

# Принцип суперпозиции полей.

Взаимодействие электрических зарядов в вакууме.

Напряженность электрического поля.

# Свойства электрических зарядов

- Физическая величина, определяющая способность частиц участвовать в электрическом взаимодействии, называется электрическим зарядом этой частицы. Электрический заряд – это неотъемлемое свойство элементарной частицы, и без нее сам по себе заряд существовать не может.

# Свойства электрических зарядов

- К числу наиболее важных свойств электрических зарядов относятся:
- 1. Существование двух видов электрических зарядов («положительных» и «отрицательных»), отличающихся друг от друга лишь тем, что в любой системе зарядов все заряды одного знака отталкиваются друг от друга, а противоположные по знаку – притягиваются.

# Свойства электрических зарядов

- 2. Дискретность величины электрического заряда. В природе существует минимальный заряд, называемый элементарным и равный по величине  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, а все заряды тел кратны ему.
- 3. Аддитивность. При соединении нескольких заряженных тел полный заряд оказывается равным алгебраической сумме зарядов соединяемых тел.

# Свойства электрических зарядов

- 4. Сохранение заряда. Согласно закону сохранения заряда, в изолированной системе полный заряд всех тел остается неизменным при любых взаимодействиях тел, приводящих к перераспределению зарядов между ними.
- 5. Инвариантность. Электрический заряд остается неизменным при переходе от одной системы отсчета к другой.

# Закон Кулона

- Взаимодействие заряженных тел осуществляется посредством электрических полей, образованных этими телами. Взаимодействие точечных зарядов в вакууме описывается законом Кулона:

$$F = k_0 \frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \quad k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

# Закон Кулона

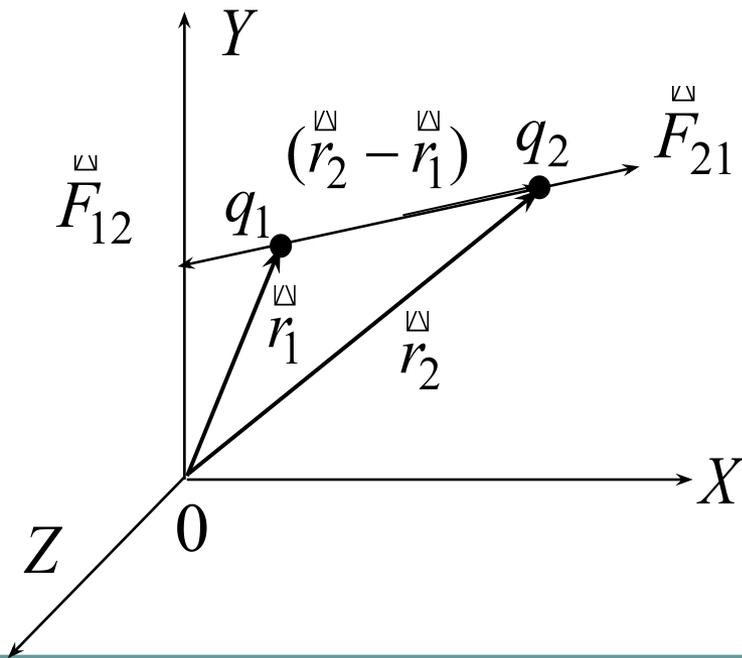
- **Точечным зарядом** называется заряженное тело, размеры которого пренебрежительно малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которым оно взаимодействует.

**Таким образом, сила взаимодействия точечных зарядов в вакууме пропорциональна величине зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.**

# Закон Кулона

В векторной форме закон Кулона записывается:

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^2} \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$$



Взаимодействие тел сферической формы, заряженных равномерно, также описывается этой формулой.

# Закон Кулона

где  $\vec{F}_{12}$  – сила, действующая на заряд  $q_1$ , со стороны заряда  $q_2$ .

$\vec{F}_{21}$  – сила, действующая на заряд  $q_2$ , со стороны заряда  $q_1$ .

$\frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$  – единичный вектор, направленный от заряда  $q_1$  к заряду  $q_2$ .

# Характеристики электрического поля. Напряженность.

- Электрическим полем называется часть пространства, в которой на помещенный туда электрический заряд действуют электрические силы.

Поле неподвижных зарядов является стационарным и называется электростатическим.

Основное свойство поля заключается в том, что на всякий заряд, помещенный в это поле, действует сила.

