ОБЩАЯ ФИЗИКА ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

ЛЕКЦИЯ №19

(Для студентов элитного отделения ЭТО –II)

- Электромагнитная теория Максвелла (60-е годы XIX века)
- Основные положения теории Максвелла
- Система уравнений Максвелла в интегральной форме
- Уравнения Максвелла в дифференциальной форме
- Система статических уравнений Максвелла
- Значение теории Максвелла
- Электрическое поле, измеренное в разных системах отсчета
- Относительность электрических и магнитных полей

Электромагнитная теория Максвелла (60-е годы 19 века)

В теории Максвелла рассматриваются ***макроскопические поля***, которые

- создаются макроскопическими зарядами и токами, сосредоточенными в объемах много больших, чем объем атомов и молекул,

-период изменения переменных электрических и магнитных полей много больше периода внутримолекулярных процессов

-расстояние от источников полей до рассматриваемой точки пространства много больше размеров атомов и молекул,

Теория Максвелла – теория *близкодействия*, т.е. электромагнитное взаимодействие происходит с конечной скоростью, равной скорости света c

Основные положения теории Максвелла

1.***<u>Переменное магнитное поле порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле</u>***

2.***<u>Переменное электрическое поле порождает в окружающем пространстве магнитное поле</u>***

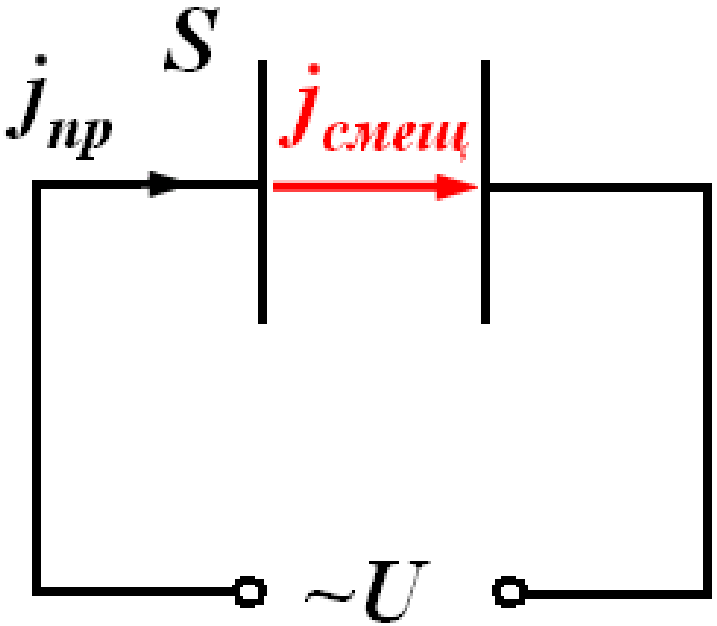
Циркуляция вихревого электрического поля по

$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = \mathcal{E}_i$$

замкнутому контуру L равна взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на контур.

Ток смещения



Ток смещения.

Постулируется: *линии тока проводимости на границах обкладок конденсатора переходят в линии тока смещения.*

$$j_{\text{пр}} = j_{\text{см}}. \qquad (1)$$

$$j_{\text{пр}} = \frac{I}{S}. \qquad (2)$$

$$I = \frac{dq}{dt}. \qquad (3)$$

$$q = \sigma S. \qquad (4)$$

$$I = S\frac{d\sigma}{dt}. \qquad (5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \qquad \Rightarrow$$

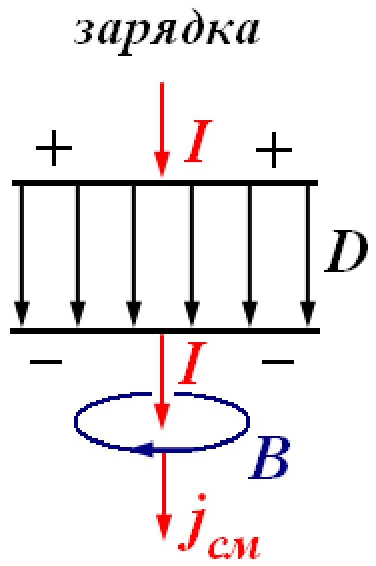
$$\vec{j}_{\text{см}} = \underbrace{\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}}_{\text{пл.тока смещ.в вакууме}} + \underbrace{\frac{\partial \vec{P}}{\partial t}}_{\text{пл.тока поляризации}}.$$

