

# Раздел – ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ФИЗИКА – НАУКА О ПРИРОДЕ.  
СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА – НАУКА,  
ИЗУЧАЮЩАЯ ОБЩИЕ СВОЙСТВА  
МАТЕРИИ – ВЕЩЕСТВА И ПОЛЯ.

**Первый шаг** при выбранной концепции построения курса физики – *Механика* рассматривала физические модели: материальная точка и абсолютно твердое тело, не вникая во внутреннюю структуру.

**Следующий шаг** в познании свойств материи – *Статистическая физика* устанавливает из каких частей (атомов и молекул) состоит тело, и как эти части взаимодействуют между собой.

Поскольку атомы построены из электрически заряженных частиц (электронов и ядер), то следующий шаг в познании строения вещества – исследование электромагнитных взаимодействий.

## Электричество

- Электростатика
- Постоянный ток
- Электромагнетизм

*Исторический очерк.* Электрические явления были известны в глубокой древности.

1) Порядка 500 лет до нашей эры Фалес Милетский обнаружил, что потертый шерстью янтарь притягивает легкие пушинки. Его дочь пыталась почистить шерстью янтарное веретено и обнаружила этот эффект.

От слова «электрон», означающий по-гречески «янтарь» и произошел термин «электричество». Термин ввел английский врач Гильберт в XVI веке. Он обнаружил, что еще ряд веществ электризуется.

2) При раскопках древнего Вавилона (4000 лет назад) обнаружены сосуды из глины, содержащие железный и медный стержни. На дне битум – изолирующий материал. Стержни разъедены лимонной или уксусной кислотой, то есть находка напоминает гальванический элемент.

3) Золотое покрытие вавилонских украшений можно объяснить только гальваническим способом их нанесения.

**Электростатика** – раздел физики, изучающий взаимодействие и свойства систем электрических зарядов неподвижных относительно выбранной инерциальной системы отсчета.

- **Электрический заряд** – мера электрических свойств тел или их составных частей.

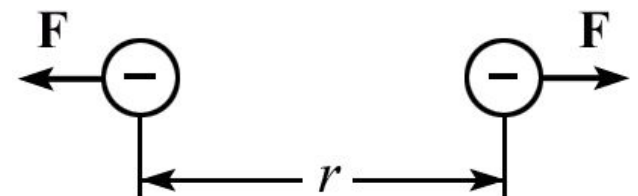
Термин ввел Б.Франклин в 1749 г. Он же – «батарея», «конденсатор», «проводник», «заряд», «разряд», «обмотка».

# Свойства электрических зарядов

1) В природе существуют **2 рода электрических зарядов:**

- положительные (стекло  $\updownarrow$  кожа),
- отрицательные (янтарь  $\updownarrow$  шерсть).

● Между одноименными электрическими зарядами действуют силы отталкивания, а между разноименными – силы притяжения.



- Выбор наименований зарядов исторически случаен. Безусловный смысл имеет только различие знаков заряда. Законы не изменились бы, если бы положительные заряды переименовали в отрицательные и наоборот: законы взаимодействия зарядов симметричны к замене  $+q$  на  $-q$ .

Фундаментальное свойство – наличие зарядов в двух видах – то, что заряды одного знака отталкиваются, а противоположного – притягиваются. Причина этого современной теорией не объяснена. Существует мнение, что положительные и отрицательные заряды – это противоположное проявление одного качества.



## Свойства электрических зарядов

### 2) **Закон сохранения заряда** –

фундаментальный закон (экспериментально подтвержден Фарадеем в 1845 г.)

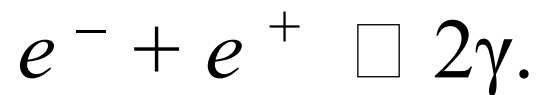
Полный электрический заряд изолированной системы есть величина постоянная.

Полный электрический заряд – сумма положительных и отрицательных зарядов, составляющих систему.

Под изолированной в электрическом поле системой понимают систему, через границы которой не может пройти никакое вещество, кроме света.

В соответствии с законом сохранения заряда разноименные заряды рождаются и исчезают попарно: сколько родилось (исчезло) положительных зарядов, столько родилось (исчезло) отрицательных зарядов. Два элементарных заряда противоположных знаков в соответствии с законом сохранения заряда всегда рождаются и исчезают одновременно.

