

# Электричество и магнетизм

*Семестр 2*

# ЛЕКЦИЯ № 1

## Основы электростатики

---

1. **Фундаментальные взаимодействия элементарных частиц.**
2. **Предмет классической электродинамики.**
3. **Электрический заряд. Релятивистская инвариантность заряда. Закон сохранения электрического заряда.**
4. **Взаимодействие точечных электрических зарядов. Закон Кулона.**
5. **Теория дальнего действия и ближнего действия. Электрическое поле. Вектор напряжённости электрического поля.**
6. **Электрическое поле точечного заряда в вакууме.**
7. **Принцип суперпозиции для электрического поля.**
8. **Электрический диполь. Дипольный момент. Поле диполя в дальней зоне.**

# Фундаментальные взаимодействия элементарных частиц

- 1. Сильное взаимодействие** обеспечивает связь между кварками в нуклонах и между нуклонами в атомных ядрах. Радиус действия сильного взаимодействия порядка  $10^{-15}$  м.
- 2. Электромагнитное взаимодействие** между заряженными частицами обеспечивает стабильность атомов, молекул и конденсированных сред. Его радиус действия считается бесконечно большим.
- 3. Слабое взаимодействие** играет важную роль в процессах превращения элементарных частиц. Радиус его действия порядка  $10^{-18}$  м.
- 4. Гравитационное взаимодействие**, связанное в общей теории относительности с геометрией пространства-времени, является универсальным и формирует все крупномасштабные объекты во Вселенной, а также отвечает за эволюцию Вселенной во времени.

**Интенсивности взаимодействий относятся как**

$$1:10^{-2}:10^{-14}:10^{-39},$$

где интенсивность сильного взаимодействия принята за 1.

# Предмет классической электродинамики.

Многие физические явления, наблюдаемые в природе и окружающей нас жизни, не могут быть объяснены только на основе законов механики, молекулярно-кинетической теории и термодинамики. В этих явлениях проявляются силы, действующие между телами на расстоянии, причем эти силы не зависят от масс взаимодействующих тел и, следовательно, не являются гравитационными. Эти силы называют **электромагнитными силами.**

О существовании электромагнитных сил знали еще древние греки. Но систематическое, количественное изучение физических явлений, в которых проявляется электромагнитное взаимодействие тел, началось только в конце XVIII века. Трудом многих ученых в XIX веке завершилось создание стройной науки, изучающей электрические и магнитные явления. Эта наука, которая является одним из важнейших разделов физики, получила название **электродинамики.**

Основными **объектами изучения** в электродинамике являются **электрические и магнитные поля, создаваемые электрическими зарядами и токами.**

***Электростатика – раздел,  
изучающий статические  
(неподвижные) заряды и  
связанные с ними электрические  
поля.***

**Перемещение зарядов либо  
отсутствует, либо происходит так  
медленно, что возникающие при  
движении зарядов магнитные поля  
ничтожны.**

# Электрический заряд

- **Понятие электрического заряда первично**, то есть не подлежит непосредственному определению. Он обозначается обычно  $Q$  или  $q$ .
- Опыт показывает, что в природе **существуют электрические заряды двух типов: положительные и отрицательные.**
- **Электрический заряд обладает релятивистской инвариантностью**, т.е. имеет одинаковую величину и знак во всех системах отсчёта и, следовательно, он не зависит от скорости движения носителя заряда.
- Выполняется **закон сохранения электрического заряда.**
- **Носителями заряда являются элементарные частицы.**

Несмотря на обилие различных веществ в природе, существуют только

два вида электрических зарядов:

заряды подобные тем, которые возникают на *стекле, потертом о шелк* –

*положительные*

заряды, подобные тем, которые появляются на *янтаре, потертом о мех* -

*отрицательные*

Назвал их так

Бенджамин Франклин в 1746 г.



## Бенджамин Франклин (1706 – 1790)

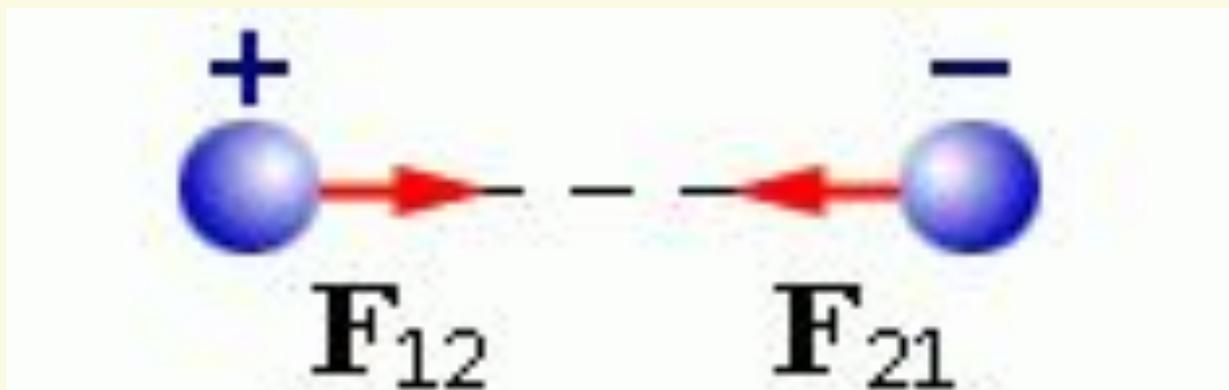
американский физик, политический и общественный деятель.

