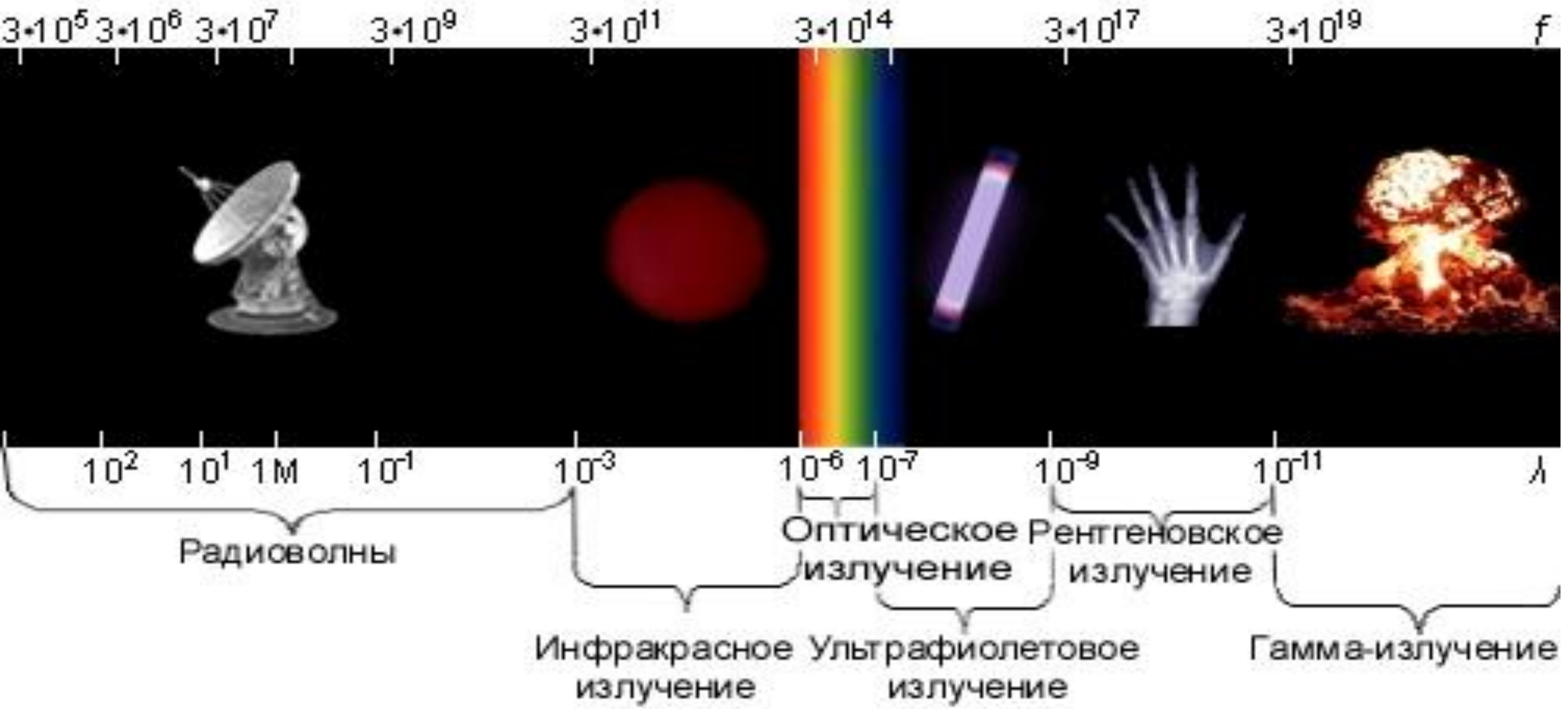
