

# *Электромагнитные волны*

A vibrant rainbow arches across a clear blue sky, spanning from the left edge to the right edge of the frame. Below the rainbow, a lush green field stretches across the foreground, with a dense line of trees in the middle ground. The overall scene is bright and clear, suggesting a sunny day after a rain shower.

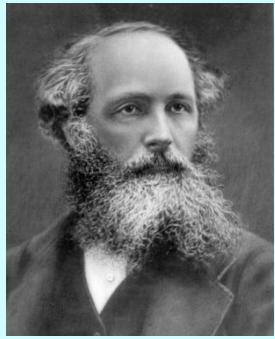
*Чужков Ю.П.*

*Доцент каф. физики*

*Канд. физ.мат. наук*

# Тема занятия

1. Понятие электромагнитной волны
2. Образование электромагнитных волн.
3. Энергия и импульс электромагнитной волны.
4. Шкала электромагнитных волн
5. Распространение электромагнитных волн  
Фазовая и групповая скорости.
6. Взаимодействие электромагнитных волн  
с веществом.

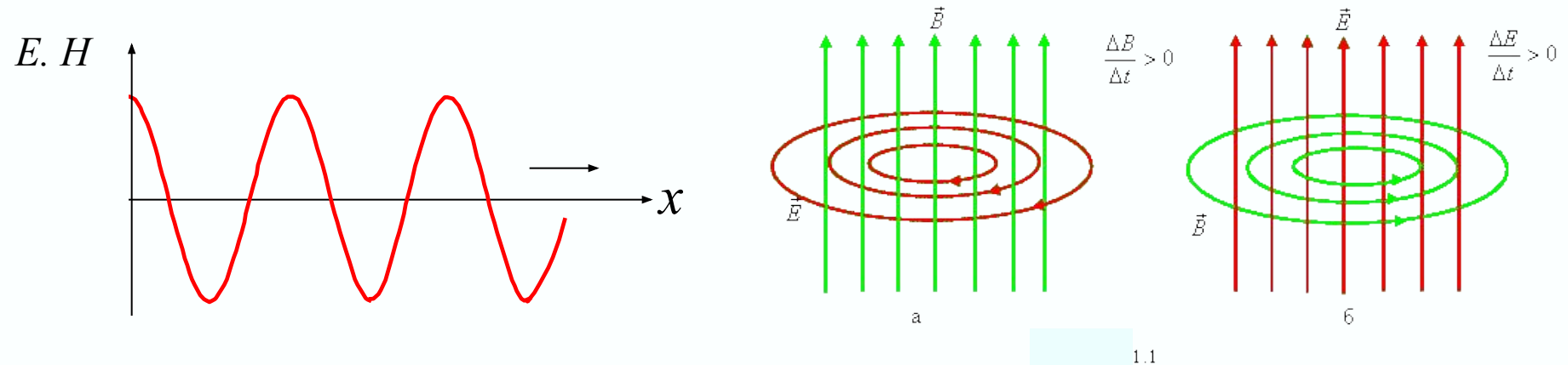


## *Электромагнитные волны*

Существование электромагнитных волн было теоретически предсказано Дж. Максвеллом в результате анализа предложенной им системы уравнений, описывающих электромагнитное поле.

# Электромагнитные волны

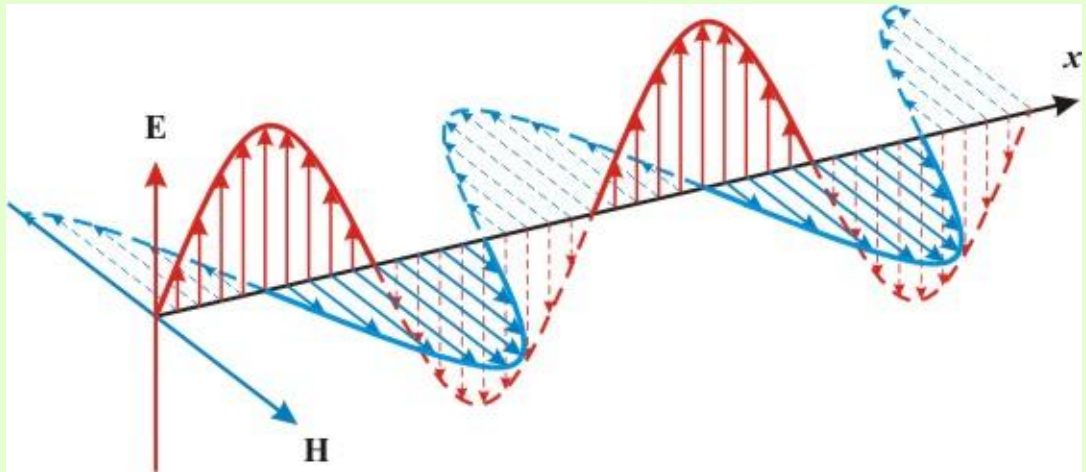
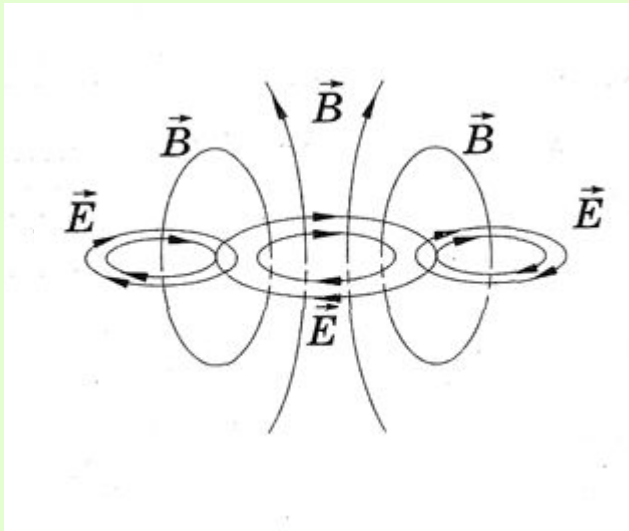
*Согласно теории Максвелла, переменные электрические и магнитные поля не могут существовать по отдельности.*



