



# Электростатика

- 
- Электрическое поле неподвижных электрических зарядов, осуществляющее взаимодействие между ними, называется **электростатическим полем**.
  - Силы, действующие на заряды со стороны электростатического поля, называются **электростатическими силами**.

# Электрический заряд

- Элементарный заряд -  $\pm e$

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

- Величины всех зарядов кратны одному элементарному заряду  $e$

$$q = \pm eN$$

$N$  – количество зарядов

# Закон сохранения электрического заряда

- Суммарный заряд электрически изолированной системы сохраняется.

Электрически изолированная система – система, у которой через ограничивающую ее поверхность не могут проникать электрические заряды.

# Закон Кулона

- - Сила электростатического взаимодействия  $F$  двух точечных неподвижных зарядов, находящихся в вакууме, прямо пропорциональна произведению этих зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между зарядами и направлена вдоль соединяющей их прямой.

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

В системе  
СИ

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{М}} \text{ – электрическая постоянная}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{М}}{\text{Ф}}$$

Точечный электрический заряд – заряженное тело, форма и размеры которого несущественны в данной задаче.

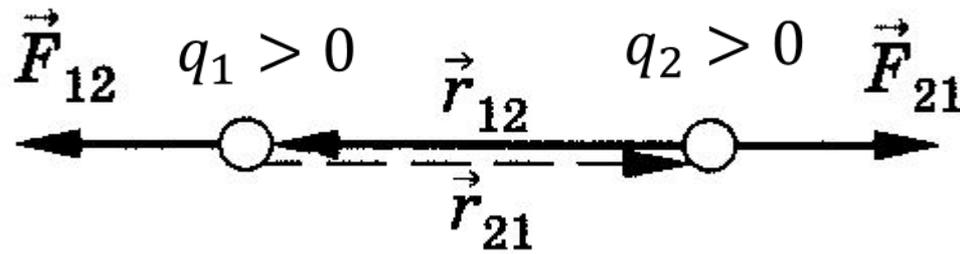
# Закон Кулона в векторной форме

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r}$$

$$\vec{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}_{21}}{r}$$

$\vec{F}_{12}$  - сила, действующая на заряд  $q_1$  со стороны заряда  $q_2$   
 $\vec{r}_{12}$  - радиус-вектор, соединяющий заряд  $q_2$  с зарядом  $q_1$   
 $r = |\vec{r}_{12}|$

$\vec{F}_{21}$  - сила, действующая на заряд  $q_2$  со стороны заряда  $q_1$   
 $\vec{r}_{21} = -\vec{r}_{12}$  - радиус-вектор, соединяющий заряд  $q_1$  с зарядом  $q_2$



- Кулоновская сила ( $\vec{F}_{12}, \vec{F}_{21}$ ) – **центральная сила** (направлена вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие заряды)

Из раздела «Механика» известно, что любое стационарное поле центральных сил является консервативным, т.е. *работа сил этого поля не зависит от формы пути, а только от положения конечной и начальной точек.*

# Принцип суперпозиции

- Результирующая сила  $F$ , действующая на заряд  $q_a$  со стороны  $N$  других зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_N$

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_{ai}$$

$\vec{F}_{ai}$  - сила взаимодействия заряда  $q_a$  с  $i$ -тым зарядом в отсутствии остальных  $N-1$  зарядов

# Напряженность электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}}$$

Силовая характеристика электрического поля.

(Векторная характеристика)

*Равна отношению силы  $\vec{F}$ , действующей со стороны поля на неподвижный точечный пробный электрический заряд, помещенный в рассматриваемую точку поля, к этому заряду  $q_{\text{пр}}$ .*

**Пробный электрический заряд** должен быть столь малым, чтобы его внесение в поле не вызывало изменения значений и перераспределения в пространстве электрических зарядов, напряженность поля которых измеряется с его помощью.

$$[E] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

# Напряженность поля точечного заряда в вакууме

Рассмотрим точечный заряд  $q$ . В поле заряда  $q$  поместим пробный заряд  $q_{\text{пр}}$ .

