

# ***ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ***

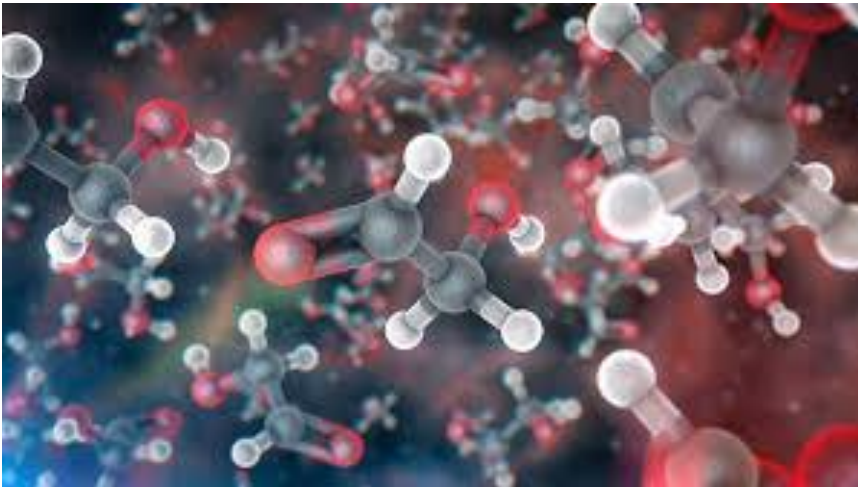
## **Тема 1. Электрическое поле**

### **Лекция 1.**

## **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ**

# фундаментальные взаимодействия

В начале 19 века, когда механика казалась вполне завершенной наукой, мир представлялся гигантским механизмом, действующим в строгом соответствии с законами механики.



Малоисследованные в то время немеханические явления, такие как электричество, магнетизм, свет, пытались свести к простому механическому взаимодействию объектов.

К концу 19, началу 20 века стало очевидным, что электромагнитные взаимодействия не только не сводимы к механическим, но и наоборот - механические силы, такие как силы упругости, трения, давления, а также силы химического взаимодействия имеют в своей основе электромагнитную природу. Изучение строения атомов и открытие элементарных частиц, обладающих электрическим зарядом, окончательно утвердило представление о фундаментальности электромагнитных взаимодействий во вселенной







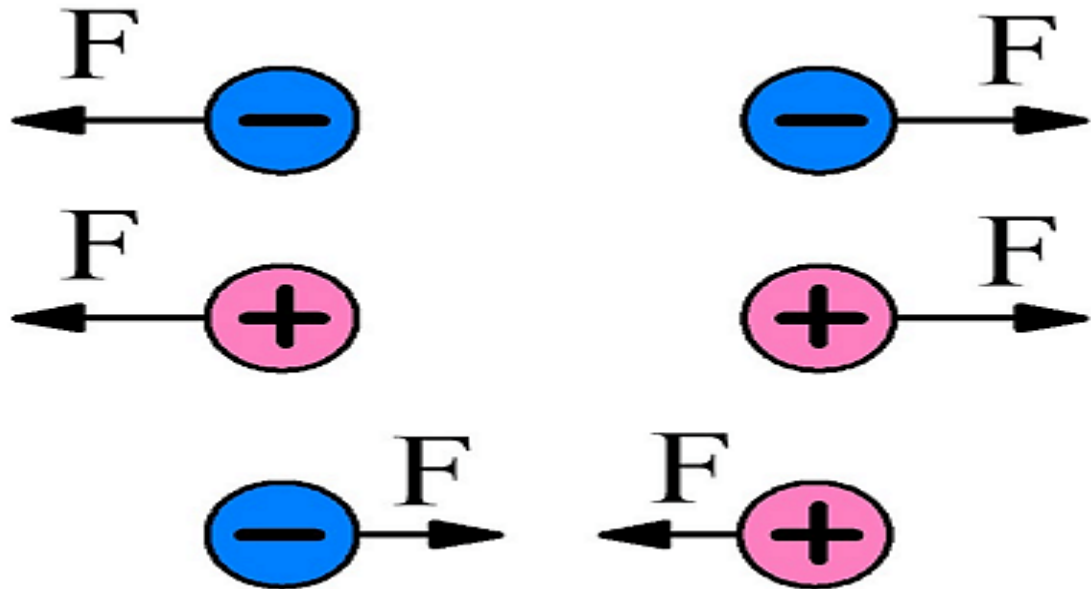
# Фундаментальные взаимодействия

Виды фундаментальных взаимодействий	Их роль во Вселенной	Радиус Действия
гравитационное	необходимо для возникновения звезд из газопылевых туманностей, для существования планетных систем	$\infty$
электро-магнитное	необходимо для существования атомов	$\infty$
сильное ядерное	обуславливает существование и стабильность ядер атомов	$10^{-15}$
слабое ядерное	необходимо для термоядерного синтеза – источника звездной энергии	$10^{-18}$