*Изменяющееся магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, а изменение электрического поля порождает переменное магнитное поле.*

# Понятие электромагнитной волны

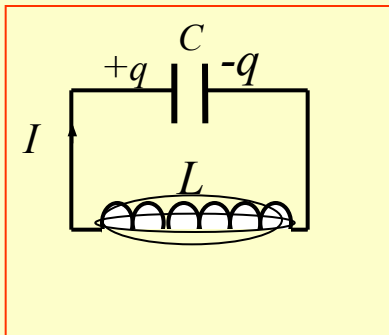
*Электромагнитные волны представляют собой распространение в пространстве с течением времени переменных электрических (вихревых) и магнитных полей со скоростью, зависящей от свойств среды.*



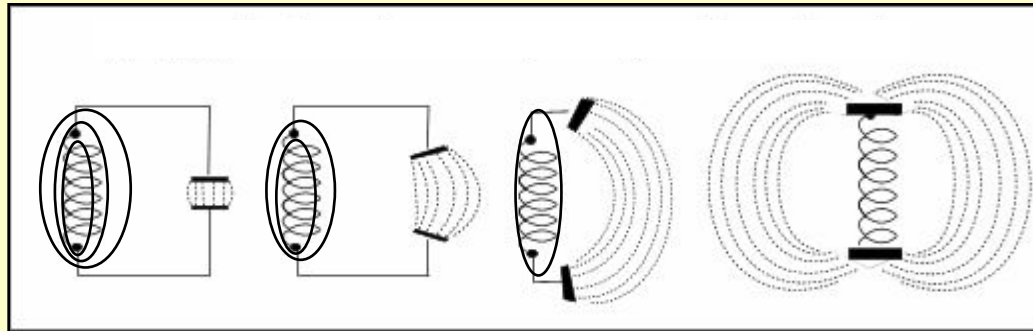
# Получение электромагнитных волн

Условием возникновения электромагнитных волн является *ускоренное движение электрических зарядов*

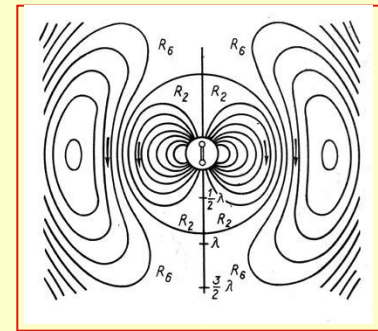
Изменение магнитного поля происходит при изменении тока в проводнике, а изменение тока происходит при изменении скорости заряда, т.е при движении зарядов с ускорением.



Закрытый  
колебательный  
контур



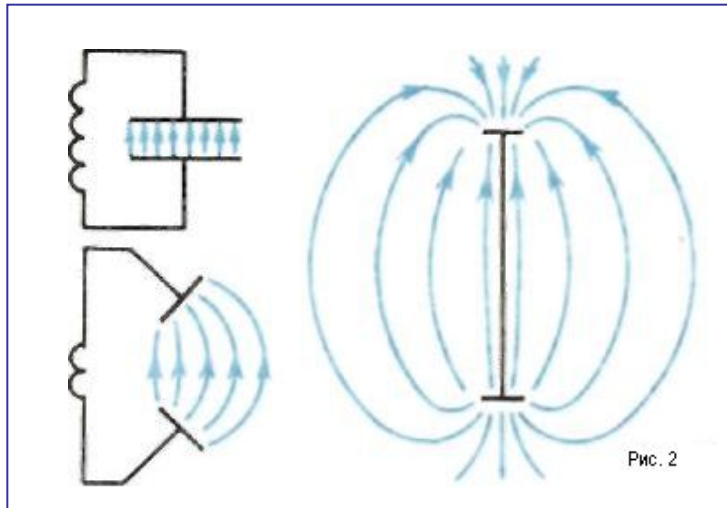
Переход от закрытого контура к  
открытому



Излучение

# Получение электромагнитных волн

Впервые электромагнитные волны были **обнаружены** в **1887г.** немецким физиком Генрихом Герцем, который в качестве источника электромагнитных колебаний использовал **открытый** колебательный контур (высокочастотный искровой разрядник – вибратор Герца)



Герц дополнил теорию Максвелла теорией электромагнитного излучения, доказал тождество с волнами света.

**Герц экспериментально подтвердил поперечность электромагнитных волн.**

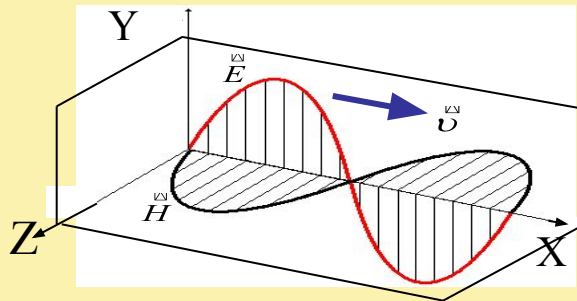
# Свойства электромагнитных волн

- В отличие от всех других видов волн, распространение которых всегда происходит в какой-то среде, **электромагнитные волны могут распространяться в пустоте.**
- Максвелл показал, что в отличие от статических электрических и магнитных полей **электромагнитное поле может существовать и в отсутствии источников – зарядов и токов.**



# Свойства электромагнитных волн

- Векторы напряженности электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны друг другу и перпендикулярны направлению распространения электромагнитной волны.