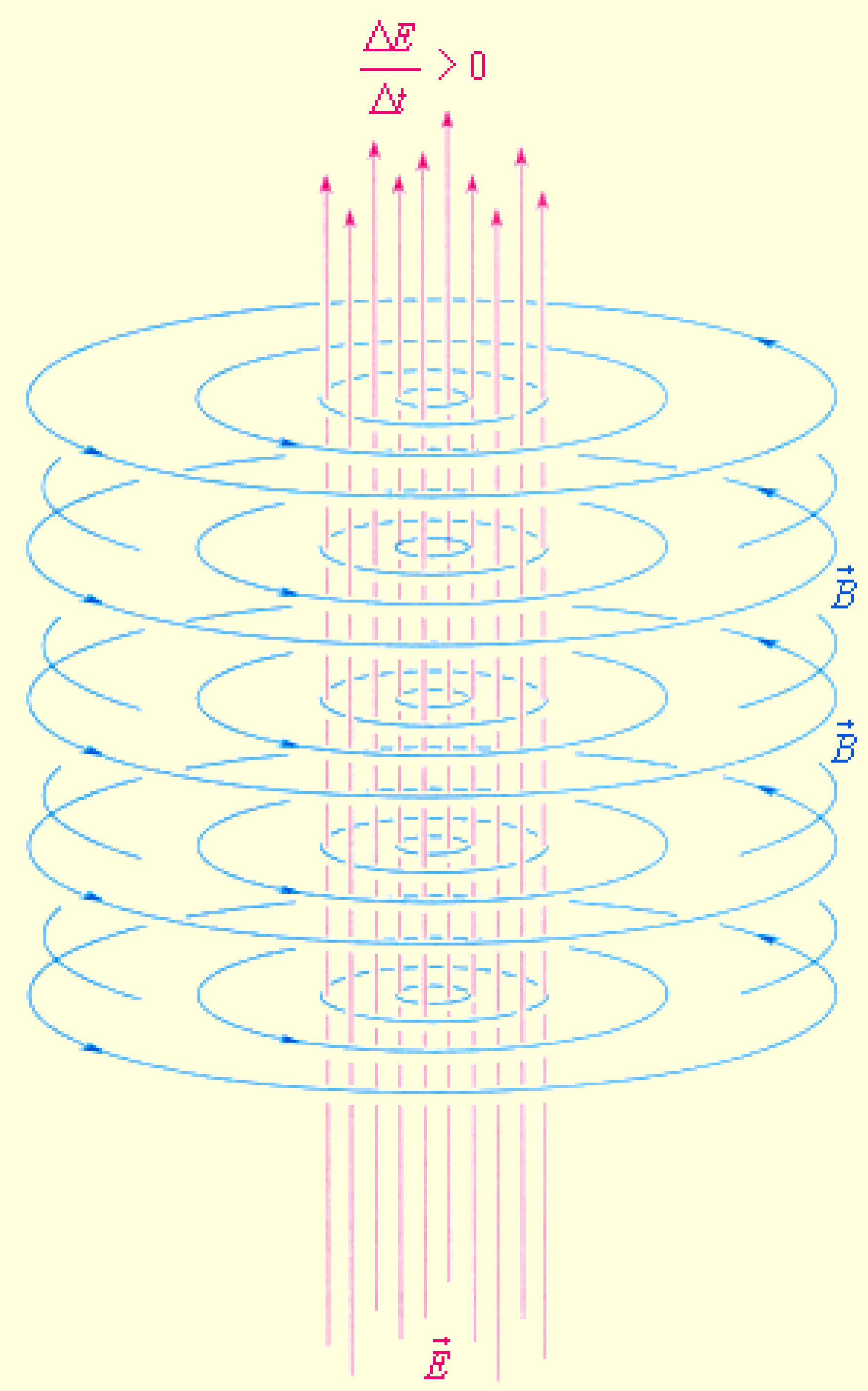
Тема 10. Волновые процессы