Основные работы в области электричества.

Объяснил действие Лейденской банки,

построил первый плоский конденсатор. Изобрел молниеотвод, доказал электрическую природу молнии и тождественность земного и атмосферного электричества. Разработал теорию электрических явлений – так называемую «унитарную теорию». Работы относятся также к теплопроводности тел, к распространению звука в воде и воздухе и т.п. Является автором ряда технических изобретений.

Известно, что *одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются.*



Если поднести заряженное тело (с любым зарядом) к легкому – незаряженному, то между ними будет притяжение – ***явление электризации*** легкого тела ***через влияние***.

На ближайшем к заряженному телу конце появляются заряды противоположного знака (индуцированные заряды) это явление называется ***электростатической индукцией***. Таким образом, всякий **процесс заряжения** есть **процесс разделения зарядов**. Сумма зарядов не изменяется, заряды только перераспределяются.

Отсюда следует **закон сохранения заряда** – один из фундаментальных законов природы, сформулированный в 1747 г. Б. Франклином и подтвержденный в 1843 г. М. Фарадеем:

***алгебраическая сумма зарядов, возникающих при любом электрическом процессе на всех телах, участвующих в процессе всегда равна нулю.***

**Закон сохранения заряда:**  
***суммарный электрический заряд замкнутой системы не изменяется.***

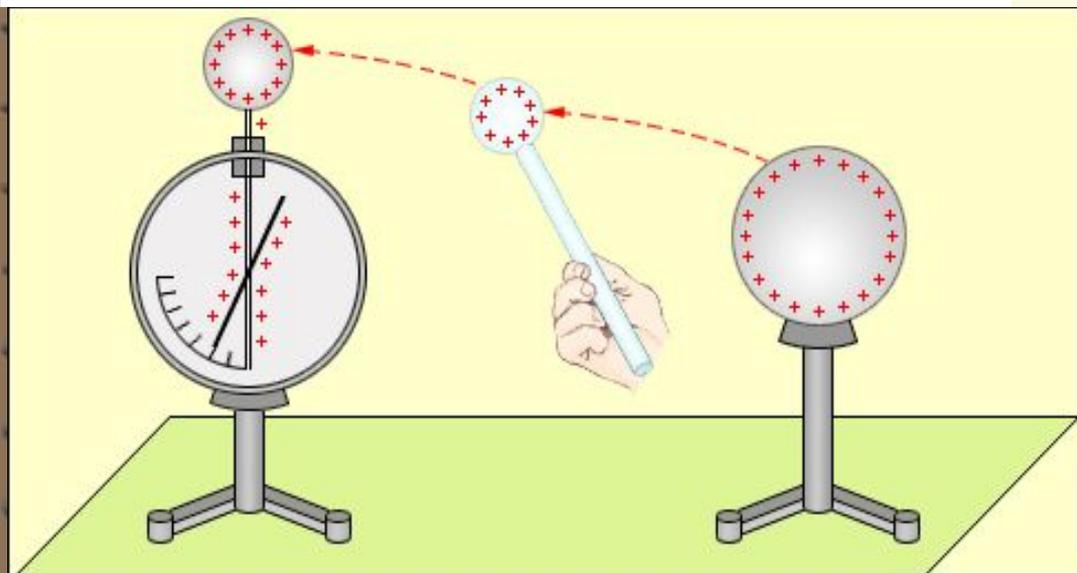
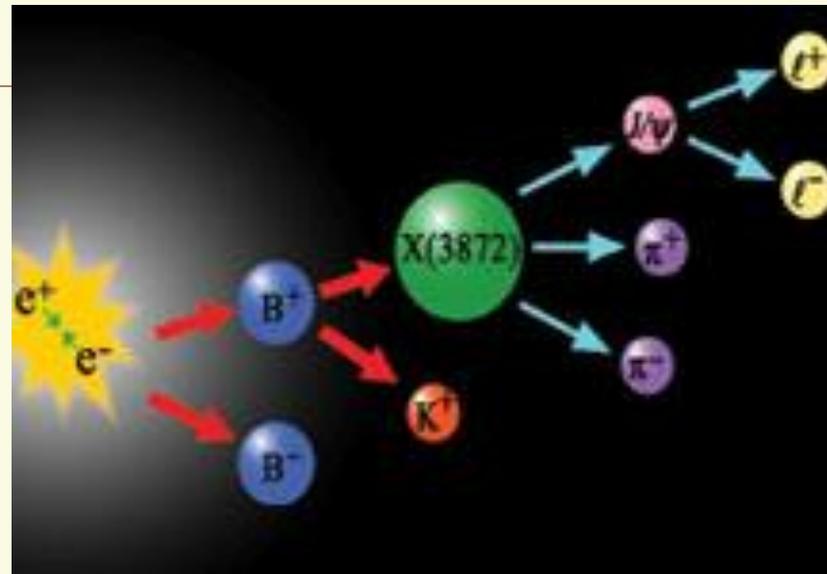
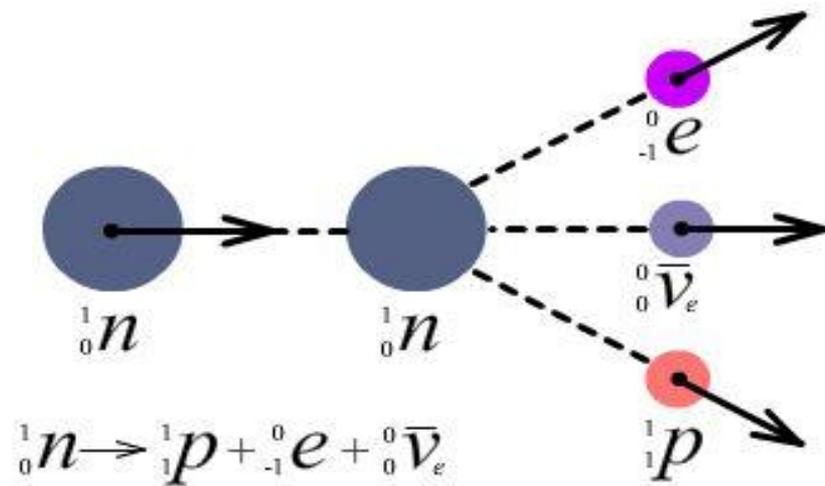
Одним из фундаментальных законов природы является экспериментально установленный закон *сохранения электрического заряда*.