- В вакууме скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

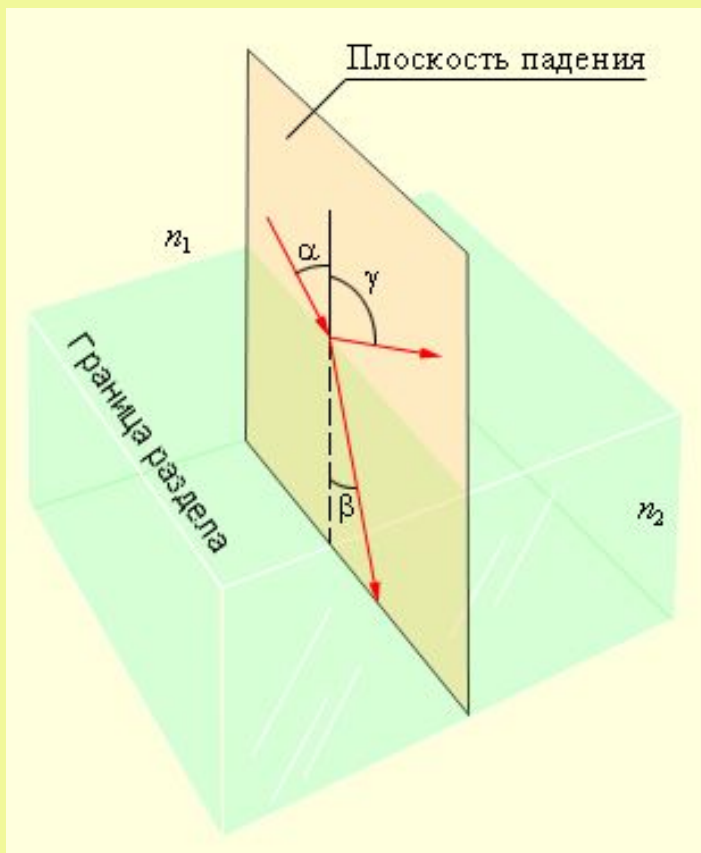
- Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  всегда колеблются в одинаковых фазах

# Свойства электромагнитных волн

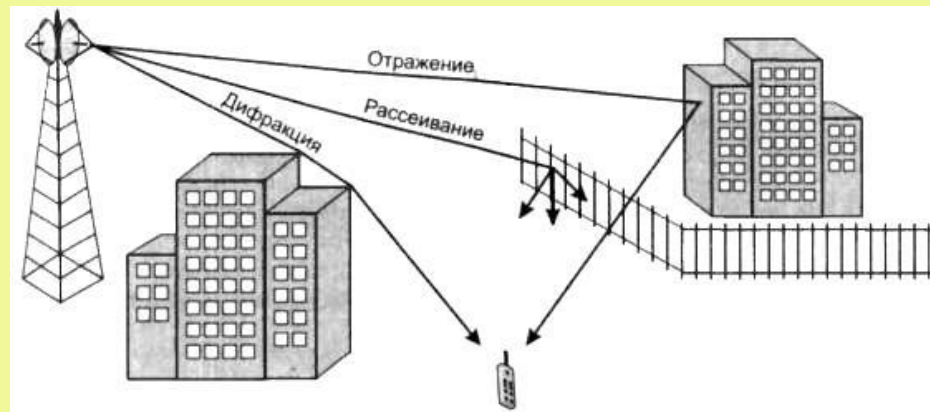
- При распространении электромагнитных волн в веществе происходит поглощение энергии волны
- Поскольку электромагнитные волны переносят энергию, отражаясь или поглощаясь телами, то из теории Максвелла следует, что электромагнитные волны должны оказывать на тела давление.
- Электромагнитные волны проявляют свойства интерференции, дифракции и поляризации
- Воздействие электромагнитных волн на живые организмы

# Свойства электромагнитных волн

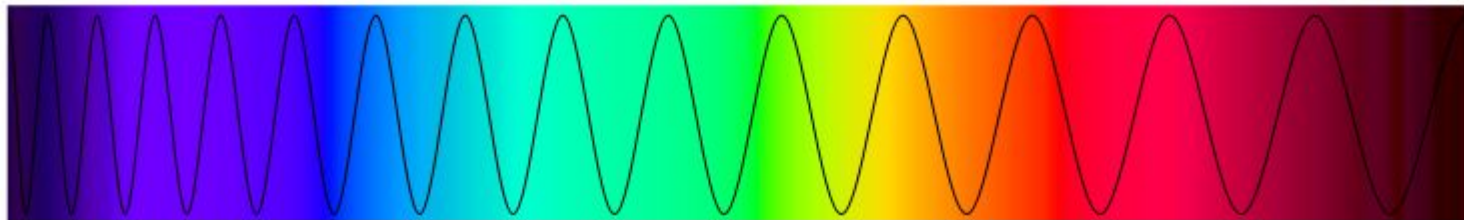
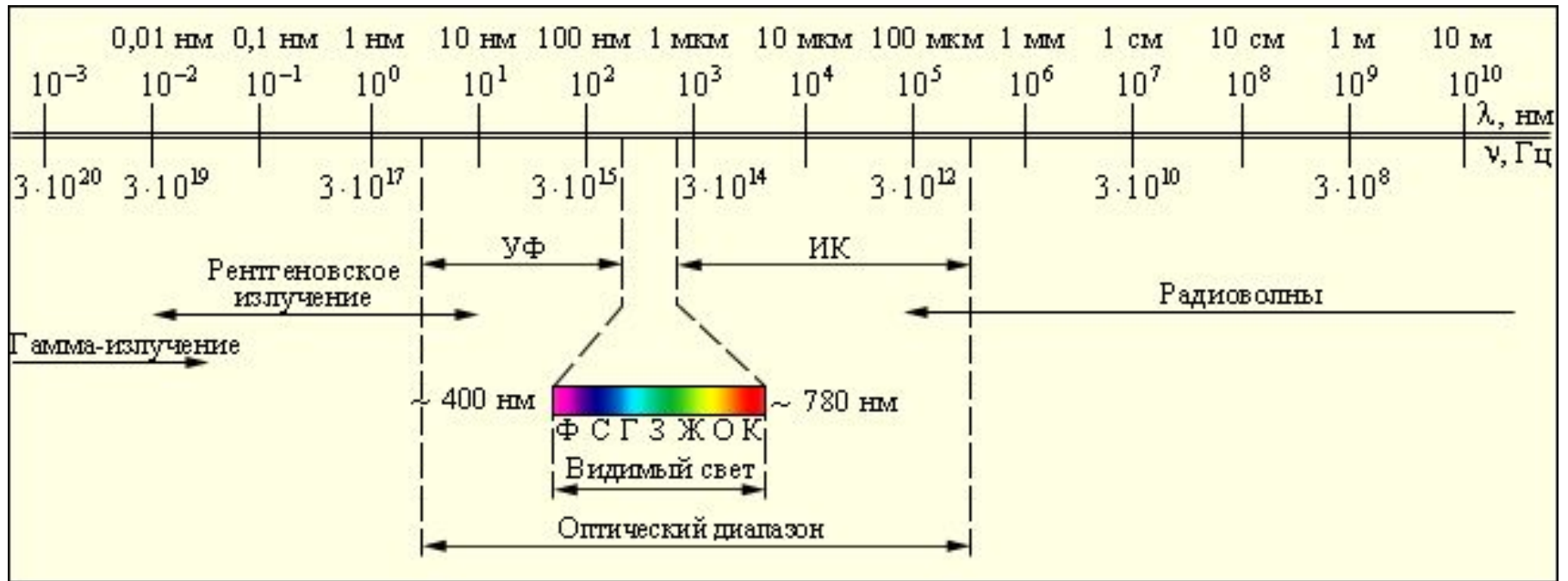
- При распространении электромагнитных волн выполняются законы геометрической оптики