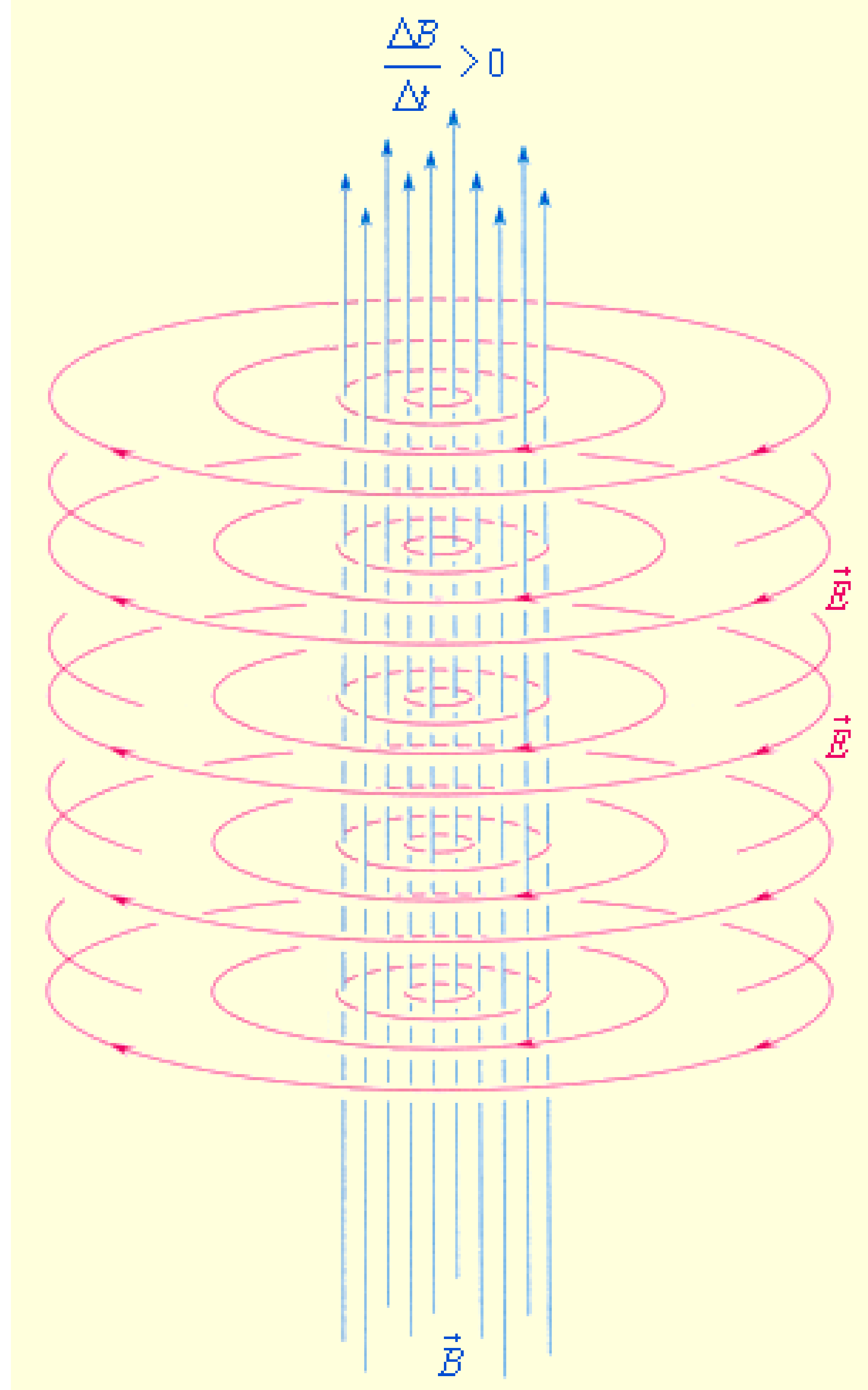
- 10.4. Возникновение электромагнитной волны