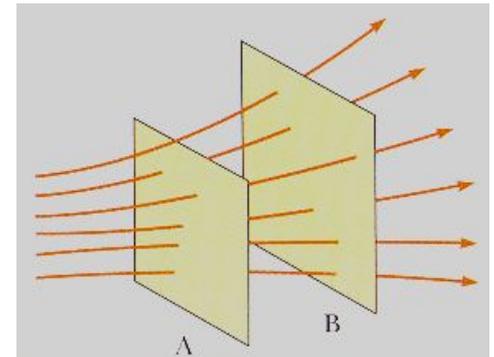
$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}} = \frac{1}{q_{\text{пр}}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_{\text{пр}}}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \vec{r}$$

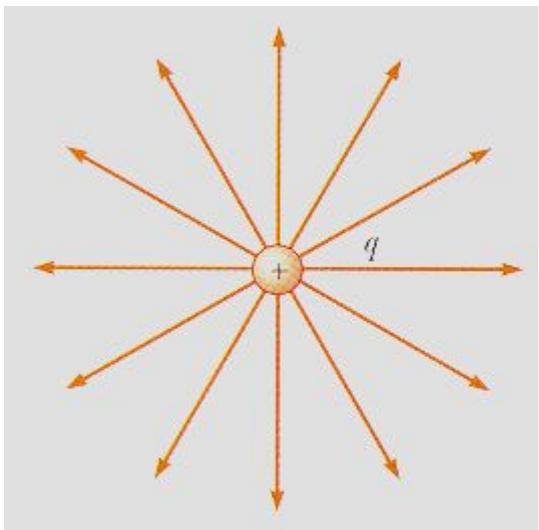
$\vec{r}$  - радиус-вектор, проведенный в рассматриваемую точку поля из той точки  $O$ , где находится заряд  $q$ .

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

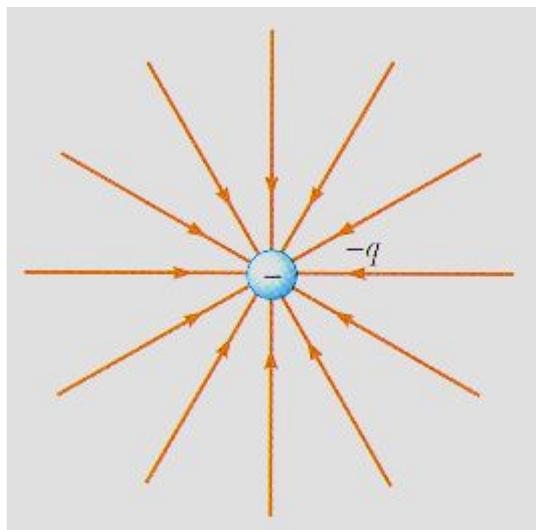
# Линии напряженности электрического поля

- **линии, проведенные в поле так, что касательные к ним в каждой точке совпадают по направлению с вектором напряженности поля.**
- Линия напряженности считается направленной так же, как вектор  $\vec{E}$  поля в рассматриваемой точке линии.
- Линии напряженности не пересекаются.
- Силовые линии начинаются и заканчиваются только на зарядах, или уходят и приходят в бесконечность.
- Число силовых линий на единицу поверхности площадки, перпендикулярной линиям, пропорционально величине  $E$  в районе этой площадки ( $E_A > E_B$ ).

