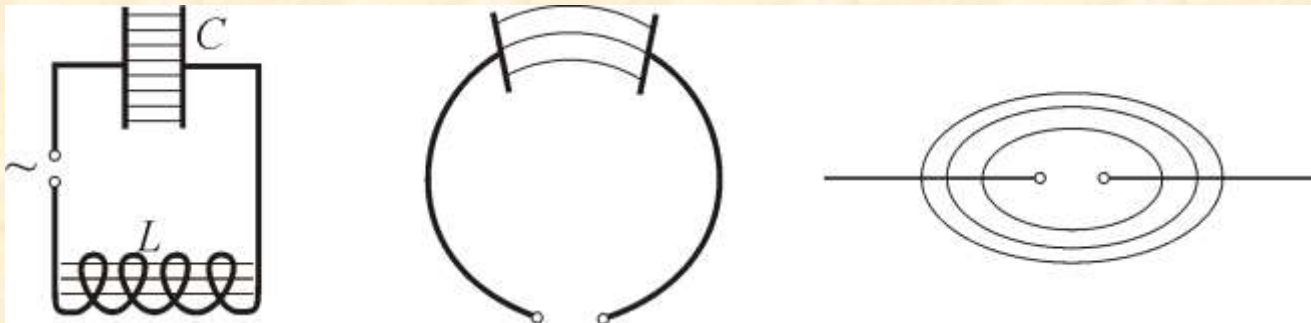


Герц Генрих Рудольф (1857 – 1894) – немецкий физик. Окончил Берлинский университет (1880 г.) и был ассистентом у Г. Гельмгольца. В 1885 – 1889 гг. – профессор Высшей технической школы в Карлсруэ. Основные работы относятся к электродинамике, одним из основоположников которой он является, и механике.

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. Исследования Герца посвящены также катодным лучам, теории удара упругих тел и т.п.

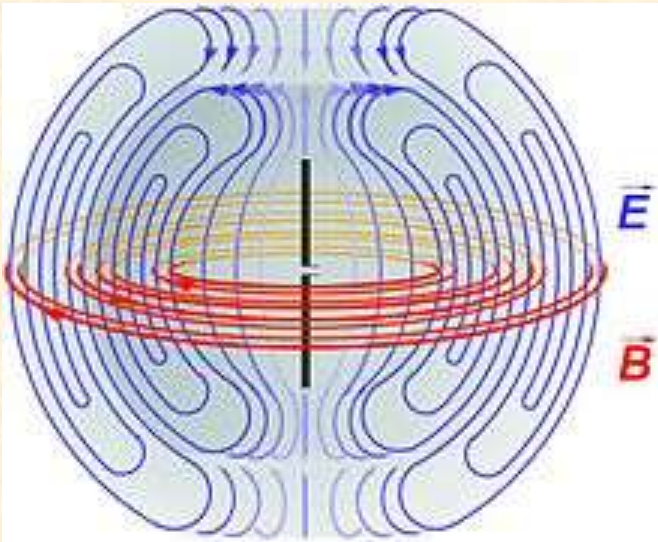
В окружающем конденсатор и катушку пространстве поля практически равны нулю, поэтому заметного излучения электромагнитных волн не происходит. Для излучения волны необходимо увеличить расстояние между обкладками конденсатора и между витками катушки. В результате получаем прибор, названный впоследствии ***вибратором Герца***.

Процесс видоизменений:



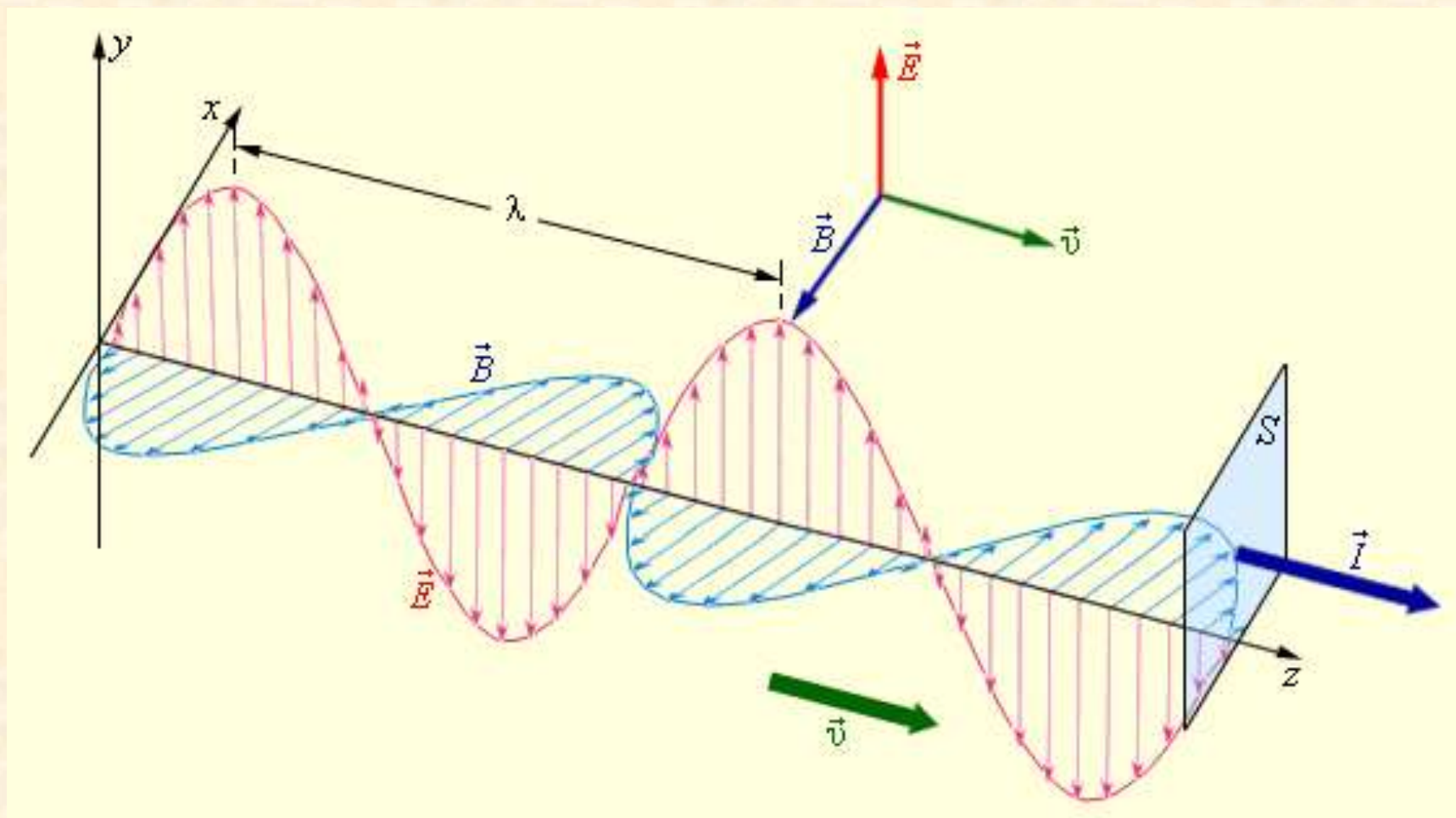
При этом сильно уменьшается емкость и индуктивность контура, что также приводит к увеличению частоты колебаний (к уменьшению длины волны). С волнами меньшей длины легче экспериментировать.

Вибратор Герца (диполь Герца, антенна Герца) — простейшая система для получения электромагнитных колебаний, электрический диполь, дипольный момент которого быстро изменяется во времени. Технический эквивалент — небольшая антенна, размер которой много меньше длины волны. Герц использовал подобное устройство в качестве излучающей и приёмной антенн в своих опытах, подтвердивших существование электромагнитных волн.