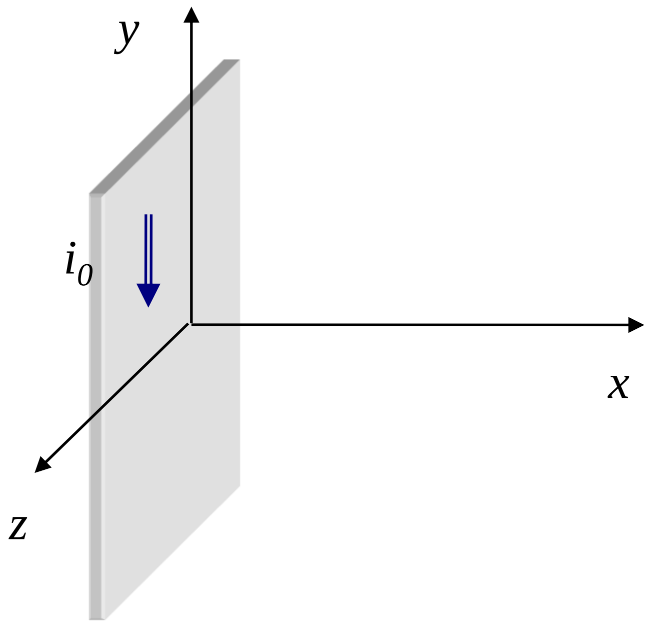
Максвелл
Джеймс Клерк
(1831–79)