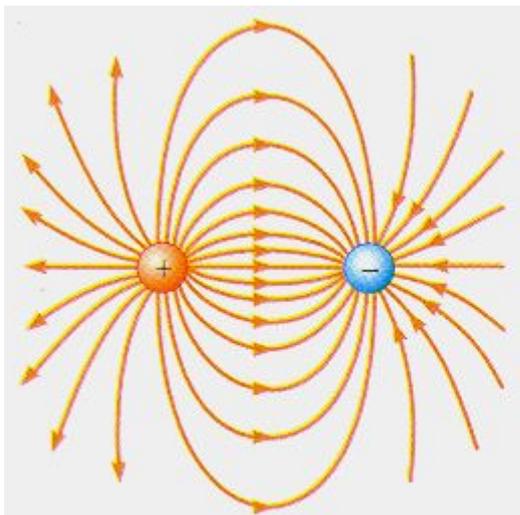




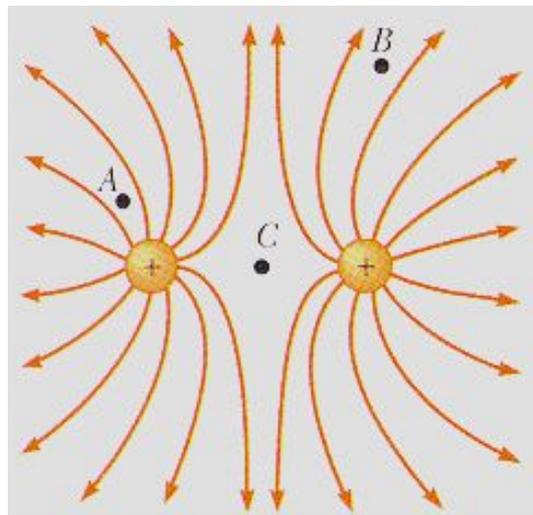
2D схема



2D схема



2D схема

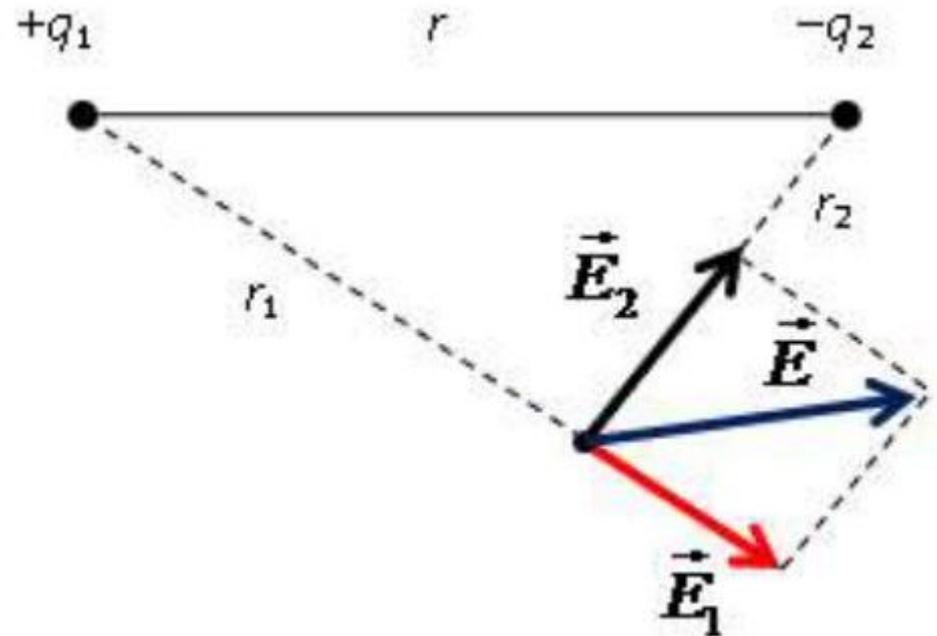


2D схема

# Принцип суперпозиции электрических полей

Напряженность электрического поля системы точечных зарядов равна сумме напряженностей полей каждого из этих зарядов в отдельности.

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$$



# Потенциальная энергия заряда

$$W_p = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Потенциальная энергия заряда  $q'$  в поле заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него.

# Потенциал электрического поля

$$\varphi = \frac{W_p}{q'}$$

**Энергетическая характеристика  
электрического поля.**

**(скалярная характеристика)**

**Физическая величина, определяемая  
потенциальной энергией единичного  
положительного, помещенного в данную  
точку поля.**

$$[\varphi] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}$$

# Потенциал поля точечного заряда

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$r$  – расстояние от данной точки до заряда  $q$ , создающего поле.

