

# ГЛАВА III. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

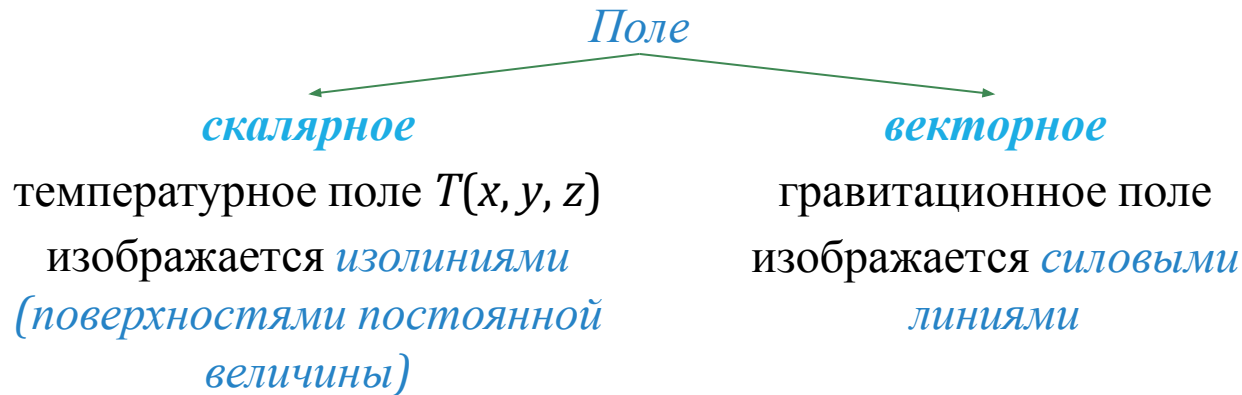
## §1. Электромагнитное поле

**О. И. Лубенченко**  
**НИУ МЭИ**

**Кафедра физики им. В. А. Фабриканта**  
**2020**

## I. Поле

**Поле** — ФВ — любая изменяющаяся в пространстве физическая величина.



Густота силовых линий  $\sim$  модулю векторного поля.

## II. Электрический заряд

**Электрический заряд** — ФВ — квантовое число, характеризующее частицу как источник электромагнитного взаимодействия.

В классической физике электрический заряд — скалярная алгебраическая ФВ — характеристика **электрически заряженного тела**, т. е. тела, на которое действует электромагнитное поле.

$$[q] = \text{Кл (кулон)}$$

**Элементарный заряд** — минимальный (по модулю) электрический заряд частиц, наблюдаемых в свободном состоянии.

$$e = 1,60 \cdot 10^{-19}$$

**Электрически изолированная система** — система тел, для которой сумма электрических зарядов частиц, появившихся в этой системе, равна нулю.

**Закон сохранения электрического заряда:** суммарный электрический заряд любой электрически изолированной системы не изменяется в любых процессах, происходящих в этой системе:

$$Q = \text{const}$$

**Линейная плотность электрического заряда** — ФВ — заряд, приходящийся на единичный участок протяжённого заряженного тела:

$$\tau = \frac{dq}{dl}$$

$$[\tau] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}}$$

**Поверхностная плотность электрического заряда** — ФВ — заряд, приходящийся на единичный участок поверхности заряженного тела:

$$\sigma = \frac{dq}{dS}$$

$$[\sigma] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

**Объёмная плотность электрического заряда** — ФВ — заряд, приходящийся на участок заряженного тела единичного объёма:

$$\rho = \frac{dq}{dV}$$

$$[\rho] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3}$$

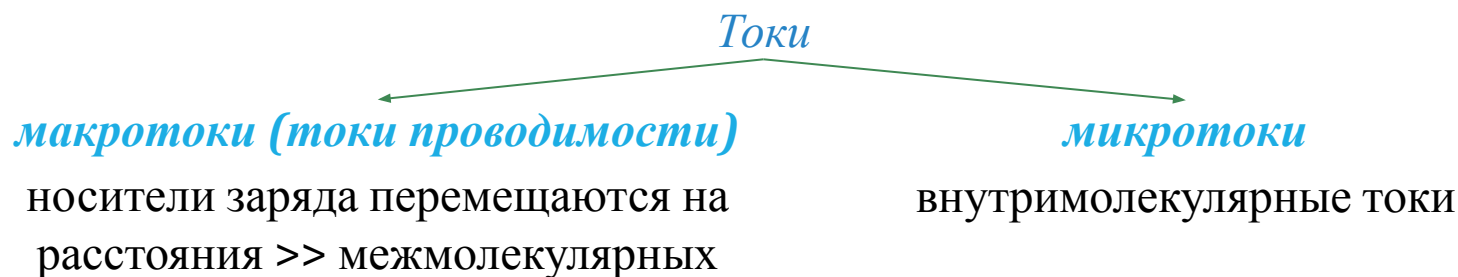
$$q \neq \int_l \quad \sigma \neq \int_S \quad \rho \neq \int_V$$