Шкала электромагнитного излучения. Внизу – длина волны в метрах, вверху – частота колебаний в герцах



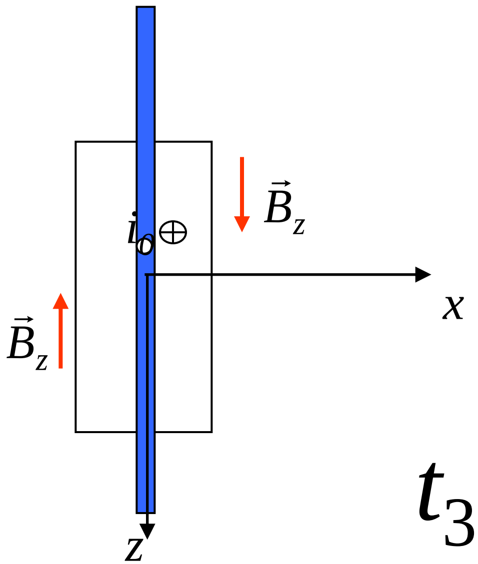

$\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0$
$\vec{B}$
$\vec{B}$
$\vec{E}$


$\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0$
$\vec{E}$
$\vec{E}$
$\vec{B}$

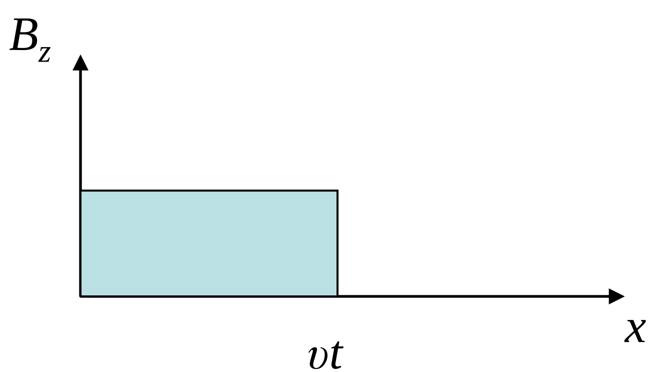


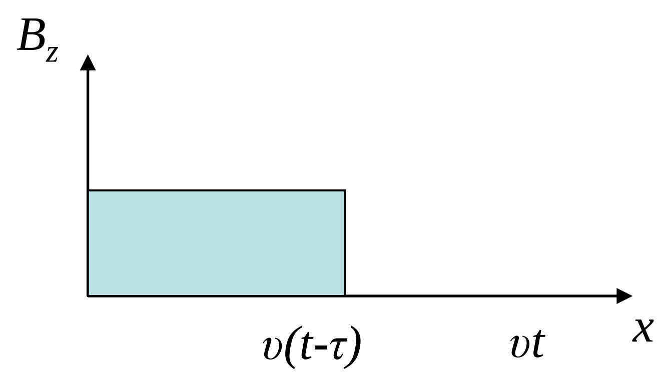
y
i0
x
z

Вид сверху

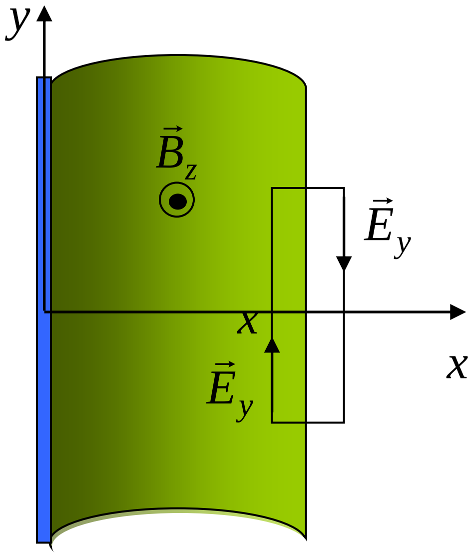


$$t_3 = \frac{x}{\upsilon} \qquad \vec{B}_z = \frac{\mu_0 i\left(t - \dfrac{x}{\upsilon}\right)}{2}\vec{e}_z$$



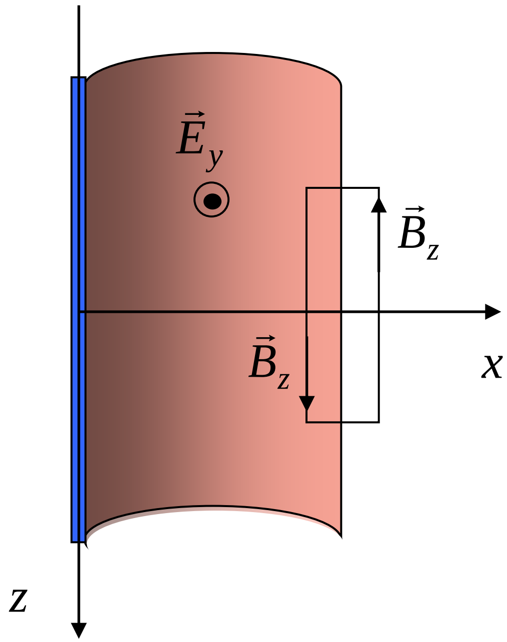


Циркуляция вектора электрического поля вблизи фронта магнитного поля



$$E_y = \upsilon B_z$$

Циркуляция вектора магнитной индукции вблизи фронта электрического поля



$$E_y = \upsilon B_z$$

$$\upsilon^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} = c^2$$

Тема 10. Волновые процессы

- 10.4. Возникновение электромагнитной волны
- 10.5. Дифференциальное уравнение ЭМВ

Максвелл
Джеймс Клерк
(1831–79)

Уравнение ЭМВ в вакууме

$$\boxed{\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \nabla^2 \vec{E} = 0} \qquad \boxed{\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \nabla^2 \vec{B} = 0}$$

уравнение Даламбера

$$\boxed{\nabla^2 \equiv \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}}$$ - *оператор Лапласа*