Пример: электрон и позитрон, встречаясь друг с другом, аннигилируют, рождая два или более гамма-фотонов.



Свет может входить и выходить из системы, не нарушая закона сохранения заряда, так как фотон не имеет заряда; при фотоэффекте возникают равные по величине положительные и отрицательные заряды, а фотон исчезает.

И наоборот, гамма-фотон, попадая в поле атомного ядра, превращается в пару частиц – электрон и позитрон.

$$\gamma \rightarrow e^{-} + e^{+}.$$

## Свойства электрических зарядов

- 3) Электрический заряд – **инвариант**, его величина не зависит от выбора системы отсчета.
- 4) Электрический заряд – **величина релятивистки инвариантная**, не зависит от того движется заряд или покоится.
- 5) **Квантование заряда**, электрический заряд дискретен, его величина изменяется скачком.
- Опыт Милликена (1910 – 1914 г.)

$q = \pm n \cdot e$ , где  $n$  – целое число. Заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл (Кулон).}$$

Суммарный заряд элементарных частиц, если частица им обладает, равен элементарному заряду.

- Наименьшая частица, обладающая отрицательным элементарным электрическим зарядом, – электрон,  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг,
- Наименьшая частица, обладающая положительным элементарным электрическим зарядом, – позитрон,  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг. Таким же зарядом обладает протон, входящий в состав ядра.

Равенство зарядов электрона и протона справедливо с точностью до одной части на  $10^{20}$ . То есть фантастическая степень точности. Причина неясна.

*Более точно:* установлено, что элементарные частицы представляют собой комбинацию частиц с дробным зарядом – кварков, имеющих заряды

$$\pm \frac{1}{3}e \quad \pm \frac{2}{3}e$$

В свободном состоянии кварки не обнаружены.

## Свойства электрических зарядов

- 6) Различные тела в классической физике в зависимости от концентрации свободных зарядов делятся на
- проводники (электрические заряды могут перемещаться по всему их объему),
  - диэлектрики (практически отсутствуют свободные электрические заряды, содержит только связанные заряды, входящие в состав атомов и молекул),
  - полупроводники (по электропроводящим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками).

## Свойства электрических зарядов

Проводники делятся на две группы:

- 1) **проводники первого рода** (металлы), в которых перенос зарядов (свободных электронов) не сопровождается химическими превращениями,
- 2) **проводники второго рода** (растворы солей, кислот), перенос зарядов (+ и – ионов) в них сопровождается химическими изменениями.



## Свойства электрических зарядов

7) Единица электрического заряда в СИ [1 Кл] – электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за время 1 с.

$$q = I \cdot t.$$

# Закон Кулона –

## основной закон электростатики

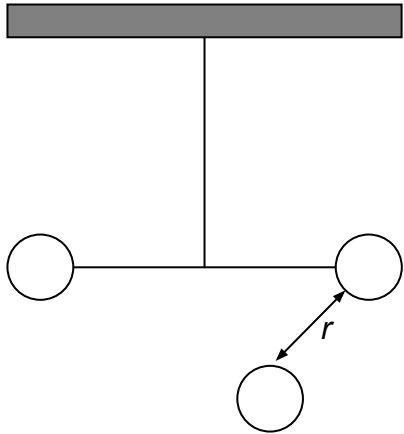
Описывает взаимодействие точечных зарядов.

- ***Точечный заряд*** сосредоточен на теле, линейные размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел.

Точечный заряд, как физическая модель, играет в электростатике ту же роль, что и материальная точка и абсолютно твердое тело в механике, идеальный газ в молекулярной физике, равновесные процессы и состояния в термодинамике.

Закон впервые был открыт в 1772 г. Кавендишем.

## Закон Кулона



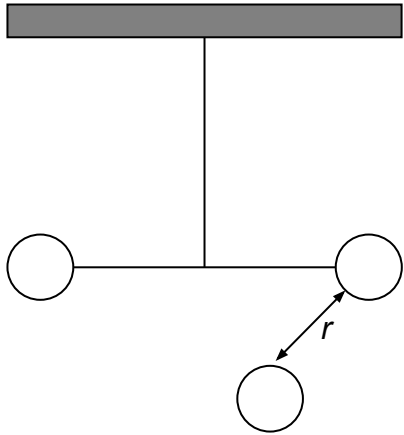
В 1785 г. Шарль Огюстен Кулон экспериментальным путем с помощью крутильных весов определил:

сила взаимодействия  $F$  двух неподвижных точечных зарядов пропорциональна величине каждого из зарядов  $q_1$ ,  $q_2$  и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними

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

$k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбранной системы единиц.