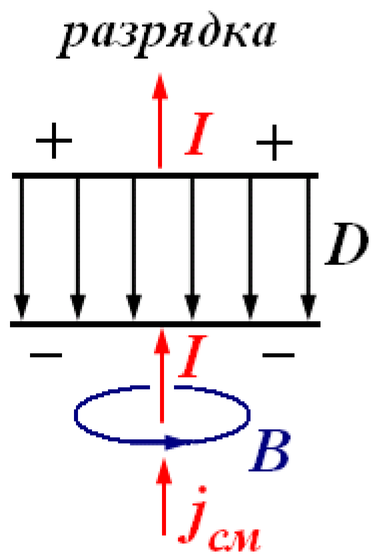
$$\left.\begin{aligned} j_{\text{см}} &= \frac{I}{S} = \frac{d\sigma}{dt}. && (6) \\ E &= \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, && (7) \\ D &= \varepsilon_0 E = \sigma. && (8) \end{aligned}\right\}$$

$$j_{\text{см}} = \frac{dD}{dt}. \qquad (9)$$

$$\vec{j}_{\text{см}} = \frac{d\vec{D}}{dt}. \qquad (10)$$

Ток смещения при зарядке и разрядке конденсатора





Циркуляция вектора **H** напряженности магнитного поля по произвольному замкнутому контуру L равна алгебраической сумме макротоков и тока смещения сквозь поверхность, натянутую на этот контур.

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

Максвелл приписал току смещения только одно общее свойство с током проводимости – *способность создавать в окружающем пространстве магнитное поле*.

Система уравнений Максвелла в интегральной форме

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV.$$

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

$$\operatorname{div}\vec{D} = \rho.$$

Из уравнений Максвелла следует

1) Электрическое и магнитное поля взаимосвязаны, т.е. в общем случае электрическое и магнитное поля не могут существовать друг без друга. Существует единое электромагнитное поле.

2) Уравнения Максвелла ковариантны относительно преобразований Лоренца, т.е. их вид не изменяется при переходе от одной ИСО к другой.

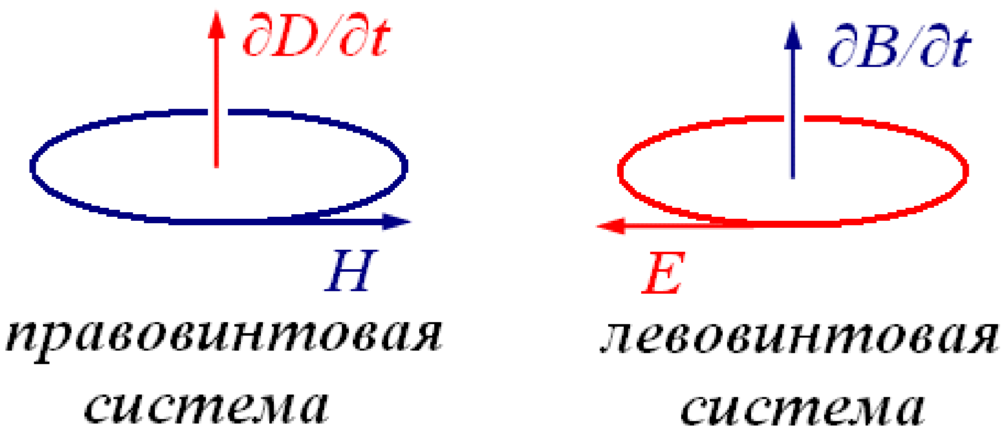
3) Уравнения Максвелла несимметричны

$$\mathrm{rot}\vec{E} = \underbrace{-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}}_{\text{одно слагаемое}}; \qquad \mathrm{rot}\vec{H} = \underbrace{\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}}_{\text{два слагаемых}}.$$

