



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

# Электростатика

Нуриев Рустам Какабаевич  
Nuryev@oi.ifmo.ru

# Электрический заряд

$$[q] = \text{Кл}$$

$$q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Один кулон (1 Кл) – это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1А.

частицы

протоны

$$\begin{aligned} q &= +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ m_p &= 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \end{aligned}$$

нейтроны

$$\begin{aligned} q &= 0 \\ m_n &= 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \end{aligned}$$

электроны

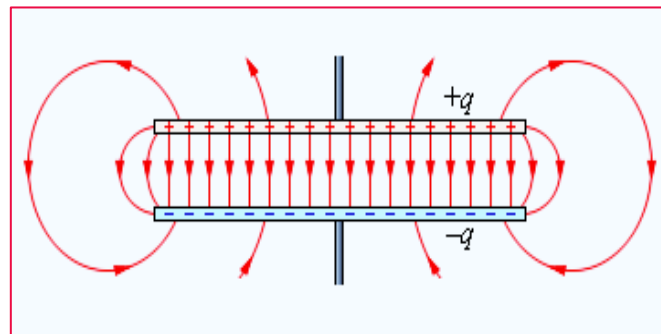
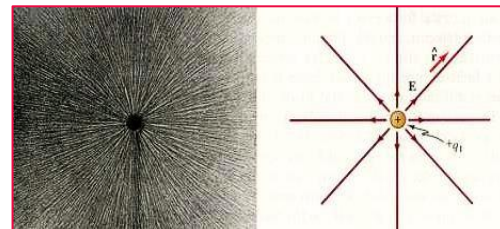
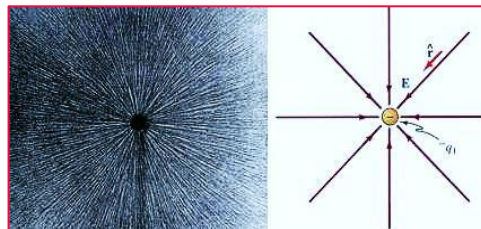
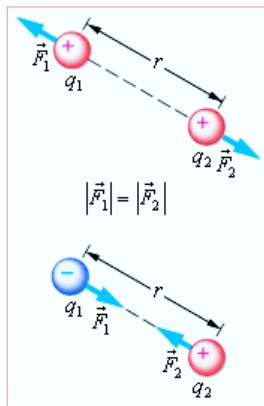
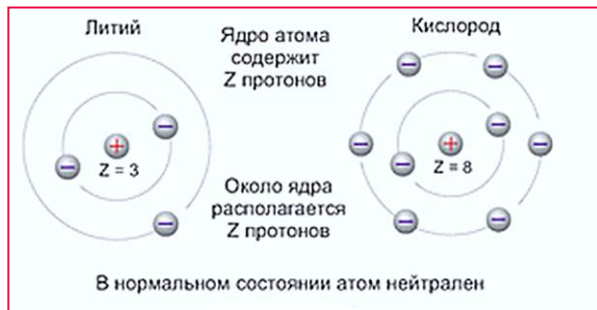
$$\begin{aligned} q &= -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ m_e &= 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \end{aligned}$$

# Закон сохранения заряда

В замкнутой системе алгебраическая сумма зарядов всех частиц остается неизменной

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$$

При соприкосновении (электризации) тел происходит перераспределение зарядов между телами.



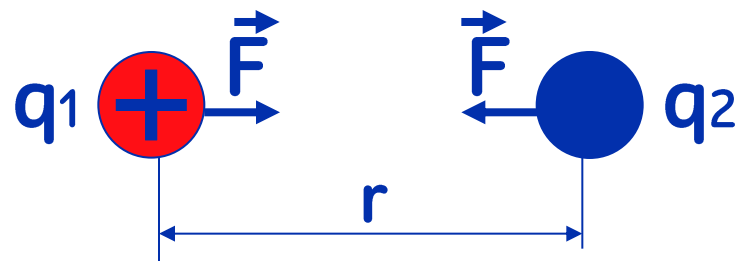
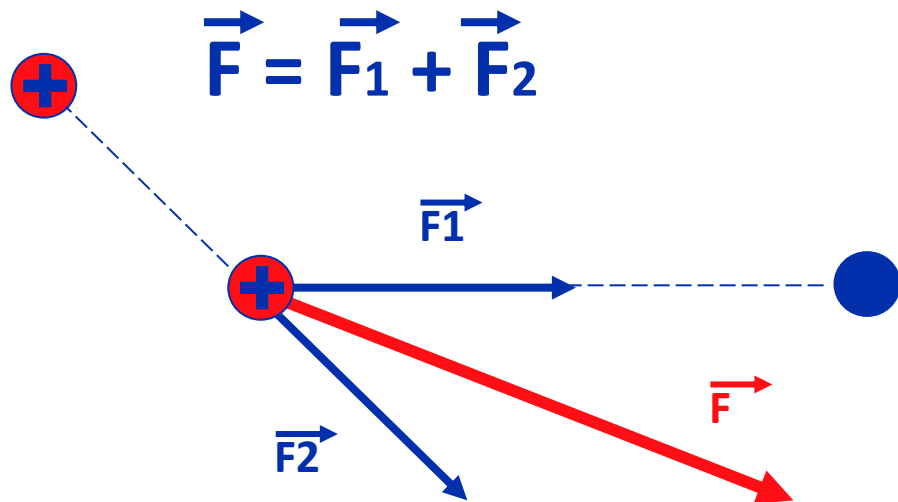
$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

– Закон Кулона 1785 г.

Сила взаимодействия двух точечных неподвижных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad k = 9 \cdot 10^9 \frac{H \cdot m^2}{Kл^2} \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Kл^2}{H \cdot m^2}$$

$k$  – коэффициент пропорциональности, численно равный силе взаимодействия двух точечных зарядов по 1 Кл, находящихся в вакууме на расстоянии 1 м.



Электрическое поле представляет собой созданную зарядами особую форму материи, через которую осуществляется взаимодействие между зарядами (иными телами). Поле, как вещество, является формой материи, обладающей массой и энергией.

- Согласно идее Фарадея электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно.
- Каждый из них создает в окружающем пространстве электрическое поле.
- Поле одного заряда действует на другой заряд и наоборот.
- По мере удаления от заряда поле ослабевает.
- Электрическое поле материально, оно существует независимо от нас и наших знаний о нем.
- Главное свойство электрического поля – действие его на электрические заряды с некоторой силой.
- Электрическое поле неподвижных зарядов называют электростатическим. Оно не меняется со временем.

# Напряженность электрического поля

Напряженность - силовая характеристика электрического поля - она определяет силу, с которой эл. поле действует на эл. заряд.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

$$[E] = \frac{H}{Kл} = \frac{B}{м}$$

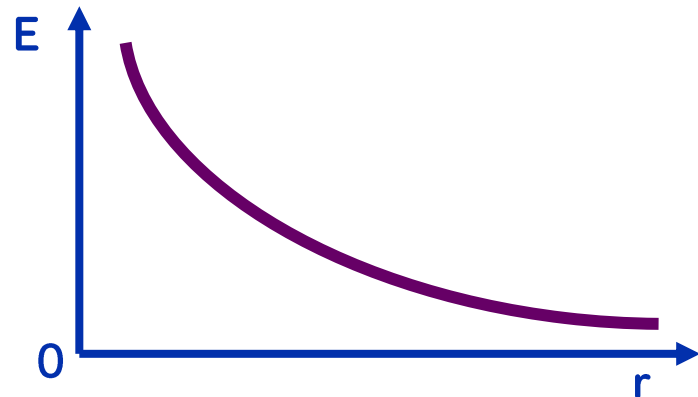
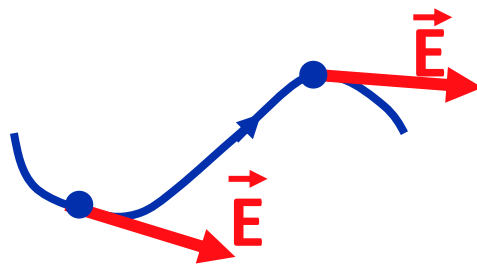
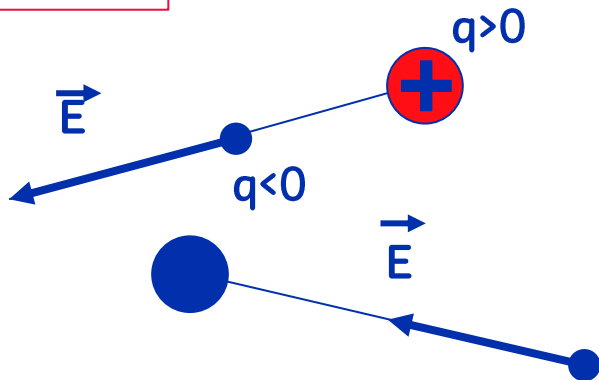
$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$