**Электрический ток** — ФЯ — упорядоченное движение электрически заряженных частиц.



- 1) заряды, нарушающие электронейтральность вещества
- 2) носители заряда в проводниках (перемещаются под действием поля на расстояния  $\gg$  межмолекулярных)

заряды, входящие в состав молекул (перемещаются под действием поля на расстояния  $\sim$  межмолекулярных)



## III. Электромагнитное поле

**Электромагнитное поле** — ФО — действует на электрически заряженные частицы.

Для того чтобы характеризовать электромагнитное поле в какой-либо точке пространства, мысленно вносим в эту точку пробный заряд.

**Пробный заряд** — МТ, имеющая положительный электрический заряд, настолько малый, чтобы не исказить электромагнитное поле, т. е. не изменять расположение заряженных тел, создающих это поле.

На частицу с пробным зарядом  $q_0$ , движущуюся со скоростью  $\vec{v}$ , электромагнитное поле действует с силой

$$\vec{F} = \vec{F}_1(q_0 \text{ поле}) + \vec{F}_2(q_0 \vec{v} \text{ поле})$$

$\vec{F}_1$  не зависит от скорости пробного заряда.

$\vec{F}_2$  зависит в т. ч. от скорости пробного заряда.

$$\vec{F}_2 = 0$$

Все заряды неподвижны:

$$\vec{F}_2 = 0 \quad \vec{F} = \vec{F}_1 (q_0 \text{ поле})$$

Рассмотрим отношение  $\vec{F}_1/q_0$ .  
 Оно определяется только модулем поля и является одной из характеристик поля:

$$\vec{F}_1 = 0$$

Создадим такие условия, при которых поле действует только на движущийся заряд:

$$\vec{F}_1 = 0 \quad \vec{F} = \vec{F}_2 (q_0 \text{ поле})$$

Из опыта:

- 1)  $F_2 \sim q_0$
- 2)  $F_2 \sim v$
- 3)  $F_2$  зависит от направления  $\vec{v}$  и изменяется от 0 до  $F_{\max}$
- 4)  $F_2 \sim \text{полю}$

$$F_2 = 0$$

$$F_1 = 0$$

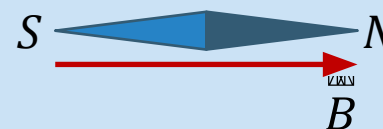
Отношение модуля максимальной силы, с которой поле действует на пробный заряд, к величине этого заряда и модулю его скорости — характеристика только поля:

$$E = \frac{F_1}{q_0 v}$$

$$B = \frac{F_{2\max}}{q_0 v}$$

— **напряжённость электрического поля**  
(электрическая компонента электромагнитного поля)

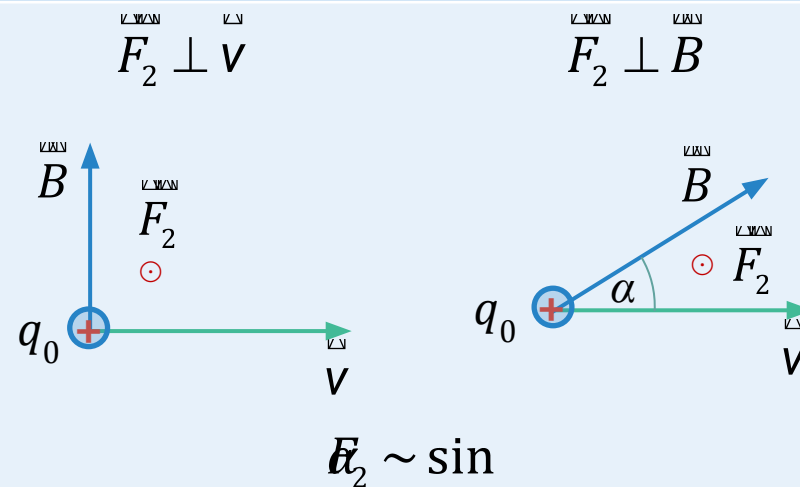
$B$  — **индукция магнитного поля**  
(магнитная компонента электромагнитного поля)  
Направление  $B$  совпадает с ориентацией магнитной стрелки, помещённой в данную точку пространства.