**В изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается постоянной**

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

Закон сохранения электрического заряда утверждает, что в замкнутой системе тел не могут наблюдаться процессы рождения или исчезновения зарядов только одного знака.

# ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА



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

$q_1, q_2, \dots, q_n$  – заряды электрически  
изолированной системы

Электрические заряды не существуют сами по себе, а являются внутренними свойствами элементарных частиц – электронов, протонов и др.

---

Опытным путем в 1914 г. американский физик Р. Милликен показал что

*электрический заряд дискретен.*

Заряд  $q$  любого тела составляет целое кратное от *элементарного электрического заряда* :

$$q = \pm ne$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

где  $n$  – целое число.

*Электрон* и *протон* являются носителями элементарных отрицательного и положительного зарядов.

---

Например, наша Земля имеет отрицательный заряд

$$- 6 \cdot 10^5 \text{ Кл}$$

это установлено по измерению напряженности электростатического поля в атмосфере Земли.

Большой вклад в исследование явлений электростатики внес знаменитый французский ученый **Ш. Кулон**. В 1785 г. он экспериментально установил закон взаимодействия *неподвижных точечных* электрических зарядов.



## Кулон Шарль Огюстен

(1736 – 1806) – французский физик и военный инженер.

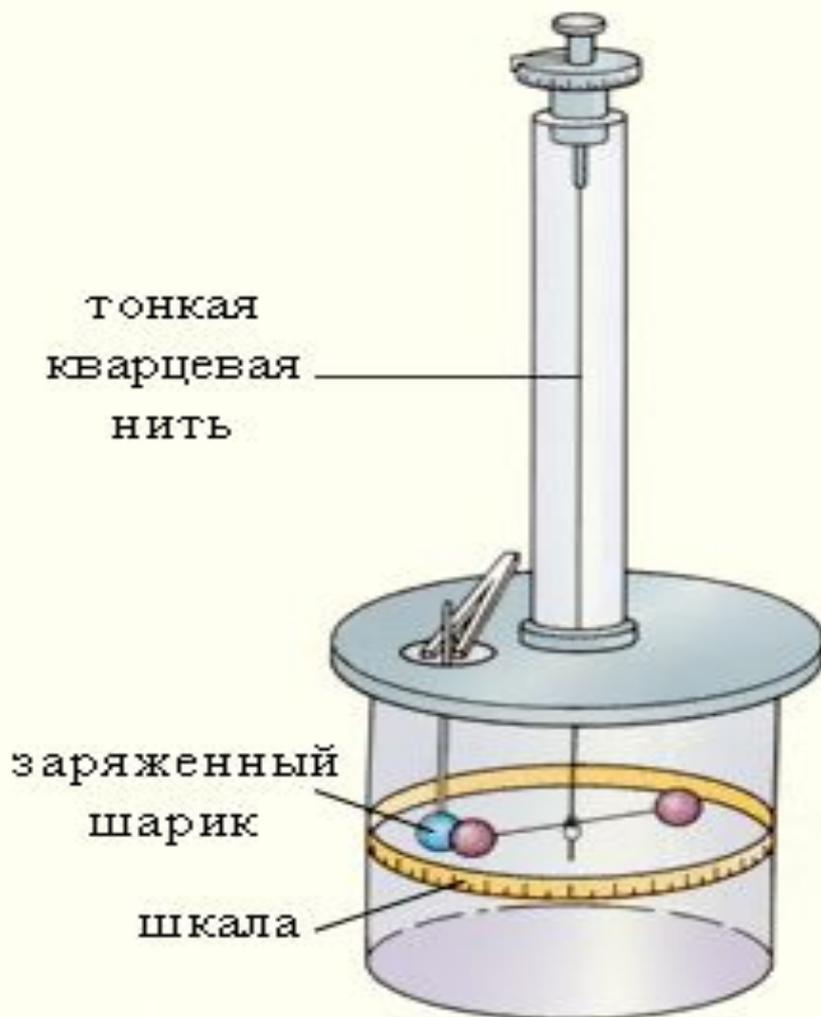
Работы относятся к электричеству, магнетизму, прикладной механике. Сформулировал законы трения, качения и скольжения. Установил законы упругого кручения. Исходя из этого в 1784 г. Кулон построил прибор для измерения силы – крутильные весы и с помощью их открыл основной закон электростатики – закон взаимодействия электрических зарядов на расстоянии, названный в последствии его именем.

