*

Электромагнитные волны

Ура!

Последняя часть физики!

Как мы дружим в этом семестре:

Форма контроля – экзамен			
Оценочные мероприятия		Кол-во	Баллы
Текущий контроль:			80
ТК1	Выполнение лабораторных работ	5	5
ТК2	Защита лабораторной работы	5	5
ТК3	Защита ИДЗ	2	10
ТК4	Коллоквиум	2	14
ТК5	Контрольная работа	2	10
НК	Независимый контроль ЦОКО	2	30
ЭК	Электронный образовательный ресурс (ДОТ) (дата выгрузки 23.12.2022 в 00:00 часов)		6
	Экзамен		20
	ИТОГО		100

КОЛЛОКВИУМ №5

1. Электромагнитные волны:
- образование свободных электромагнитных волн,
- плоские электромагнитные волны, свойства электромагнитных волн, стоячие электромагнитные волны,
- энергия электромагнитных волн.
2. Интерференция света:
- принцип Гюйгенса,
- интерференция,
- классические интерференционные опыты,
- пространственная когерентность,
- временная когерентность,
- интерференция в тонких пленках.
3. Дифракция света:
- понятие дифракции,
- принцип Гюйгенса – Френеля,
- зоны Френеля,
- дифракция Френеля от простейших преград,
- дифракция Фраунгофера,
- дифракционная решетка.
4. Поляризация света:
- поляризованный и естественный свет,
- закон Малюса,
- поляризация при отражении и преломлении,
- поляризация при двойном лучепреломлении,
- поляризационные устройства,
- интерференция поляризованных лучей,
- анализ поляризованного света,
- искусственное двойное лучепреломление,
- вращение плоскости поляризации.
5. Взаимодействие света с веществом, дисперсия света, групповая скорость, элементарная теория дисперсии, поглощение света, рассеяние света.
6. Квантовая природа излучения: тепловое излучение, закон Кирхгофа, законы Стефана – Больцмана, Вина, формула Планка.
7. Квантовая природа излучения: внешний фотоэффект, фотоны, эффект Комптона, рентгеновское излучение, давление света

Вопросы к теоретическому коллоквиуму № 6.

1. Тепловое излучение. Закон Кирхгофа, энергетическая светимость испускательная способность.
2. Излучение абсолютно черного тела. Закон Стефана-Больцмана. Закон смещения Вина.
3. Излучение абсолютно черного тела. Формула Рэлея - Джинса. Формула Планка
4. Фотоэффект. Основные закономерности фотоэффекта. Формула Эйнштейна.
5. Эффект Комптона.
6. Рентгеновское излучение
7. Давление света
8. Атомные модели. Опыт Резерфорда. Сечение рассеяния. Формула Резерфорда. Экспериментальная проверка формулы Резерфорда.
9. Гипотеза де Бройля
10. Эксперимент Дэвиссона и Джермера
11. Свойства микрочастиц
12. Соотношение неопределенностей
13. Волновая функция
14. Уравнение Шредингера временное и стационарное.
15. Движение свободной частицы.
16. Частица в одномерной прямоугольной яме с бесконечными внешними «стенками».
17. Гармонический осциллятор.
18. Прохождение частиц сквозь потенциальный барьер. Туннельный эффект.
19. Квантование физических величин.
20. Атомные модели. Опыт Резерфорда. Сечение рассеяния. Формула Резерфорда.
21. Планетарная модель атома.
22. Теория Бора.
23. Опыты Франка и Герца.
24. Спектральные закономерности.
25. Атом водорода по Бору.
26. Водородоподобные системы в квантовой механике.
27. Многоэлектронные атомы.
28. Строение и важнейшие свойства ядер.
29. Физика элементарных частиц

*Сегодня: **

Лекция 1

Электромагнитные волны

Содержание лекции:

- Образование свободных электромагнитных волн
- Плоские электромагнитные волны
- Свойства электромагнитных волн
- Стоячие электромагнитные волны
- Энергия электромагнитных волн

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 обосновал это предположение Дж. Максвелл. С этим обоснованием мы познакомились в четвертой части курса.

Максвелл Джеймс Клерк (1831 – 1879) – ***английский физик***, член Эдинбургского (1855) и Лондонского (1861) королевских обществ с 1871 г.

Самым большим научным достижением Максвелла является созданная им в 1860 – 1865 ***теория электромагнитного поля***, которую он сформулировал в виде системы нескольких уравнений (уравнения Максвелла), выражающих все основные закономерности электромагнитных явлений..

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

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

- обобщенный закон Био-Савара-Лапласа

$$\mathrm{rot}\,\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \qquad \oint_L \left(\mathbf{E}, \mathrm{d}\mathbf{l}\right) = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}$$

- закон Фарадея

$$\mathrm{div}\,\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0}, \qquad \oint_S \left(\mathbf{D}, \mathrm{d}\mathbf{S}\right) = \int_V \rho\, \mathrm{d}V$$

- теорема Гаусса

$$\mathrm{div}\,\mathbf{B} = 0, \qquad \oint_S \left(\mathbf{B}, \mathrm{d}\mathbf{S}\right) = 0$$

- отсутствие магн. зарядов

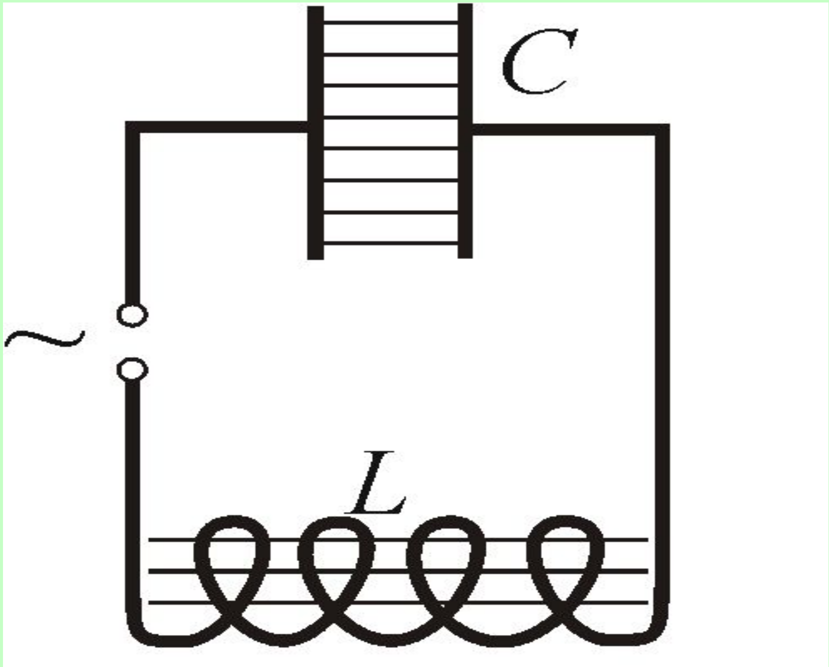
$$\mathbf{B} = \mu_0\mu\mathbf{H}, \qquad \mathbf{D} = \varepsilon_0\varepsilon\mathbf{E}, \qquad \mathbf{j} = \sigma\mathbf{E} + \mathbf{j}_{стр}$$

№	Название	Дифференциальная форма	Интегральная форма	Физический смысл
1	Закон индукции Фарадея	$\mathrm{rot}\vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\oint_S \frac{\partial B}{\partial t} d\vec{S}$	Вихревое электрическое поле порождается изменением магнитной индукции и наоборот
2	Обобщенный закон Био – Саварра – Лапласса	$\mathrm{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = I_{encl} + \oint_S \frac{\partial D}{\partial t} d\vec{S}$	Вихревое магнитное поле порождается электрическим током и изменением электрической индукции
3	Теорема Гаусса для вектора $\vec{D}$	$\mathrm{div}\vec{D} = \rho$	$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = Q_{encl}$	Электрический заряд является источником электростатического поля
4	Теорема Гаусса для вектора $\vec{B}$	$\mathrm{div}\vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0$	Магнитная индукция не расходится (магнитных зарядов нет)
5	Электростатическая индукция	$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$	Связь электрической индукции с напряженностью электростатического поля	
6	Магнитная индукция	$B = \mu_0 \mu \vec{H}$	Связь магнитной индукции с напряженностью магнитного поля	
7	Плотность тока	$\vec{j} = \sigma \vec{E}$	Связь плотности тока с напряженностью электростат. поля (Закон Ома в диф. Форме)	

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. В 1887 наблюдал внешний фотоэффект. Исследования Герца посвящены также катодным лучам, теории удара упругих тел и т. п.