# Электрические заряды

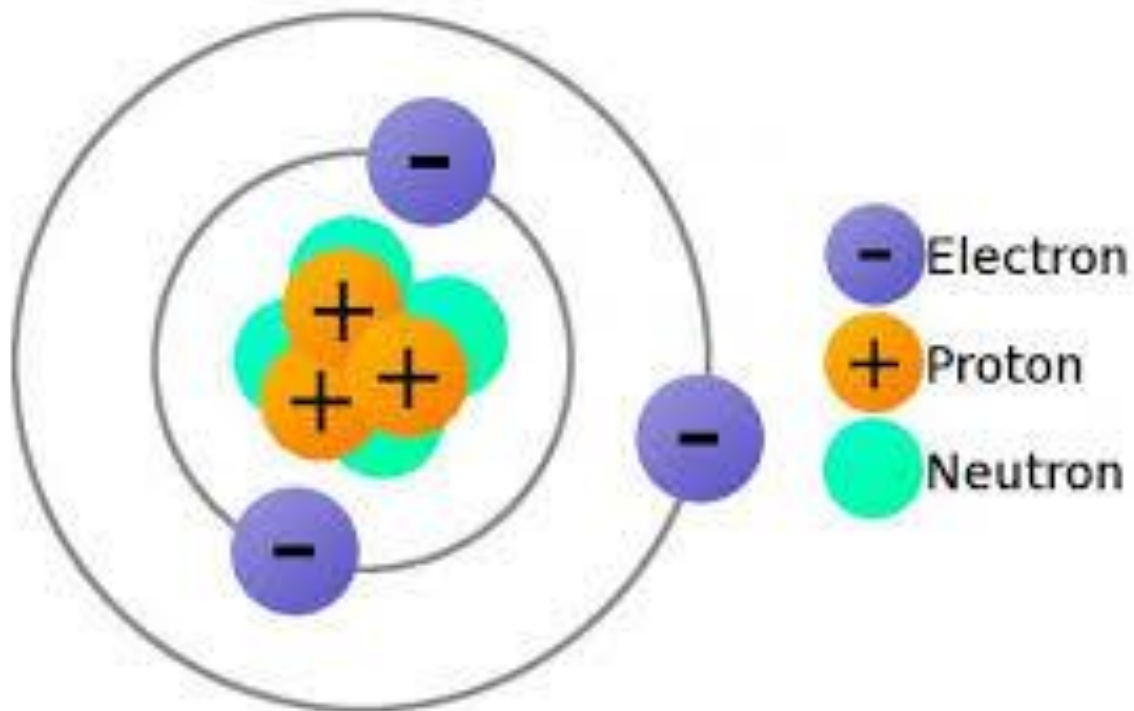
Еще в древности люди установили, что в результате натирания тела приобретают способность притягивать легкие предметы. Было установлено, что эта способность обусловлена наличием электрических зарядов. Понятие электрического заряда является **первичным** и не подлежит непосредственному определению. Возможно только перечисление его свойств.

Заряды бывают двух видов: положительные и отрицательные



Носителями зарядов в веществе являются элементарные частицы электрон и протон, входящие в состав атомов.

Заряд электрона  $e$  считают отрицательным, заряд протона - положительным. Заряд этих элементарных частиц является минимальной дискретной единицей заряда, поэтому заряд любого тела кратен величине заряда электрона. Каждый атом вещества электронейтрален, так как содержит в своем составе равное количество электронов и протонов, взаимно уравнивающих заряды друг друга. Суммарный заряд атома равен нулю.



# Закон сохранения заряда

Алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы (т.е. системы, не обменивающимися зарядами со внешними телами) остается неизменной независимо от физических процессов, происходящих в этой системе. Иными словами, до сих пор не обнаружены процессы, в которых превращения элементарных частиц происходят с изменением суммарного электрического заряда.

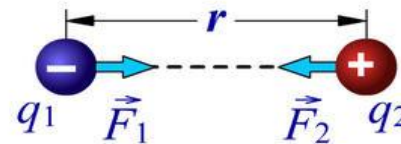
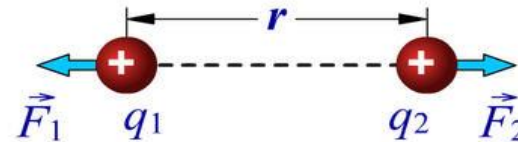
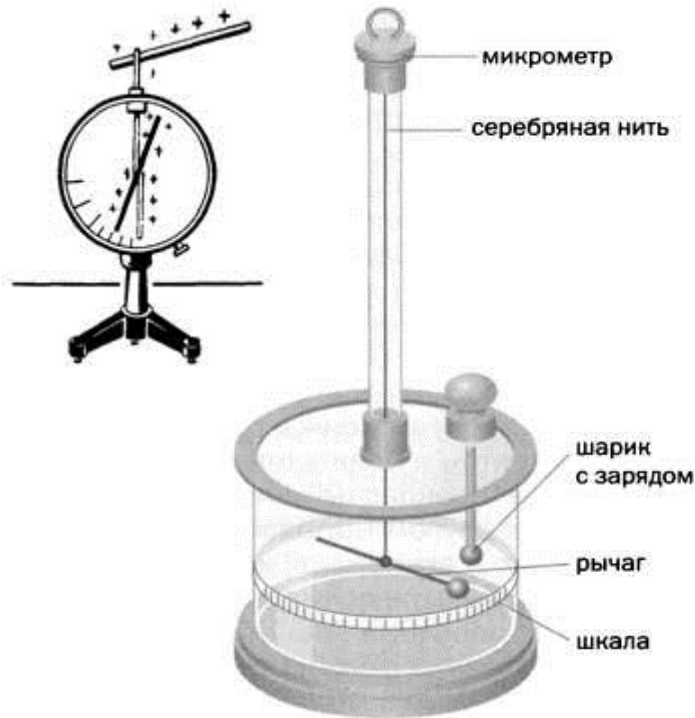
Величина заряда не зависит от системы отсчета и при переходе из одной инерциальной системы в другую не изменяется. Это свойство называют **релятивистской инвариантностью заряда**.