## Закон Кулона



*В опытах определялся вращающий момент:*

$$M = \gamma\varphi = Fr.$$

*Сам Кавендиш, работы которого остались неизвестными, еще в 1770 г. получил «закон Кулона» с большей точностью.*

## Закон Кулона

Сила  $\vec{F}$  направлена по прямой, соединяющей взаимодействующие заряды.

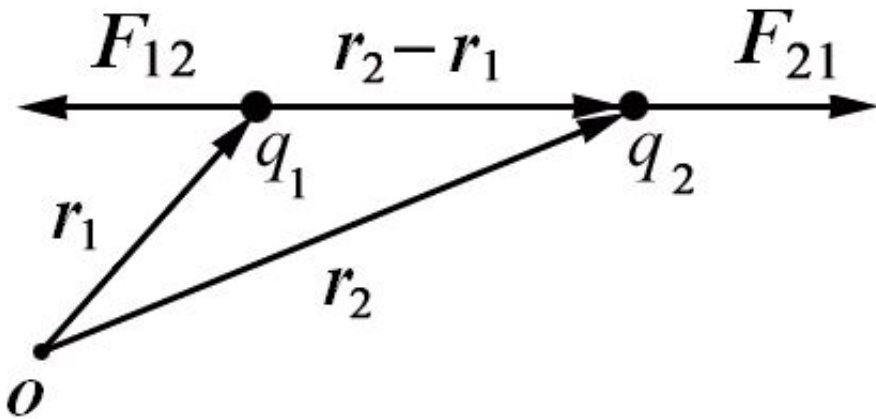
Кулоновская сила является ***центральной силой***.

## Закон Кулона в векторном виде

Сила – величина векторная.

Поэтому запишем закон Кулона в векторном виде.

1) Для произвольно выбранного начала отсчета.

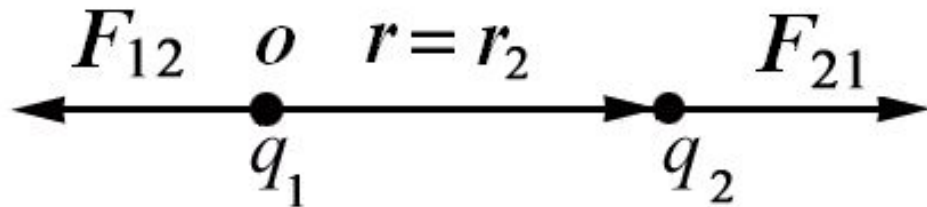


$$\vec{F}_{21} = k \frac{|q_1||q_2|}{(|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|)^3} (\vec{r}_2 - \vec{r}_1),$$

$$\frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|} = 1$$

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

## Закон Кулона в векторном виде



2) Начало отсчета совпадает с одним из зарядов.

$$\vec{F}_{21} = k \frac{|q_1||q_2|}{r^3} \vec{r}$$

## Закон Кулона

- Закон Кулона выполняется при расстояниях  $10^{-15} \text{ м} < r < 4 \cdot 10^4 \text{ км}$ .

- В системе СИ:  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \equiv 9 \cdot 10^9 \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \right]$   
[ м / Ф ].<sup>0</sup>

- В системе СГС:  $k = 1$ .

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \right] [\text{Ф} / \text{м}]$  –  
электрическая постоянная.



# Электрическое поле.

## Напряженность электрического поля

- *Поле – форма материи, обуславливающая взаимодействие частиц вещества.*
- *Электрическое поле – особая форма существования материи, посредством которого взаимодействуют электрические заряды.*
- **Электростатическое поле** - поле, посредством которого осуществляется кулоновское взаимодействие неподвижных электрических зарядов.

Является частным случаем электромагнитного поля.