Свет – электромагнитные волны



# Шкала электромагнитных волн



# *Электромагнитные волны разделены по длинам волн на шесть основных диапазонов*

## *Радиоволны*

*Излучаются с помощью колебательных контуров и макроскопических вибраторов.*

*В зависимости от частоты по-разному поглощаются, отражаются и распространяются.*

## *Инфракрасное излучение (тепловое)*

*Излучаются атомами или молекулами вещества.*

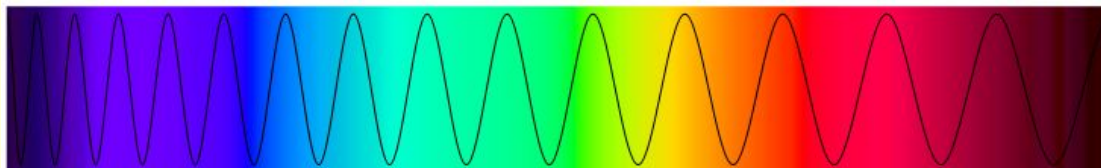
*ИК излучение дают все нагретые тела при любой  $t^0$ .*

*ИК излучение поглощаясь веществом, нагревает его.*

*Проходит через некоторые непрозрачные вещества а также сквозь дождь, снег, туман, дымку.*

*Видимый участок оптического диапазон  $\alpha$  (свет)*

$\lambda = 400\text{нм}$



$\lambda = 760\text{нм}$

*Естественный свет появляется в результате испускания электромагнитных волн возбужденными атомами.*

*Ультрафиолетовое излучение*

*Источники УФ излучения: газоразрядные лампы, кварцевые трубки. Излучаются всеми твердыми телами, у которых  $t^\circ > 1000^\circ\text{C}$ .*

*Рентгеновское излучение*

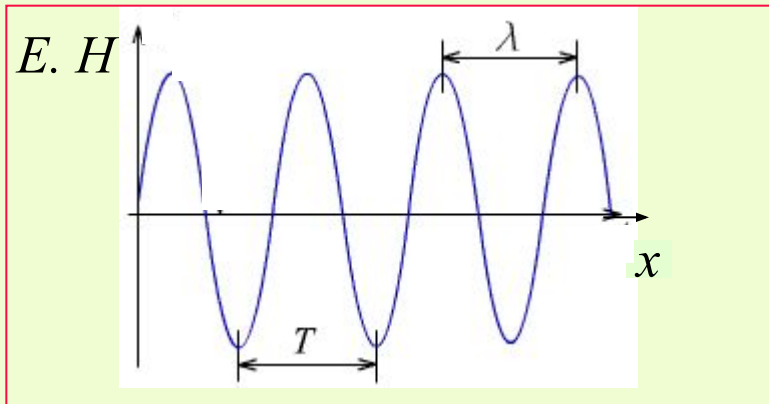
*Излучается при бомбардировке анода потоком частиц.*

*Большая проникающая способность (диагностика мед.)*

*$\gamma$  - излучение*

*Источник: ядерные процессы*

# Электромагнитная волна



Связь между длиной волны  $\lambda$ , периодом  $T$  колебаний и частотой  $\nu$

$$\lambda = \nu T$$

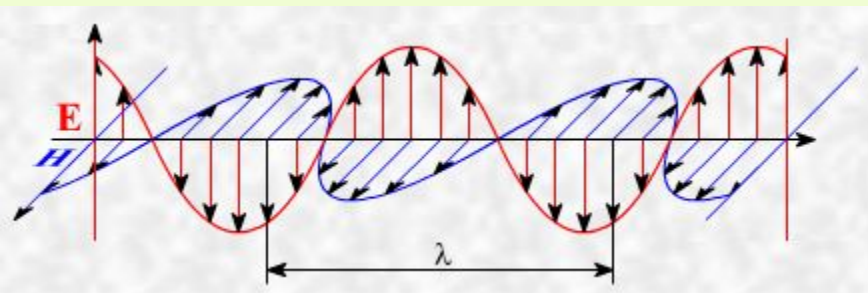
$$\nu = \frac{v}{\lambda}$$

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

$v$  - фазовая скорость распространения волн в среде

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

$n$  - абсолютный показатель преломления



$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды;

$\mu$  - магнитная проницаемость среды.

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

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

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

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

**Волновое число**

$$E_y = E_m \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

$$H_z = H_m \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

# Электромагнитная волна

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  - электрическая постоянная

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - магнитная постоянная

$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon} E = \sqrt{\mu_0 \mu} H$$

$$\Delta E = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$v$  - фазовая скорость

Дифференциальное уравнение  
электромагнитной волны

$$\Delta H = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

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

Оператор  
Лапласа



## Задача 1

# Электромагнитные волны

Плоская электромагнитная волна распространяется в среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 4$ ;  $\mu = \mu_0$ . Определить амплитуду напряженности электрического поля волны, если амплитуда  $H_0$  напряженности магнитного поля волны равна 5 мА/м.