# Взаимодействие точечных электрических зарядов в вакууме.

---

*Точечным зарядом ( $q$ ) называется заряженное тело, размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которым оно взаимодействует.*

Кулон открыл свой закон, измеряя силы притяжения и отталкивания заряженных шариков с помощью крутильных весов, изобретённых им же.



# Закон Кулона

*Два точечных неподвижных электрических заряда взаимодействуют с силой, прямо пропорциональной произведению величины этих зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Силы электрического взаимодействия направлены по линии, соединяющей заряды. Одноимённые заряды отталкиваются, разноимённые — притягиваются.*

$$F = k_0 \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

Здесь  $k_0$  — коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от выбора системы единиц.

В системе СИ единица заряда  $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$

---

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

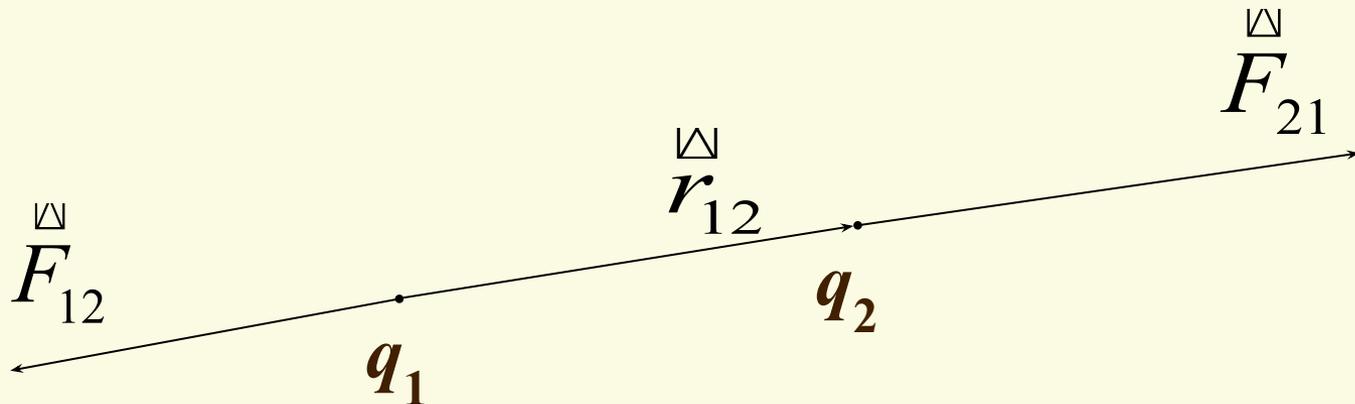
где  $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_0} = \frac{1}{4\pi 9 \cdot 10^9} = 8.85 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \right]$  —

электрическая постоянная;

$4\pi$  здесь выражают сферическую симметрию закона Кулона.

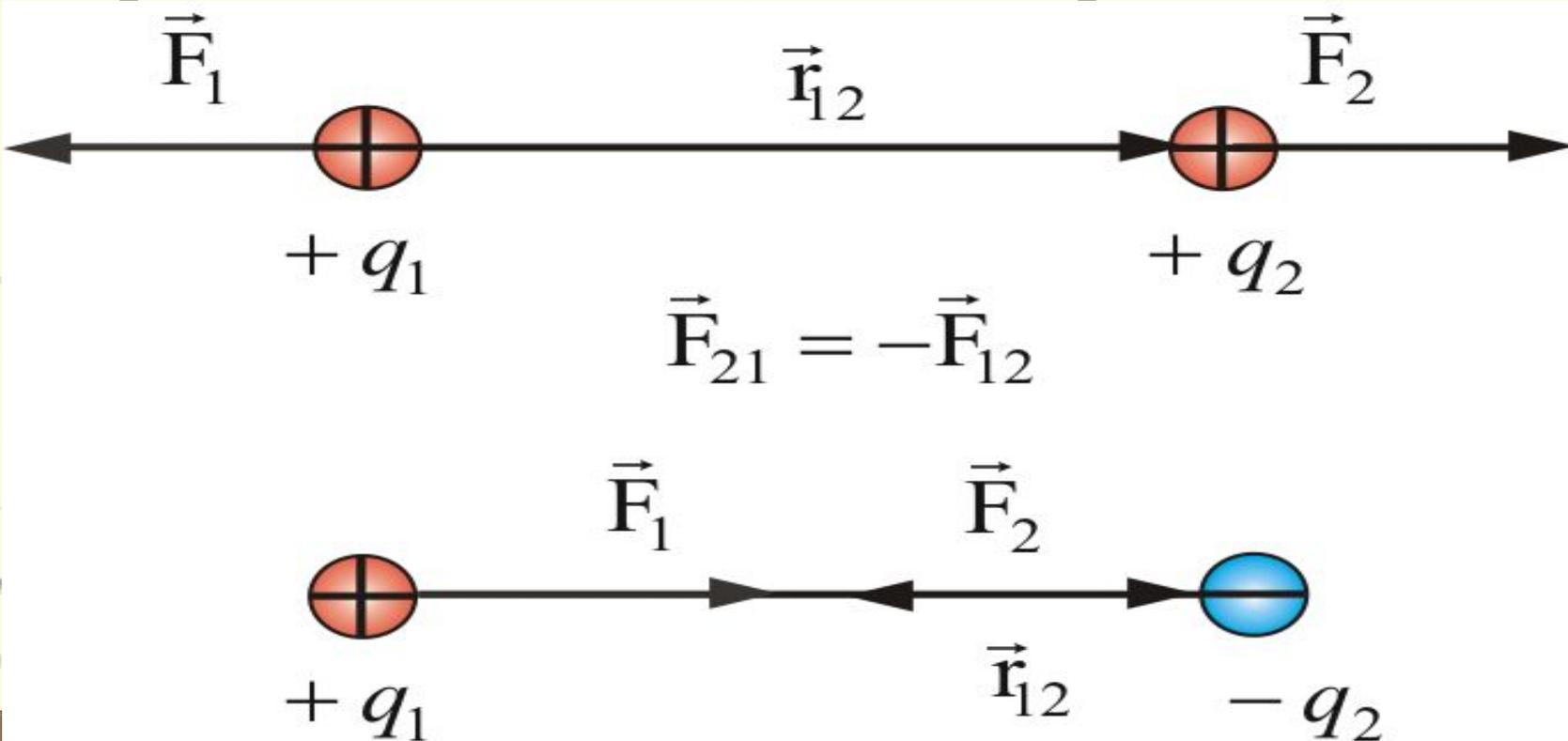
В векторной форме **закон Кулона** выглядит так:

$$\vec{F}_{12} = k_0 \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}} = -\vec{F}_{21}$$

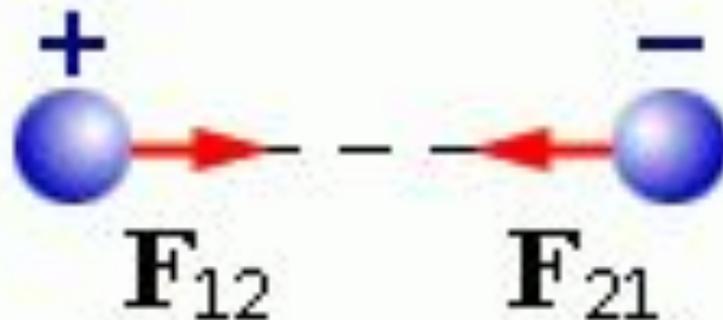


В электростатике взаимодействие зарядов подчиняется **третьему закону**

**Ньютона:** силы взаимодействия между зарядами равны по величине и направлены противоположно друг другу вдоль прямой, связывающей эти заряды



# Притяжение зарядов противоположных знаков.



# Отталкивание зарядов одинаковых знаков.



Если заряды не точечные, то в такой форме закон Кулона не годится – нужно интегрировать по объему.

---

Вся совокупность фактов говорит, что закон Кулона справедлив при

$$10^7 - 10^{-15} \text{ м}$$

Внутри ядра действуют уже другие законы, не кулоновские силы.

## *Теории близко - и дальнего действия для описания взаимодействия электрических зарядов.*

---

В **теории дальнего действия** заряды непосредственно взаимодействуют друг с другом на сколь угодно большие расстояния (без посредника). Её сторонниками были: Лаплас, Ампер, Гаусс, Пуассон.

Теорию действия на расстоянии не принимал Фарадей. Согласно идее Фарадея электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создаёт в окружающем пространстве электрическое поле, которое действует на другой заряд – это **теория ближнего действия**.

*В электростатике* **источником электрического поля считаются заряды.**

---

Понятие электрического поля было введено Майклом Фарадеем.

Все 4 фундаментальные физические взаимодействия осуществляются через посредничество соответствующих полей.

**Материальный носитель силового взаимодействия электрических зарядов, заполняющий непрерывным образом пространство, называется электрическим полем.**

# Напряжённость электрического поля

Силовая характеристика электрического поля - **вектор напряжённости электрического поля**  $\vec{E}$ .

Кулоновская сила, действующая на электрический заряд  $q$ , находящийся в точке с радиусом - вектором  $\vec{r}$ , будет:

$$\vec{F} = q\vec{E}(\vec{r}).$$

И электрическое поле характеризуется напряжённостью  $\vec{E}$  :

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

В международной системе единиц СИ размерность напряжённости электрического поля Н/Кл или В/м.

Из закона Кулона можно написать выражение для **вектора напряжённости электрического поля точечного заряда  $q$**  в вакууме:

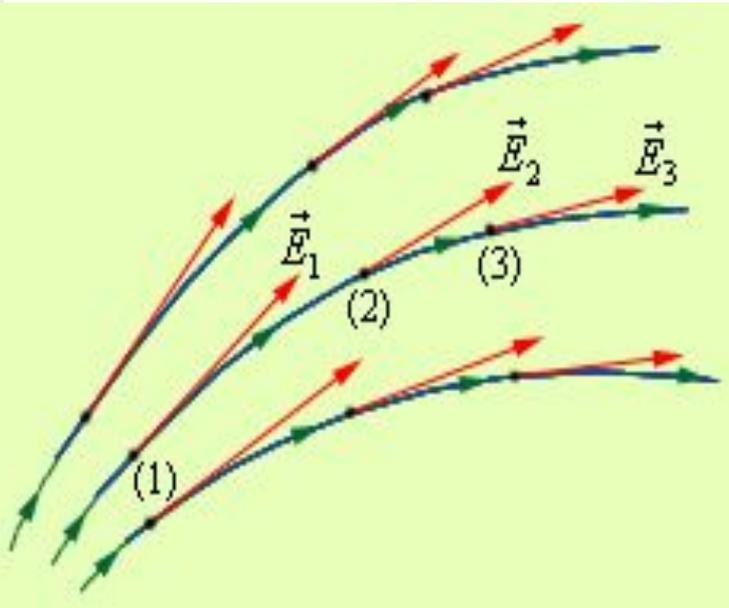
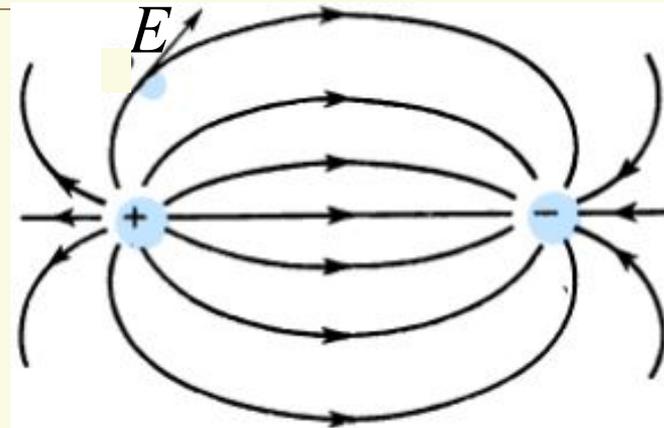
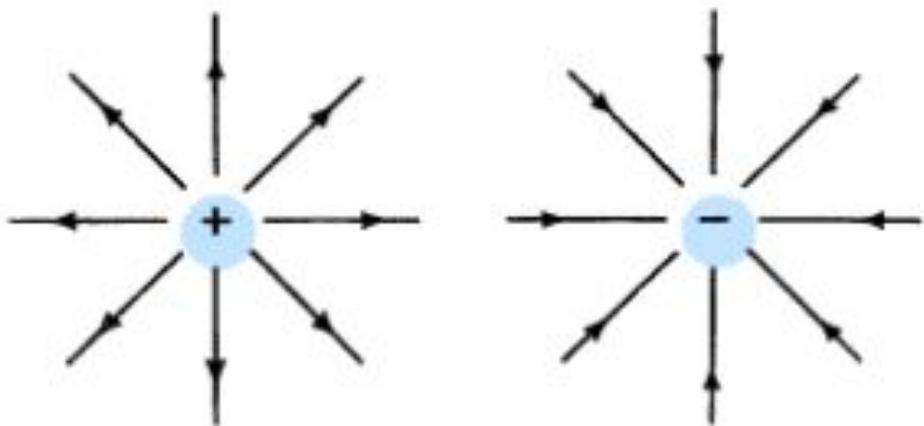
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r},$$

где  $\vec{r}$  - радиус – вектор, проведённый к точке наблюдения из точечного заряда  $q$ , создающего поле.

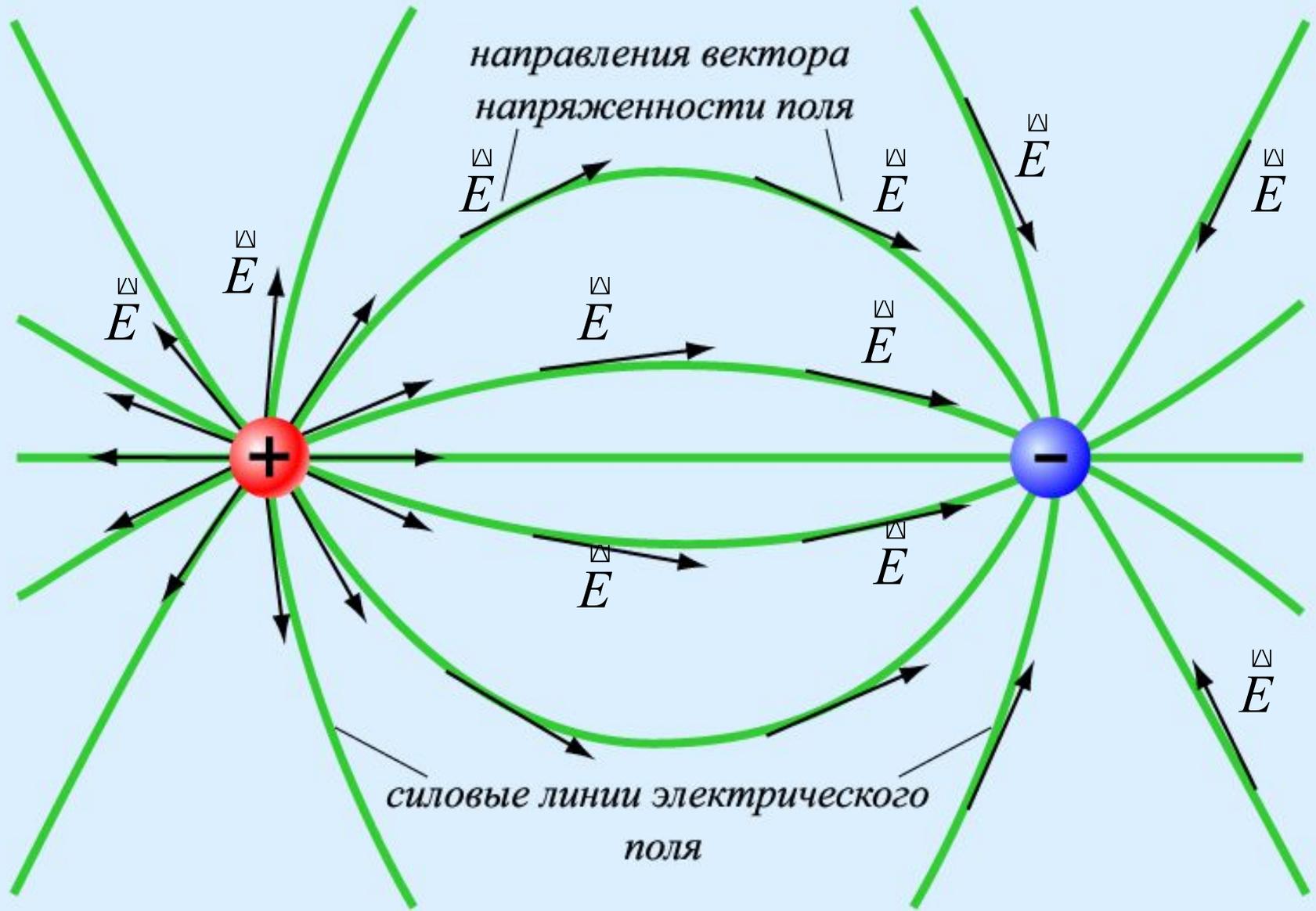
Для наглядного представления распределения в пространстве векторов напряжённости электрического поля используются **силовые линии поля.**