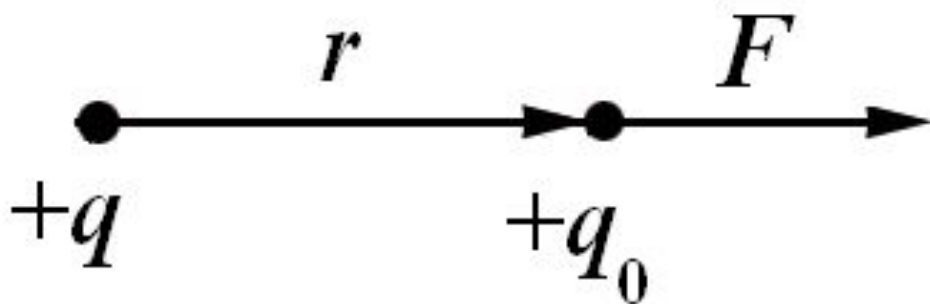
# *Пробный точечный положительный заряд $q_0$*

используют для обнаружения и исследования электростатического поля.

$q_0$  не вызывает заметного перераспределения зарядов на телах, создающих поле.

Силовая характеристика электростатического поля определяет, с какой силой поле действует на единичный положительный точечный заряд  $q_0$ . Такой характеристикой является ***напряженность электростатического поля.***

**Напряженность электрического поля – физическая величина, определяемая силой, действующей на пробный точечный положительный заряд  $q_0$ , помещенный в эту точку поля.**



$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{0+}}$$

$q$  – источник поля.

$q_{0+}$  – пробный заряд.

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k}$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{0+}}.$$

Напряженность электростатического поля в данной точке численно равна силе, действующей на единичный положительный точечный заряд, помещенный в данную точку поля.

Зная напряженность поля в какой-либо точке пространства, можно найти силу, действующую на заряд , помещенный в эту точку:

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

Это другой вид закона Кулона, который и вводит понятие электрического поля, создающегося зарядами во всем окружающем пространстве, а также представляет закон действия данного поля на любой заряд.

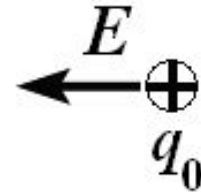
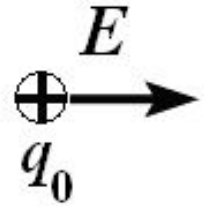
# Напряженность поля точечного заряда в вакууме.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_{0+}}{r^2} \quad E = \frac{F}{q_{0+}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

$q$  – источник поля,

$q_{0+}$  – пробный заряд.

## Напряженность электрического поля



- $E$  совпадает с направлением силы  $F$ , действующей на пробный заряд  $q_{0+}$ .
- Поле создается положительным зарядом – вектор напряженности электрического поля  $E$  направлен от заряда.
- Поле создается отрицательным зарядом – вектор напряженности электрического поля  $E$  направлен к заряду.

## Напряженность электрического поля

- СИ:  $E$  измеряется в  $[1 \text{ Н /Кл} = 1 \text{ В/м}]$  – это напряженность такого поля, которое на точечный заряд 1 Кл действует с силой 1 Н.



# Принцип суперпозиции напряженности электрического поля

Опытно установлено, что взаимодействие двух зарядов не зависит от присутствия других зарядов.

В соответствии с принципом независимости действия сил: на пробный заряд, помещенный в некоторую точку, будет действовать сила  $\mathbf{F}$  со стороны всех зарядов  $q_i$ , равная векторной сумме сил  $\mathbf{F}_i$ , действующих на него со стороны каждого из зарядов.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i$$

## Принцип суперпозиции напряженности электрического поля

$$\left. \begin{aligned} F &= q_0 E \\ F_i &= q_0 E_i \end{aligned} \right\} \Rightarrow q_0 E = \sum_{i=1}^n q_0 E_i, \quad E = \sum_{i=1}^n E_i$$

Напряженность электростатического поля, создаваемого системой точечных зарядов в данной точке, равна геометрической сумме напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждым из зарядов в отдельности.

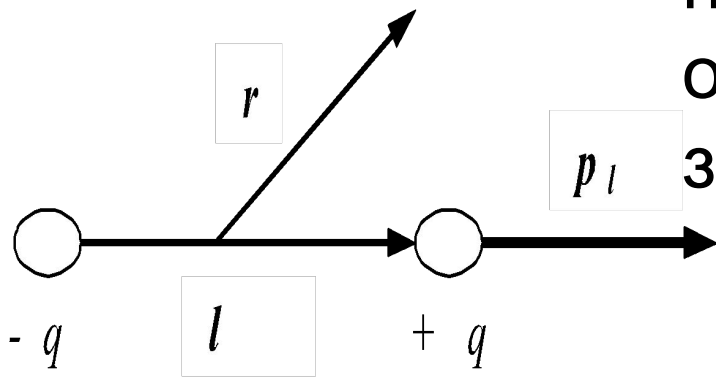
**Первый способ определения напряженности электрического поля  $E$  – с помощью закона Кулона и принципа суперпозиции.**

**Поле электрического диполя**

# Поле электрического диполя

- **Электрический диполь** - система двух одинаковых по величине разноименных точечных зарядов, расстояние  $l$  между которыми значительно меньше расстояния до тех точек, в которых определяется поле.
- **Ось диполя** прямая, проходящая через оба заряда.