В системе СИ единицей измерения электрического заряда служит Кулон (Кл). Элементарный электрический заряд электрона или протона составляет  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.



# Закон Кулона

Сила взаимодействия  $F$  двух точечных зарядов пропорциональна величинам  $q_1$  и  $q_2$  этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними.



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

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

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

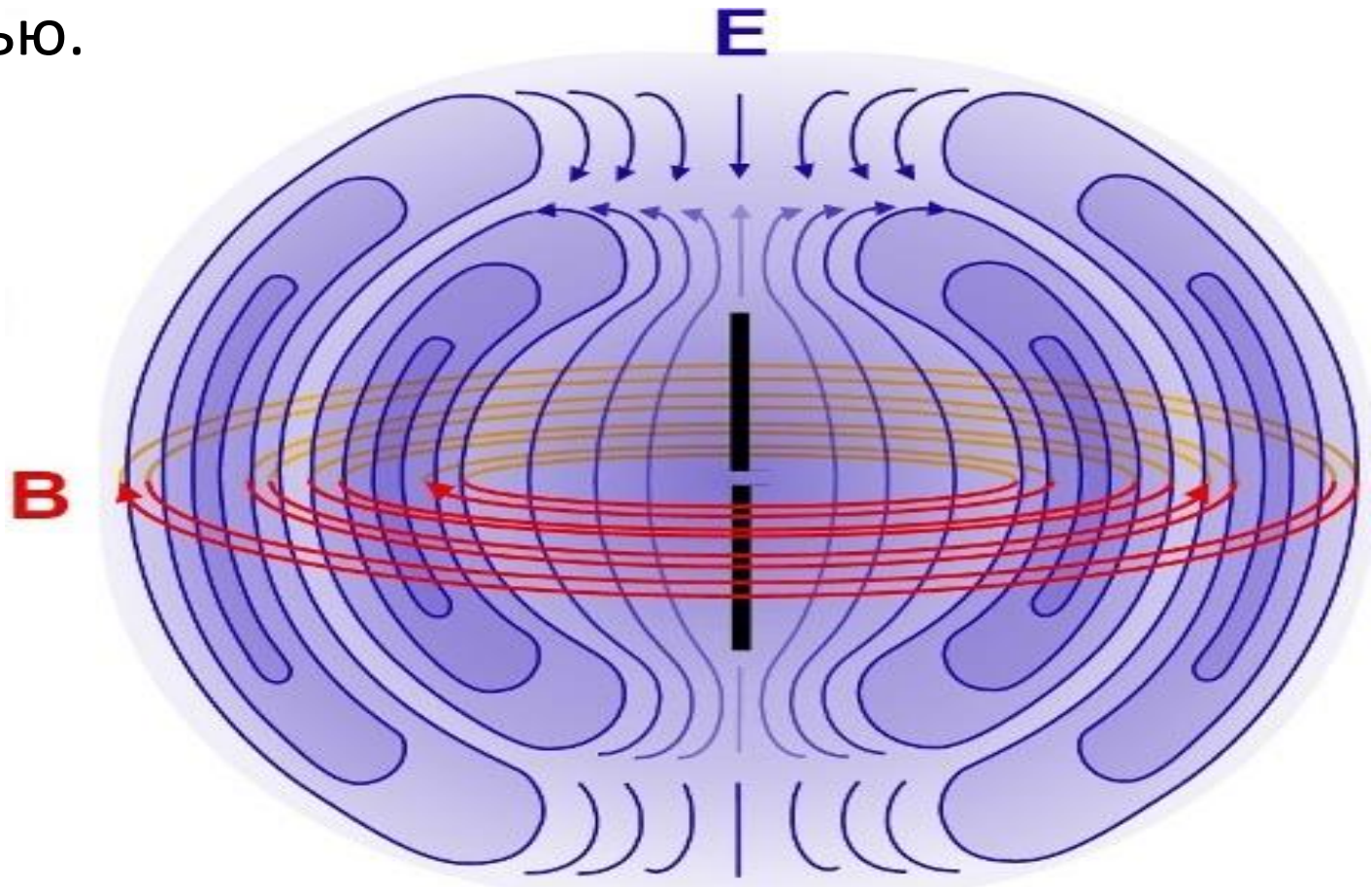
$\epsilon_0$  — электрическая постоянная  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$

# Механизм взаимодействия электрических зарядов на расстоянии

Многие физики придерживались идеи непосредственного мгновенного действия зарядов друг на друга на расстоянии без какого-либо промежуточного объекта, передающего действие от одного заряда к другому (**теория дальногодействия**). Другие считали, что воздействие одного заряда на другой осуществляется через материальный носитель – гипотетическую промежуточную среду, называемую эфиром (**теория близкодействия**).