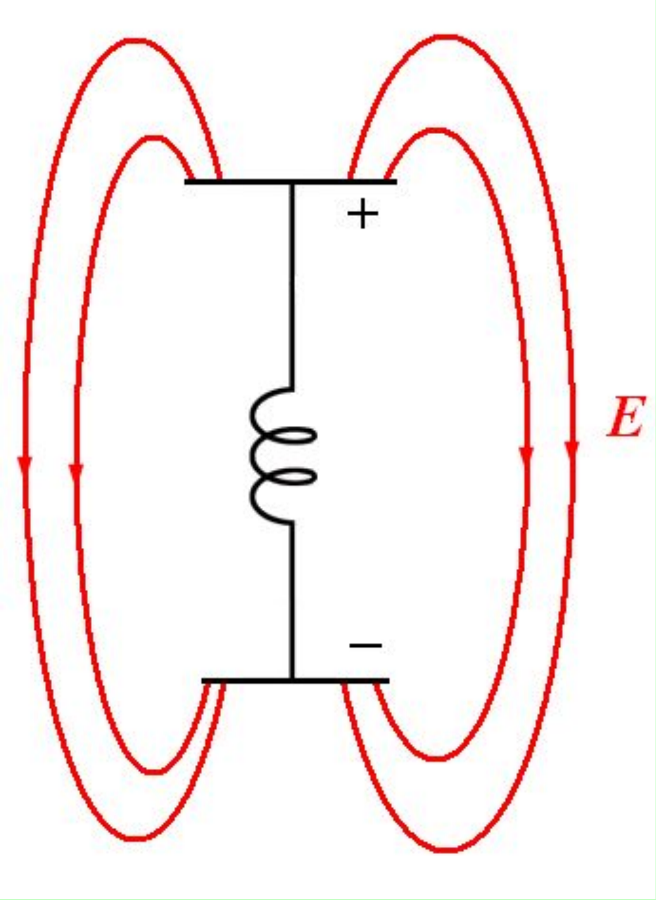
В колебательном контуре, образованном конденсатором *C* и катушкой *L* ***электрическое поле сосредоточено в зазоре между обкладками, а магнитное – внутри катушки***.



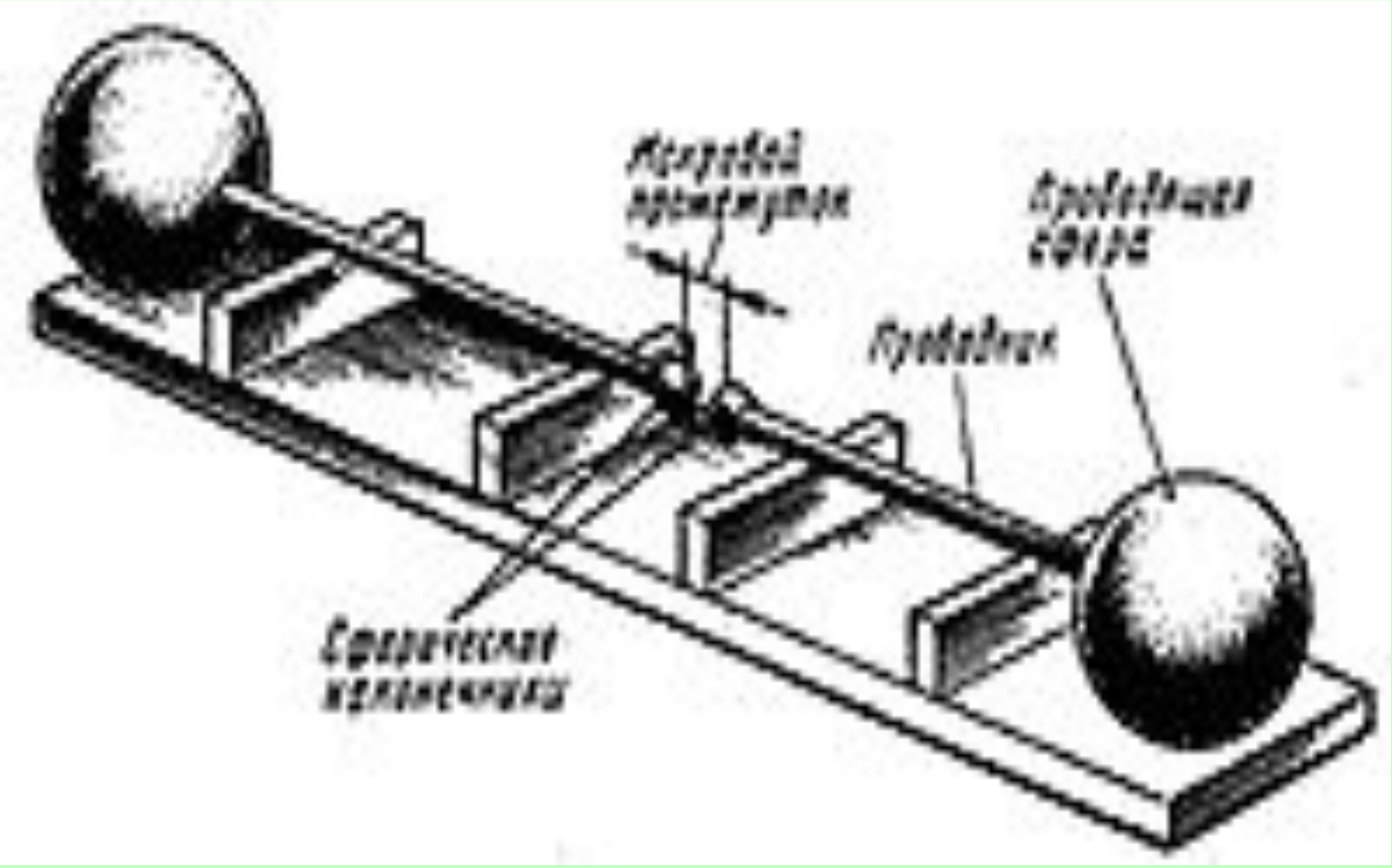
В окружающем конденсатор и катушку пространстве поля практически равны нулю.

Вибратор Герца – открытый колебательный контур.

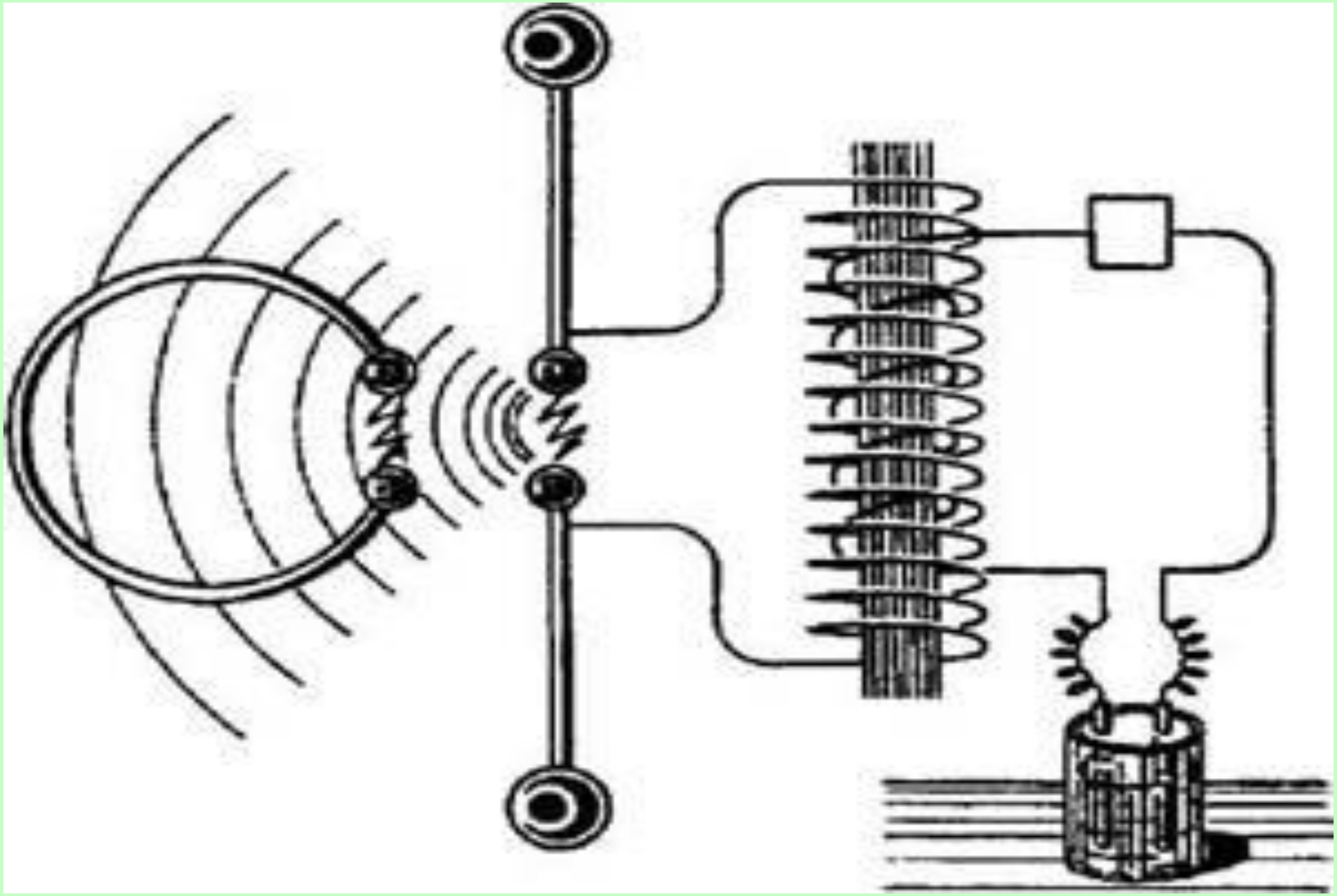
Переменное электрическое поле заполняет окружающее пространство и порождает переменное магнитное поле и т. д.