Дано:  $\varepsilon = 4$ ;  $\mu = \mu_0$ ;  $H_0 = 5$  мА/м.

Найти:  $E_0$ .

Решение

Связь между мгновенными значениями напряженностей электрического и магнитного полей электромагнитной волны

$$\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} E = \sqrt{\mu_0 \mu} H \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;

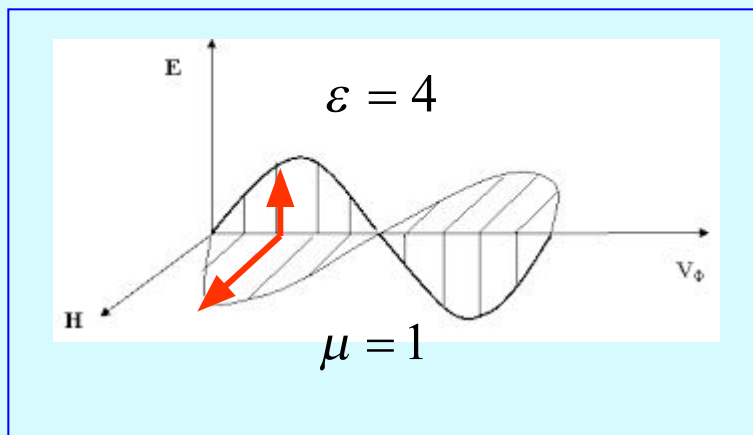
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\varepsilon$  и  $\mu$  –

соответственно электрическая и магнитная проницаемости среды.

Задача 1  
продолжение

# Электромагнитные волны

В электромагнитной волне векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  всегда колеблются в одинаковых фазах, поэтому выражение (1) может быть записано и для мгновенных значений амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей электромагнитной волны:



$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon} E_0 = \sqrt{\mu_0 \mu} H_0$$

Отсюда находим искомую амплитуду напряженности электрического поля

$$E_0 = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon}} H_0$$

После подстановки числовых данных имеем:

$$E_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4}} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,94 \text{ В / м}$$

Ответ:  $E_0 = 0,94 \text{ В / м}$

## Задача 2

# Электромагнитные волны

Плоская электромагнитная волна  $E = 100 \sin(6,28 \cdot 10^8 t - 4,55x)$  распространяется в немагнитном веществе. Определить скорость распространения электромагнитной волны в веществе и диэлектрическую проницаемость вещества.

Дано:  $E = 100 \sin(6,28 \cdot 10^8 t - 4,55x)$   $\mu = 1$

Найти:  $\nu$ ;  $\epsilon$

Решение. Уравнение плоской электромагнитной волны в общем виде имеет вид

$$E = E_0 \cos(\omega t - kx)$$

Сравнивая с заданным в задаче уравнением, определяем: амплитудное значение волны; угловую скорость колебаний

$\omega = 6,28 \cdot 10^8$  рад/с и волновое число  $k = 4,55$ .

Скорость распространения волны определим из соотношения  $k = \frac{\omega}{\nu}$

Задача 2  
продолжение

## Электромагнитные волны

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{6,28 \cdot 10^8}{4,55} = 1,38 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Скорость электромагнитной волны в веществе

откуда  $\sqrt{\varepsilon} = \frac{c}{v}$  (учли, что  $\mu = 1$ ). Окончательно находим

диэлектрическую проницаемость вещества  $\varepsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2$

Вычисления:  $\varepsilon = \left(\frac{3 \cdot 10^8}{1,38 \cdot 10^8}\right)^2 = 4,72$

Ответ:  $v = 1,38 \cdot 10^8 \text{ м/с}$      $\varepsilon = 4,72$

# Энергия и импульс электромагнитной волны

Объемная  $w$  плотность энергии электромагнитной волны складывается из объемных плотностей электрического  $w_{\text{э}}$  и магнитного  $w_{\text{м}}$  полей:

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

В каждый момент времени объемные плотности электрического и магнитного полей одинаковы

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

$$w_{\text{э}} = w_{\text{м}} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

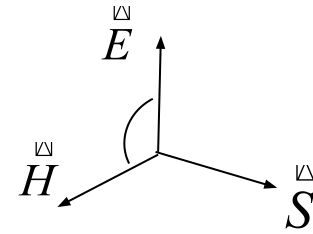
Для характеристики переносимой волной энергии и направления скорости было введено понятие *плотности потока энергии*

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

Вектор Умова - Пойнтинга

## Вектор Пойнтинга

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



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

Так как векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  взаимно перпендикулярны и образуют с направлением распространения волны правовинтовую систему, то направление вектора совпадают с направлением переноса энергии, а **модуль** этого вектора равен

$$S = wv = EH$$

$w$  - Объемная плотность энергии;

$v$  - Фазовая скорость волны

### Задача 3

## Вектор Пойнтинга

В вакууме распространяются две плоские электромагнитные волны одинаковой частоты, с одинаковыми начальными фазами и одинаковыми амплитудами вектора электрического поля  $E = 10 \text{ В/м}$ . одна волна распространяется вдоль оси  $x$ , а другая – вдоль оси  $y$ . Вектор  $E$  направлен параллельно оси  $z$ . Найти среднее значение плотности потока энергии в точках плоскости  $xy$

Дано:  $E_{mx} = E_{my} = 10 \text{ В/м}$      $\varepsilon = 1$      $\mu = 1$

Найти:  $\langle S \rangle$

Решение.