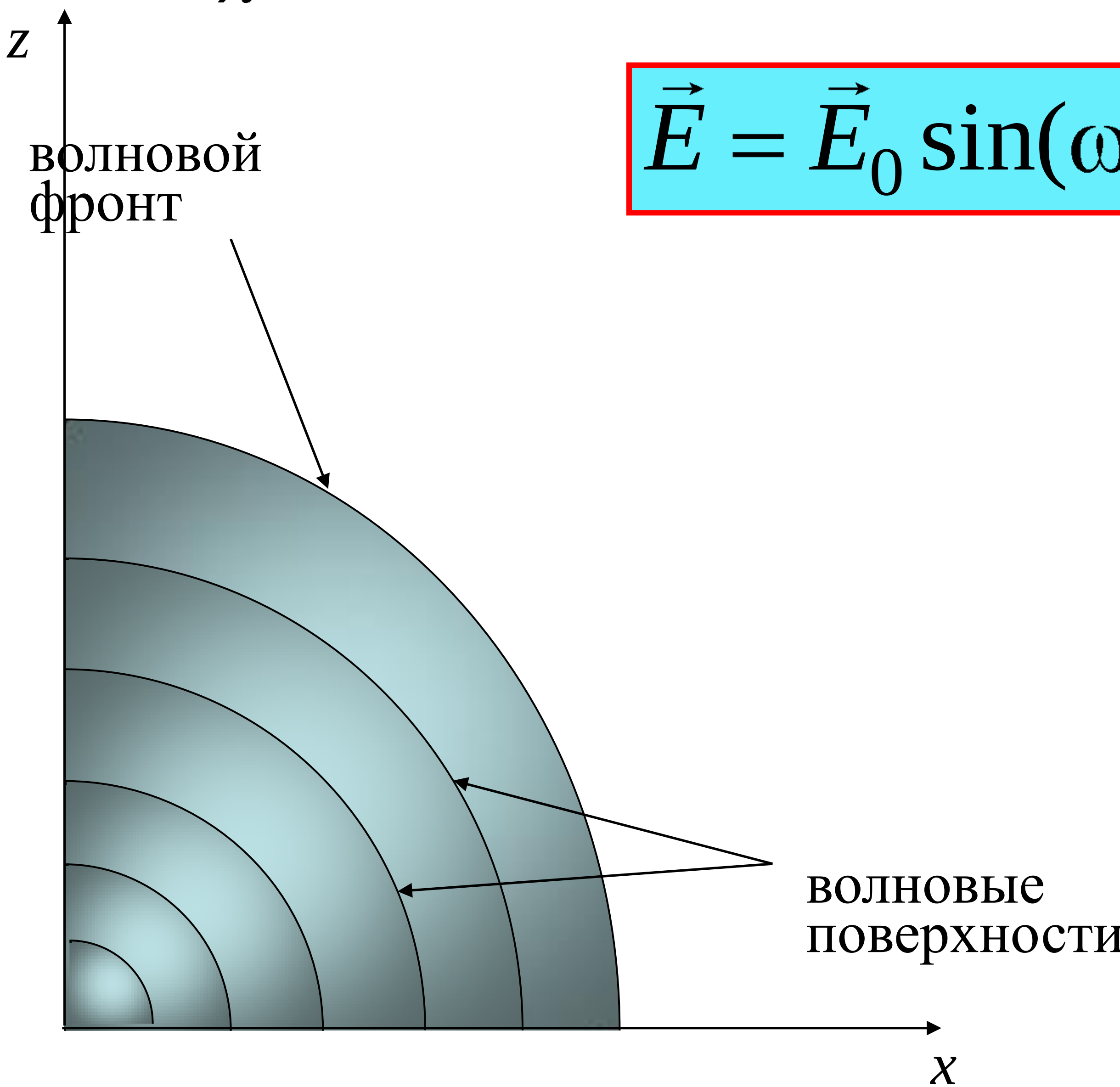
волновое уравнение для плоского электромагнитного поля

$$\boxed{\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}}$$

$$E_y = f_1\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{\upsilon}\right)$$