# Силловые линии поля

Силловые линии это воображаемые кривые, которые начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных.



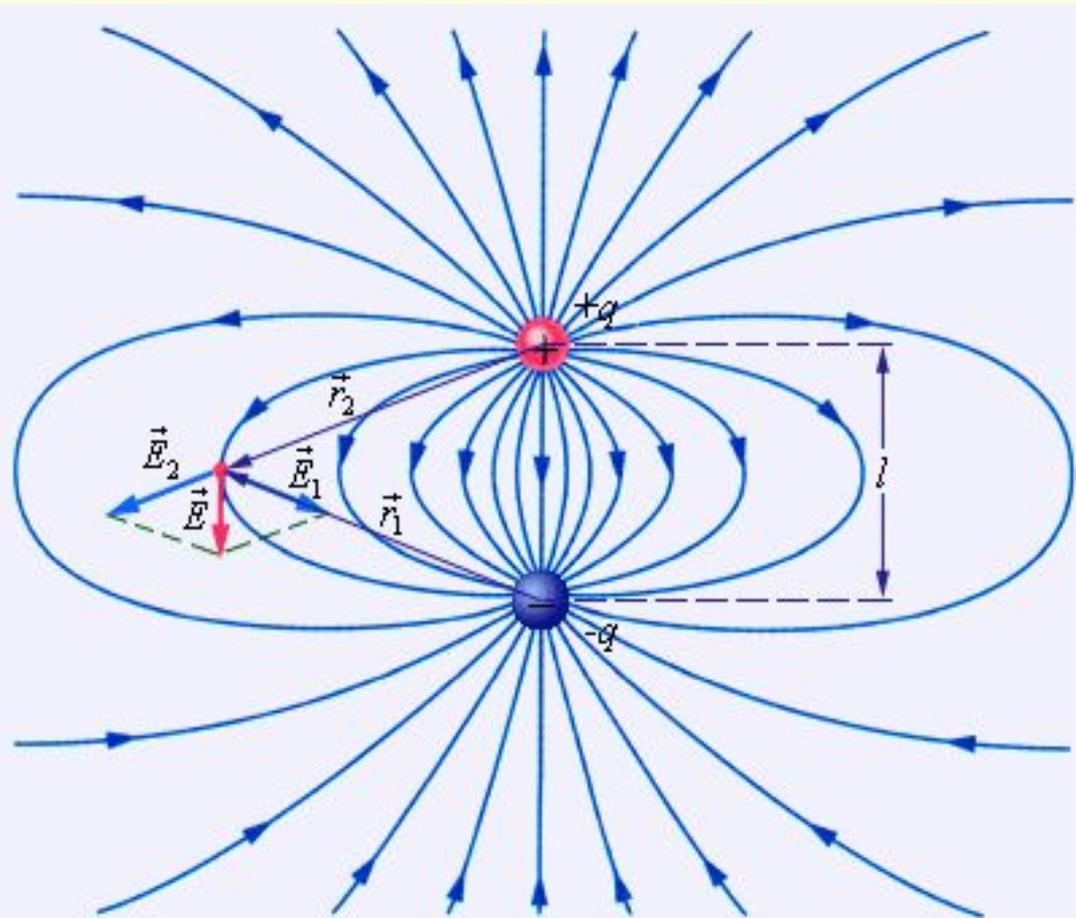
Для любой точки пространства вектор  $\vec{E}$  лежит на касательной к силовой линии, проходящей через данную точку. Густота силовых линий, т.е. число силовых линий, пересекающих единичную площадку, ориентированную перпендикулярно силовым линиям, пропорциональна величине напряжённости поля  $\vec{E}$ .



*направления вектора  
напряженности поля*

*силовые линии электрического  
поля*

Картина **силовых линий** поля электрического **диполя** – системы из двух одинаковых по модулю зарядов разного знака  $q$  и  $-q$ , расположенных на некотором расстоянии  $l$ .