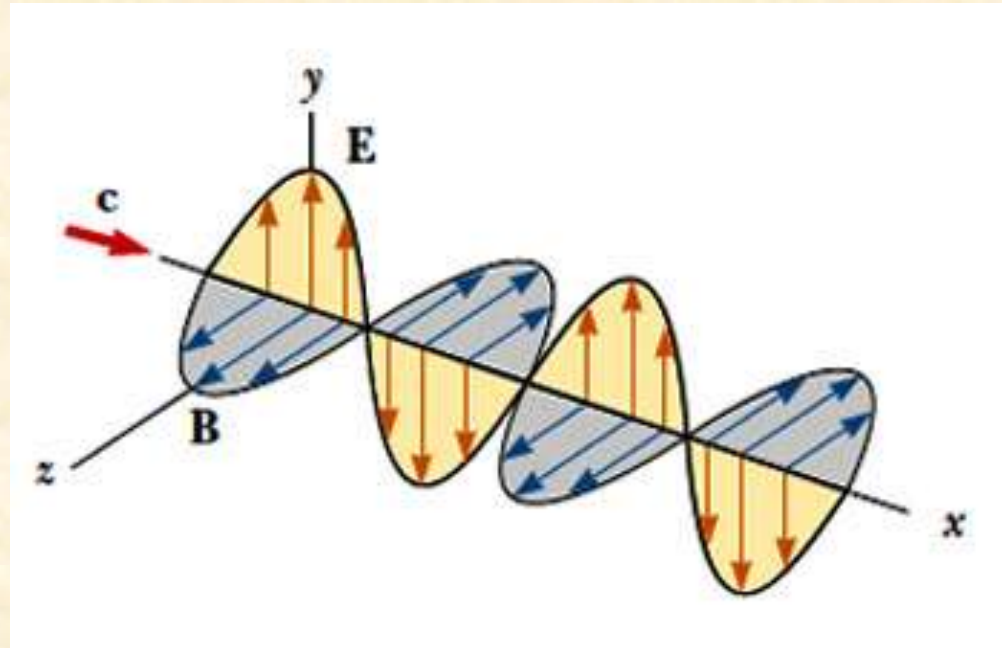
Конструкция: медный стержень с металлическими шарами на концах, в искровой промежутке которого включалась катушка. Наименьший из вибраторов Герца (26 см) позволял получить колебания с частотой порядка 5×10^8 Гц (длина волны 60 см).

ЭМВ распространяются в пространстве, удаляясь от вибратора во все стороны.



Основные свойства ЭМВ

- 1) в любой точке векторы напряженности электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны между собой и направлением распространения волны;
- 2) Электрическое и магнитное поля изменяют свое направление в пространстве;
- 3) электрическое и магнитное поля находятся в фазе, т.е. они достигают максимума и обращаются в нуль в одних и тех же точках.



Электромагнитные волны представляют собой *поперечные волны* и аналогичны другим типам волн.

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

Справедливо утверждение: *движущийся с ускорением электрический заряд испускает электромагнитные волны.*

2.4. Дифференциальное уравнение ЭМВ

Векторы напряженности \vec{E} и \vec{H} электромагнитного поля удовлетворяют волновым уравнениям типа

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

где $\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$ – оператор Лапласа,

v – фазовая скорость.

Фазовая скорость ЭМВ определяется выражением

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

где $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ – скорость света в вакууме;

$$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$$

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

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

В веществе скорость распространения электромагнитных возмущений меньше в $n = \sqrt{\epsilon \mu}$ раз.

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

Величину

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

называют ***абсолютным показателем преломления***. С учетом последнего имеем:

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

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

Выводы:

- 1) векторы \vec{E} , \vec{H} и \vec{U} взаимно перпендикулярны, т. к. \vec{k} и \vec{U} направлены одинаково;
- 2) электромагнитная волна является поперечной;
- 3) электрическая и магнитная составляющие распространяются в одном направлении;
- 4) векторы \vec{E} и \vec{H} колеблются в одинаковых фазах.

2.5. Экспериментальное исследование ЭМВ

Анализируя излучение вибратора, Герц дополнил теорию Максвелла теорией электромагнитного излучения, впервые получил электромагнитные волны, предсказанные Максвеллом, и доказал их тождество с волнами света.