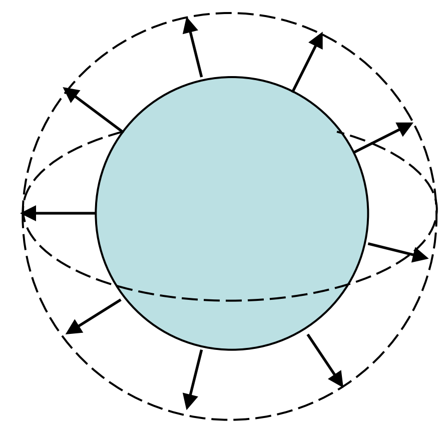
$$\upsilon \equiv c$$

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



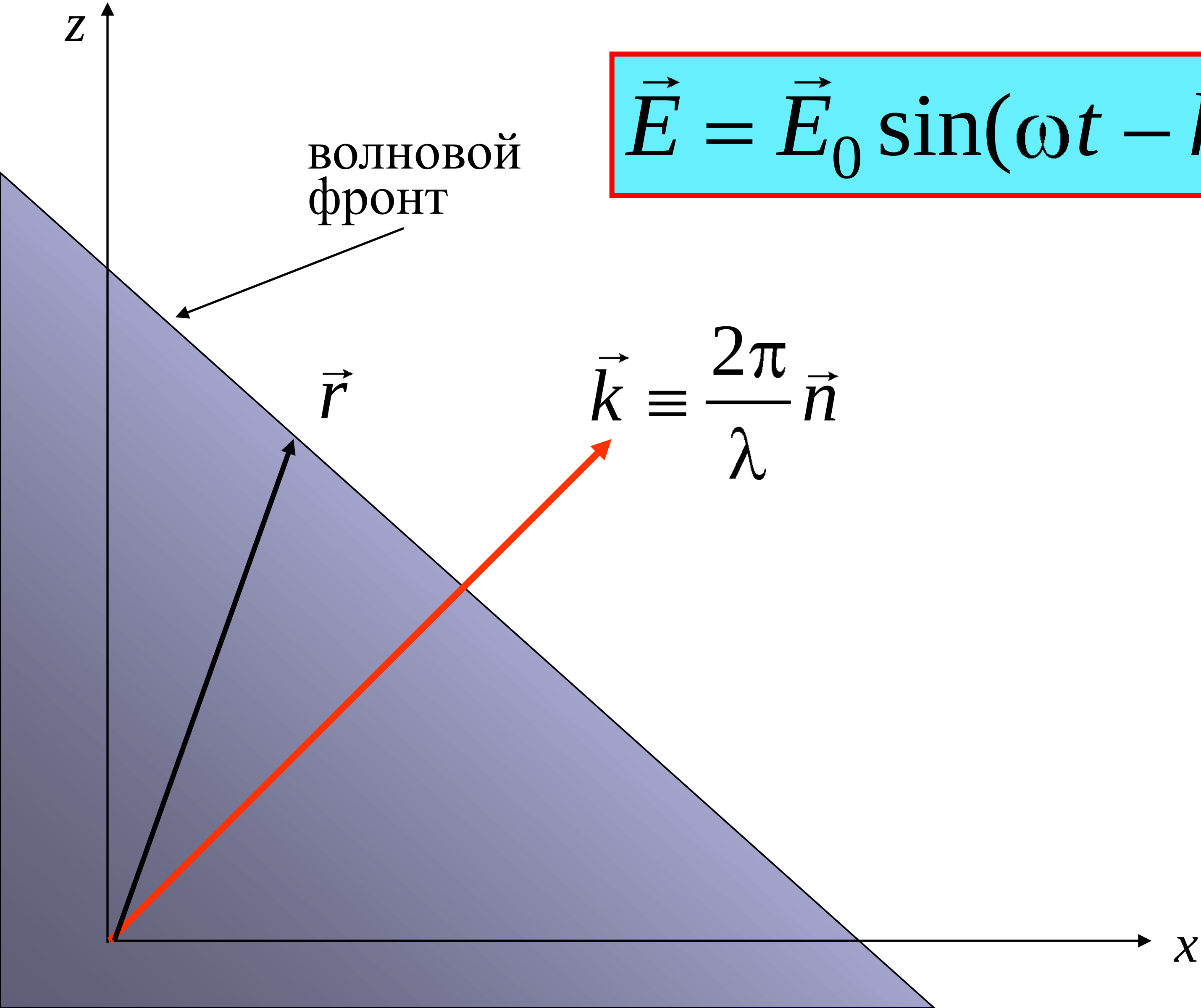
$$\boxed{\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\omega t - kr + \alpha)}$$

Сферическая
волна



Плоская волна

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha)$$



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

Тема 10. Волновые процессы

- 10.5. Дифференциальное уравнение ЭМВ
- 10.6. Свойства ЭМВ. Вектор Пойнтинга

Пойнтинг Джон Генри (9.IX.1852–30.III.1914)