**Если электрическое поле создано системой зарядов, занимающих фиксированные положения в пространстве, то как определить вектор напряжённости электрического поля, созданного всей системой зарядов?**

**Ответ : используя принцип суперпозиции электрических полей.**

# Принцип суперпозиции

Согласно опыту в электрическом поле выполняется **принцип суперпозиции: вектор напряжённости электрического поля есть векторная сумма напряжённостей полей всех зарядов системы**

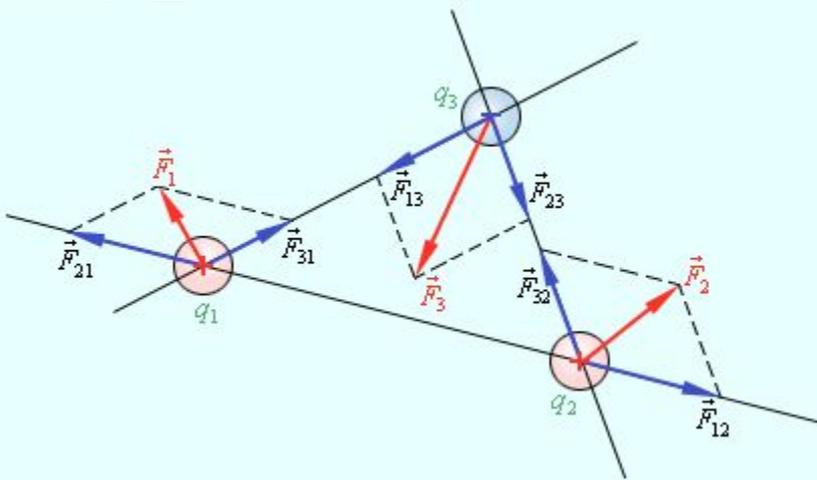
$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i(q_i)$$

Каждый  $i$ -й заряд (где  $i = 1, 2, \dots, n$ ) при отсутствии других зарядов создаёт электрическое поле  $\vec{E}_i$

Принцип суперпозиции применяется для вычисления вектора напряжённости электрического поля системы, состоящей из многих электрических зарядов.

**Принцип суперпозиции для напряженности электрического поля** является простым следствием механического принципа определения равнодействующей нескольких сил. С силой  $F$  будет совпадать по величине и направлению вектор напряженности суммарного поля  $E$ .

Если поле создается несколькими точечными зарядами, то на пробный заряд  $q$  действует со стороны заряда  $q_n$  такая сила, как если бы других зарядов не было.



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

$\vec{E}$  – вектор напряженности результирующего электрического поля

$\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$  – векторы напряженностей всех электрических полей

Если поле создается *не точечными зарядами*, то используют обычный в таких случаях прием. Тело разбивают на бесконечно малые элементы и определяют напряженность поля создаваемого каждым элементом, затем интегрируют по всему телу:

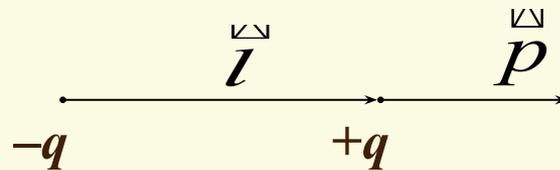
$$\vec{E} = \int d\vec{E},$$

где  $d\vec{E}$  – напряженность поля, обусловленная заряженным элементом. Интеграл может быть линейным, по площади или по объему в зависимости от формы тела.

Очень важным является случай простейшей системы из двух одинаковых по величине, но противоположных по знаку зарядов, которые находятся в вакууме друг от друга на малом по сравнению с характерным для данной задачи расстоянием  $l$ . Это случай так называемого элементарного электрического диполя.

Основной характеристикой **электрического диполя** является так называемый дипольный момент  $\vec{p}$

$$\vec{p} = ql$$

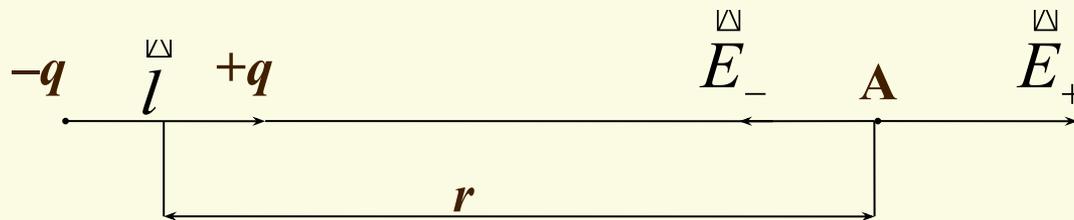


$\vec{p}$  – вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному, модуль

Воспользовавшись принципом суперпозиции электрических полей, вычислим поле на оси диполя в точке  $A$ , отстоящей от центра диполя на расстоянии  $r \gg l$

Электрическое поле в рассматриваемой точке возникает как результат сложения двух полей, созданных точечными зарядами  $+q$  и  $-q$ .

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



Спроецируем это уравнение на ось диполя и получим для напряжённости поля точечного диполя:

$$E_A = E_+ - E_- = \frac{k_0 q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{k_0 q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} = k_0 q \left( \frac{2rl}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2 \times \left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \right)$$

Учитывая, что  $\frac{l}{2} \ll r$ , окончательный результат запишем так:

$$E_A = \frac{2k_0ql}{r^3} = \frac{2p}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

Здесь важно отметить три момента:

- Напряжённость поля  $E_A$  на оси диполя пропорциональна его электрическому моменту  $p$ .
- Поле диполя убывает с расстоянием  $r$  быстрее, чем поле точечного заряда — обратно пропорционально кубу расстояния.
- Напряжённость поля на оси диполя  $E_A$  совпадает по направлению с направлением дипольного момента  $p$ .



**ЛЕКЦІЯ ЗАКОНЧЕНА!**