Вибратор Герца имел несколько модификаций.



Вибратор Герца имел несколько модификаций.



Вибратор Герца и приемник.

Вибратор

Резонатор

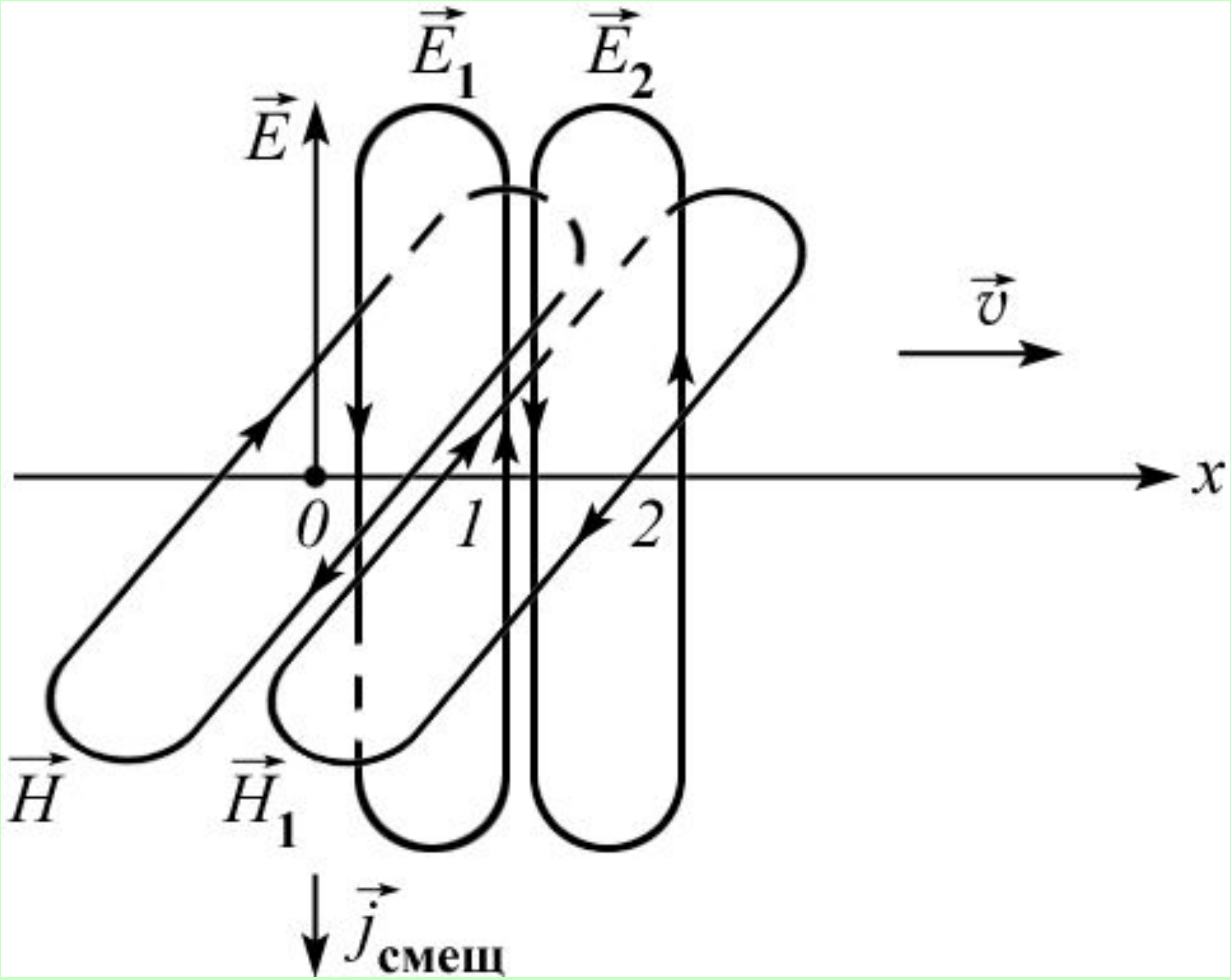
1. Образование свободных электромагнитных волн

Пусть в некоторой точке *O* безграничной проводящей среды создается электрическое поле $\vec{E}$

В отсутствие поддерживающих электрических зарядов электрическое поле уменьшается, <u>порождая магнитное поле</u> $\vec{H}$

В отсутствие поддерживающих токов магнитное поле уменьшается, <u>порождая вихревое электрическое поле</u> $\vec{E}_1$; в точке *O* электрическое поле обратится в нуль, но возникнет в точке *1* и т.д...

Итак, вместо первоначального электрического поля будут электрические, магнитные поля, взаимно связанные друг с другом и распространяющиеся в пространстве с образованием **свободных электромагнитных волн**.



Свободные электромагнитные волны

2. Плоские электромагнитные волны

Покажем, что существование электромагнитных волн вытекает из уравнений Максвелла:

Запишем их для случая <u>однородной нейтральной ($\rho = 0$)</u> <u>непроводящей $\left(\vec{j} = 0\right)$ среды</u>:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{cases} \qquad \begin{cases} \operatorname{div} \vec{D} = \rho = 0 \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \end{cases}$$

Рассмотрим случай <u>**плоской волны**</u>: $\vec{E}, \vec{H} = f\left(x, t\right)$

Распишем первую пару уравнений в координатной форме:

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{rot}_x \vec{H} &= \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \equiv 0 = \frac{\partial D_x}{\partial t} \\ \mathrm{rot}_x \vec{E} &= \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \equiv 0 = \frac{\partial B_x}{\partial t} \end{aligned}\right\}$$

- ***D_x, B_x*** **<u>не</u> зависят от времени**.

Расписав вторую пару уравнений в координатной форме, получаем:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial D_x}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial B_x}{\partial x} &= 0 \end{aligned}\right\}$$

- D_x, B_x **<u>не</u> зависят от *x***.

Следовательно,

$$\begin{cases} D_x = \mathrm{const} \\ B_x = \mathrm{const} \end{cases}$$

- обусловлены постоянными однородными полями, **<u>накладывающимися</u>** на электромагнитное поле волны

Само поле волны на имеет составляющих вдоль Ox, т.е. $\vec{E}, \vec{H} \perp Ox$

- **электромагнитная волна – поперечная**.

<u>Будем полагать постоянные поля отсутствующими</u>: $E_x = H_x = 0$.