Плотность потока энергии

$$S = wv = EH$$

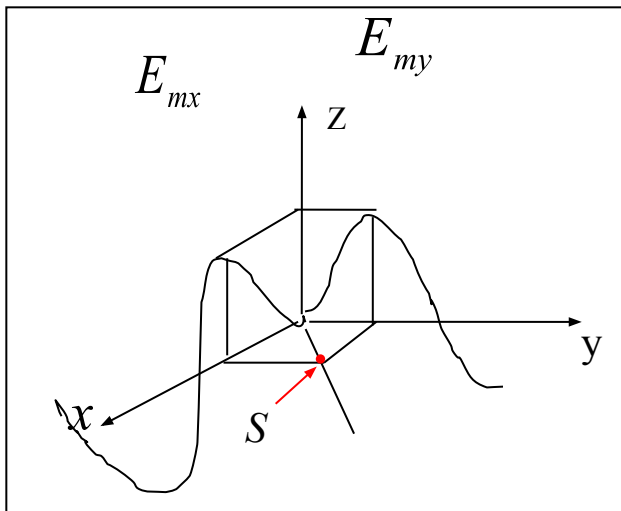
Среднее значение

$$\langle S \rangle = \langle w \rangle v$$

В вакууме  $v = c$      $\varepsilon = 1$      $\mu = 1$

В бегущей электромагнитной волне мгновенные значения  $E$  и  $H$  в любой точке связаны соотношением

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



### Задача 3

продолжение

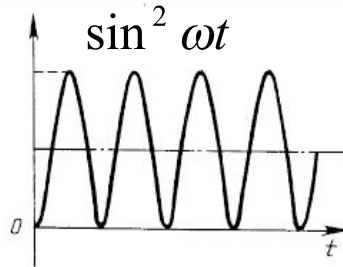
$$\sqrt{\varepsilon_0} E = \sqrt{\mu_0} H$$

$$E = E_m \sin(\omega t - kx)$$

$$H = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_m \sin(\omega t - kx)$$

$$S = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E^2_m \sin^2(\omega t - kx)$$

$$\langle S \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E^2_m$$



$$S = S_x + S_y$$

$$\langle S \rangle = \sqrt{\langle S_x \rangle^2 + \langle S_y \rangle^2}$$

$$\langle S \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \cdot E^2_m$$

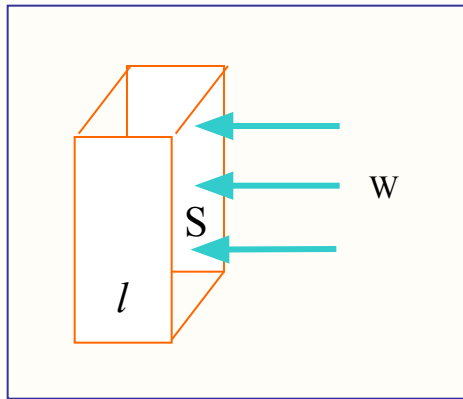
Вычисления

$$\langle S \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12}}{4\pi \cdot 10^{-7}}} \cdot 10^2 = 0,188 \text{ Вт} / \text{м}^2$$

Ответ:  $\langle S \rangle = 0,188 \text{ Вт} / \text{м}^2$



# Энергия и импульс электромагнитной волны



$$\Phi = \frac{W}{t} \quad \text{- Поток энергии}$$

$$j = \frac{\Phi}{S} \quad \text{- Плотность потока энергии}$$

$$j = \frac{\Phi}{S} = \frac{W}{t \cdot S} = \frac{W \cdot l}{t \cdot S \cdot l} = \frac{W}{V} \cdot v = w \cdot v$$

$$j = w \cdot v$$

Вектор Умова – Пойнтинга (плотность потока энергии) обозначают  $S$

$$S = w \cdot v$$

$$S = [E, H]$$

Для электромагнитной волны

$$w = 2w = \varepsilon_0 \varepsilon E^2 = \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} \sqrt{\mu_0 \mu} E H$$

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

## Задача 4

# Плотность потока энергии

Электромагнитная волна распространяется в среде, обладающей диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 3$  и магнитной проницаемостью  $\mu = 4$ . Объемная плотность энергии волны равна  $320 \text{ мкДж/м}^3$ . Найти модуль вектора плотности потока энергии волны.

Дано:  $\varepsilon = 3$  ;  $\mu = 4$  ;  $w = 320 \text{ мкДж/м}^3$  : Найти:  
 $|j|$   $j = S$

Решение Вектор плотности потока энергии

$$\vec{j} = w\vec{v}$$

где  $w$  – объемная плотность энергии;  $v$  - скорость волны в среде.

Модуль плотности потока энергии

$$j = wv$$

Скорость волны в среде

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

После подстановки имеем

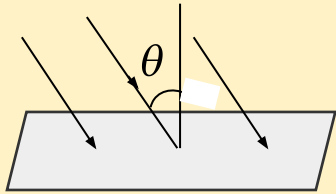
$$j = w \cdot \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

Ответ:  $j = 2,77 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$

$$j = 320 \cdot 10^{-6} \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{3 \cdot 4}} = 2,77 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$$

# Давление и импульс электромагнитной волны

Электромагнитные волны оказывают на тела давление



$$P = \frac{I}{c} (1 + R) \cos^2 \theta$$

$I$  - интенсивность волны

$R$  - коэффициент отражения

*Давление электромагнитных волн объясняется тем, что под действием электрического поля волны заряженные частицы начинают беспорядочно двигаться и подвергаются со стороны магнитного поля волны действию сил Лоренца.*

П.Н.Лебедев экспериментально доказал существование светового давления на твердые тела и газы

$$p = \frac{W}{c}$$

*Электромагнитная волна, несущая энергию  $W$ , обладает импульсом*

Энергия обычно выражается в электронвольтах

$$1 \text{ эВ} = \text{Дж} / 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

## Задача 5

# Давление и импульс электромагнитной волны

В вакууме вдоль оси  $x$  распространяется плоская электромагнитная волна и падает перпендикулярно к поверхности тела. Определить давление, оказываемое волной на тело, если амплитуда  $E = 1,5$  В/м. Тело полностью поглощает волну.

$$p = \langle w \rangle \quad w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