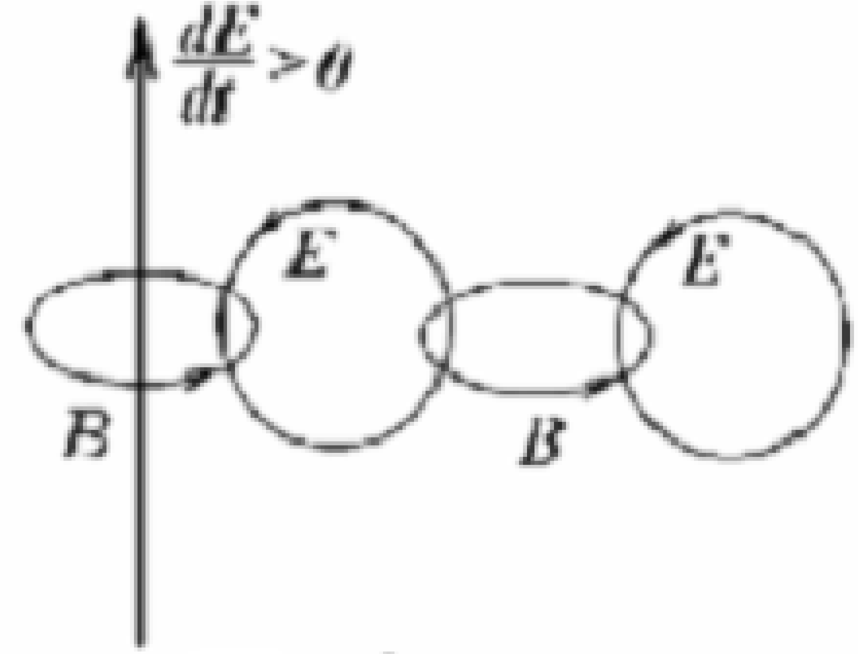
В среде без токов и зарядов уравнения Максвелла имеют вид

$$\mathrm{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \qquad \mathrm{rot}\vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

$$div\vec{B} = 0; \qquad div\vec{D} = 0. \qquad (1)$$



Возникновение электромагнитной волны



Материальные уравнения Максвелла

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E},$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H},$$

$$\vec{j} = \sigma\left(\vec{E}_{\text{кул}} + \vec{E}_{\text{ст}}\right).$$

Система статических уравнений Максвелла

$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = 0, \qquad \mathrm{rot}\vec{E} = 0.$$

$$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0, \qquad \mathrm{div}\vec{B} = 0.$$

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = \int_S \vec{j}d\vec{S}, \qquad \mathrm{rot}\vec{H} = \vec{j}\,.$$

$$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = \int_V \rho dV, \qquad \mathrm{div}\vec{D} = \rho.$$

Значение теории Максвелла

1. Показал, что электромагнитное поле – это совокупность взаимосвязанных электрических и магнитных полей.

2. Предсказал существование электромагнитных волн, распространяющихся от точки к точке с конечной скоростью.

3. Показал, что световые волны являются электромагнитными волнами.

4. Связал воедино электричество, магнетизм и оптику.

Электрическое поле, измеренное в разных системах отсчета

Пусть в системе имеем две неподвижные заряженные плоскости с поверхностными плотностями $+\sigma$ и $-\sigma$.

а) Пусть плоскости – квадраты со сторонами и будем считать, что расстояние между плоскостями << a. Тогда поле между плоскостями можно считать однородным.