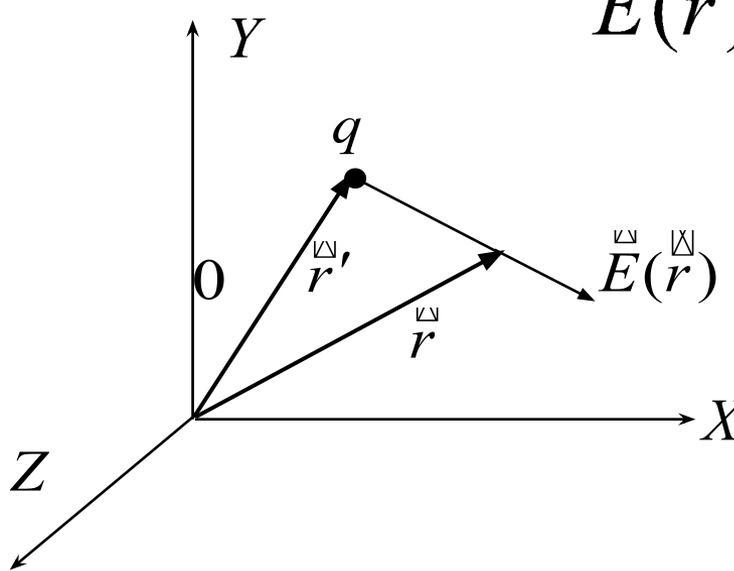
# Силовая характеристика. Напряженность поля.

- **Силовой характеристикой поля, создаваемого зарядом  $q$ , является напряженность электростатического поля, которая определяется отношением силы, действующей на заряд  $q'$ , к величине этого заряда**

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

# Напряженность поля.

- Напряженность поля, созданного точечным зарядом, легко получается из закона Кулона:


$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} (\vec{r} - \vec{r}')$$

## Напряженность поля. Принцип суперпозиции.

Поля, одновременно созданные в одной и той же области различными источниками, существуют независимо друг от друга.

- Напряженность поля, созданного системой зарядов, определяется в каждой точке пространства как геометрическая сумма напряженностей полей отдельных зарядов – **принцип суперпозиции полей.**

# Принцип суперпозиции.

- Для дискретного распределения зарядов

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_1(\vec{r}) + \vec{E}_2(\vec{r}) + \dots + \vec{E}_n(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i(\vec{r})$$

Для системы точечных зарядов

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} (\vec{r} - \vec{r}_i)$$

# Принцип суперпозиции

Когда заряд непрерывно распределен в какой-либо области пространства, вводятся понятия

- линейной плотности заряда

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

- поверхностной плотности заряда

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

- и объемной плотности заряда

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

# Принцип суперпозиции

- Соответственно заряд элемента длины  $dL$ , поверхности  $ds$  и объема  $dV$  равен  $\lambda dL$ ,  $\sigma ds$ ,  $\rho dV$ , а напряженность рассчитывается по формулам:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{(L)} \frac{\lambda dL}{|r - r'|^3} (r - r');$$

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{(S)} \frac{\sigma ds}{|r - r'|^3} (r - r');$$

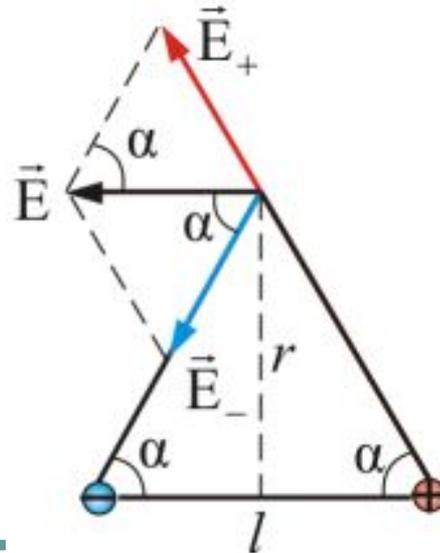
$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{(V)} \frac{\rho dV}{|r - r'|^3} (r - r');$$

# Силовые линии (линии напряженности)

- Поле может быть представлено графически с помощью силовых линий (линий напряженности). Силовая линия – это воображаемая линия, касательная к которой в любой точке совпадает с вектором напряженности в этой точке.
- Силовые линии проводятся так, чтобы их густота была пропорциональна (или равна) значению напряженности поля в данной точке пространства. Линии напряженности электрического поля начинаются на положительных, а заканчиваются на отрицательных зарядах или уходят в бесконечность. Они непрерывны и нигде не пересекаются.