Остальные компоненты:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial D_y}{\partial t} = -\dfrac{\partial H_z}{\partial x} \\ \dfrac{\partial B_z}{\partial t} = -\dfrac{\partial E_y}{\partial x} \end{cases} \qquad \begin{cases} \dfrac{\partial D_z}{\partial t} = \dfrac{\partial H_y}{\partial x} \\ \dfrac{\partial B_y}{\partial t} = \dfrac{\partial E_z}{\partial x} \end{cases}$$

Пусть $\begin{cases} E_y = E, \quad E_z = 0 \\ H_y = 0, \quad H_z = H \end{cases}$ $\begin{cases} \dfrac{\partial D}{\partial t} = -\dfrac{\partial H}{\partial x} \\ \dfrac{\partial B}{\partial t} = -\dfrac{\partial E}{\partial x} \end{cases}$ ***- уравнения Максвелла для одномерного случая***

Дифференциальное уравнение ЭМВ

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

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

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

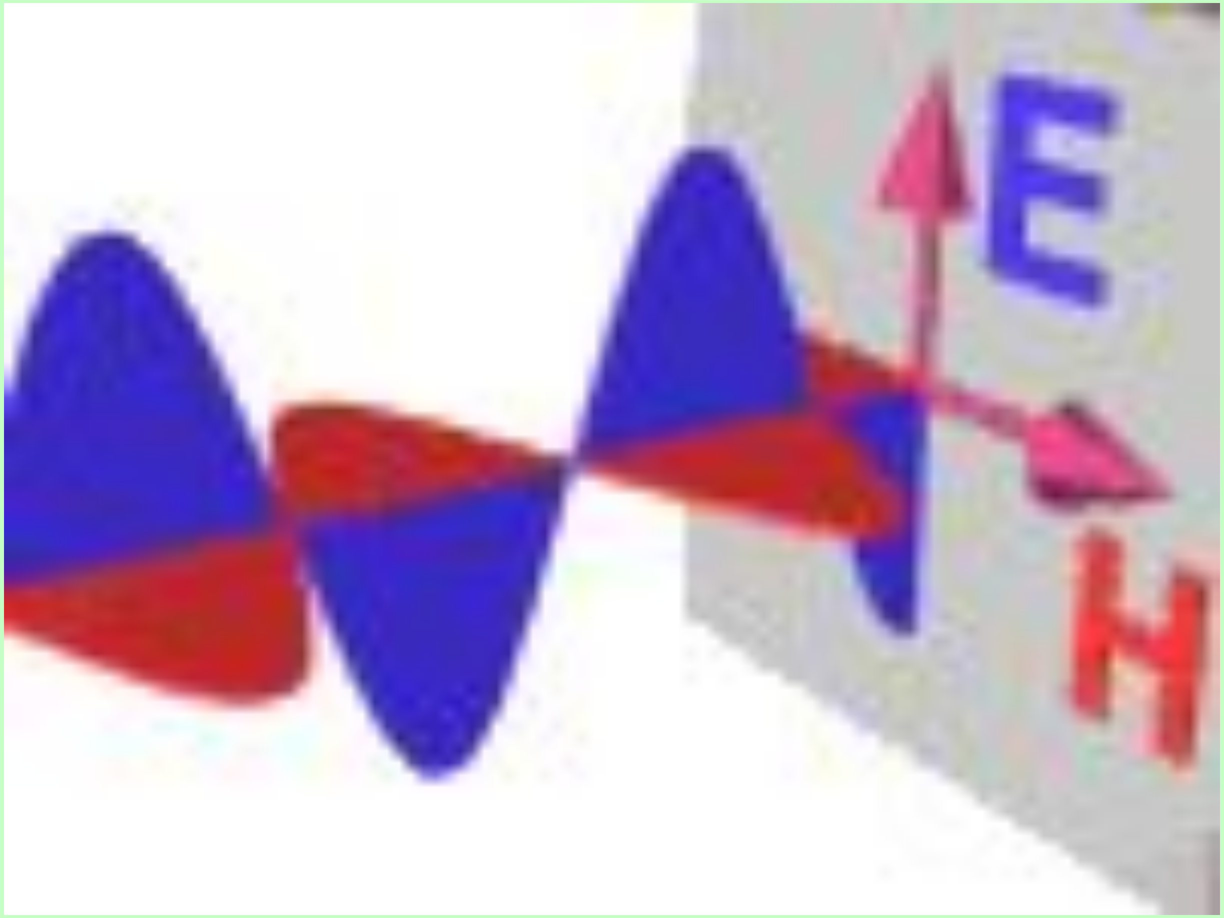
Решение уравнений:

$$\boxed{E = E_0\cos(\omega t - kx + \phi)} \qquad (6.2.1)$$

$$H = H_0\cos(\omega t - kx + \phi) \qquad (6.2.2)$$

φ – начальная фаза колебаний; $k = \dfrac{\omega}{\upsilon}$ –волновое число;
ω – круговая частота

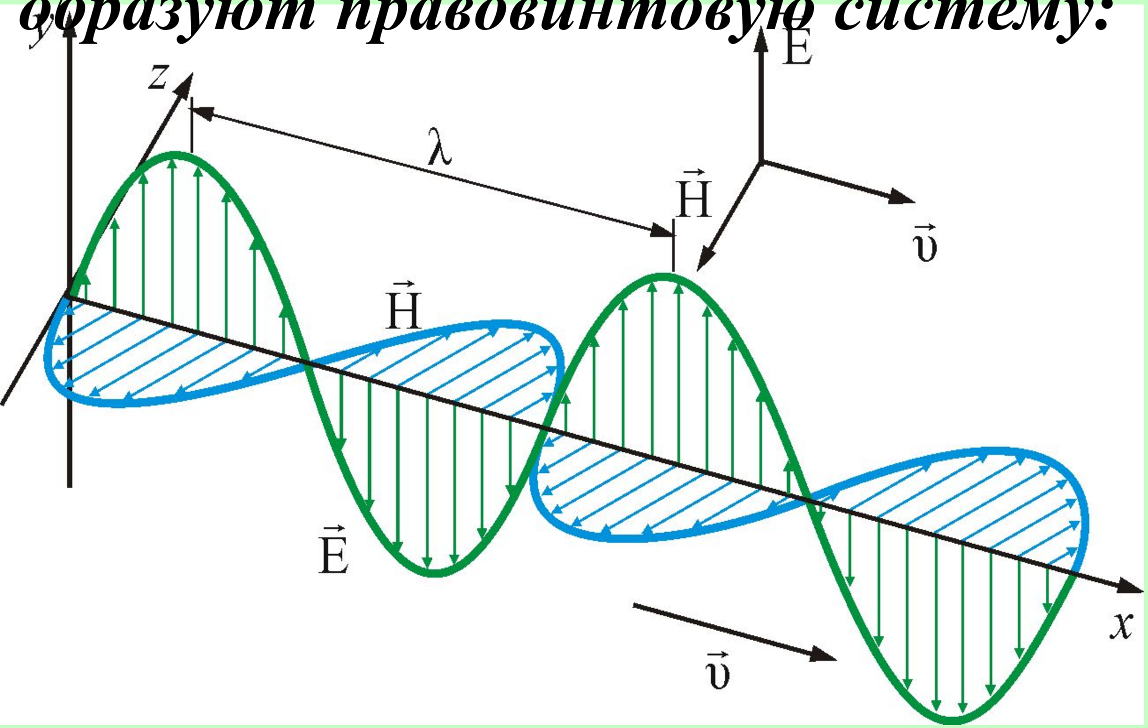
Оператор Лапласа - $\nabla^2 = \dfrac{d^2}{dx^2} + \dfrac{d^2}{dy^2} + \dfrac{d^2}{dz^2}$



ЭМВ распространяются в пространстве, удаляясь от вибратора во все стороны

1. В любой точке ***векторы напряженности электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны*** ***и перпендикулярны направлению распространения*** $\vec{\upsilon}$, ***т.е. образуют правовинтовую систему:***

$$\vec{E} \to \vec{H} \to \vec{\upsilon}$$



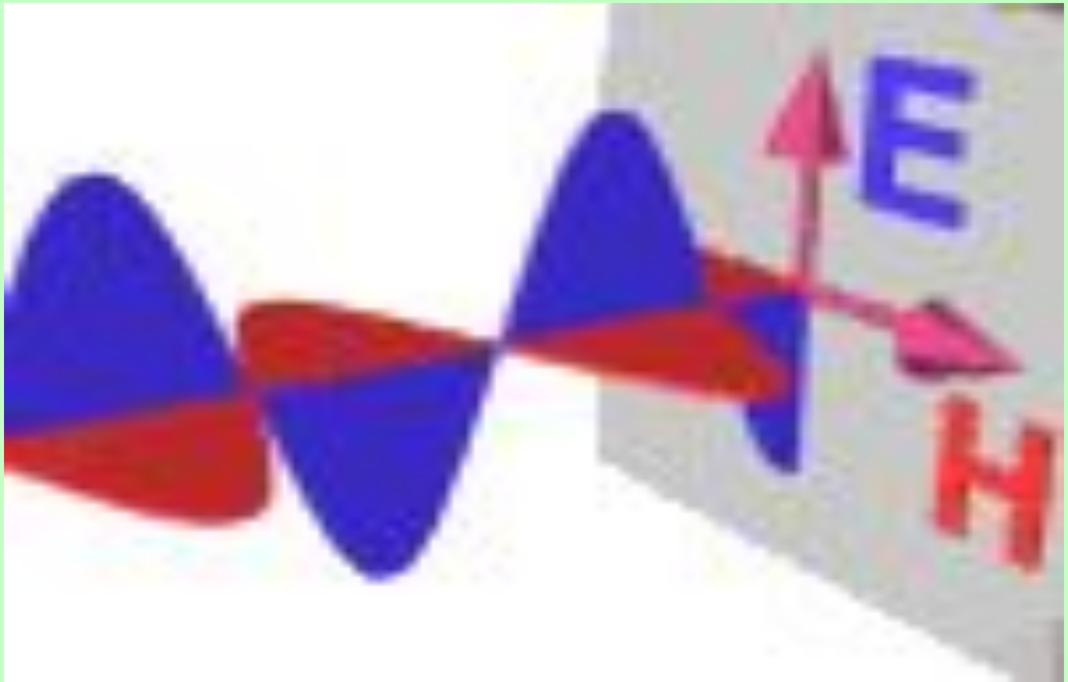
2. ***Поля изменяют свое направление в пространстве:*** в одних точках вектор $\vec{H}$ направлен к плоскости страницы , в других – от нее; аналогично ведет себя и вектор $\vec{E}$

3. ***Электрическое и магнитное поля находятся в фазе***, т.е. они достигают максимума и обращаются в нуль в одних и тех же точках.

