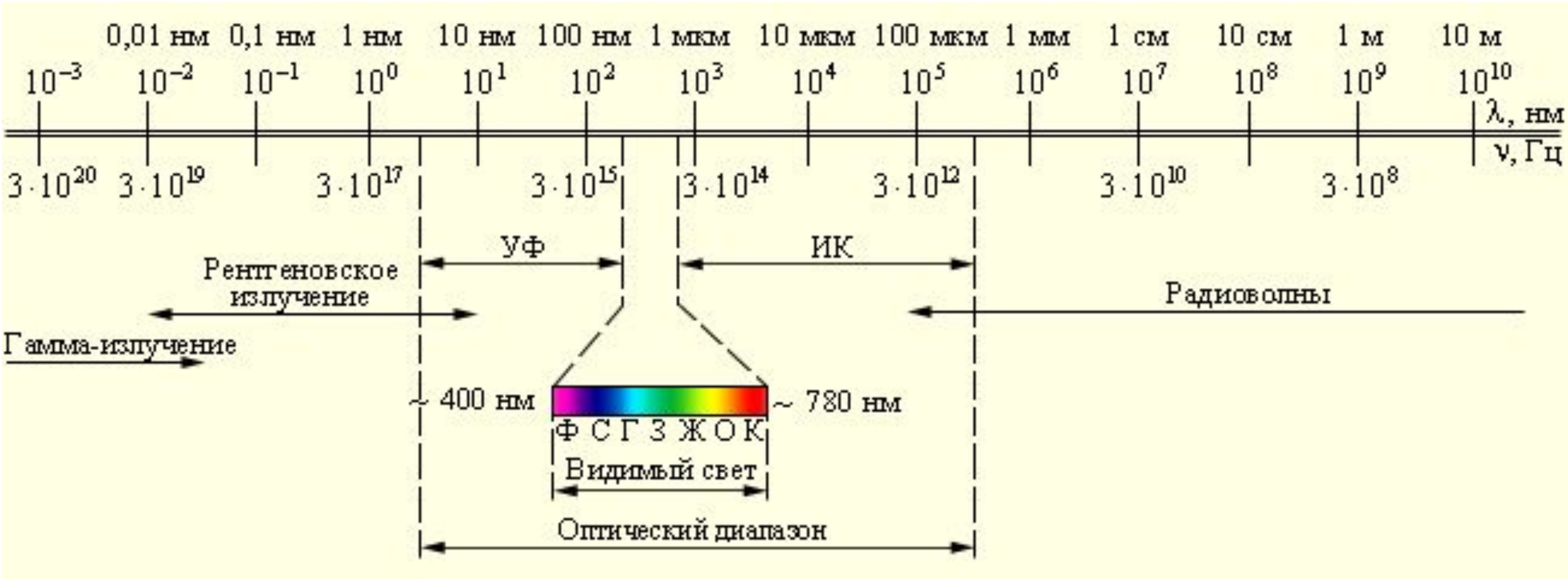
Лекция 7

СВЕТ КАК ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА

Вопросы:

1. **Общая характеристика излучения оптического диапазона.**
2. **Волновое уравнение и параметры световой волны.**
3. **Энергия световой волны.**



Место оптического диапазона
на шкале электромагнитных волн

<u>**Оптика**</u> **– это раздел физики, в котором изучаются свойства и законы распространения электромагнитного излучения в оптическом диапазоне длин волн.**