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

Опыты Герца были продолжены П.Н. Лебедевым, который в 1894 г. получил ЭМВ длиной 4–6 мм и исследовал прохождение их в кристаллах. При этом было обнаружено двойное преломление волн.

Дальнейшее развитие методики эксперимента продолжено в 1923 г., когда А.А. Глаголева-Аркадьева сконструировала массовый излучатель, в котором короткие ЭМВ, возбужденные колебаниями электрических зарядов в атомах и молекулах, генерировались с помощью искр, между металлическими опилками, взвешенными в масле. Так были получены волны длиной λ от 50 мм до 80 мкм.

Усовершенствовав вибратор Герца и применив свой приемник, профессор Петербургского электротехнического института А.С. Попов в 1896 г. впервые в мире наладил опытную радиотелеграфную связь и осуществил с помощью электромагнитных волн передачу сообщения на расстояние около 250 м. Тем самым было положено основание радиотехнике. В 1899 г. Попов довел расстояние беспроводной передачи сигналов до 50 км.

В 1901 г. была осуществлена радиотелеграфная связь через Атлантический океан. Изобретение электронных ламп (1904 – 1907) и применение их для генерирования незатухающих колебаний (1913 г.) сделали возможным развитие радиотелеграфии и радиовещания. В 1920-1930-х гг. весь мир покрылся сетью мощных радиопередающих станций.

Шкала электромагнитных излучений

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).

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

Луи де Бройль

Chart of the Electromagnetic Spectrum

Size reference



wavelength λ (m)	10^3	10^2	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
wavenumber (cm ⁻¹)	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}
electron volt (eV)	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
frequency (Hz)	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}

Bands	Radio Spectrum										Terahertz		Infrared		Ultraviolet		X-ray		Gamma		
	Broadcast and Wireless					Microwave							Far IR Mid IR		Near IR		Near UV Extreme UV		Soft X-ray Hard X-ray		

Sources and Uses of Frequency Bands

- AM radio:** 600kHz-1.6MHz
- FM radio:** 88-108 MHz
- Mobile Phones:** 900MHz-2.4GHz
- Radar:** 1-100 GHz
- TV Broadcast:** 54-700 MHz
- Wireless Data:** ~ 2.4 GHz
- Ultrasound:** 1-20 MHz
- Sound Waves:** 20Hz-10kHz
- Microwave Oven:** 2.4 GHz
- Screening:** 0.2-4.0 THz
- mm wave / sub-mm:** 0.2-4.0 THz
- Remotes:** 850 nm
- Night Vision:** 10-0.7 μ
- Visible Light:** 425-750THz, 700-400nm
- Suntan:** 400-290nm
- Visible wavelengths (nm):** 700 (red), 625 (orange), 575 (yellow), 540 (green), 470 (blue), 440 (violet)
- Fiber telecom:** 0.7-1.4 μ
- Dental Curing:** 200-350nm
- Medical X-rays:** 10-0.1 Å
- Cosmic ray observations:** << 1 Å
- Baggage screen:** 10-1.0 Å
- Crystallography:** 2.2-0.7 Å
- PET imaging:** 0.1-0.01 Å

$$\lambda = 3 \times 10^8 / \text{freq} = 1 / (\text{wn} * 100) = 1.24 \times 10^{-6} / \text{eV}$$

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

2.6. Энергия и импульс 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

$$w = w_{\text{э}} + w_{\text{м}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