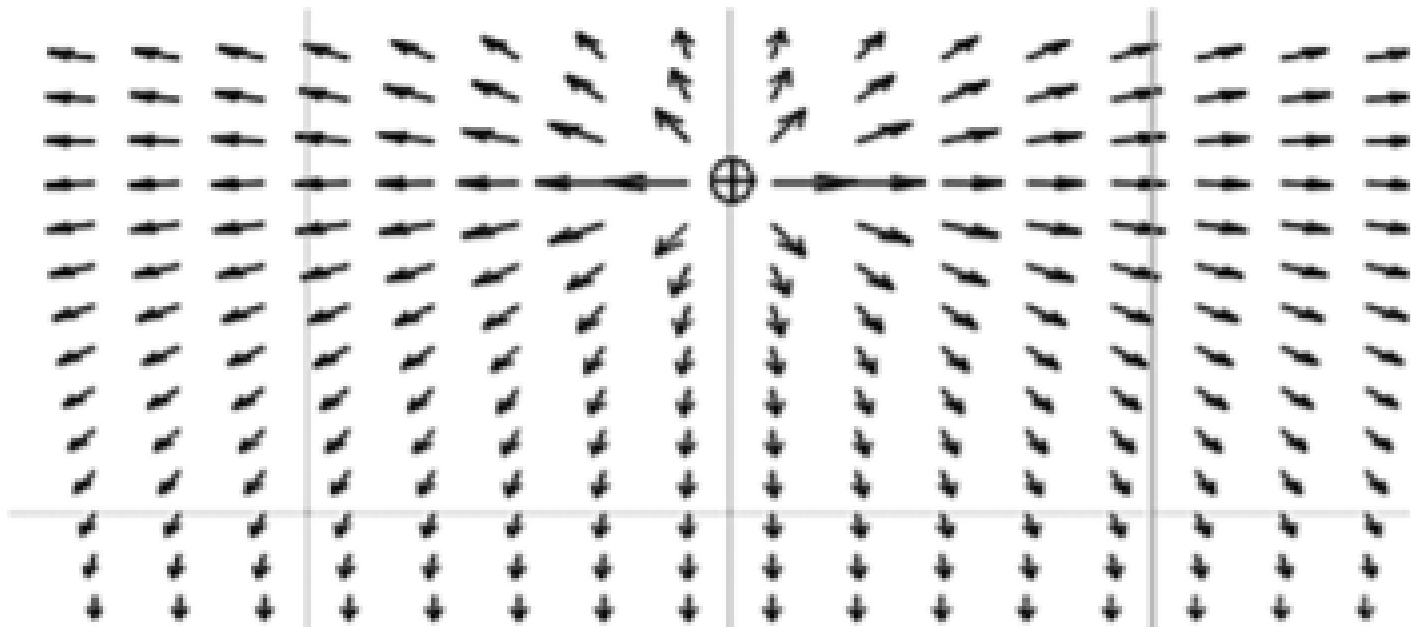


В дальнейшем были открыты **электромагнитные волны** и гипотеза о существовании промежуточной среды, передающей взаимодействие, была подтверждена. Эта среда является реальным материальным объектом, обладающим энергией и импульсом и передающим взаимодействие с конечной скоростью.

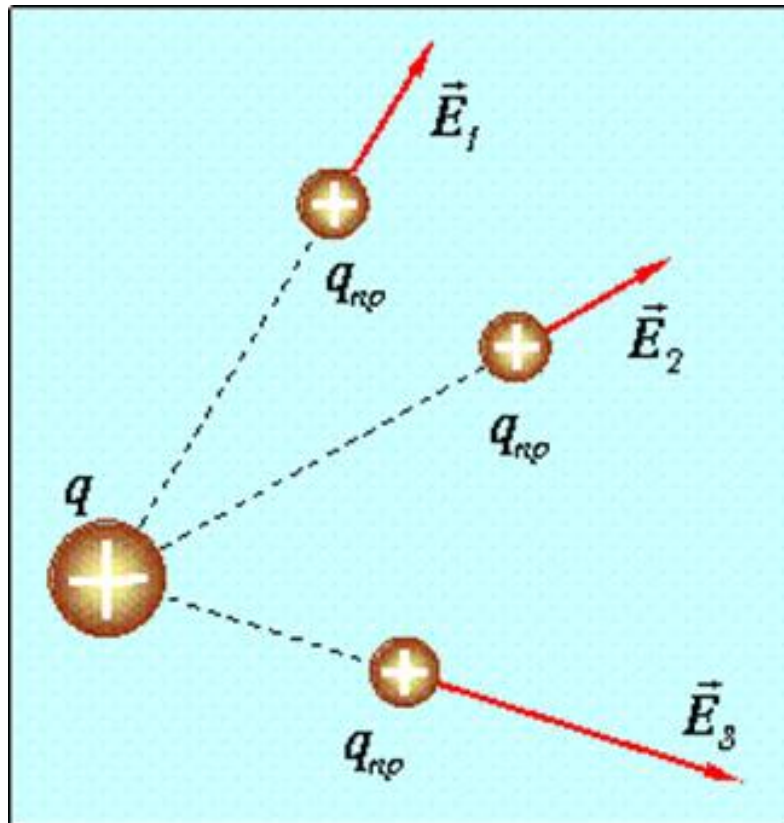


# Электрическое поле

Материальный носитель кулоновского взаимодействия, заполняющий все пространство, называется **электрическим полем**. В электростатике источником электрического поля считаются заряды. Любой электрический заряд меняет свойства окружающего пространства. Эту область пространства с измененными свойствами называют **электрическим полем**.



Когда заряды, являющиеся источниками поля, неподвижны и не изменяются по величине, поле называют **электростатическим**. На любой другой заряд, помещенный в электрическое поле, действует сила. Ее величина и направление зависит от количественной характеристики электрического поля, называемой **напряженностью электрического поля**.





# Напряженность электрического поля

Рассмотрим простейший вид электрического поля - поле точечного заряда. Из закона Кулона

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

получим отношение силы, действующей на положительный пробный заряд к величине этого заряда.