4. Движущийся с ускорением электрический заряд испускает электромагнитные волны.

5. ЭМВ представляют собой поперечные волны и аналогичны другим типам волн.

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



3. Свойства электромагнитных волн

Волновое уравнение для электромагнитной волны:

$$\boxed{\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}}$$

<u>Скорость электромагнитной волны</u>:

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

$$\boxed{c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}}$$

- скорость электромагнитных волн **в вакууме**

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

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

$$\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c}{n} \quad \text{и} \quad n = \frac{c}{\upsilon}$$

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

Простейшим решением волнового уравнения являются **монохроматические (синусоидальные) волны:**

$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx) \\ \vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - kx) \end{cases}$$

E_0, H_0 – **амплитуды волны**.

Связь между мгновенными значениями напряженностей:

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

Колебания электрического и магнитного векторов происходят **синфазно**, причем векторы $\vec{E}, \vec{H}$ образуют с направлением распространения волны **правовинтовую систему**.

4. Стоячие волны

Рассмотрим электромагнитную волну, распространяющуюся:

по Ox

$$\begin{cases} E_y = E_0 \cos(\omega t - kx) \\ H_z = H_0 \cos(\omega t - kx) \end{cases}$$

в противоположном направлении

$$\begin{cases} E_y = E_0 \cos(\omega t + kx) \\ H_z = -H_0 \cos(\omega t + kx) \end{cases}$$

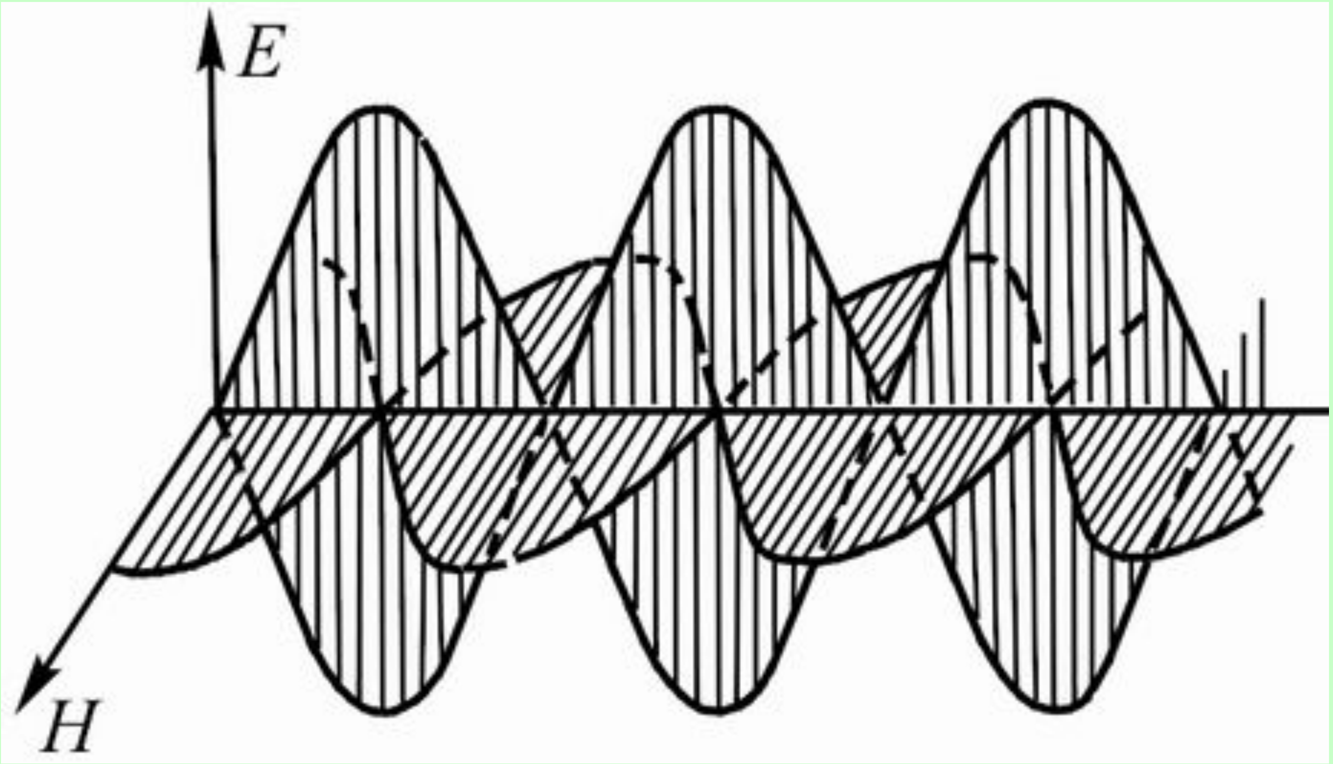
Знак «-» у H_z (или E_y) связан с изменением направления переноса плотности потока энергии $\left[\vec{E}, \vec{H}\right]$,которая после отражения должна быть направленной вдоль отраженного луча.

Суперпозиция падающей и отраженной волн:

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

- фазовый сдвиг на π/2

- стоячая электромагнитная волны состоит из двух стоячих волн – электрической и магнитной



Стоячая электромагнитная волна.

Фазы колебаний электрического и магнитного полей сдвинуты в стоячей волне на $\pi/2$

5. Энергия электромагнитных волн

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.***

Энергия электромагнитных волн

w – объемная плотность энергии электромагнитной волны:

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

В силу соотношения

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

получаем

$$w = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2 = \underbrace{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\sqrt{\mu\mu_0}}_{1/v} EH = \frac{EH}{v}$$

Тогда

$$EH = wv$$ - соотношение, совпадающее с **модулем плотности потока энергии**

С учетом направления переноса энергии $\vec{v}$ получаем:

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

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

$$\vec{E} \perp \vec{H} \quad \Rightarrow \quad \vec{P} \uparrow\uparrow \vec{v}$$

- вектор плотности потока электромагнитной энергии (вектор Умова-Пойнтинга) - энергия, переносимая электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.

Модуль вектора плотности потока э/м энергии

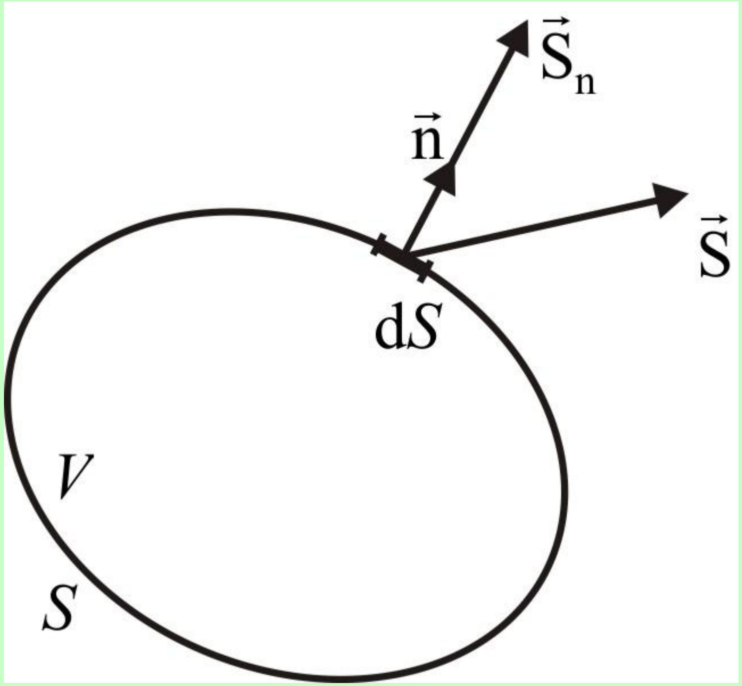
$$P = EH$$

В узлах и пучностях электрических, магнитных полей

$$\boldsymbol{P = 0.}$$

Поток энергии через площадку *dS*:

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



Теорема Умова - Пойнтинга:

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

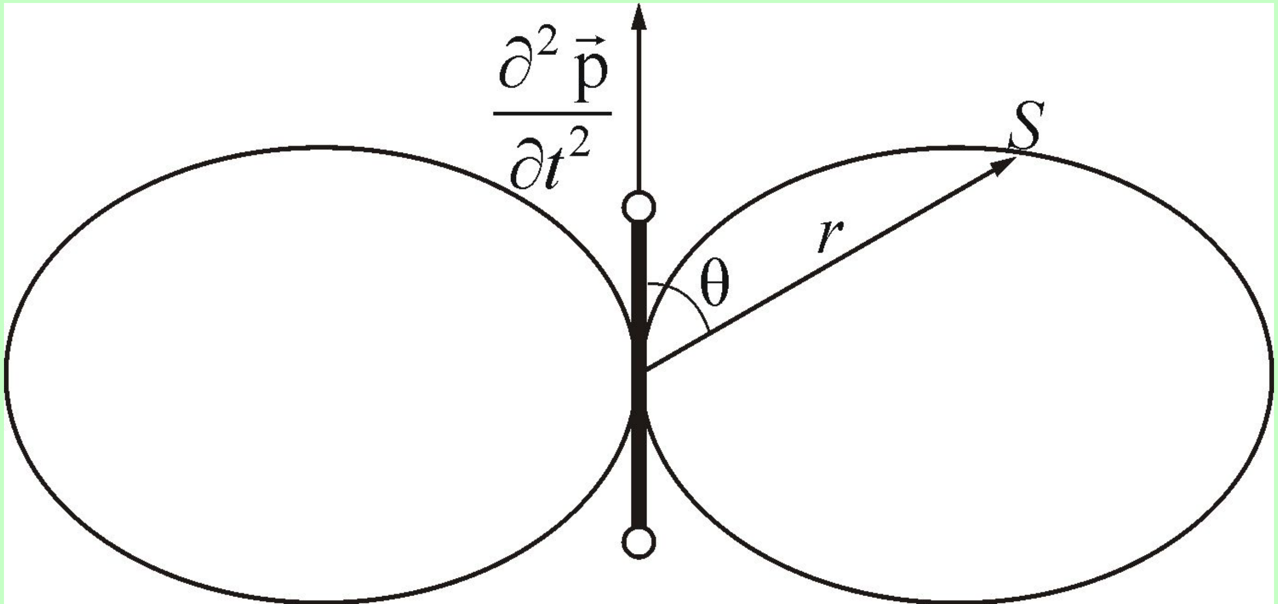
- уменьшение полной энергии внутри объема *V* за единицу времени должно быть равно энергии, выходящей через поверхность S за единицу времени наружу – ***закон сохранения э/м энергии***.

Модуль среднего значения вектора Умова-Пойнтинга называется ***интенсивностью*** $J = \left|< \vec{S} >\right|$

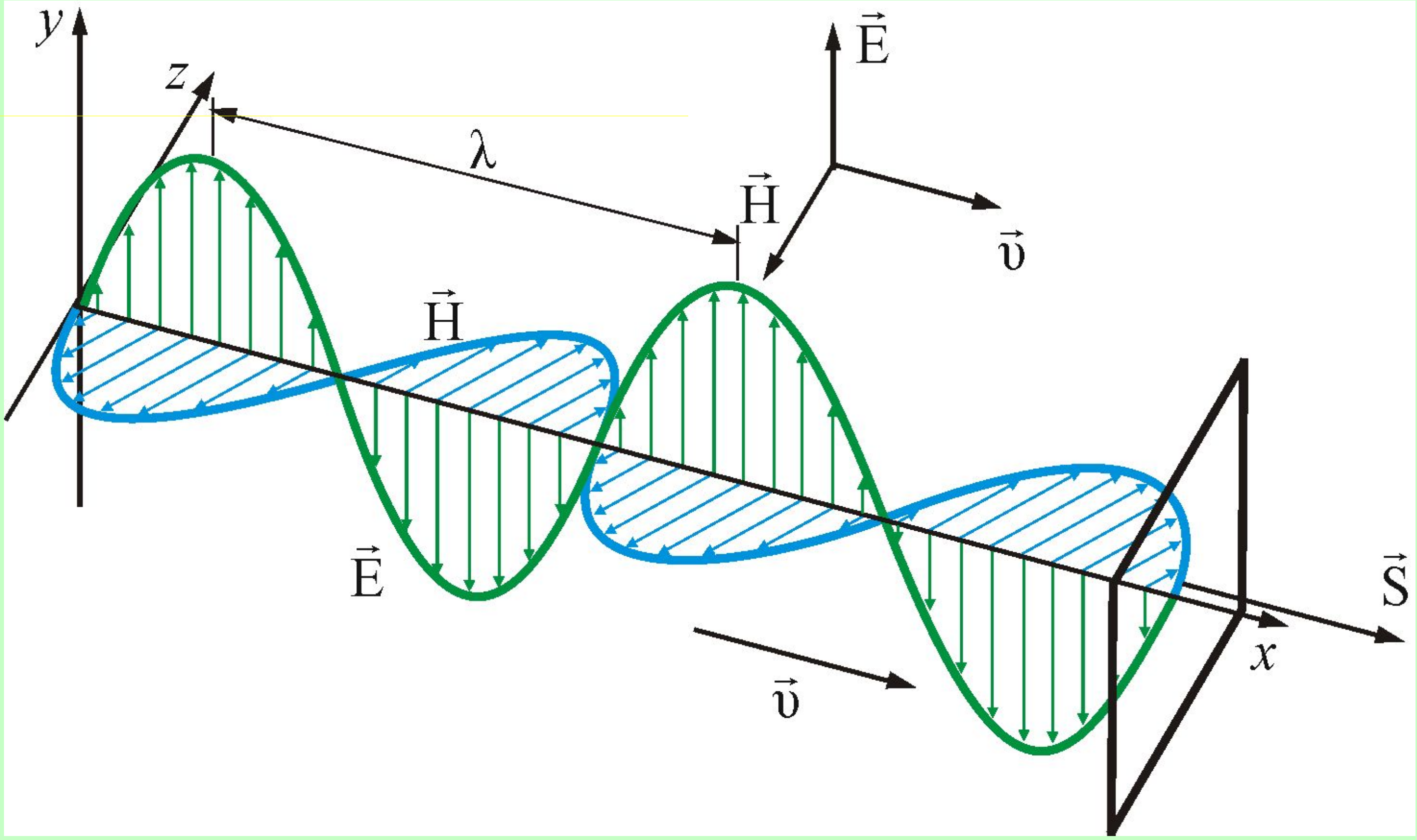
Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды:

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

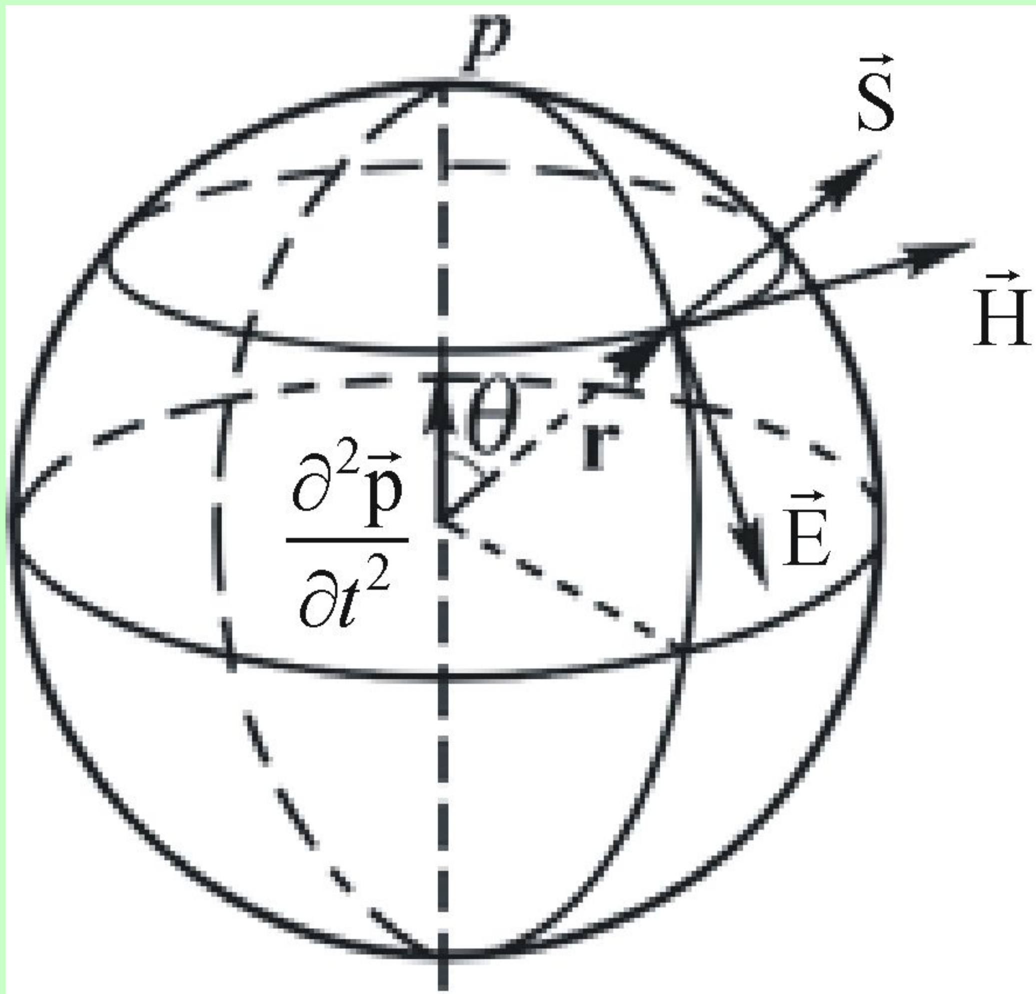
Зависимость интенсивности излучения от направления называют ***диаграммой направленности.***