# Принцип суперпозиции

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{r_i}$$

**Потенциал поля, создаваемого системой зарядов, равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов в отдельности.**

# Работа сил электростатического поля при перемещении заряда $q$ из точки 1 в точку 2

Равна произведению перемещаемого заряда на разность потенциалов в начальной и конечной точках.

$$A_{12} = W_{p1} - W_{p2} = q\varphi_1 - q\varphi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

# Еще одно определение потенциала

Перемещаем  $q$  из произвольной точки в бесконечность ( $\varphi_2 = 0$ )

$$A_\infty = q\varphi_1$$

$$\varphi = \frac{A_\infty}{q}$$

**Потенциал численно равен работе, которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки на бесконечность.**

# Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi$$

Знак минус показывает, что  $\vec{E}$  направлен в сторону убывания потенциала.

$$\text{grad} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{e}_z$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{e}_z$$

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

$$E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

$$E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

# Теорема о циркуляции вектора $\vec{E}$

Работа сил поля по перемещению заряда из точки 1 в точку 2:

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F} d\vec{l} = \int_1^2 q\vec{E} d\vec{l} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}$$

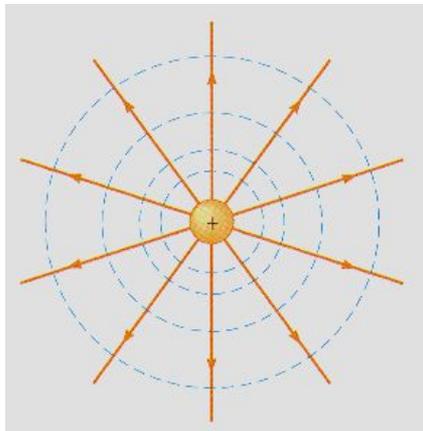
Для электростатического поля получаем, что и интеграл по замкнутому контуру равен нулю.

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

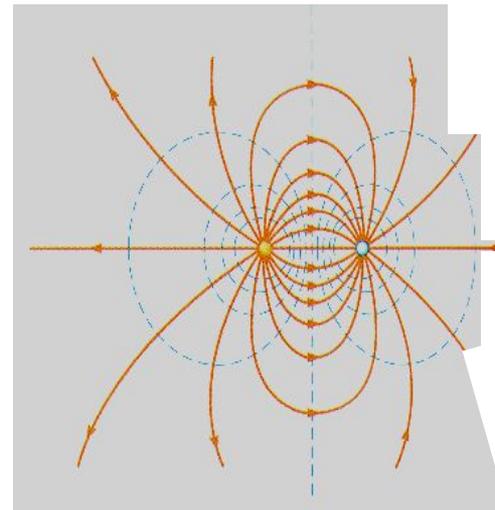
# Эквипотенциальная поверхность

- - воображаемая поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал.

Эквипотенциальная поверхность всегда перпендикулярна линиям напряженности электрического поля.



**Точечный заряд**



**Электрический диполь**

# Электрическое поле непрерывного распределения зарядов

**Линейная плотность заряда** – заряд, приходящийся на единицу длины.

$$\tau = \frac{Q}{l} \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{м}} \right]$$

- если заряд равномерно распределен вдоль линии длиной  $l$ :

**Поверхностная плотность заряда** – заряд, приходящийся на единицу поверхности.

$$\sigma = \frac{Q}{S} \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \right]$$

- если заряд равномерно распределен на поверхности площадью  $S$ :

**Объемная плотность заряда** – заряд, приходящийся на единицу объема.

$$\rho = \frac{Q}{V} \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3} \right]$$

- если заряд равномерно распределен по объему  $V$ :

Если заряд распределен *неравномерно*:

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

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

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

# Теорема Остроградского-Гаусса

Суммарный электрический поток через произвольную замкнутую поверхность

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{\text{внутри}}}{\epsilon_0}$$

$q_{\text{in}}$  – суммарный заряд внутри поверхности,

$\vec{E}$  – напряженность электрического поля  
в произвольной точке на поверхности.

$\vec{E}$  учитывает вклады зарядов как внутри, так и вне поверхности.