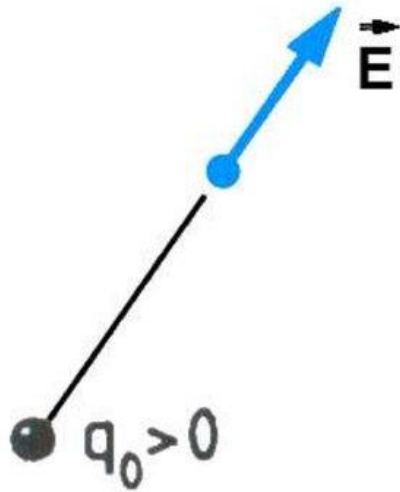
$$\frac{F}{q_{\text{проб}}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2}$$

Оно не зависит от величины пробного заряда. Отношение  $F/q_{\text{проб}}$  принимают в качестве силовой характеристики электрического поля и называют **напряженностью электрического поля  $E$** .

$$E = F/q_{\text{проб}} \qquad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2}$$

Напряженность электрического поля - векторная величина. Вектор  $E$  направлен вдоль линии, соединяющей рассматриваемую точку поля с источником - зарядом  $q_1$ .

## Напряженность поля точечного заряда



$$E = \frac{k|q_0|}{r^2}$$

*Вектор напряженности в любой точке электрического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд*

Если заряд  $q_0$  отрицательный, то вектор  $E$  направлен в сторону  $q_0$ , а если положительный - то в противоположную сторону.

В векторном виде выражение для напряженности электрического поля точечного заряда примет следующий вид

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}$$

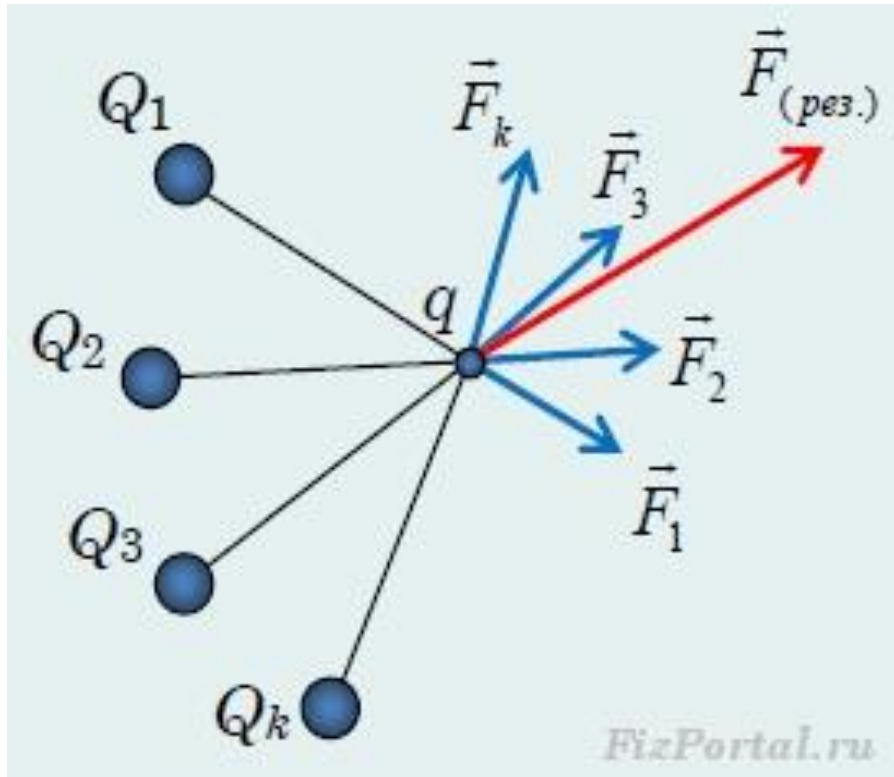
На любой помещенный в электрическое поле заряд  $q$  действует сила  $F$ , равная

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

Единицей напряженности электрического поля в системе СИ является вольт/метр (В/м), где вольт – единица **потенциала электрического поля** (потенциал будет рассмотрен ниже).

# Принцип суперпозиции электрических полей

Рассмотрим случай, когда электрическое поле создается совокупностью произвольно расположенных точечных зарядов  $Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_k$ . Поместим в это поле пробный заряд.



Сила, действующая со стороны зарядов  $Q_1 - Q_k$  на пробный заряд  $q$  равна

$$\vec{F}_0 = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_k$$

Поскольку  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ , то общая напряженность электрического поля также может быть представлена суммой напряженностей, создаваемых в рассматриваемой точке каждым из зарядов  $Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_k$  в отдельности.

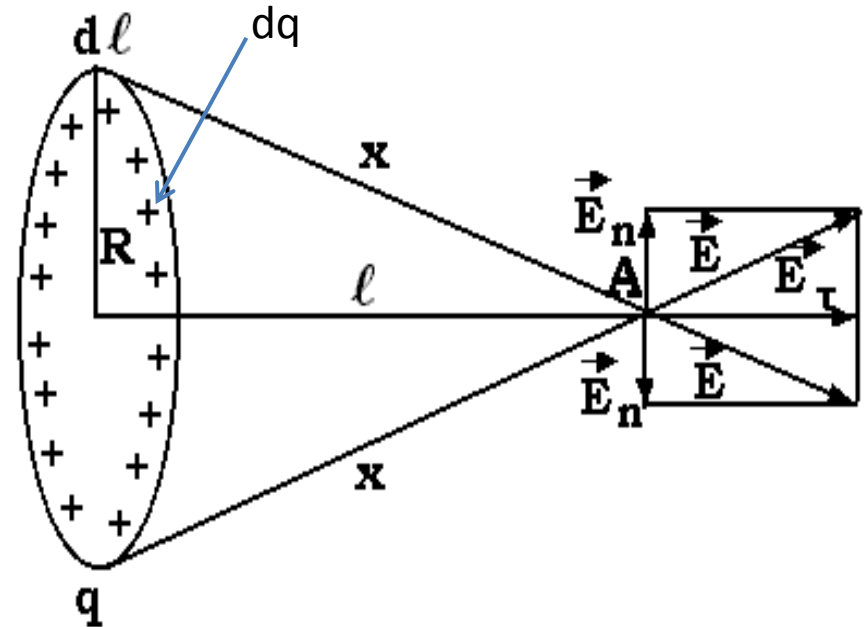
$$\vec{E}_0 = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_k$$