В системе S: $E_Z = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0} = \dfrac{Q}{a^2\varepsilon_0}.$

В системе S': $x' = a\sqrt{1-\beta^2}, \quad \sigma' = \dfrac{\sigma}{a^2\sqrt{1-\beta^2}}; \quad E_z' = \dfrac{E_z}{\sqrt{1-\beta^2}} = \gamma E_z.$

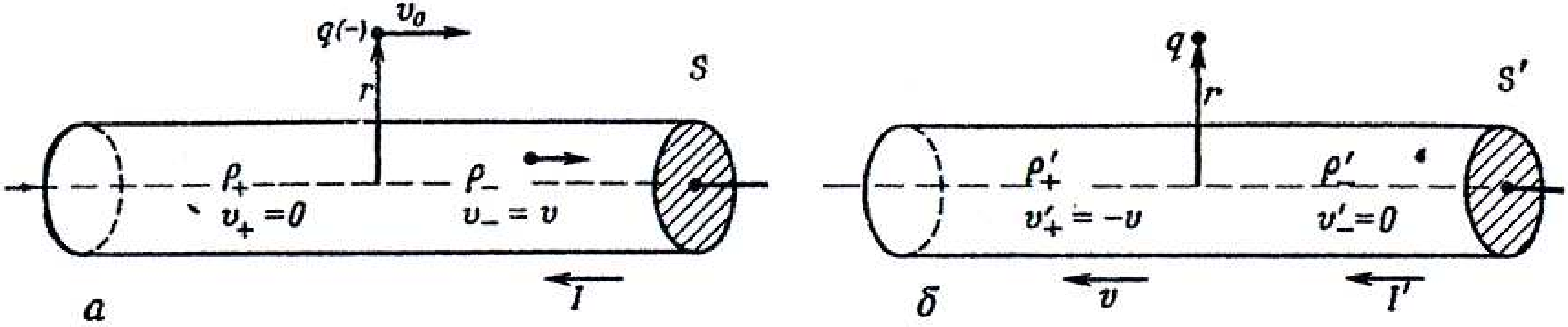
б) Теперь пусть плоскости ориентированы перпендикулярно оси x. $E_x = E_x' = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}.$

Обобщим результаты: $F_{\text{пер}} = qE_{\text{пер}} \quad F'_{\text{пер}} = \dfrac{qE_{\text{пер}}}{\sqrt{1-\beta^2}}.$

$$F_{\text{пер}} = F'_{\text{пер}}\sqrt{1-\beta^2}$$

Относительность электрических и магнитных полей

Пусть имеем отрицательный заряд движущийся параллельно длинному проводнику, по которому течет ток.



S-система: $\vec{F}_{\text{л}} = q[\vec{\upsilon}_0 \cdot \vec{B}]$ $F_{\text{л}} = q\upsilon_0 B.$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \qquad \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} = c^2.$$

$$B = \frac{I}{2\pi r \varepsilon_0 c^2}.$$

$$I = \rho_+ S \upsilon.$$

$$F_л = \frac{q\upsilon_0 \rho_+ S \upsilon}{2\pi r \varepsilon_0 c^2}.$$

$$F_л = \frac{q \rho_+ S \upsilon^2}{2\pi r \varepsilon_0 c^2}.$$

S'-система: $L' = L_0\sqrt{1-\beta^2}$

$$\rho_0 L_0 S = \rho' L' S$$

$$\rho_0 L_0 = \rho' L'.$$

$$\rho'_+ = \frac{\rho_+}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \rho_- = \frac{\rho^э_-}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\rho^э_- = \rho_-\sqrt{1-\beta^2}$$

$$\rho' = \rho'_+ + \rho'_- \qquad \rho' = \frac{\rho_+}{\sqrt{1-\beta^2}} + \rho_-\sqrt{1-\beta^2}$$

$$\rho_+ = -\rho_- \qquad \rho' = \rho_+ \cdot \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

$$E' = \frac{\rho' S}{2\pi r\varepsilon_0} = \frac{\rho_+ S\beta^2}{2\pi r\varepsilon_0\sqrt{1-\beta^2}}. \qquad F' = \frac{F}{\sqrt{1-\beta^2}};$$