$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

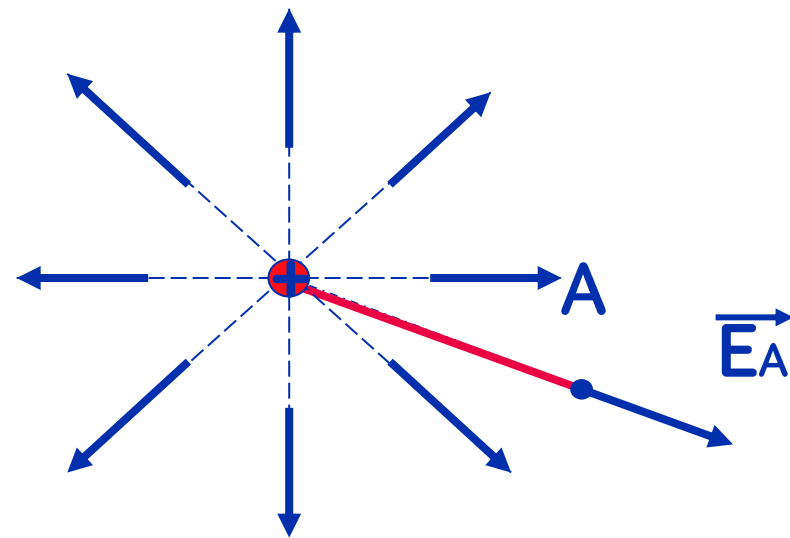
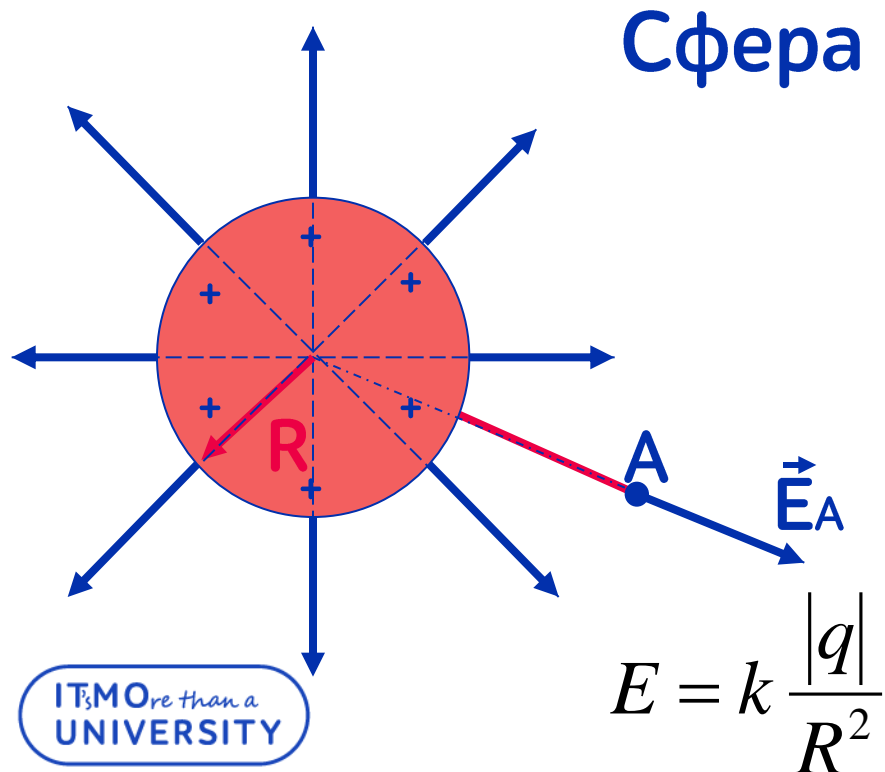
$$\left. \begin{array}{l} \vec{F} = \vec{E} \cdot q \\ F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \end{array} \right\} E = k \frac{|q|}{r^2}$$



$$\vec{E} \uparrow \uparrow \vec{F}$$

$$E = K \frac{Q}{r^2 \times \epsilon}$$

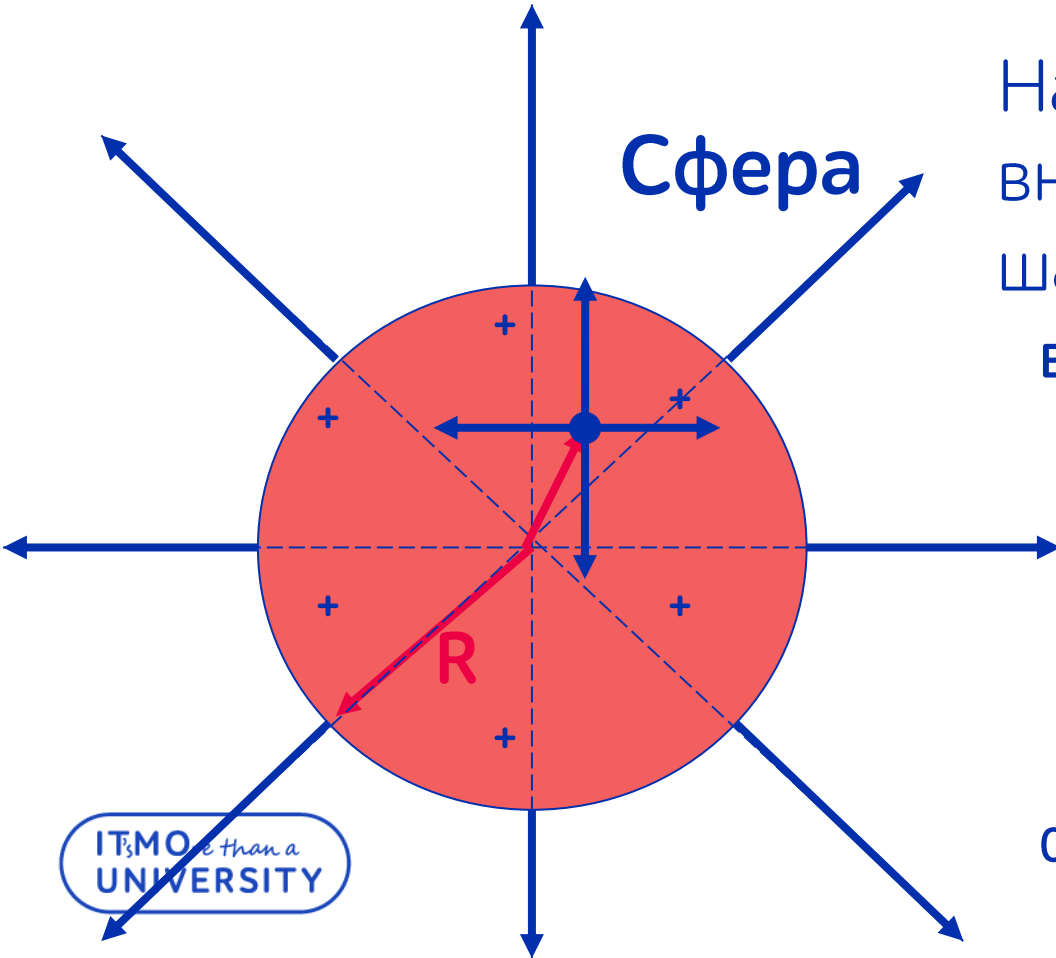
Напряженность эл. поля точечного заряда на расстоянии  $r$  от него.



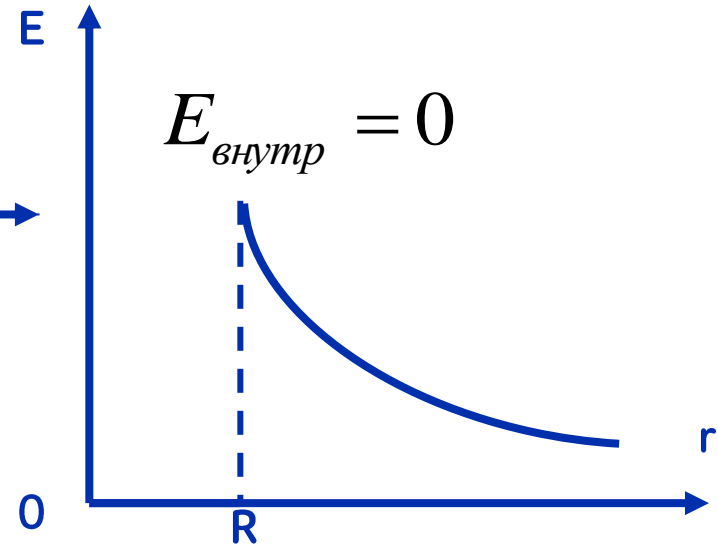
Напряженность поля на поверхности сферы.



# Напряженность электрического поля



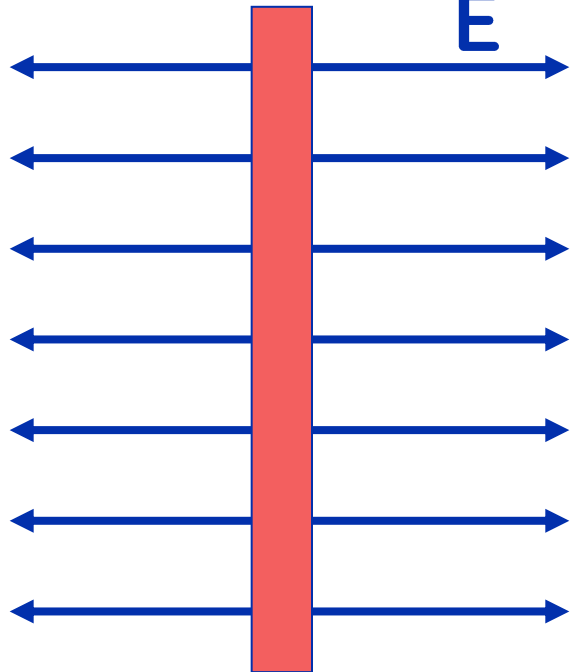
Напряженность поля  
внутри проводящего  
шара равна нулю.