Это утверждение называют **принципом суперпозиции** (наложения) электрических полей. Принцип суперпозиции позволяет вычислить напряженность электрического поля любой системы зарядов.

Если заряды не точечные, а протяженные, то протяженное заряженное тело мысленно разбивают на множество малых объемов. На каждый из них приходится заряд  $dq$ , который можно считать точечным зарядом. При устремлении объемов разбиения к нулю сумма векторов напряженностей переходит в интеграл

$$\mathbf{E} = \int_{(q)} d\mathbf{E}$$

где  $d\mathbf{E}$  — напряженность электрического поля, создаваемого элементарным зарядом  $dq$ . Интегрирование ведется по всей области  $(q)$  распространения заряда.

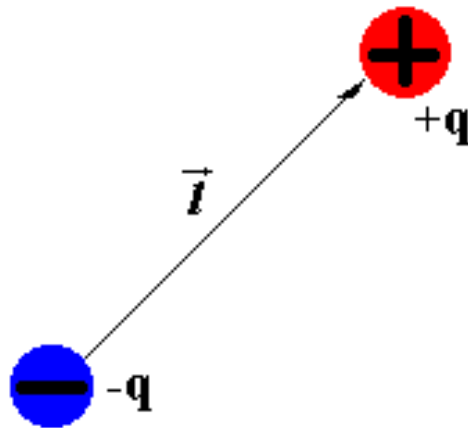




# Поле электрического диполя

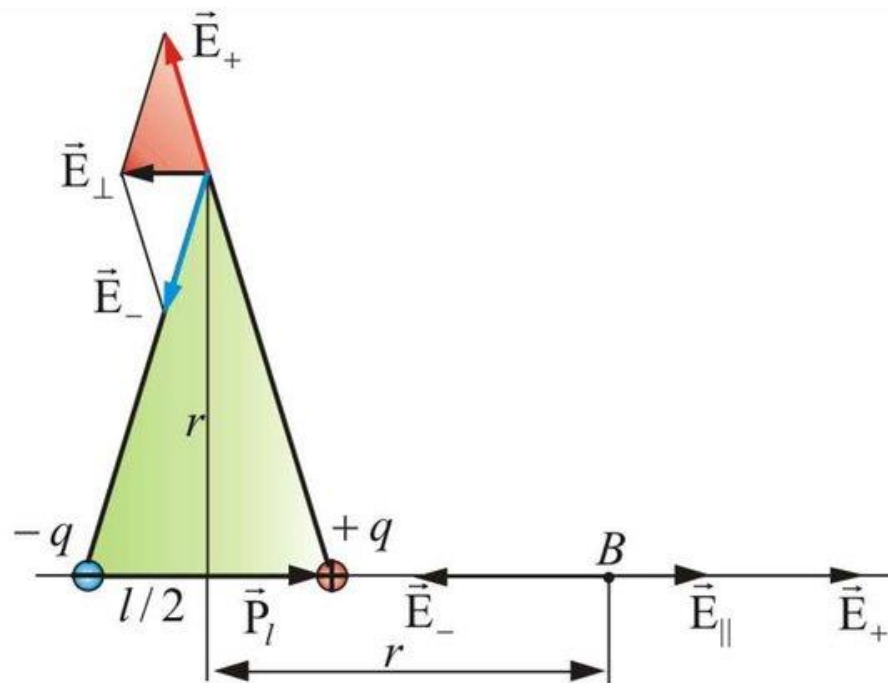
(пример применения принципа суперпозиции)

**Электрическим диполем** называется система из двух равных по величине разноименных точечных зарядов  $+q$  и  $-q$ , расположенных на небольшом расстоянии  $l$  друг от друга. Произведение  $p = ql$  называют электрическим моментом диполя, а линию, соединяющую заряды – осью диполя.





- $$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} \approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{т.к. } l \ll r$$



- Из подобия заштрихованных треугольников можно записать:

$$\frac{E_{\perp}}{E_{+}} = \frac{l}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{l}{r}$$