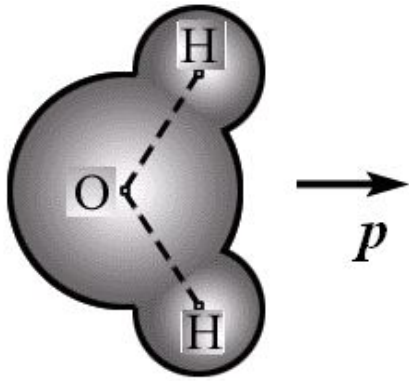
$l$  – плечо диполя – вектор, проведенный от отрицательного заряда к положительному.



Дипольный момент:

$$p_l = ql$$

## Поле электрического диполя

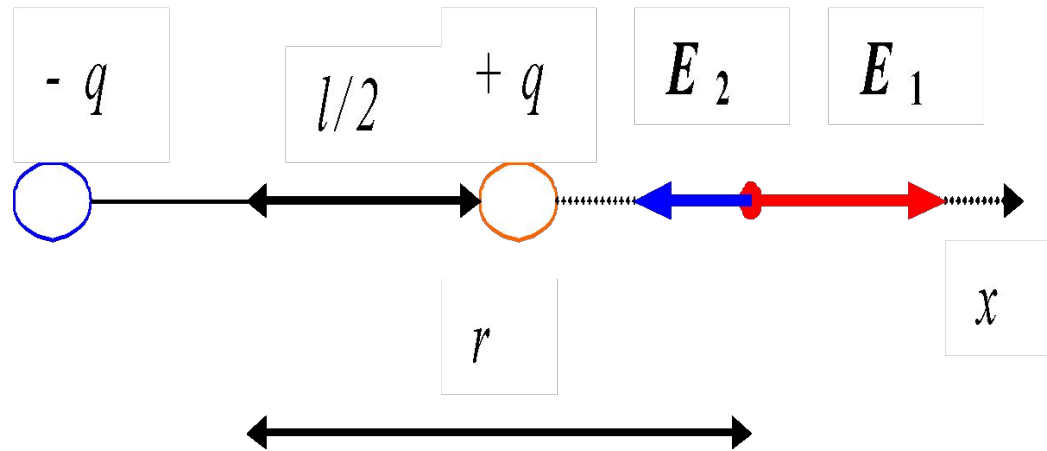


$r \gg l \rightarrow$  Диполь можно рассматривать как систему 2-х точечных зарядов.

Молекула воды  $\text{H}_2\text{O}$  обладает дипольным моментом  $p = 6,3 \cdot 10^{-30}$  Кл·м.

Вектор дипольного момента направлен от центра иона кислорода  $\text{O}^{2-}$  к середине прямой, соединяющей центры ионов водорода  $\text{H}^+$ .

## Напряженность поля в точке, расположенной на оси диполя.



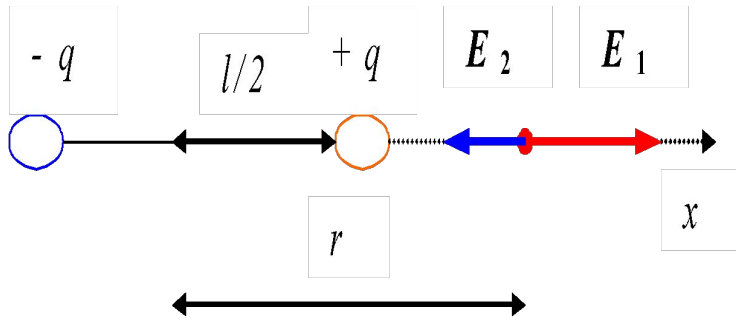
$E_1$  – напряженность поля положительного заряда.

$E_2$  – напряженность поля отрицательного заряда.