# Напряженность электрического поля

Плоскость

$\vec{E}$



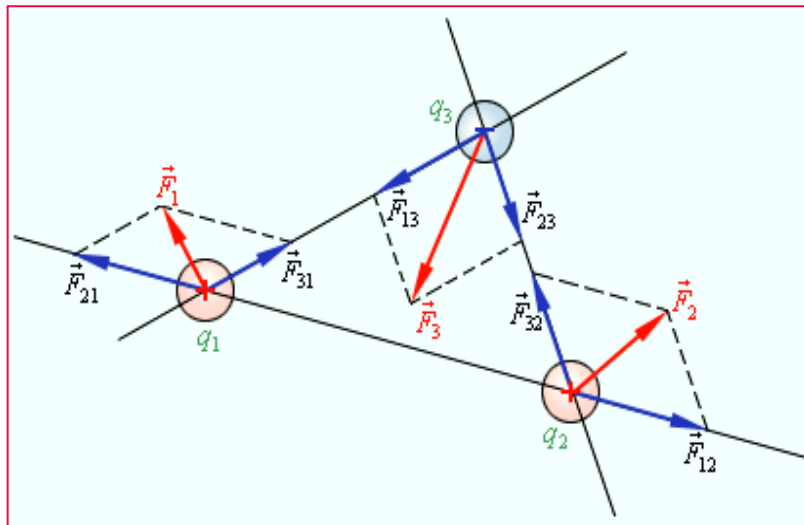
$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$



$$E = \frac{q}{2S\varepsilon_0}$$

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

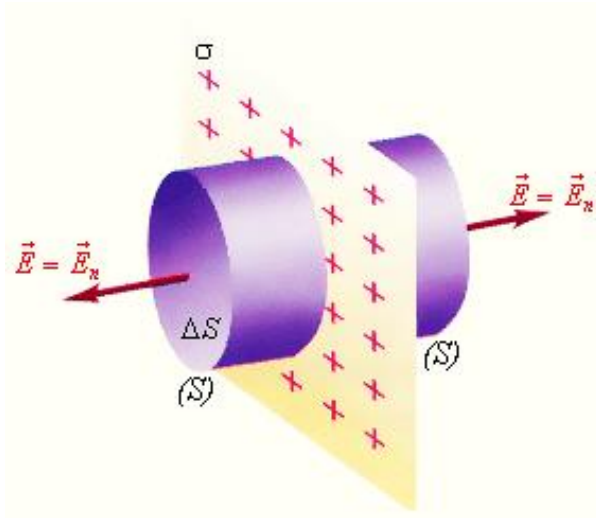
поверхностная  
плотность заряда



$$\vec{E} = \sum_{I=1}^n \vec{E}_i$$

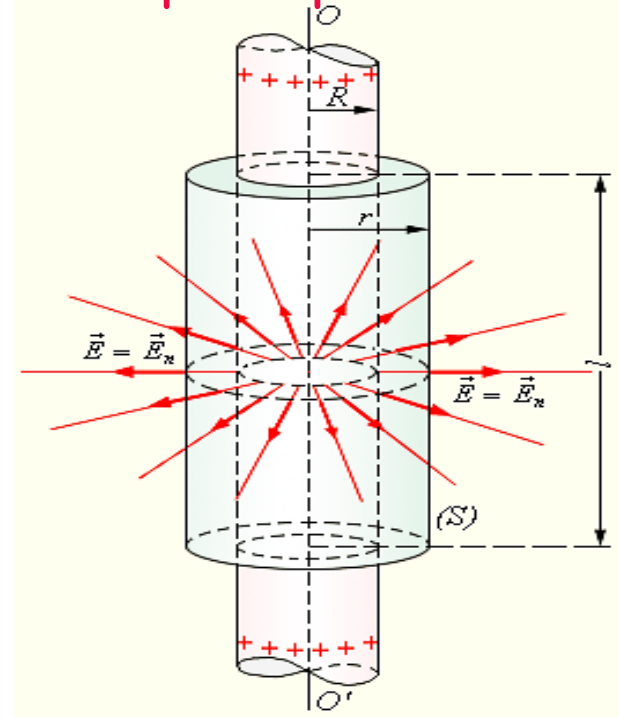
# Напряженность электрического поля

Равномерно заряженная плоскость



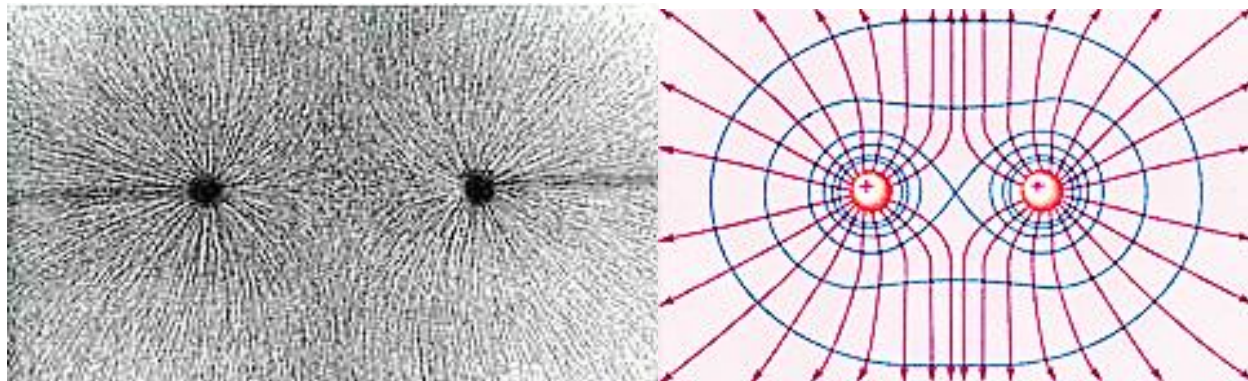
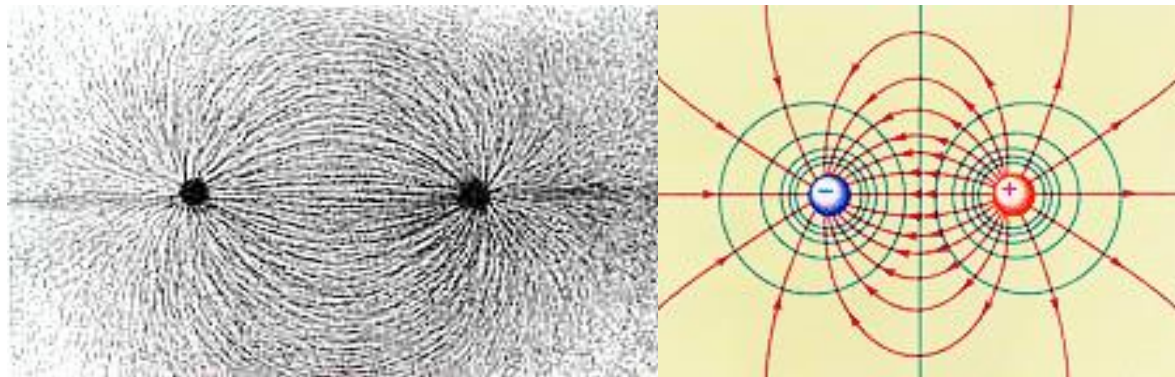
$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

Поле равномерно заряженной нити



$$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \times \frac{\tau}{\varepsilon \times r}$$

# Напряженность электрического поля



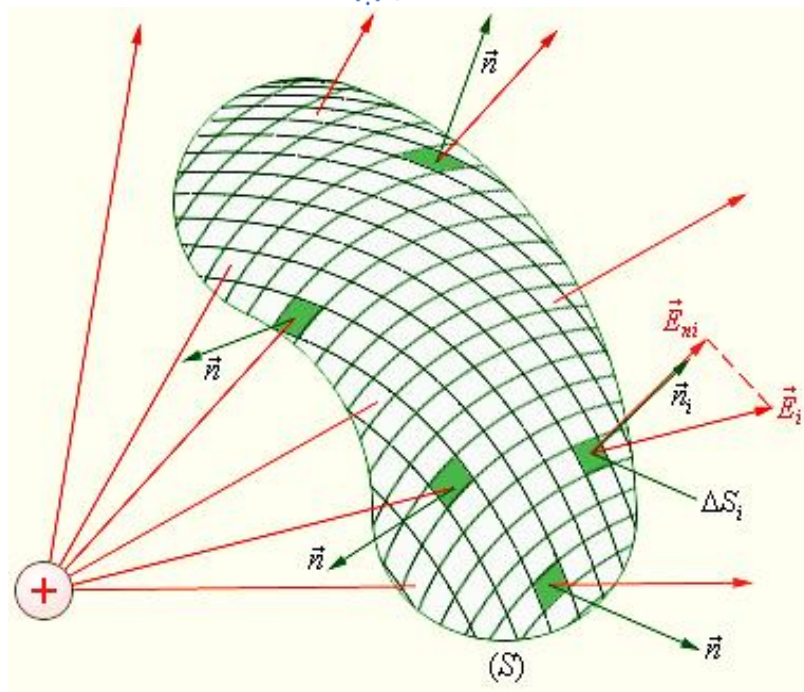
# Поток вектора напряженности электрического поля

Поток вектора напряженности величина скалярная. Знак потока определяется направлением положительной нормали к поверхности. За положительное направление принимается направление внешней нормали к поверхности.

Для определения потока вектора напряженности через конечную поверхность это выражение надо проинтегрировать.

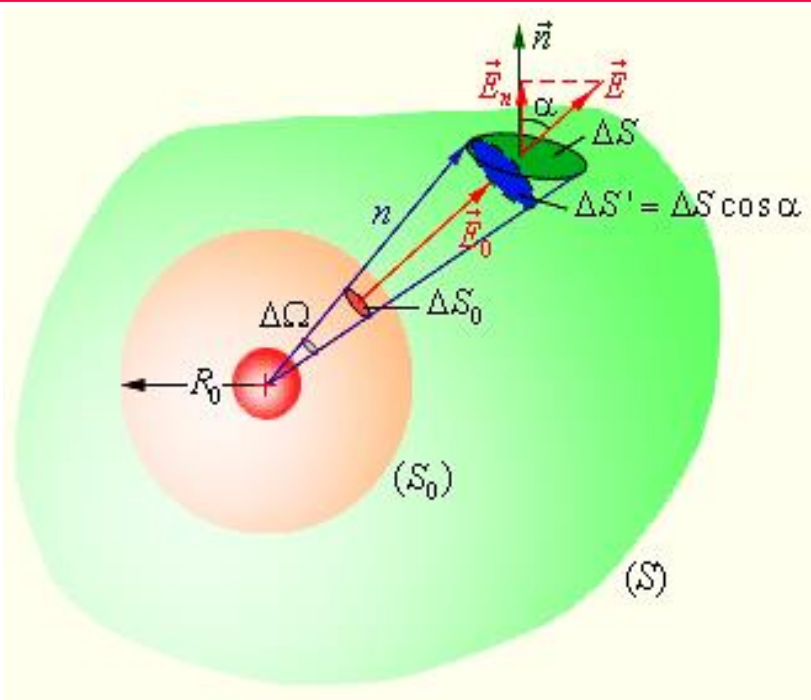
$$\Phi = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \cdot \cos \alpha$$

$$\Phi = (B/m)^* m^2 = m^3 * \kappa \varepsilon * c^{-3} * A^{-1}$$



Число силовых линий, пронизывающих некоторую поверхность, расположенную в электрическом поле, называется **поток вектора напряженности электрического поля** сквозь эту поверхность. Если поверхность перпендикулярна силовым линиям и напряженность  $E$  поля постоянна, то  $\Phi = E S$ , где  $S$  - площадь

# Теорема Гаусса



✓ Расчет электрических полей значительно упрощается если использовать теорему Гаусса, определяющую поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность.