# Пример 1

- Рассмотрим применение принципа суперпозиции в случае поля, созданного электрической системой из двух одинаковых по модулю, но противоположных по знаку зарядов с расстоянием между зарядами, равным  $l$  в точке, лежащей на перпендикуляре, восстановленном из середины отрезка, соединяющего заряды



# Пример 1

- В соответствии с принципом суперпозиции

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$$

Так как заряды равны по модулю и равноудалены от точки А, то

$$|\vec{E}_+| = |\vec{E}_-| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r^2 + l^2/4)}$$

# Пример 1

- Напряженность результирующего поля

$$E = 2E_+ \cos \alpha,$$

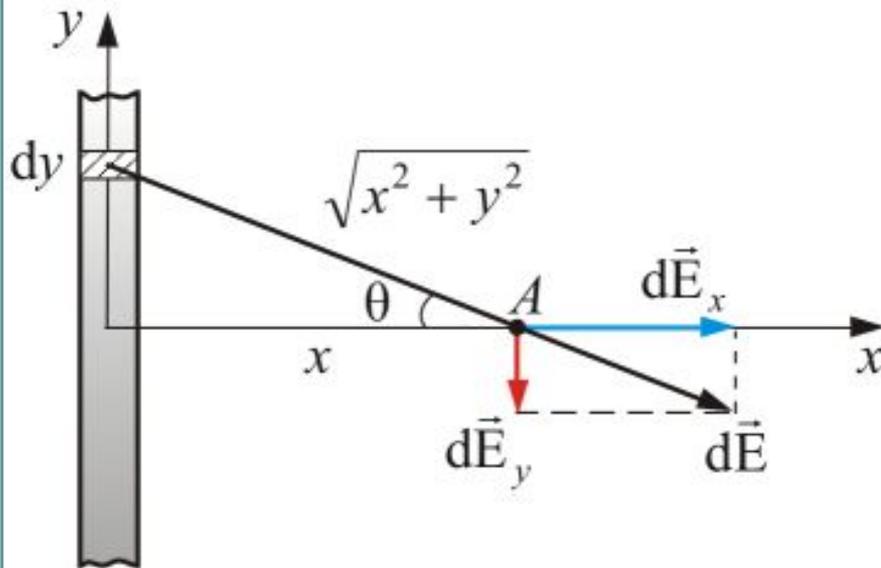
$$\cos \alpha = \frac{l}{2\sqrt{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)}}$$

- Окончательно

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{3/2}}$$

## Пример 2.

- Определим напряженность электрического поля в точке  $A$  на расстоянии  $x$  от бесконечно длинного, равномерно заряженного стержня.



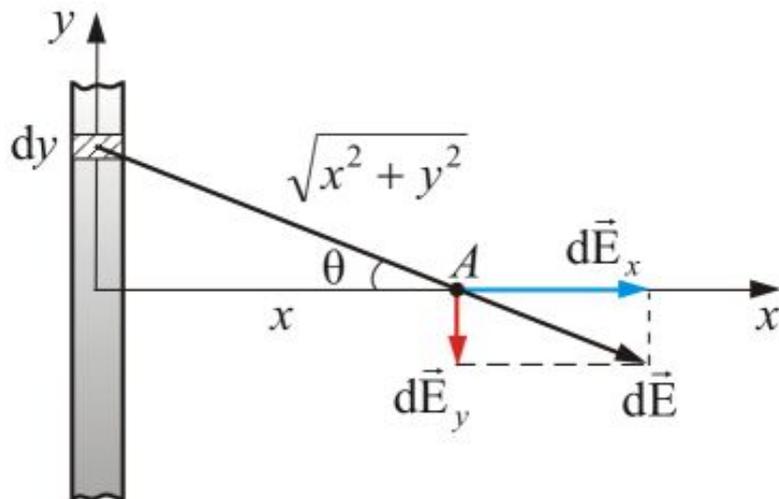
эйную

плотность  $\lambda$ ,

тогда

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dy}{(x^2 + y^2)}$$

## Пример 2.



$$dE_x = dE \cos \theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda \cos \theta dy}{(x^2 + y^2)}$$

$$dE_y = dE \sin \theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda \sin \theta dy}{(x^2 + y^2)}$$

## Пример 2.

- Проинтегрируем

$$E_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos \theta dy}{(x^2 + y^2)}$$

$$E_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \theta dy}{(x^2 + y^2)}$$

- Произведем замену переменных

$$y = x \operatorname{tg} \theta, \quad dy = \frac{x d\theta}{\cos^2 \theta}, \quad x^2 + y^2 = \frac{x^2}{\cos^2 \theta}.$$

## Пример 2.

- Результат интегрирования

$$E_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 x} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos \theta d\theta = \frac{2\lambda}{4\pi\epsilon_0 x}$$

$$E_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 x} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \sin \theta d\theta = 0$$

$$E = E_x = \frac{2\lambda}{4\pi\epsilon_0 x};$$

$$\vec{E} = \frac{2\lambda}{4\pi\epsilon_0 x} \vec{i}.$$