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 $\vec{n}$



Электромагнитные волны, отражаясь или поглощаясь в телах, на которые они падают, оказывают на данные тела **давление**:

1) Рассмотрим нормальное падение волны:

• при полном поглощении:

$$\boxed{p = \langle w \rangle}$$

- давление равно среднему значению объемной плотности энергии в падающей электромагнитной волне.

• при частичном отражении волны:

$$\boxed{p = (1 + k)\langle w \rangle}$$

k – **коэффициент отражения**

• при полном отражении волны (k = 1):

$$\boxed{p = 2\langle w \rangle}$$

Через **<u>интенсивность волны</u>** (среднее значение вектора плотности потока энергии):

$$\boxed{I = \langle w \rangle c}$$

Тогда давление

$$\boxed{p = \frac{I}{c}\left(1+k\right)}$$

<u>2) При наклонном падении волны</u>

$$\boxed{p = \frac{I}{c}\cos\theta\,\left(1+k\right), \quad \theta = \widehat{\vec{v},\vec{n}}}$$

Импульс и масса электромагнитного поля:

Давление электромагнитных волн свидетельствует о наличии у электромагнитной волны импульса:

Плотность импульса:

$$\boxed{\vec{g} = \frac{\vec{P}}{c^2}}$$

Полный импульс:

$$\boxed{\vec{G} = \int_V \frac{\vec{P}}{c^2} dV}$$

V – объем, занятый полем.

Плотность потока электромагнитной энергии (в вакууме):

$$P = wc$$

Тогда

$$g = \frac{P}{c^2} = \frac{wc}{c^2} = \frac{w}{c}$$

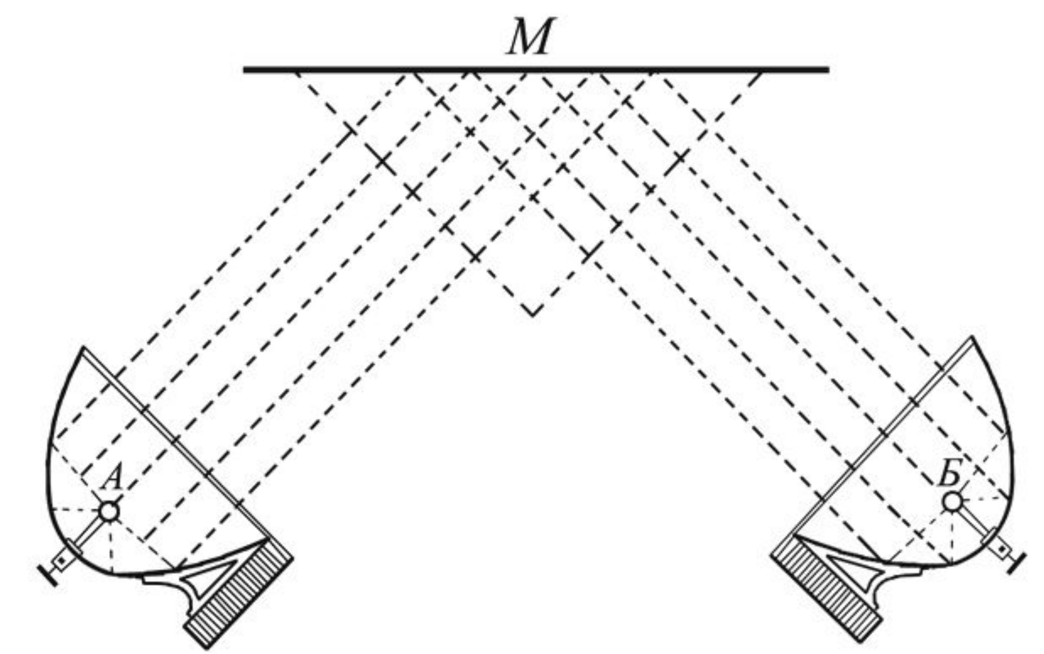
Следовательно, плотность энергии

$$w = gc = \rho c^2$$ – для единицы объема.

Для произвольного объема:

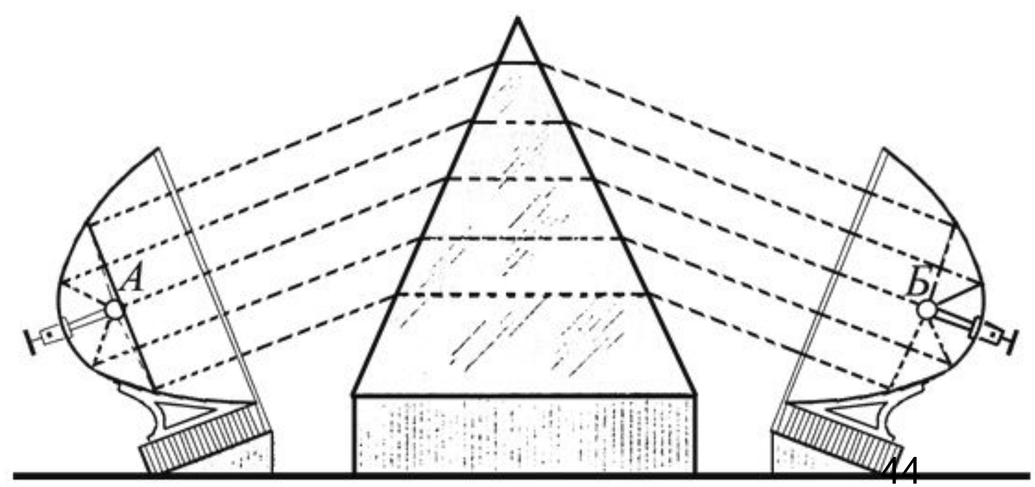
$$\mathbf{W = mc^2.}$$

m – **масса электромагнитного поля**;
W – энергия поля;
c – скорость света в вакууме.



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

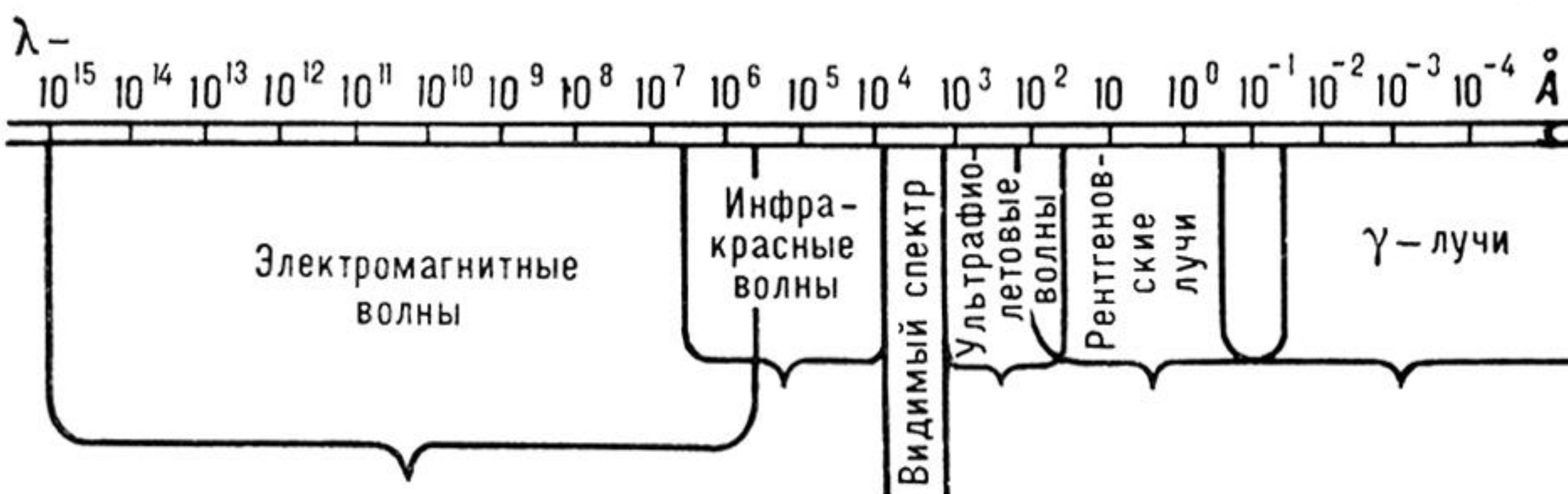
Было показано, что для электромагнитных волн справедлив закон отражения и преломления