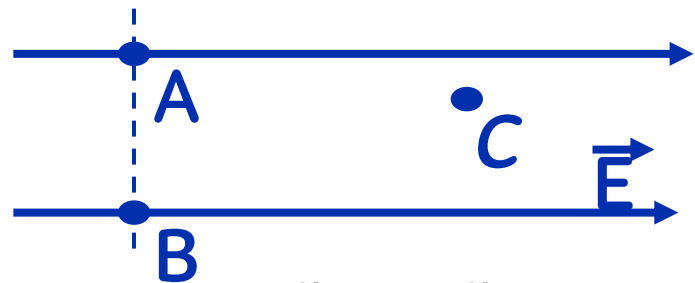
✓ Поток вектора напряженности электрического поля через любую замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, охватываемых этой поверхностью, деленной на электрическую постоянную.

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \Phi_i = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{\epsilon_0} = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{\epsilon_0}$$

# Потенциал

Потенциал - Энергетическая характеристика электрического поля - она определяет энергию, которую приобретает заряженная частица в электрическом поле.

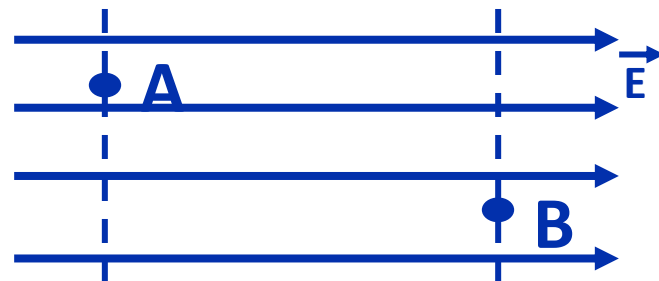
$$[\varphi] = B \quad (\text{вольт})$$



$$\varphi_A = \varphi_B$$

$$\varphi_C < \varphi_A$$

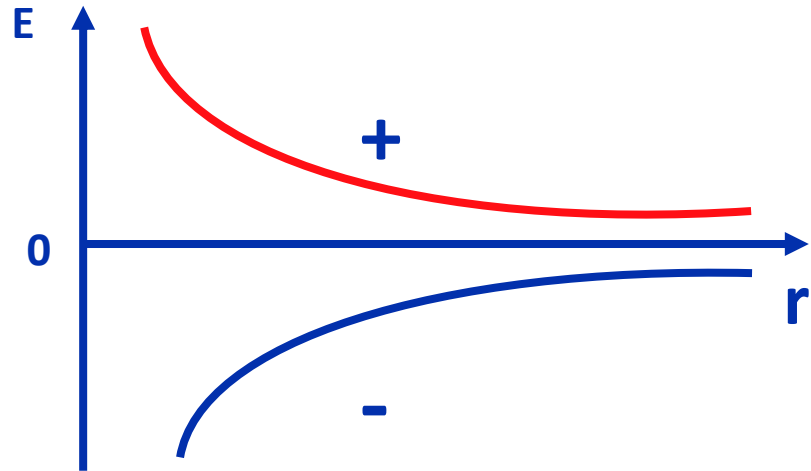
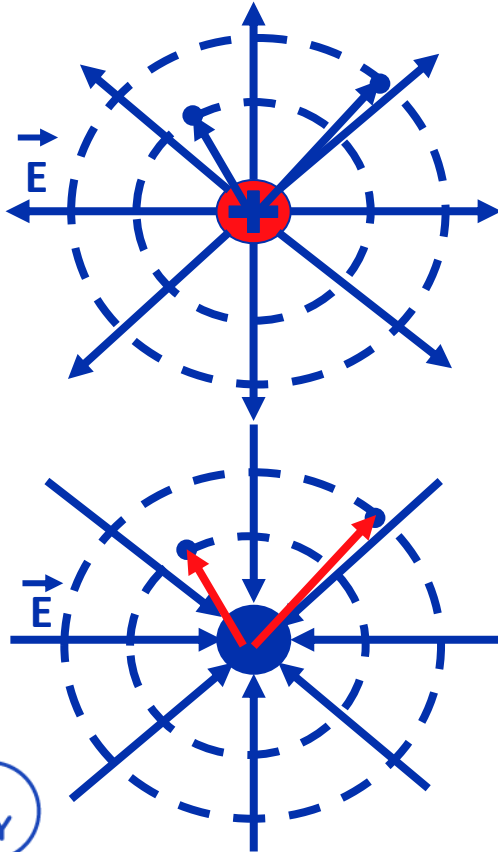
$$\varphi = \frac{W_E}{q} \quad \varphi = k \frac{q_0}{r} \quad 1B = \frac{1Дж}{1Кл}$$



$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = \frac{A}{q}$$

$$\varphi_A > \varphi_B$$

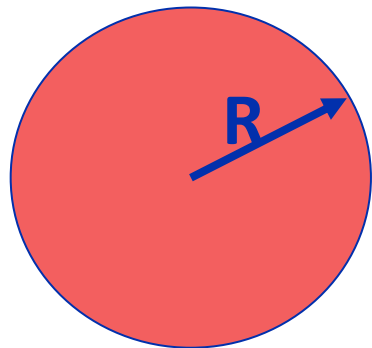
# Потенциал





# Потенциал

Если поле создано не одним, а несколькими источниками, то потенциал точки равен алгебраической сумме потенциалов исходных полей.



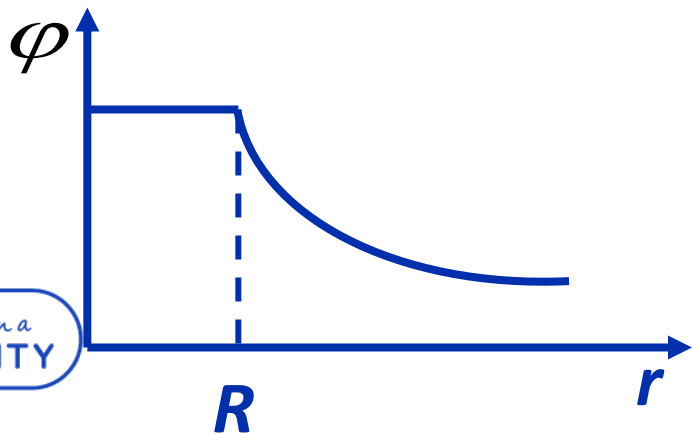
$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$$

$$\varphi = k \frac{q}{R}$$

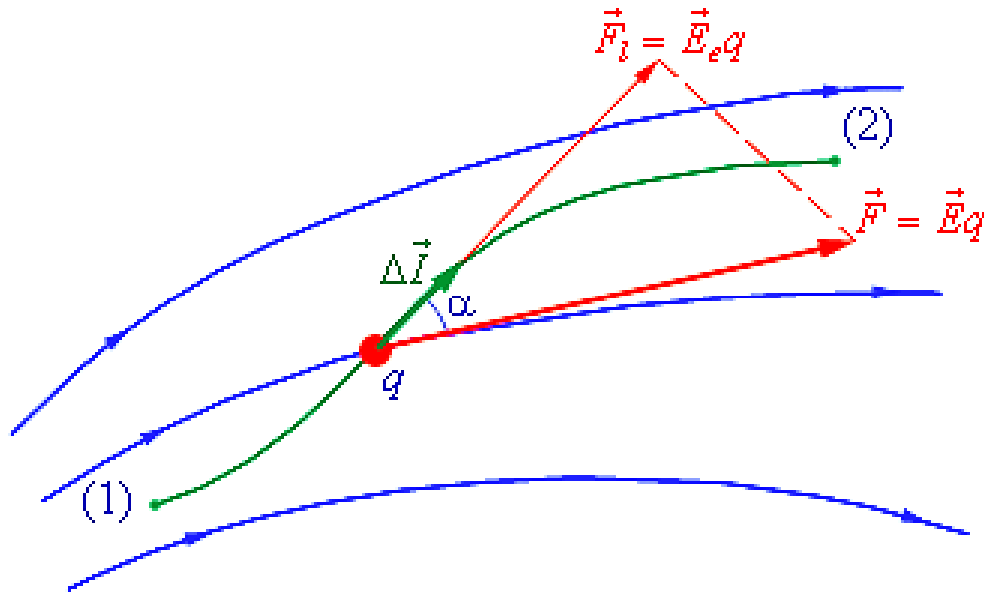
потенциал внутри и на поверхности заряженной сферы

$$\varphi = k \frac{q}{R + r}$$

потенциал вне заряженной сферы



# Напряженность поля как градиент потенциала



$$\vec{E} = -\left( \frac{d\varphi}{dx} \vec{i} + \frac{d\varphi}{dy} \vec{j} + \frac{d\varphi}{dz} \vec{k} \right) = -\text{grad} \varphi$$