$$\vec{F}_2 = 0$$

$$\vec{F}_1 = 0$$

Обратная задача:



$$\vec{F}_1 = q_0 \vec{E}$$

$$\vec{F}_2 = q_0 [\vec{v} \vec{B}]$$

Общий случай:  $\vec{F}(q_0, \vec{v}) = q_0 \vec{E} + q_0 [\vec{v} \vec{B}]$

$\vec{F}$  — сила Лоренца



## IV. Силовые характеристики электромагнитного поля

*Основные силовые характеристики  
электромагнитного поля*

Напряжённость электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_1}{q_0}$$

$$[E] = \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

Индукция магнитного поля

$$\vec{B} = \frac{F_{2\text{max}}}{q_0 v}$$

$$[B] = \text{Тл (тесла)}$$

*Вспомогательные силовые характеристики  
электромагнитного поля*

*Электрическое смещение*

$$\vec{D}$$

$$[D] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (\text{в вакууме})$$

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

— *электрическая постоянная*

*Напряжённость магнитного поля*

$$\vec{H}$$

$$[H] = \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (\text{в вакууме})$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

— *магнитная постоянная*

$$\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} = c^2 \quad c = \frac{\text{м}}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \text{— скорость электромагнитных волн в вакууме}$$

## V. Принцип суперпозиции полей

**Принцип суперпозиции полей:**  $\left\{ \begin{array}{l} \text{напряжённость электрического поля} \\ \text{индукция магнитного поля} \end{array} \right\}$ ,

создаваемого системой  $\left\{ \begin{array}{l} \text{заряженных частиц} \\ \text{равна сумме} \\ \text{движущихся заряженных частиц (токов)} \end{array} \right\}$ ,

$\left\{ \begin{array}{l} \text{напряжённостей} \\ \text{индукций} \end{array} \right\}$  полей, создаваемых каждым из этих  $\left\{ \begin{array}{l} \text{зарядов} \\ \text{В ОТДЕЛЬНОСТИ.} \\ \text{ТОКОВ} \end{array} \right\}$

Для дискретного распределения  $\left\{ \begin{array}{l} \text{зарядов} \\ \text{токов} \end{array} \right\}$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \sum E_i \\ B = \sum B_i \end{array} \right.$$

Для непрерывного распределения  $\left\{ \begin{array}{l} \text{зарядов} \\ \text{токов} \end{array} \right\}$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \int dE \\ B = \int dB \end{array} \right.$$

## VI. Уравнения Максвелла

Уравнения Максвелла — ФЗ — основные уравнения классической электродинамики — постулируются.

*Уравнения Максвелла в интегральной форме*

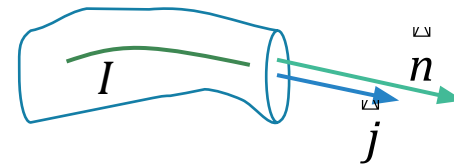
$$\text{I. } \oint_l \vec{E} d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

$$\text{II. } \oint_l \vec{H} d\vec{l} = \int_s \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$

$$\text{III. } \oint_s \vec{\rho} d\vec{S} = \int_V$$

$$\text{IV. } \oint_s \vec{B} d\vec{S} = 0$$

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n} = \frac{dq}{dt dS} \vec{n} \text{ — } \textit{\textbf{плотность тока}}$$



В эти уравнения входит плотность свободных зарядов и плотность макротоков.

## VII. Материальные уравнения

**Материальные уравнения** — ФЗ — уравнения, связывающие основные и вспомогательные характеристики электромагнитного поля:  $E$  и  $D$ ,  $B$  и  $H$

Вид материальных уравнений зависит от природы вещества.

$$\underbrace{E}_{\text{поле свободных зарядов}} = \underbrace{E_0}_{\text{поле свободных зарядов}} + \underbrace{E'}_{\text{поле связанных зарядов}}$$

$$\underbrace{B}_{\text{поле макротоков}} = \underbrace{B_0}_{\text{поле макротоков}} + \underbrace{B'}_{\text{поле микротоков}}$$

Для изотропных диэлектриков, сегнетоэлектриков

$$D = \epsilon E$$

$\epsilon$  — *относительная диэлектрическая проницаемость* вещества

В вакууме  $\epsilon = 1$ .

Для изотропных магнетиков, ферромагнетиков

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu}$$

$\mu$  — *относительная магнитная проницаемость* вещества

В вакууме  $\mu = 1$ .