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

$$E = E_0 \cos(\omega t - kx)$$

$$w = \varepsilon_0 \varepsilon E_0^2 \cos^2(\omega t - kx)$$

$$\langle w \rangle = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon E_0^2$$

$$\langle w \rangle = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_0^2$$

$$p = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_0^2$$

$$p = 0,5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (1,5)^2 = 9,96 \text{ пПа.}$$

$$p = 9,96 \text{ пПа.}$$

# Распространение электромагнитных волн

В вакууме скорость электромагнитных волн равна

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

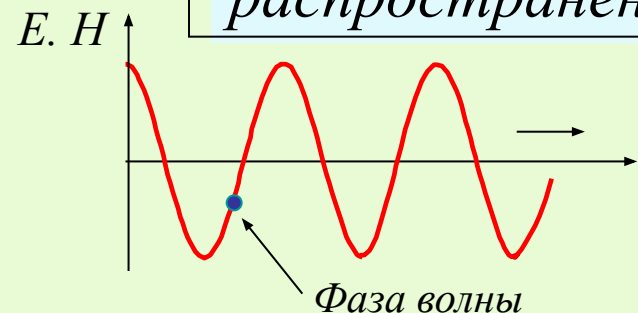
При распространении электромагнитных волн в среде

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

$\epsilon$  - Диэлектрическая проницаемость среды

$\mu$  - Магнитная проницаемость среды

Различают **фазовую** и **групповую** скорости распространения электромагнитных волн



Фазовая скорость – скорость распространения фазы волны

$$v_{\phi} = \frac{\omega}{k}$$

## Фазовая и групповая скорости распространения волн

Понятие скорости распространения волны является простым лишь в случае отсутствия дисперсии, при этом волны различной формы и интенсивности распространяются с одинаковой скоростью, которую называют **фазовой скоростью**, например распространение электромагнитных волн в вакууме ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с) или акустических в воздухе ( $v = 337$  м/с).

Если существует зависимость скорости гармонической волны от частоты (длины волны), то наблюдается явление, называемое **дисперсией волны**.



# Фазовая и групповая скорости распространения волн

**Дисперсия волны** – зависимость фазовой скорости волны в среде от его частоты

Групповая скорость зависит от фазовых скоростей различных волн, входящих в волновой пакет.

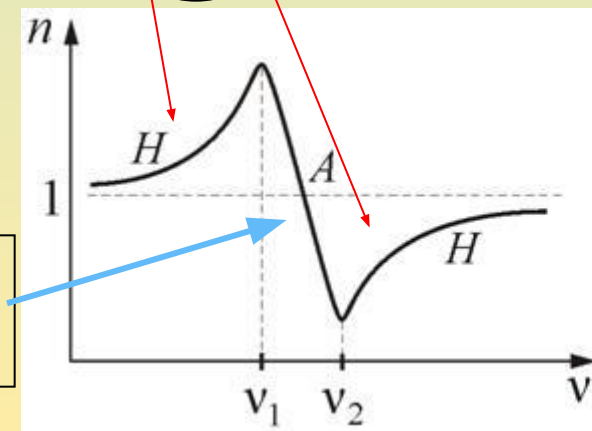
Зависимость между фазовой и групповой скоростями и длиной волны была получена Рэлеем и имеет вид

$$v_{gr} = v_{\phi} - \lambda \frac{dv_{\phi}}{d\lambda}$$

Нормальная дисперсия

$$\frac{dn}{dv} > 0$$

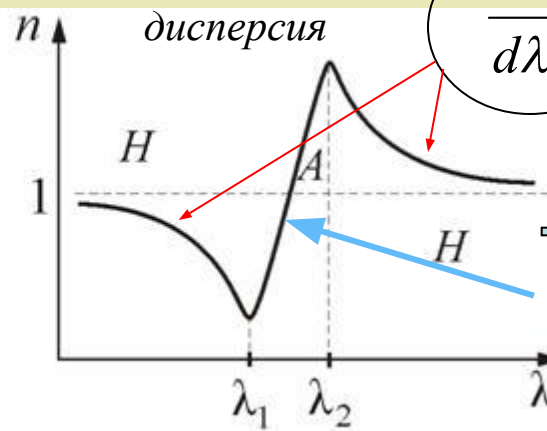
Аномальная дисперсия



Нормальная дисперсия

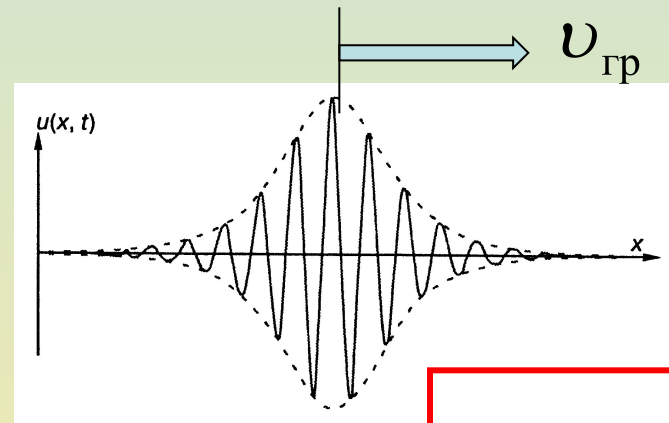
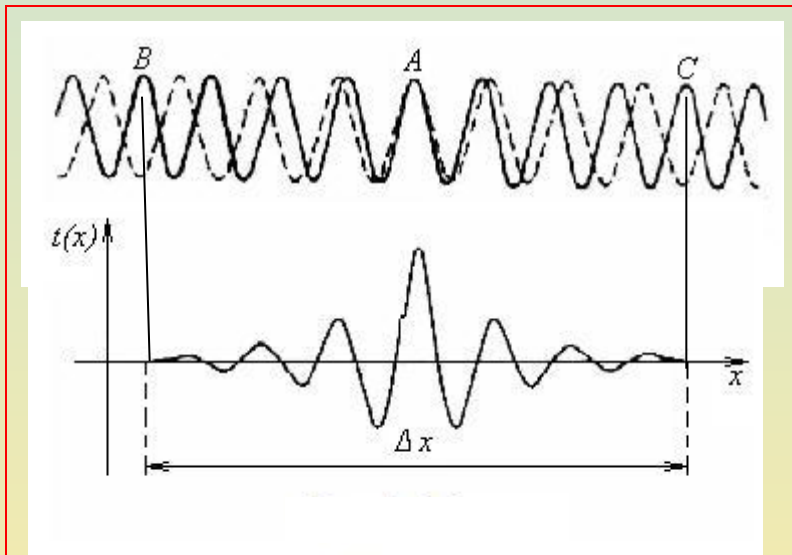
$$\frac{dn}{d\lambda} > 0$$