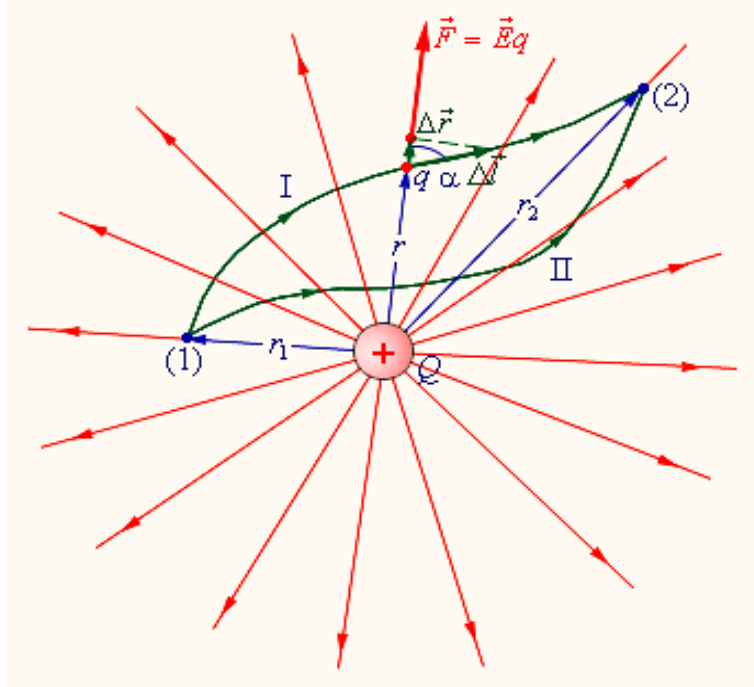
$$dA = q \cdot E_x \cdot dx$$

$$dA = -q \cdot d\varphi$$

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx}$$

$$E_y = -\frac{d\varphi}{dy}$$

$$E_z = -\frac{d\varphi}{dz}$$



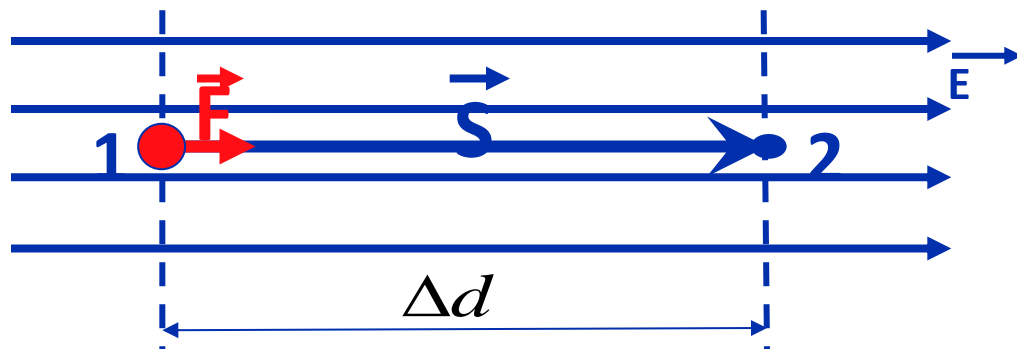
$$dA = F \cdot dS \cdot \cos \alpha$$

$$dS \cdot \cos \alpha = dR$$

$$F = k \frac{q \cdot q_0}{R^2}$$

$$dA = kq \cdot q_0 \frac{dR}{R^2}$$

# Работа по перемещению заряда в поле



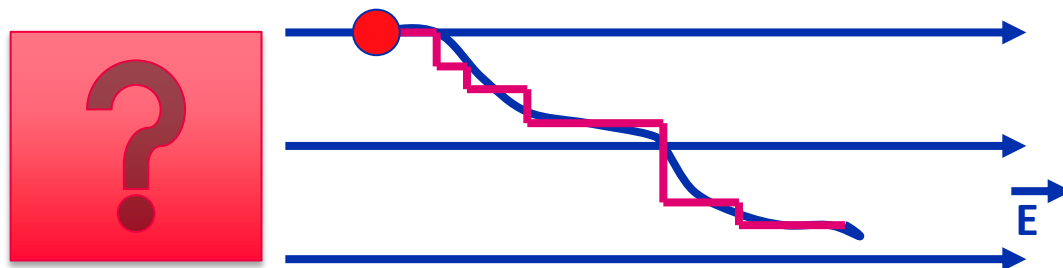
$$A = F \cdot S \cdot \cos \alpha$$

$$F = E \cdot q$$

$$S = \Delta d$$

$$\cos \alpha = 0$$

$$A = Eq\Delta d$$



# Работа по перемещению заряда в поле

$$A = \int_{R_1}^{R_2} dA = kq q_0 \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{R^2} \quad A = -kq q_0 \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right)$$

$$\varphi = k \frac{q_0}{R} + C \quad A = -q (\varphi_2 - \varphi_1) = -q \cdot \Delta\varphi$$

Из полученного выражения следует, что работа сил электрического поля не зависит от длины и формы траектории, а определяется начальным и конечным положением заряда в поле.

Другими словами - работа электрического поля на замкнутом пути равна нулю. Электрическое поле является потенциальным.

$$A = -(q\varphi_2 - q\varphi_1) \quad A = -(W_2 - W_1)$$

$$W = q\varphi \quad A = q \cdot \varphi \quad \varphi = \frac{A}{q}$$

# Циркуляция вектора напряженности электрического поля по замкнутому контуру

$$dA = F \cdot dl \cdot \cos \alpha$$

$$dA = \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$dl \cdot \cos \alpha = d\vec{l}$$

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

Циркуляцией вектора напряженности электрического поля называется выражение:

$$A = \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Работа сил электрического поля по замкнутому пути равна нулю, значит

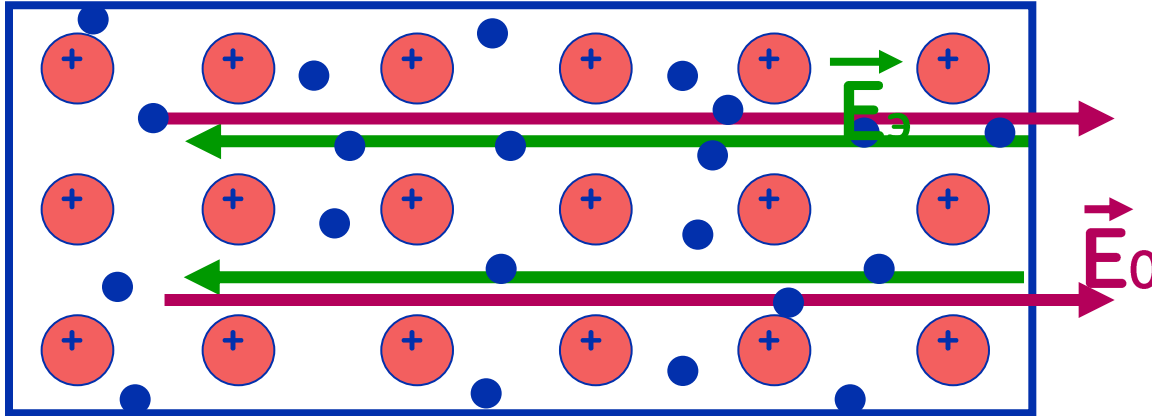
$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

Равенство нулю этого интеграла говорит о том, что в природе существует два вида электрических зарядов, являющиеся истоками и стоками электрического поля.

# Проводники в электрическом поле

- ✓ Проводники – это вещества с большой концентрацией свободных заряженных частиц.
- ✓ Проводниками являются металлы, электролиты.

# Проводники в электрическом поле



$$\vec{E}_{\text{итог}} = \vec{E}_0 + \vec{E}_\text{э}$$

$$E_0 = E_\text{э}$$

$$E_{\text{итог}} = 0$$

- Электростатического поля внутри проводника нет.
- Весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности.



# Диэлектрики в электрическом поле

- ✓ Диэлектрики (изоляторы) – это вещества, с малой концентрацией свободных заряженных частиц.
- ✓ Диэлектриками являются такие вещества как резина, дерево, фарфор.

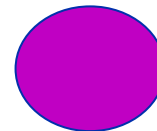
Виды диэлектриков:

- ✓ Полярные, состоящие из таких молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают. (спирты, вода, поваренная соль).



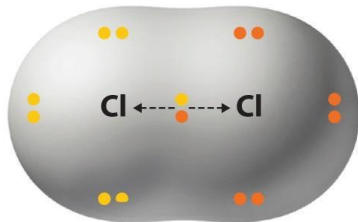
диполь  $H_2O$

- ✓ неполярные, состоящие из атомов или молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают. (инертные газы, кислород, полиэтилен).

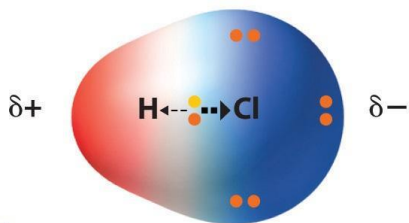


$He, H_2$

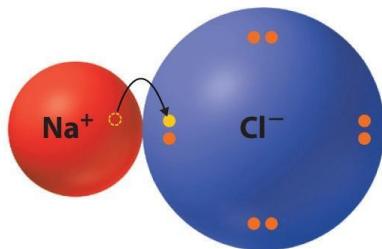
# Диэлектрики в электрическом поле



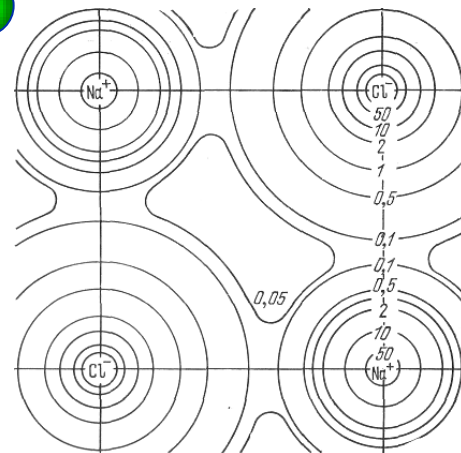
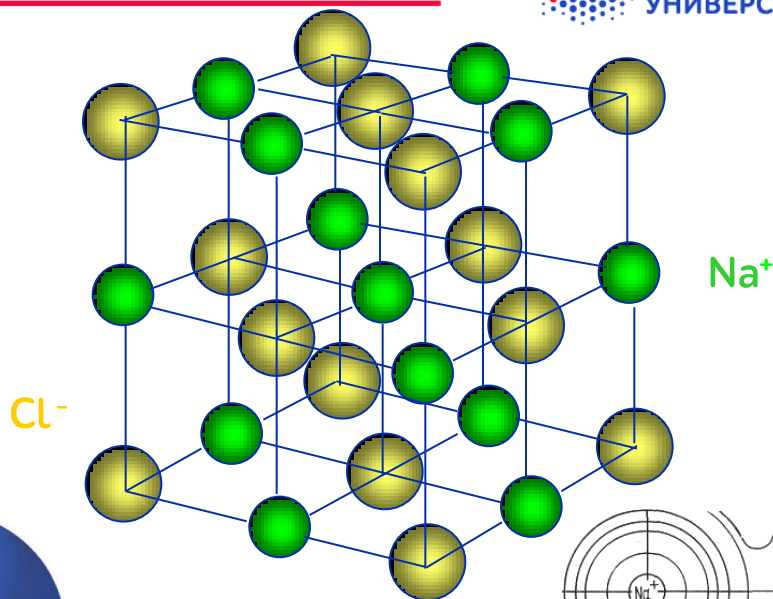
**Неполярная ковалентная связь**  
Связывающие электроны в равной степени принадлежат обоим атомам. На атомах отсутствует заряд.