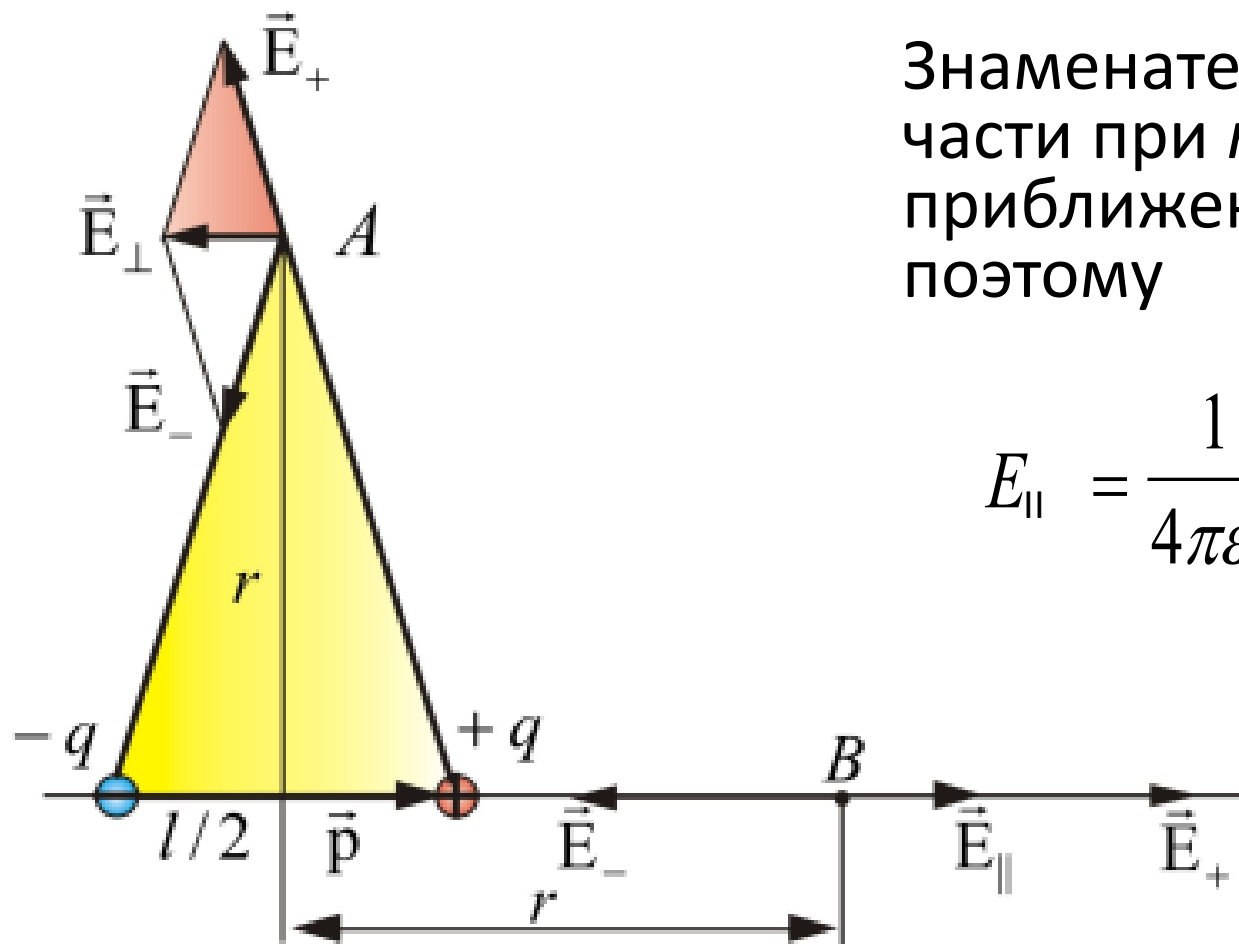
отсюда

$$E_{\perp} = E_{+} \frac{l}{r} = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

$$E_{\perp} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

Теперь найдем поле в точке В на оси диполя. Оно будет представлять собой сумму полей  $E_+$  и  $E_-$ , от точечных зарядов  $+q$  и  $-q$

$$E_{\parallel} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{q}{(r - l/2)^2} - \frac{q}{(r + l/2)^2} \right] = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{(r + l/2)^2 - (r - l/2)^2}{(r - l/2)^2 (r + l/2)^2}$$



Знаменатель в правой части при  $r \gg l$  приближенно равен  $r^4$ , поэтому

$$E_{\parallel} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}$$

Видно, что напряженность поля электрического диполя зависит не от величины зарядов, а от электрического момента диполя  $p = ql$ . С расстоянием напряженность убывает как  $1/r^3$ , то есть быстрее, чем напряженность поля точечного заряда. Интересно отметить, что вектор  $E_{\perp}$ , направлен не вдоль линии, соединяющей точку наблюдения с центром диполя, а перпендикулярен ей.

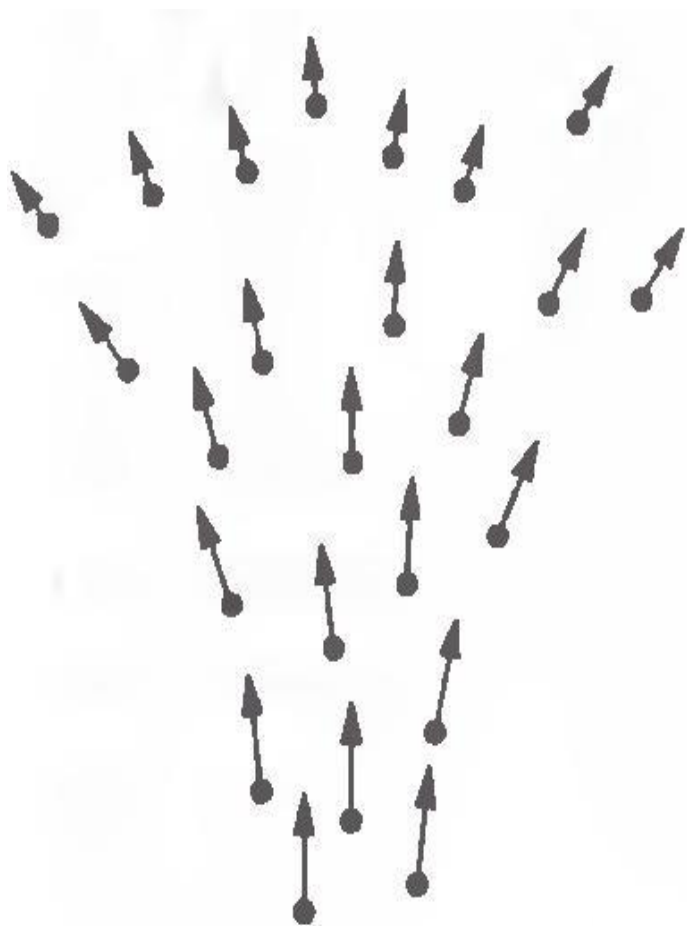
$$E_{\parallel} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}$$