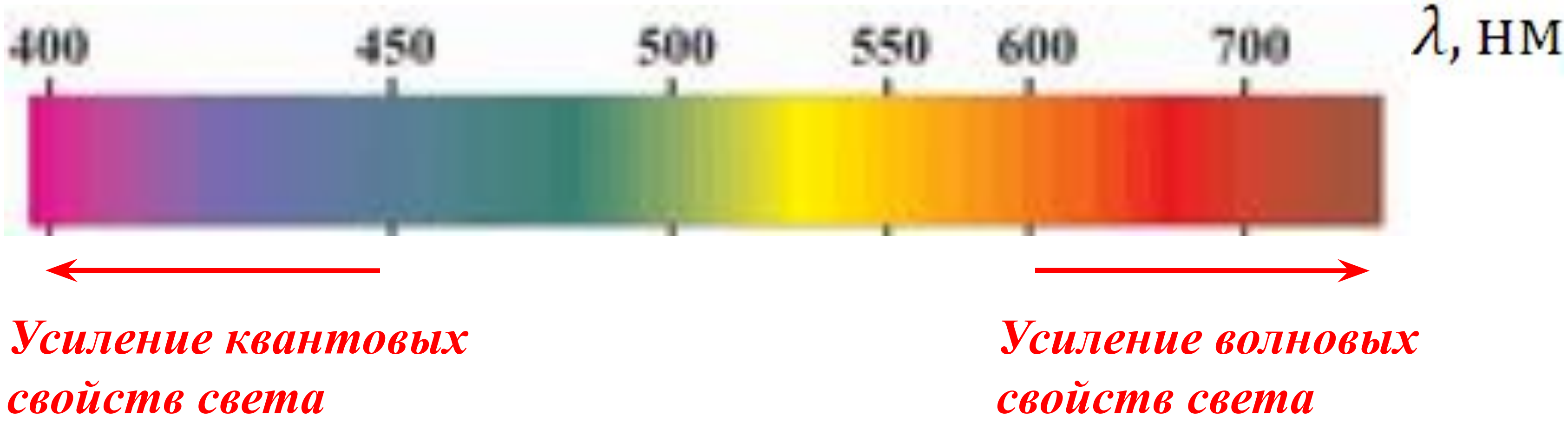
Джеймс Клерк Максвелл (1831 – 1879)

Изучение глубокой связи между электромагнитными и оптическими явлениями позволило Д.Максвеллу создать *электромагнитную теорию света*, согласно которой свет представляет собой электромагнитные волны оптического диапазона частот (длин волн).

<u>Разделы оптики</u>:

- **геометрическая оптика** изучает распространение света на основе представлений о световых лучах, т.е. в предположении малости длины волны света ($\lambda \to 0$);
- **волновая оптика** рассматривает оптические явления на основе волновой природы света. В волновой оптике изучаются явления *интерференции*, *дифракции* и *поляризации света*;
- **квантовая оптика** изучает дискретный (корпускулярный) характер оптического излучения.

Свет представляет собой сложный физический объект и обладает *корпускулярно-волновым дуализмом* (двойственностью свойств): в зависимости от длины волны в одних случаях он ведет себя как волна, в других – как поток особых частиц (фотонов).



$$\begin{cases} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\mu_0 \cdot \int\limits_S \dfrac{\partial \vec{H}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \\ \vec{H} \cdot d\vec{l} = \varepsilon_0 \cdot \int\limits_S \dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \end{cases}$$

– система уравнений для электрической $\vec{E}$ и магнитной $\vec{H}$ составляющих электромагнитной волны.

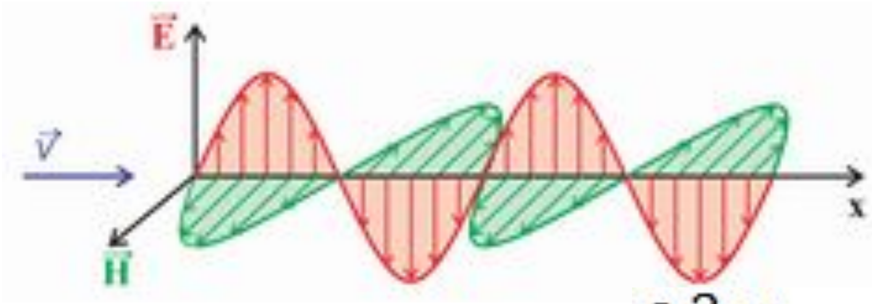
Из этой системы может быть получено волновое уравнение для $\vec{E}$ и $\vec{H}$:

$$\Delta\vec{E} = \varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}; \quad \Delta\vec{H} = \varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

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

– оператор Лапласа.