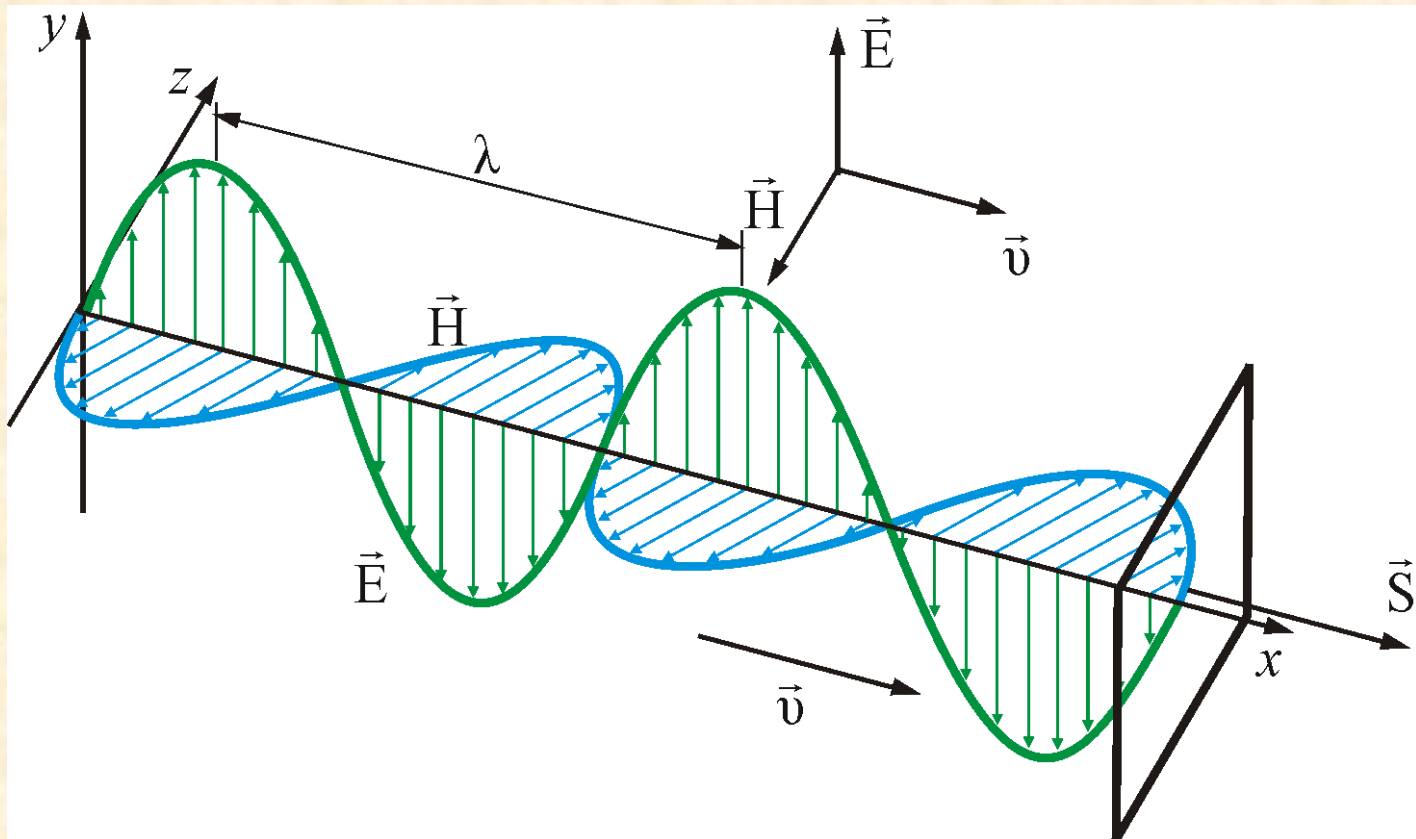
Поток энергии через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны в единицу времени:

$$S = wv = EH$$

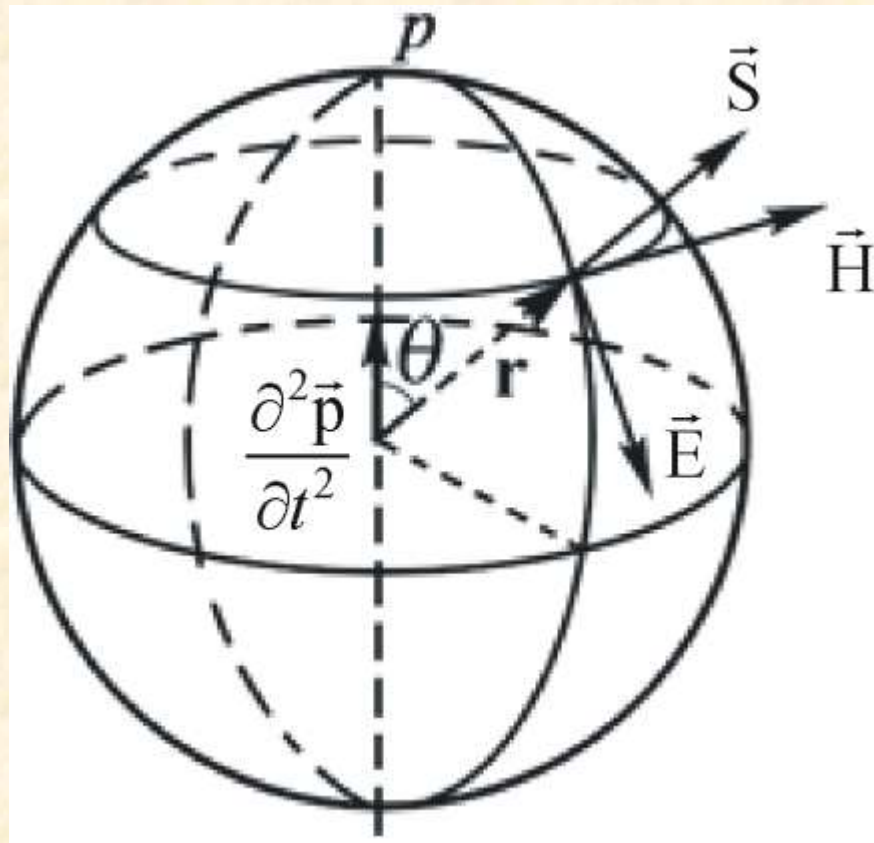
Вектор плотности потока электромагнитной энергии называется ***вектором Умова-Пойнтинга***:

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

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.



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



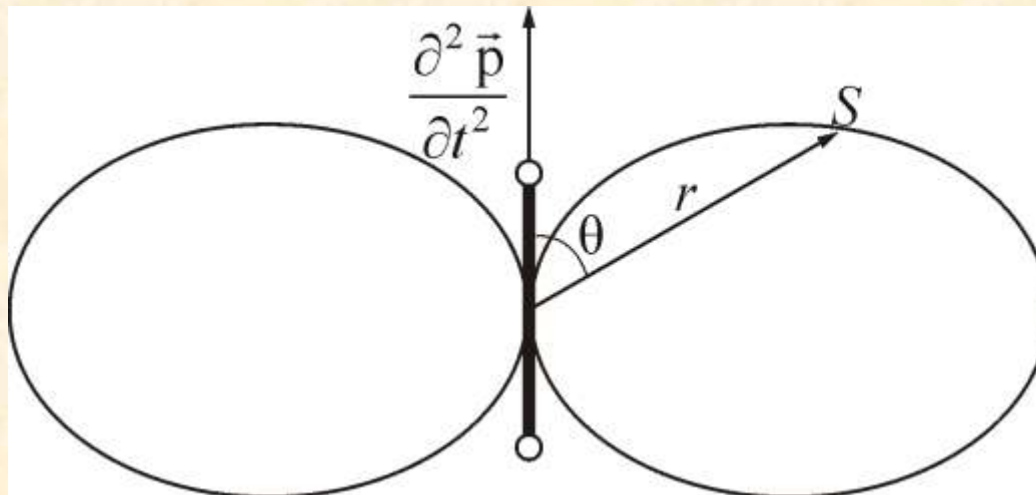
Модуль среднего значения вектора Умова-Пойнтинга называется **интенсивностью**:

$$J = \left| \langle \vec{S} \rangle \right|$$

Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды:

$$J = \frac{\sin^2 \theta}{r^2}$$

Зависимость интенсивности излучения от направления называют **диаграммой направленности**.



Электромагнитная масса и импульс

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

$$p = mc = \frac{E}{c} \qquad E = mc^2$$

$$m = m_{\text{мех}} + m_{\text{эл}} \qquad \vec{p} = m\vec{v}$$

$$m_{\text{эл}} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2 4\pi\epsilon_0}$$

Для электромагнитного импульса получается релятивистски инвариантная формула:

$$\vec{p} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2 4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$