$$E_{\perp} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}$$



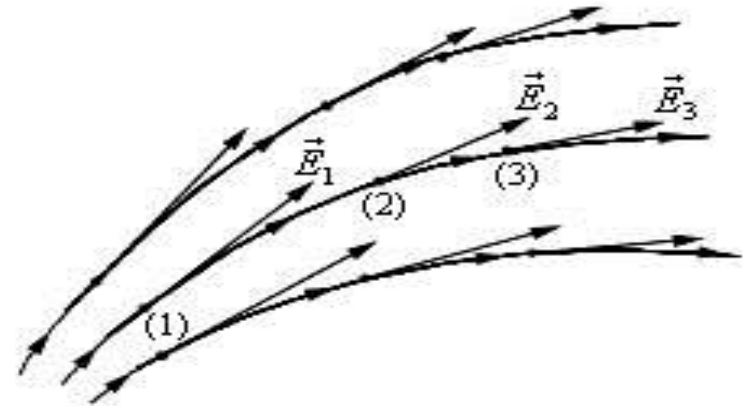
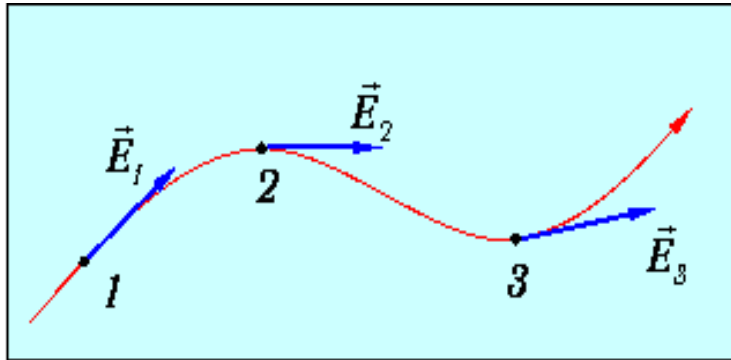
# Линии напряженности

Чтобы описать электрическое поле необходимо для каждой точки пространства указать величину и направление вектора напряженности поля.

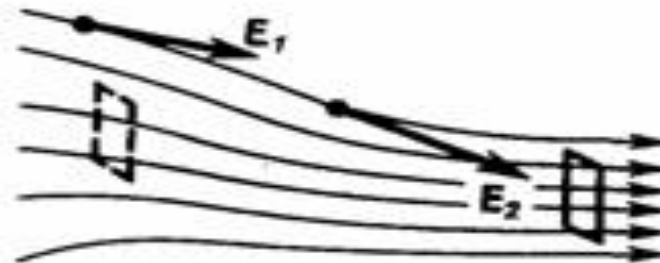


# Правила проведения линий напряженности

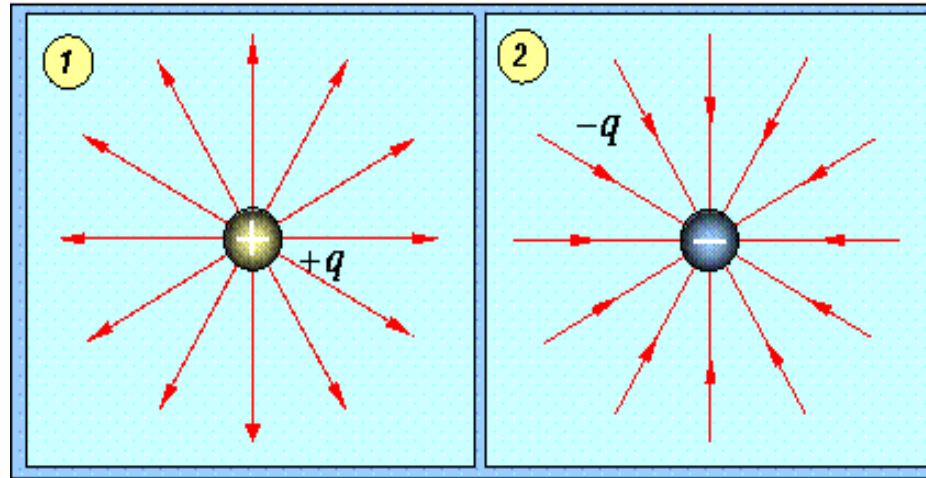
- Касательная к линии в любой точке совпадает с направлением вектора  $\vec{E}$



- Густота линий выбирается так, чтобы количество линий  $N$ , пронизывающих единичную площадку, перпендикулярную к линиям, численно равнялось бы модулю вектора  $E$ , то есть  $N = |E|$



# Картина линий напряженности точечных зарядов



Линии напряженности исходят из положительных зарядов и заканчиваются на отрицательных (или в бесконечности).

## Картина линий напряженности электрического диполя