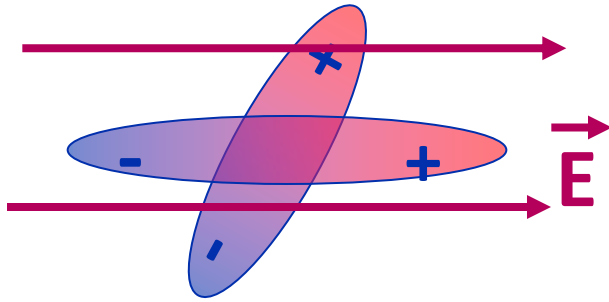


**Полярная ковалентная связь**  
Электронная плотность смещена к более электроотрицательному атому, на котором возникает частичный отрицательный заряд. На менее электроотрицательном атоме возникает частичный положительный заряд.

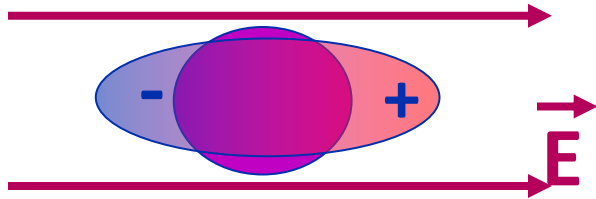


**Ионная связь**  
Перенос одного или нескольких валентных электронов от атома металла к атому неметалла. Образуются целочисленно заряженные ионы.



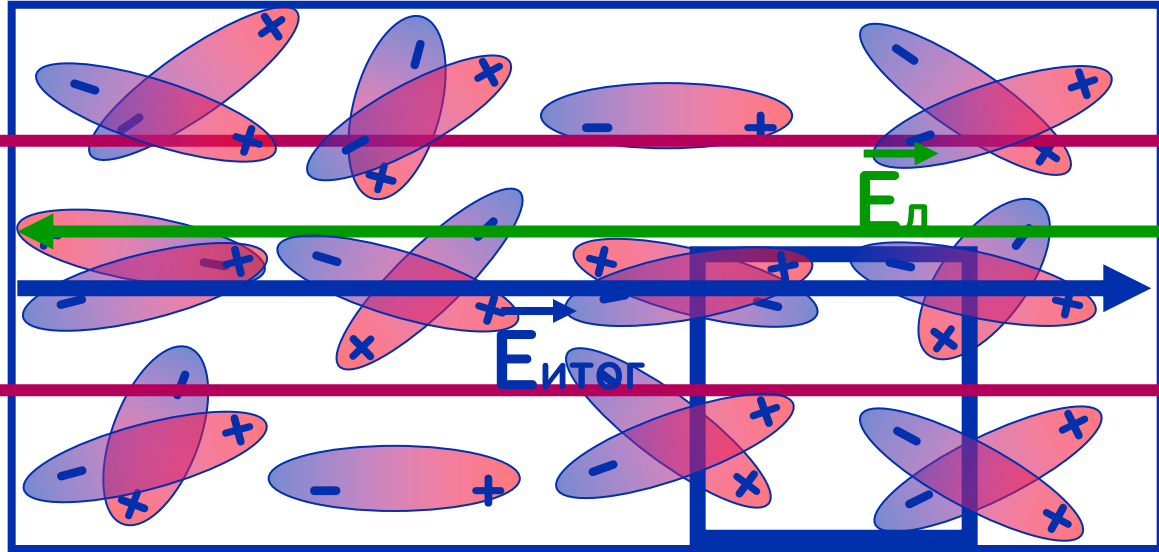


Смещение положительных и отрицательных связанных зарядов диэлектрика в противоположные стороны называют поляризацией.



Неполярные диэлектрики в электрическом поле тоже поляризуются.

# Диэлектрики в электрическом поле



$$\vec{E}_{\text{итог}} = \vec{E}_0 + \vec{E}_d$$

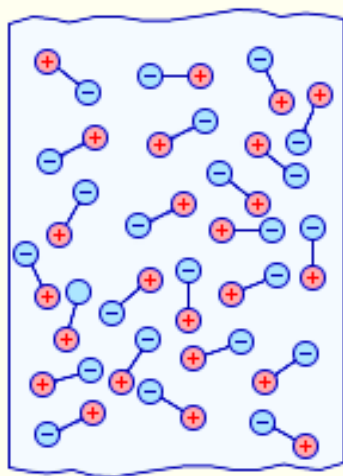
$$E_{\text{итог}} = E_0 - E_d$$

$$\vec{E}_0 \rightarrow E_{\text{итог}} < E_0$$
$$E_{\text{итог}} = \frac{E_0}{\epsilon}$$

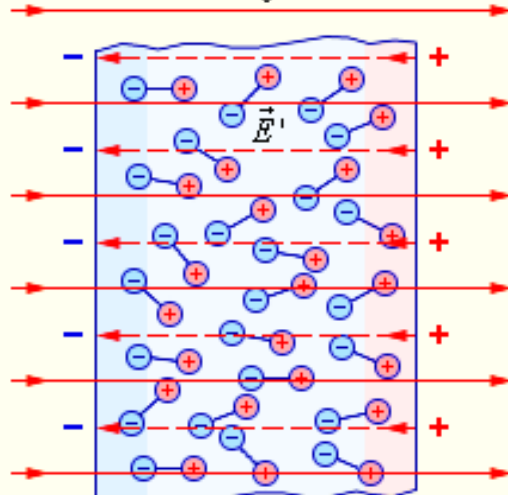
$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость вещества

# Поляризация полярных и неполярных диэлектриков

$$\vec{E}_0 = 0$$

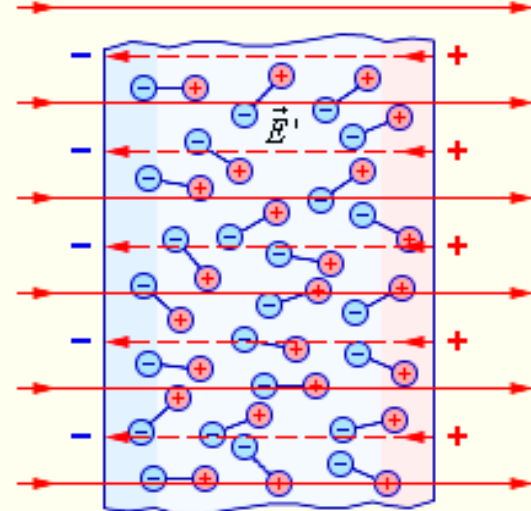


$$\vec{E}_0$$



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

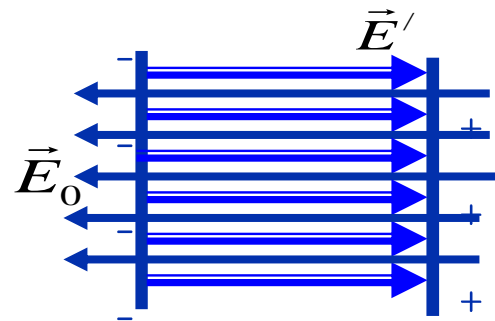
$$\vec{E}_0$$



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

# Проводники в электростатическом поле

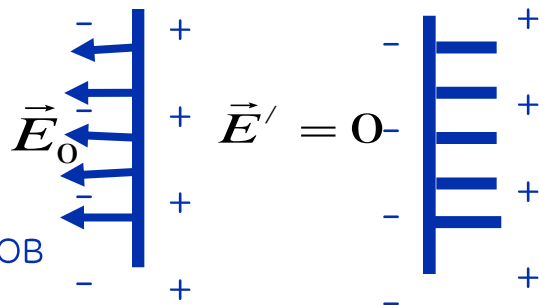
- ✓ Проводник – это вещество обладающее свободными зарядами (электроны, ионы)
- ✓ Электростатическая индукция
- ✓ Напряженность поля внутри проводника равна нулю, а поверхность проводника является эквипотенциальной.



$$\vec{E}_0 = -\vec{E}'$$

$\vec{E}_0$  – напряженность внешнего поля

$\vec{E}'$  – напряженность, созданная перераспределением зарядов



- ✓ Сила тока – скалярная физическая величина, численно равная заряду, который переносится за единицу времени через поперечное сечение проводника.