Плоская монохроматическая световая волна



В одномерном случае

$$E = E(x,t); H = H(x,t)$$

волновое уравнение $$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}; \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

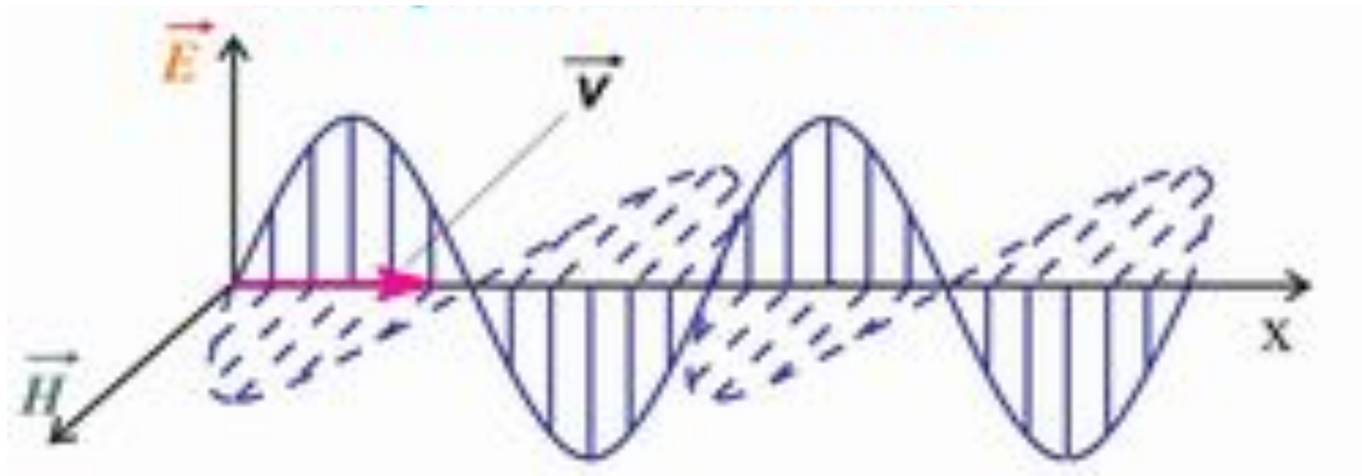
описывает плоскую монохроматическую световую волну:

$$\left.\begin{aligned} E(x,t) &= E_m \cos(\omega t - kx + \varphi) \\ H(x,t) &= H_m \cos(\omega t - kx + \varphi) \end{aligned}\right\}$$

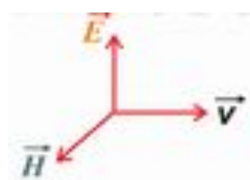
$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ *– волновое число;* $v = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ *– скорость волны.*