Плоская гармоническая волна

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \alpha)$$

$$e^{i\alpha} = \cos\alpha + i\sin\alpha$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} + \alpha)}$$

$$\vec{E} = \mathrm{Re}\,\vec{E} = \mathrm{Re}\,\vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} + \alpha)}$$

Плоская гармоническая волна

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\ \omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} + \alpha}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 e^{i\ \omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} + \alpha}$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = -i\vec{k}\cdot\vec{E}$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{B} = -i\vec{k}\cdot\vec{B}$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = -i\vec{k}\times\vec{E}$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{B} = -i\vec{k}\times\vec{B}$$

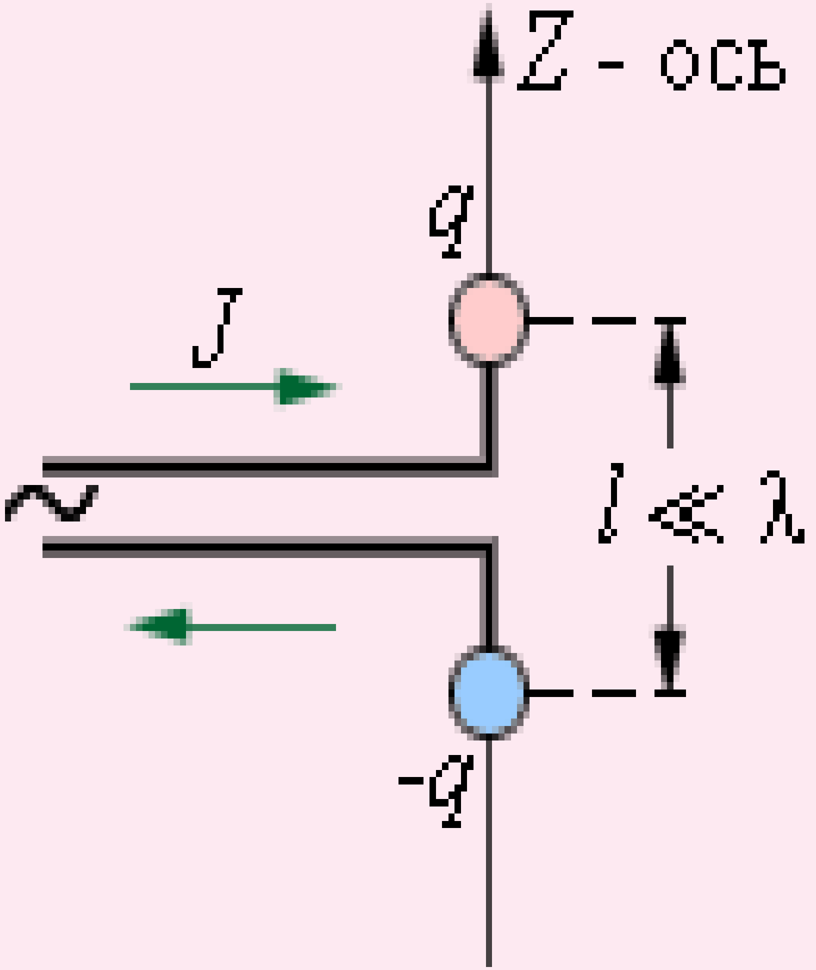
$$\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} = i\omega\vec{E}$$

$$\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} = i\omega\vec{B}$$

Свойства электромагнитных волн

- 1. Поперечность
- 2. Векторы $\vec{E}, \quad \vec{B}, \quad \vec{k}$ образуют правую тройку
- 3. Синфазность
- 4. $I_1 = 0$
- 5. $I_2 = 0$
- 6. $w = \varepsilon_0 E^2 = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} EB$
- 7. $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$
- 8. $I = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \left\langle E^2 \right\rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_0^2$
- 9. $\vec{p}_{e\partial} = \frac{1}{c^2} \vec{S}$

Элементарный диполь, совершающий гармонические колебания (диполь Герца)



$$p = q(t)l = p_0 \cos \omega t$$

Герц (Hertz)
Генрих
(22.II.1857–1.I.1894)

Излучение элементарного диполя