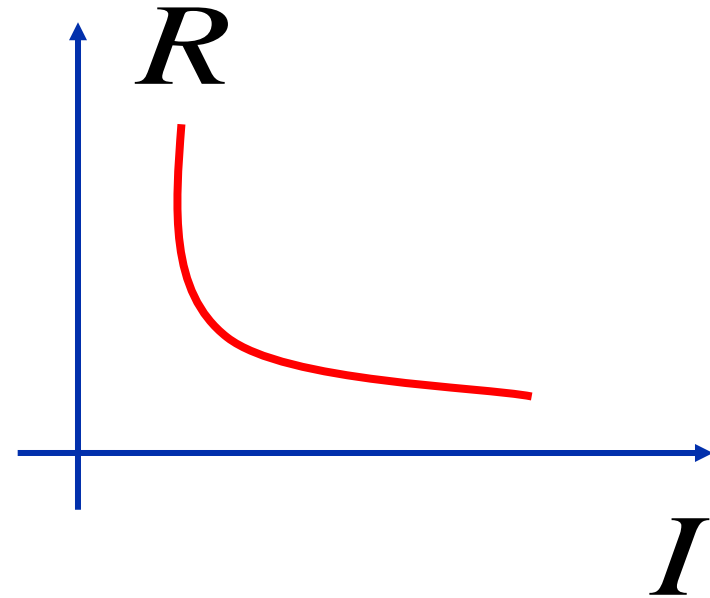
$$I = \frac{q}{t}$$

$$I = q_0 n V S$$

$$[I] = 1A$$

## Сопротивление

$$R = \frac{\rho l}{S}$$





## Зависимость сопротивления от температуры

$$R = R_0 (1 + \alpha t^0)$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t^0)$$

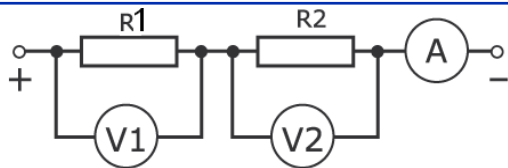
$\alpha$ - температурный коэффициент  
сопротивления для металлов

Чистые металлы

$$\alpha = \frac{1}{273} K^{-1}$$

## Соединения проводников

Последовательное



$$I_1 = I_2 = I$$

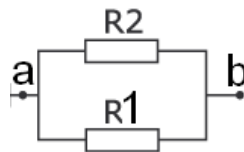
$$U = U_1 + U_2$$

$$R = R_1 + R_2$$

Для N одинаковых проводников

$$R = NR_1$$

Параллельное



$$U_1 = U_2 = U$$

$$I_{ab} = I_1 + I_2$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Для N одинаковых проводников

$$R = \frac{R_1}{N}$$

## Работа тока

$$A = UI t, A = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R}$$

$$[A] \Rightarrow 1 \text{ Дж}$$

## Мощность

$$P = UI, P = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

$$[P] \Rightarrow 1 \text{ Вт}$$

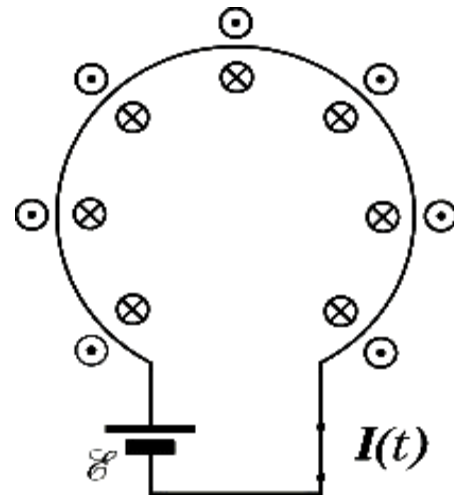
Количество теплоты

$$Q = I^2 R t$$

$$[Q] \Rightarrow 1 \text{ Дж}$$

## Закон Ома для полной цепи.

- ✓ Сторонние силы - это силы любой природы (кроме электрической), которые разделяют заряды внутри источника тока.
- ✓ Виды сторонних сил: механические, магнитные, химические, световые, тепловые
- ✓ Электродвижущая сила  $\mathcal{E}$  (В) характеризует работу сторонних сил по перемещению зарядов внутри источника:



$$\mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q}$$

## Закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

- ✓  $R$  – полное сопротивление внешней цепи,
- ✓  $r$  – внутреннее сопротивление источника

## Сила тока короткого замыкания

$$R \rightarrow 0$$

$$I_{\kappa\mathcal{Z}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$



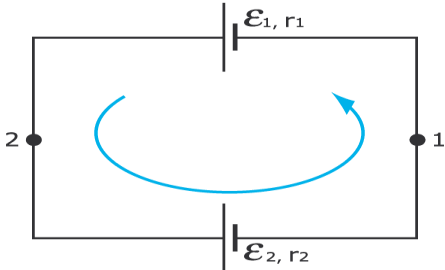
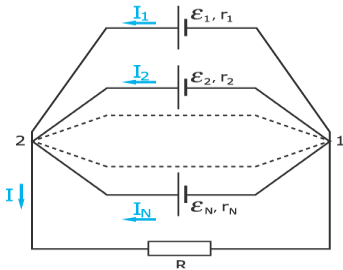
Напряжение на внешней цепи

$$U = IR = \varepsilon - Ir$$

КПД источника тока:

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}} 100\%$$

## Соединения источников

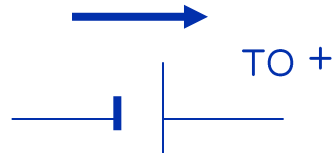
	Последовательное соединение	Параллельное соединение
Схема		
Эквивалентное внутреннее сопротивление	$r = r_1 + r_2$	$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$

## Соединения источников

	Последовательное соединение	Параллельное соединение
Эквивалентное ЭДС	$\mathcal{E} = \pm \mathcal{E}_1 \pm \mathcal{E}_2$	$\frac{\mathcal{E}}{r} = \pm \frac{\mathcal{E}_1}{r_1} \pm \frac{\mathcal{E}_2}{r_2}$
Закон Ома для $n$ одинаковых источников	$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr}$	$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{n}}$

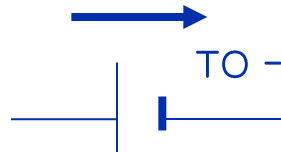
## Направление тока и знаки ЭДС

✓ Если

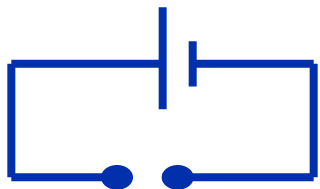


$\mathcal{E}$

✓ Если



$\mathcal{E}$



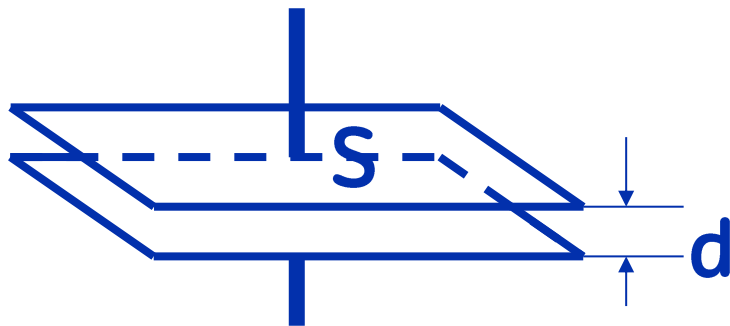
Електроємкост – фізическа величина, характеризующа спосібность проводника наеапливать електриеский заряд.

$$C = \frac{q}{U}$$

$$[C] = \Phi \text{ (фарад)}$$

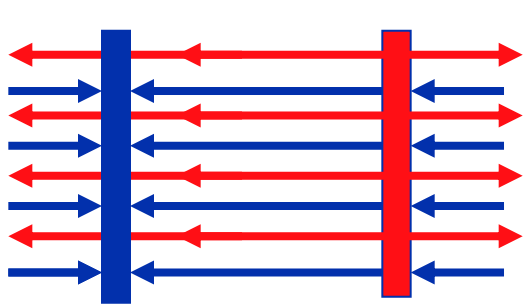
$$1\Phi = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}}$$

- ✓ Электроемкость определяется геометрическими размерами проводников, их формой и взаимным расположением, а также электрическими свойствами окружающей среды.
- ✓ Большой электроемкостью обладают системы из двух проводников, называемые конденсаторами.
- ✓ Конденсатор представляет собой два проводника, разделенные слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводника.
- ✓ Проводники в этом случае называют обкладками конденсатора.
- ✓ Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.



Емкость плоского конденсатора.

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$



$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$$

$$E = E_1 + E_2$$

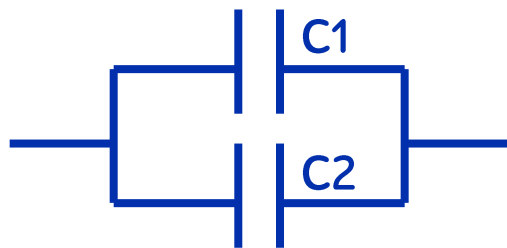
$$E = \frac{q}{2S\epsilon_0}$$

$$E_{умог} = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon S}$$

$$C = \frac{q}{U} \quad U = E \cdot d$$



Параллельное  
соединение  
конденсаторов.



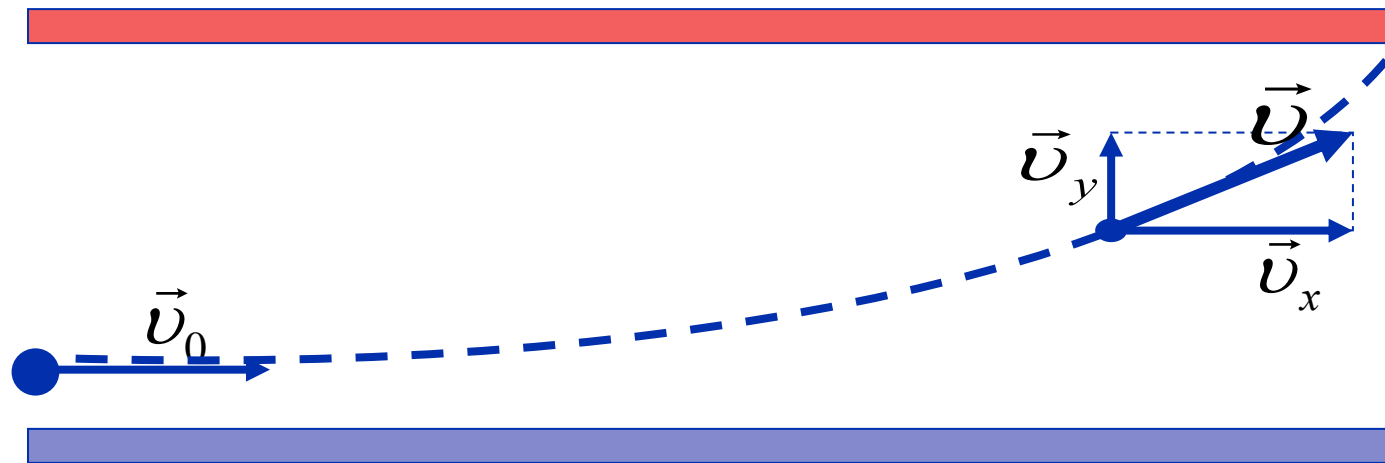
$$C = C_1 + C_2 + \dots$$

Последовательное  
соединение  
конденсаторов.