$n = \sqrt{\varepsilon\mu}$ *– показатель преломления среды.*

Свойства электромагнитной (световой) волны



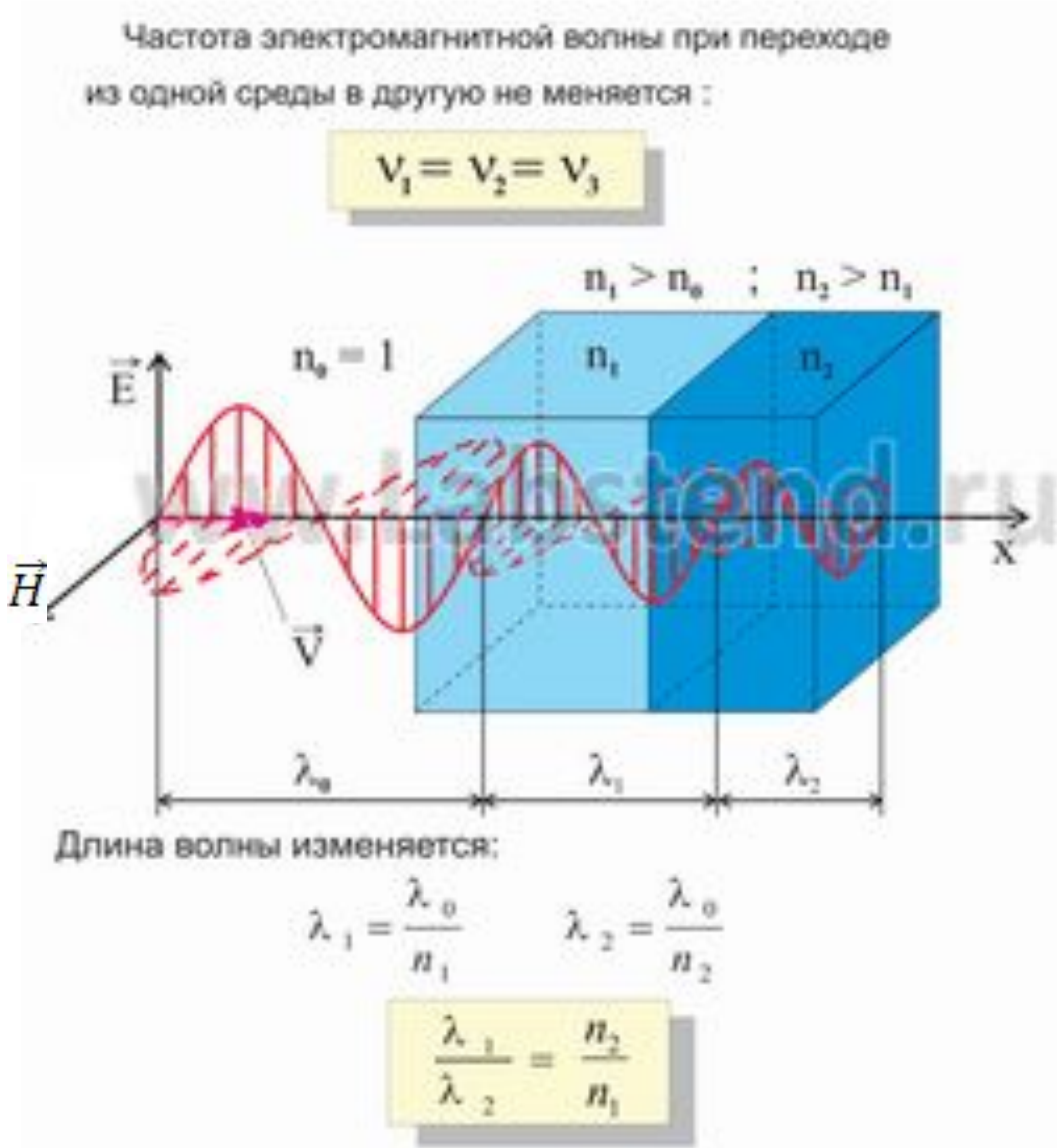
1. **Электромагнитная (световая) волна является поперечной волной.**



2. **Вектора электрической и магнитной напряженностей колеблются в одинаковой фазе.**

3. **Мгновенные значения *E* и *H* в любой точке связаны соотношением Максвелла:** $\varepsilon_0 \varepsilon E^2 = \mu_0 \mu H^2$

Свойства частоты и длины волны света при переходе из одной среды в другую



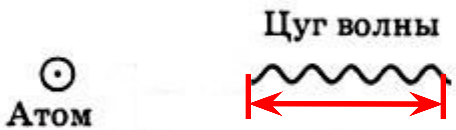
Фазовая и групповая скорости световой волны

Бесконечно протяженная монохроматическая волна

$$\omega t - kx + \varphi = const.$$

$$\omega dt - kdx = 0$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k}$$ – ***фазовая скорость, т.е. скорость переноса фазы волны.***



$$\tau = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$$ – ***длительность цуга.***