аномальная дисперсия



# Групповая скорость

Если среда обладает дисперсией, то форму волнового пакета можно представить как наложение гармонических волн с различными частотами (Фурье преобразование).



$$v_{gp} = v_{\phi} - \lambda \frac{dv_{\phi}}{d\lambda}$$

**Групповая скорость** – скорость распространения центра волнового пакета



# Поглощение электромагнитных волн

*Поглощением (абсорбцией) света называется явление уменьшение энергии световой волны при ее распространении в веществе вследствие преобразования энергии волны в другие виды энергии.*

*В результате поглощения интенсивность света при прохождении через вещество уменьшается. Поглощение света в веществе описывается **законом Бугера***

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

*где  $I_0$  и  $I$  – интенсивности плоской монохроматической волны соответственно на входе и выходе слоя поглощающего вещества толщиной  $x$ ;*

*$\alpha$  – коэффициент поглощения, зависящий от длины волны света, химической природы и состояния вещества и не зависящий от интенсивности света.*

## Задача 6

# Поглощение электромагнитной волны

Коэффициент поглощения графита для монохроматического света определенной длины волны  $\alpha = 700 \text{ см}^{-1}$ . Определить толщину слоя графита, вызывающего ослабление света в 100 раз.

Дано:  $\alpha = 700 \quad I_0 / I = 100$

Найти:  $d$

**Решение.** Запишем закон Бугера:  $I = I_0 e^{-\alpha \cdot d}$

По условию задачи

$$\eta = I_0 / I \quad \eta = e^{\alpha d}$$

Чтобы избавиться от экспоненты, необходимо проинтегрировать левую и правую части (взять натуральный логарифм)

$\ln \eta = \alpha \cdot d$  Откуда находим искомое значение толщины слоя  $d$

$$d = \frac{\ln \eta}{\alpha} \Rightarrow d = \frac{\ln 100}{7 \cdot 10^4} = 65,8 \text{ мкм}$$

Ответ:  $d = 65,8 \text{ мкм}$

## Задача 7

# Поглощение электромагнитной волны

Монохроматический свет падает нормально поочередно на две пластинки, изготовленные из одного материала, одна толщиной  $d_1 = 4$  мм, другая -  $d_2 = 8,5$  мм. Пренебрегая вторичными отражениями, определить коэффициент поглощения этого материала, если первая пластинка пропускает  $\eta_1 = 0,7$  светового потока, вторая -  $\eta_2 = 0,52$  .

Дано:  $d_1 = 4$  мм;  $d_2 = 8,5$  мм;  $\eta_1 = 0,7$   $\eta_2 = 0,52$

Найти:  $\alpha$

Решение Обе пластинки изготовлены из одного материала

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$$

Запишем закон Бугера

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha d_1}$$

$$I_2 = I_0 e^{-\alpha d_2}$$

Согласно условию задачи

$$\eta_1 = I_1 / I_0 \quad \eta_2 = I_2 / I_0$$

Задача 7  
продолжение

## Поглощение электромагнитной волны

Согласно условию задачи

$$\eta_1 = I_1 / I_0$$

$$\eta_2 = I_2 / I_0$$

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = e^{\alpha(d_2 - d_1)}$$

Откуда, потенцируя

$$\ln \frac{\eta_1}{\eta_2} = \alpha(d_2 - d_1)$$

находим искомый коэффициент поглощения

$$\alpha = \frac{\ln \eta_1 / \eta_2}{(d_2 - d_1)}$$

Подставляем числовые данные

$$\alpha = \frac{\ln 0,7 / 0,52}{(8,5 - 4) \cdot 10^{-3}} = 0,66 \text{ см}^{-1}$$

Ответ:  $\alpha = 0,66 \text{ см}^{-1}$

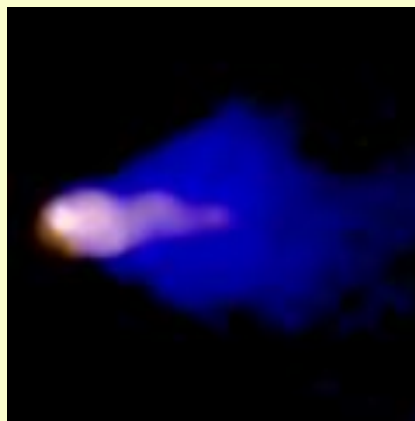
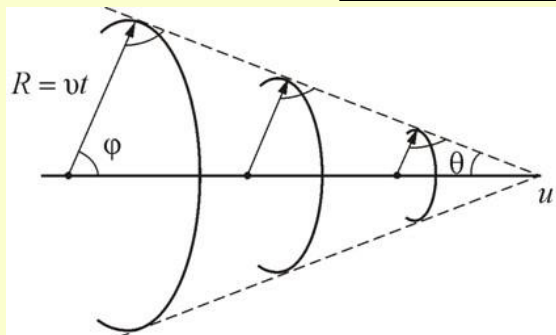
# Излучение Черенкова - Вавилова

Излучение (эффект) Черенкова – возникновение электромагнитного излучения при движении релятивистских частиц в среде с постоянной скоростью  $v$ , превышающей фазовую скорость света в этой среде, т.е. при условии

$$v > \frac{c}{n}$$

Суть этого явления заключается в следующем. Электрон, движущийся со скоростью, близкой к скорости света, *обгоняет* свое собственное электромагнитное поле и начинает этим полем тормозиться. В результате торможения и возникает излучение. Следовательно, скорость движения электронов и в среде превышает скорость распространения электромагнитных волн в среде, т.е. скорость света  $u > v_{\phi}$

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}$$



*П.А. Черенков, И.Е. Тамм и И.М. Франк в 1958 г. Удостоены нобелевской премии*

*Спасибо за  
внимание*