Виды излучений	Длина волны	Получение	Регистра-ция	Характери-стика, свойства	Применение
Радиоволны	10 км (3x10^ 4 – 3x10 ^12 Гц)	Транзистор-ные цепи	Резонатор Герца, Когерер, антенна	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Связь и навигация
Инфракрас-ное излучение	0,1м – 770нм (3x10^ 12 – 4x 10 ^14 Гц)	Электричес-кий камин	Болометр, Фотоэлемент термостолбик	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Приготовл. пищи Нагревание, сушка, фотокопиро-вание
Видимый свет	770 – 380 нм (4x10^ 14 – 8x10 ^14 Гц)	Лампа накаливания Молнии, Пламя	Спектрограф, Болометр	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Наблюдение за видимым миром, путем отражения
Ультрафио летовое излучение	380 – 5 нм (8x10^ 14 – 6x 10 ^16 Гц)	Разрядная трубка, углеродная Дуга	Фотоэлемент Люминесцен-ция, болометр	Фотохимиче-ские реакции	Лечение заболеваний кожи, уничтожение бактерий, сторож. устройства
Рентгеновс-кое излучение	5 нм– 10^ –2 нм (6x 10^ 16 – 3x10 ^19 Гц)	Рентгеновс-кая трубка	Фотопластинка	Проникаю-щая способность Дифракция	Рентгенография, радиология, обнаружение под-делок
γ - излучение	5x10^-11 - 10^-15 м	Циклотрон Кобальт - 60	Трубка Гейгера	Порождаются космически ми объектами	Стерилизация, Медицина, лечение рака

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
10^5 10^4 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} 10^{-13} 10^{-14} 10^{-15}
Частота, Гц
$3 \cdot 10^2$ $3 \cdot 10^4$ $3 \cdot 10^6$ $3 \cdot 10^8$ $3 \cdot 10^{10}$ $3 \cdot 10^{12}$ $3 \cdot 10^{14}$ $3 \cdot 10^{16}$ $3 \cdot 10^{18}$ $3 \cdot 10^{20}$ $3 \cdot 10^{22}$
низкочастотные колебания
радиоволны
инфракрасное излучение
видимое излучение
ультрафиолетовое излучение
рентгеновское излучение
гамма-излучение
γ
iroda1.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

Излучение электромагнитных волн. Излучение диполя

Процесс возбуждения электромагнитных волн какой-либо системой в окружающее пространство называется ***излучением электромагнитных волн***.

Электромагнитные волны возбуждают

- электрические заряды, движущиеся с ускорением (электрическая цепь, ток в которой изменяется; электроны, ускоряемые в ускорителях),
- в веществе возможно излучение Вавилова-Черенкова (1934 г.) при движении частиц с фазовой скоростью большей скорости света в этом веществе.

Простейшая излучающая система – *электрический диполь*, дипольный момент p_l 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 $\vec{p}_l$ которого изменяется по гармоническому закону

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

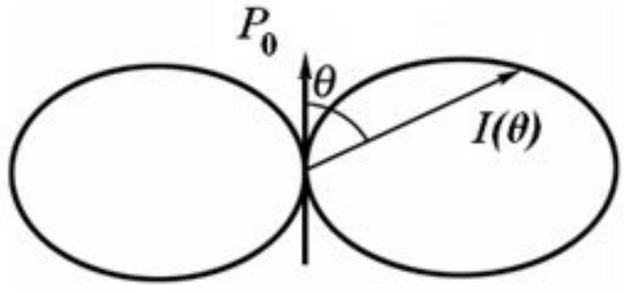
Если поле распространяется в однородной, изотропной среде, то во всех точках, находящихся на одинаковом расстоянии r от диполя, фаза гармонических колебаний одинакова. Следовательно, волновой фронт сферический, и волна, излучаемая диполем, *сферическая*.

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

$\frac{1}{r} sin\theta,$ θ – 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*, приведена на рисунке. Диполь сильнее всего излучает в направлении, составляющем угол $\theta = \dfrac{\pi}{2}$, т.е. в плоскости, проходящей через середину диполя перпендикулярно его оси.

Вдоль своей оси $\theta = 0; \pi$ диполь не излучает совсем.

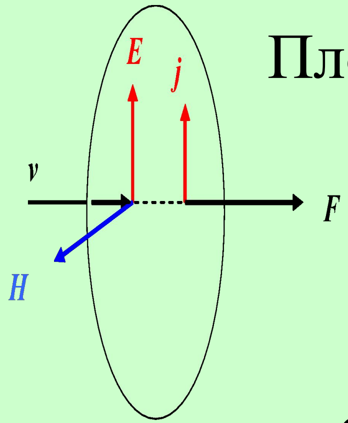
Средняя мощность излучения диполя (энергия, излучаемая по всем направлениям в единицу времени)

$$\langle P \rangle \sim p_0^2 \omega^4.$$

Следовательно, при малой частоте колебаний ω (например, линии передач переменного тока) излучение электрических систем незначительно.

Давление электромагнитных волн

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



Плоская волна нормально падает на поверхность тела с

$$\varepsilon = 1, \qquad \mu = 1.$$

Электрическое поле $\vec{E}$ волны возбуждает в теле ток плотности $\vec{j} = \sigma \vec{E}$,

$\sigma = \dfrac{1}{\rho}$ – удельная проводимость, ρ – удельное сопротивление.

Магнитное поле волны действует на этот ток силой Лоренца.

$$\vec{F} \uparrow\uparrow \vec{v}_{волны}.$$

Сила Лоренца, действующая на единицу объема

$$\vec{F}_{ед.V} = \left[\vec{j}, \vec{B}\right] = \left[\vec{j}, \mu\mu_0 \vec{H}\right] = \mu_0 \left[\vec{j}, \vec{H}\right]. \quad (1)$$

$\vec{F}_{Л} = q\left[\vec{v}, \vec{B}\right]$ – сила Лоренца, действующая на точечный заряд *q*.

$\vec{F}_{Л} = dq\left[\vec{v}, \vec{B}\right]$ – сила Лоренца, действующая на заряд *dq* в объёме *dV*.

Сила Лоренца, действующая на единицу объема

$$\vec{F}_{ед.V} = \frac{dq}{dV}\left[\vec{v}, \vec{B}\right] = \frac{dq}{dSdl} \cdot \frac{dt}{dt}\left[\vec{v}, \vec{B}\right] =$$

$$= \underbrace{\frac{dq}{dt\,dS}}_{j}\left[\frac{\vec{v}\,dt}{dl}, \vec{B}\right] = \left[\vec{j}, \vec{B}\right].$$

Поверхностному слою $dV = \underbrace{dS}_{1} \cdot dl$ в единицу времени сообщается импульс

$$dp = F_{ед.V}\, dl \cdot \underbrace{dS}_{1} \cdot \underbrace{dt}_{1}.$$

$$\angle \vec{j}, \vec{H} = \frac{\pi}{2}.$$

Уравнение (1).

$$dp = \mu_0 jHdl. \qquad (2)$$

Показано, что в объеме dV за единицу времени поглощается энергия

$$dW = jEdl. \qquad (3)$$

Делим уравнение (2) на (3): $\dfrac{dp}{dW} = \dfrac{p}{W} = \dfrac{\mu_0 jHdl}{jEdl} = \mu_0 \dfrac{H}{E}.$

$$\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\,E = \sqrt{\mu\mu_0}\,H \qquad \Rightarrow \qquad \frac{H}{E} = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}}.$$

$$\frac{p}{W} = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = \frac{1}{c}. \qquad (4) \qquad p = \frac{W}{c}. \qquad (5)$$

$$\varepsilon = 1, \qquad \mu = 1; \qquad p = mc$$

$W = mc^2$ – связь массы и энергии.

Измеренное Лебедевым и рассчитанное в соответствии с теорией Максвелла значение импульса p мало.

Для идеально отражающей поверхности импульс в два раза больше.