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

# Конденсатор



$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$$

$$v_x = v_{0x} = \text{const}$$

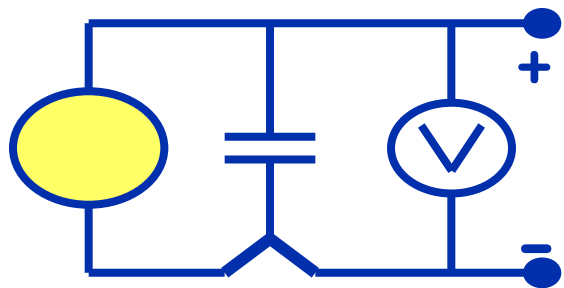
$$v_{0y} = 0$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

$$v_y = v_{0y} + at$$

$$a = \frac{Eq_{\text{частицы}}}{m_{\text{частицы}}}$$

# Энергия заряженного конденсатора



$$W_E = q \frac{E}{2} d$$

$$C = \frac{q}{U}$$

$$W_E = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

## Плоский конденсатор.

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \\ U &= E \cdot d \\ W_E &= \frac{CU^2}{2} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} W_E &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon E^2 Sd \\ w_E &= \frac{W}{V} = \frac{W}{Sd} \end{aligned}$$

$$[w_E] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$$

$$w_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon E^2 \quad - \text{плотность энергии эл. поля.}$$

*Постоянный электрический ток... Сила и плотность тока... ЭДС...Закон Ома... Сопротивление проводников... Последовательное и параллельное соединение проводников... Работа и мощность тока... Электронная проводимость металлов... Электрический ток в электролитах... Полупроводники... Электрический ток в газах... Ток в вакууме... Электромагнитная индукция... Ток проводимости... Уравнения Максвелла... Электромагнитные колебания... Колебательный контур... Вынужденные колебания...*

Магнитное поле описывается силовыми характеристиками: вектором напряженности и вектором магнитной индукции .

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

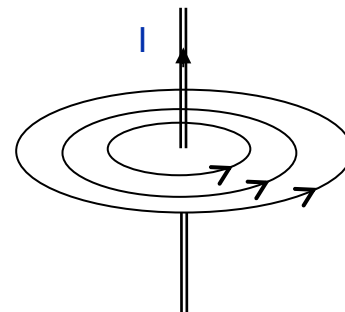
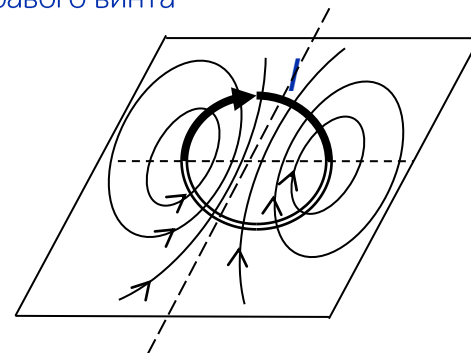
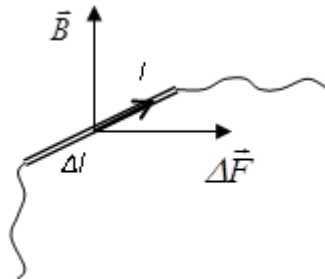


Рисунок 3 - Направление вектора индукции определяется по правилу правого винта



**Правило левой руки?..**

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



$$B = \frac{dF_{\max}}{Idl}$$

Рисунок 2 - Физический смысл. Согласно закону Ампера на проводник длиной  $dl$  с силой тока в нём  $I$ , помещённый в магнитное поле (рис.1), действует сила  $dF$ . Магнитная индукция численно равна максимальной силе, действующей на проводник единичной длины с единичной силой тока в нём  
Магнитная индукция измеряется в теслах:  
 $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н} / (\text{м} \cdot \text{А})$

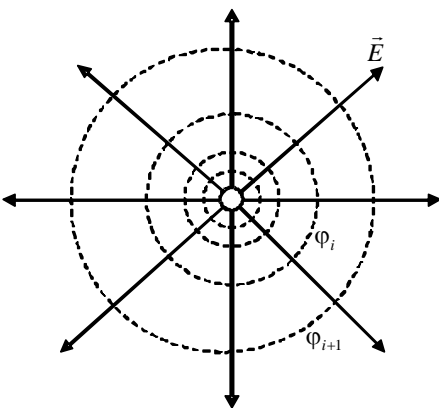


Рисунок 1 - Силовые линии показаны стрелками, эквипотенциальные линии показаны пунктиром

# Основные формулы

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{Гармонические колебания}$$

$$C = \frac{q}{\varphi} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \quad A = qU = q\Delta\varphi$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$F = mgsin\alpha$$

$$F = k\Delta x$$

$$W = mgh + \frac{mv^2}{2}$$

$$W = \frac{k\Delta x}{2} + \frac{mv^2}{2}$$

$$\varphi = \frac{W}{q} = \frac{q}{4r\varepsilon\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\Delta\varphi}{d} = \frac{q}{4r^2\varepsilon\varepsilon_0}$$

$$\omega_0 = -\frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$I = I_0 \sin\omega t$$

Сила переменного тока  $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin\omega t$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Емкостное сопротивление

$$X_L = \omega L$$

Индуктивное сопротивление

$$I_d = -\frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

$$U_d = -\frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

$I_0$  и  $U_0$  –  
амплитудные  
значения силы тока  
и напряжения

$$W = \frac{LI_0^2}{2} \quad \text{В моменты } t=T/4 \text{ и } t=3T/4 \text{ энергия магн. поля максимальна}$$

$$W = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{q_0 U_0}{2} = \frac{CU_0^2}{2}$$

В моменты  $t=0$ ,  $t=T/2$  и  $t=T$  энергия эл. поля достигает максимального знач.

# Основные формулы

$$F_A = IlB \sin \alpha$$

Сила, действующая на проводник длиной  $l$  с силой тока  $I$ , находящийся в магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$ ,  $\alpha$  - угол между вектором  $\mathbf{B}$  и направлением тока

$$F_L = qvB \sin \alpha$$

Сила, действующая на заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $v$ , в однородном магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$ ,  $\alpha$  - угол между вектором  $v$  и  $\mathbf{B}$

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Поток вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$  однородного магнитного поля,  $S$  - площадь, ограниченная плоским контуром,  $\alpha$  - угол между нормалью к площадке  $S$  и  $\mathbf{B}$

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

ЭДС электромагнитной индукции, равное изменению магнитного потока за промежуток времени  $\Delta t$

$$I_i = - \frac{\Delta \varepsilon}{R}$$

Сила индукционного тока, равная отношению ЭДС к сопротивлению контура

$$q = - \frac{\Delta \Phi}{R}$$

Заряд, протекающий в контуре

$$\varepsilon_i = vBl \sin \alpha$$

ЭДС индукции в отрезке проводника длиной  $l$ , движущегося со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$ ,  $\alpha$  - угол между вектором  $v$  и  $\mathbf{B}$

$$\Phi_s = LI$$

Поток самоиндукции, где  $L$  - индуктивность контура,  $I$  - сила тока в контуре

$$\varepsilon_s = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

ЭДС самоиндукции

$$W = \frac{LI^2}{2}$$

Энергия магнитного поля



# Основные формулы

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{Гармонические колебания}$$

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu} = \frac{2\pi v}{\omega} \quad \nu = \frac{1}{T} \quad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21} \quad n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\sin i_{\text{пр}} = \frac{1}{n} = n_{21}$$

$$W = \frac{LI_0^2}{2} \quad \text{В моменты } t=T/4 \text{ и } t=3T/4 \text{ энергия магн. поля максимальна}$$

$$W = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{q_0 U_0}{2} = \frac{CU_0^2}{2}$$

В моменты  $t=0$ ,  $t=T/2$  и  $t=T$  энергия эл. поля достигает максимального знач.

$$I = I_0 \sin \omega t \quad \text{Сила переменного тока} \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$$

Емкостное сопротивление

Индуктивное сопротивление

$I_0$  и  $U_0$  –  
амплитудные  
значения силы тока  
и напряжения

# Основные формулы

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{Гармонические колебания}$$

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu} = \frac{2\pi v}{\omega} \quad \nu = \frac{1}{T} \quad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \quad \omega_0 = -\frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$F = mgsin\alpha$$

$$F = k\Delta x$$

$$W = mgh + \frac{mv^2}{2}$$

$$W = \frac{k\Delta x}{2} + \frac{mv^2}{2}$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$I = I_0 \sin \omega t$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$X_L = \omega L$$

$$I_D = -\frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Сила переменного тока} \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$$

Емкостное сопротивление

Индуктивное сопротивление

$$U_D = -\frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

$I_0$  и  $U_0$  -  
амплитудные  
значения силы тока  
и напряжения

$$W = \frac{LI_0^2}{2} \quad \text{В моменты } t=T/4 \text{ и } t=3T/4 \text{ энергия магн. поля максимальна}$$

$$W = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{q_0 U_0}{2} = \frac{CU_0^2}{2}$$

В моменты  $t=0$ ,  $t=T/2$  и  $t=T$  энергия эл. поля достигает максимального знач.

Спасибо за внимание!

IT'sMO<sup>re</sup> than a  
UNIVERSITY