$\Delta\omega$ – ***ширина спектра частот.***

Δk – ***ширина спектра волновых чисел.***

Параметры волнового пакета

$$u = \lim_{\Delta k \to 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta k} = \frac{d\omega}{dk}$$ – ***групповая скорость, т.е. скорость движения центра волнового пакета.***

Связь групповой и фазовой скоростей

$$u = \frac{d(vk)}{dk} = v + k \cdot \frac{dv}{dk} = v + k \cdot \frac{dv}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dk}$$

$$\frac{dk}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) = -\frac{2\pi}{\lambda^2}$$

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

В недиспергирующей среде (среде, в которой фазовая скорость волн не зависит от их частоты) имеем: $\frac{dv}{d\lambda} = 0 \Rightarrow u = v$

<u>Энергия световой волны</u>

Объемная плотность энергии световой волны определяется как сумма энергетических компонент электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля:

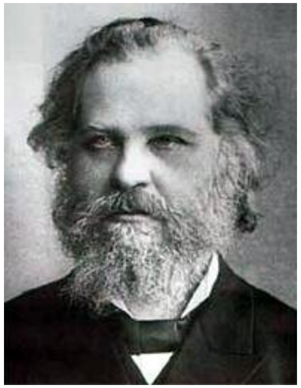
$$w = w_{\text{эл}} + w_{\text{м}} = \frac{1}{2}\varepsilon\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\mu\mu_0 H^2 \qquad \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}\right]$$

$$\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon}\cdot E = \sqrt{\mu_0\mu}\cdot H \quad \Rightarrow \quad w_{\text{эл}} = w_{\text{м}}$$

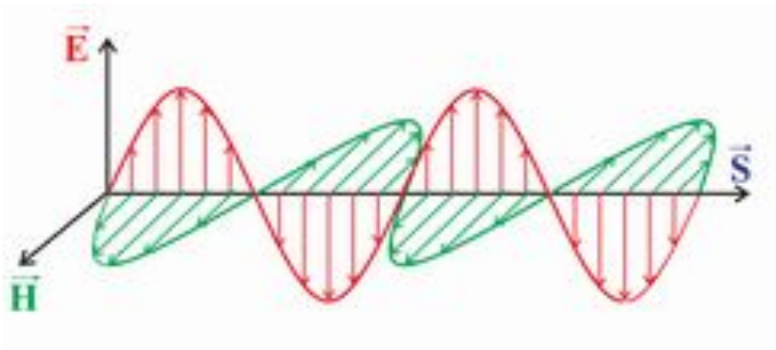
$$w = 2(\sqrt{w_{\text{ýë}}}\cdot\sqrt{w_{\text{ì}}}) = \sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\cdot\sqrt{\varepsilon\mu}EH = \frac{1}{\upsilon}\cdot\text{ÅÍ}$$

$$\vec{S} = w\cdot\vec{\upsilon} = \frac{1}{\upsilon}EH\cdot\vec{\upsilon} = \left[\vec{E}\times\vec{H}\right], \frac{\text{Âò}}{\text{ì}^{2}}$$ – ***вектор плотности потока энергии (вектор Умова-Пойнтинга).***

Вектор Умова-Пойнтинга и интенсивность световой волны



Николай Алексеевич Умов (1846 – 1915)



Джон Генри Пойнтинг (1852 – 1914)

Модуль вектора Умова-Пойнтинга равен энергии, переносимой световой волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения световой волны.

Усредненная по времени величина модуля вектора Умова-Пойнтинга называется *интенсивностью световой волны*:

$$I = \langle|\vec{S}|\rangle, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Вычисление интенсивности плоской монохроматической световой волны

$$I = E_m H_m \cdot \langle cos^2(\omega t - kx + \varphi)\rangle = \frac{1}{2} E_m H_m$$

Поскольку $\varepsilon_0 \varepsilon E_m^2 = \mu_0 \mu H_m^2,$ **то:**

$$I = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\mu_0 \mu}} E_m^2$$

Для световой волны, распространяющейся в вакууме:

$$\varepsilon = \mu = 1 \qquad \frac{E_m}{H_m} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377 \text{ Ом}$$