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

В проекциях на ось  $x$ :  $E = E_1 - E_2$

# Напряженность поля в точке, расположенной на оси диполя.



$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2 - \left(r - \frac{l}{2}\right)^2}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2 \cdot \left(r + \frac{l}{2}\right)^2} =$$

$r \gg l \Rightarrow \left(r - \frac{l}{2}\right) \approx r, \quad \left(r + \frac{l}{2}\right) \approx r.$

$$= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{2rl}{r^4} = \frac{2ql}{4\pi\epsilon_0 r^3}.$$

$$E = \frac{2p_l}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

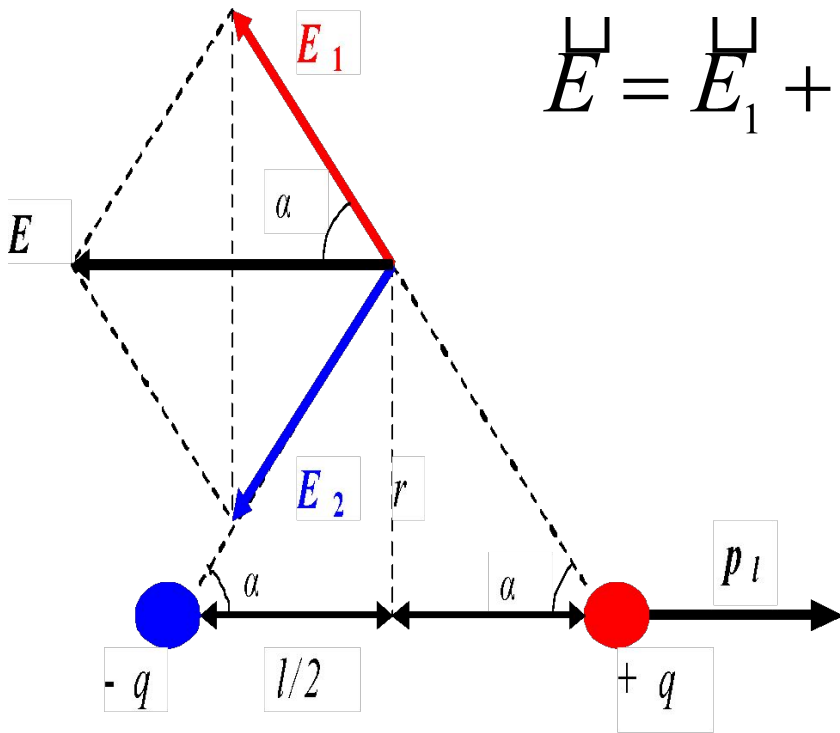
Напряженность поля в точке, расположенной на оси  
диполя.

$$E = \frac{2p_l}{4\pi\epsilon_0 r^3}.$$

Поле диполя убывает быстрее в  
зависимости от расстояния по  
сравнению с полем точечного заряда.



Напряженность поля диполя в точке, лежащей на перпендикуляре, восстановленном к его середине



$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (1) \quad E \uparrow \downarrow p_l \quad (2)$$

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)} \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)} \quad (4)$$

$$E = E_1 \cos \alpha + E_2 \cos \alpha = 2E_1 \cos \alpha \quad (5)$$

$$\cos \alpha = \frac{\frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}}, \quad (6)$$

# Напряженность поля диполя в точке, лежащей на перпендикуляре, восстановленном к его середине

Уравнения (3),(4), (6)→(5):

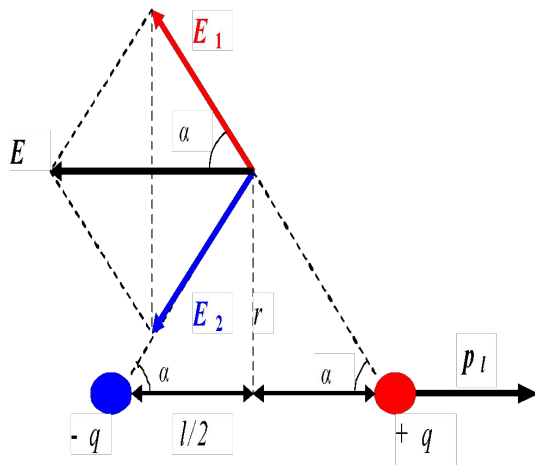
$$E = 2 \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)} \cdot \frac{l}{2\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}} = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

$$r \gg l \Rightarrow \frac{l^2}{4} \approx 0$$

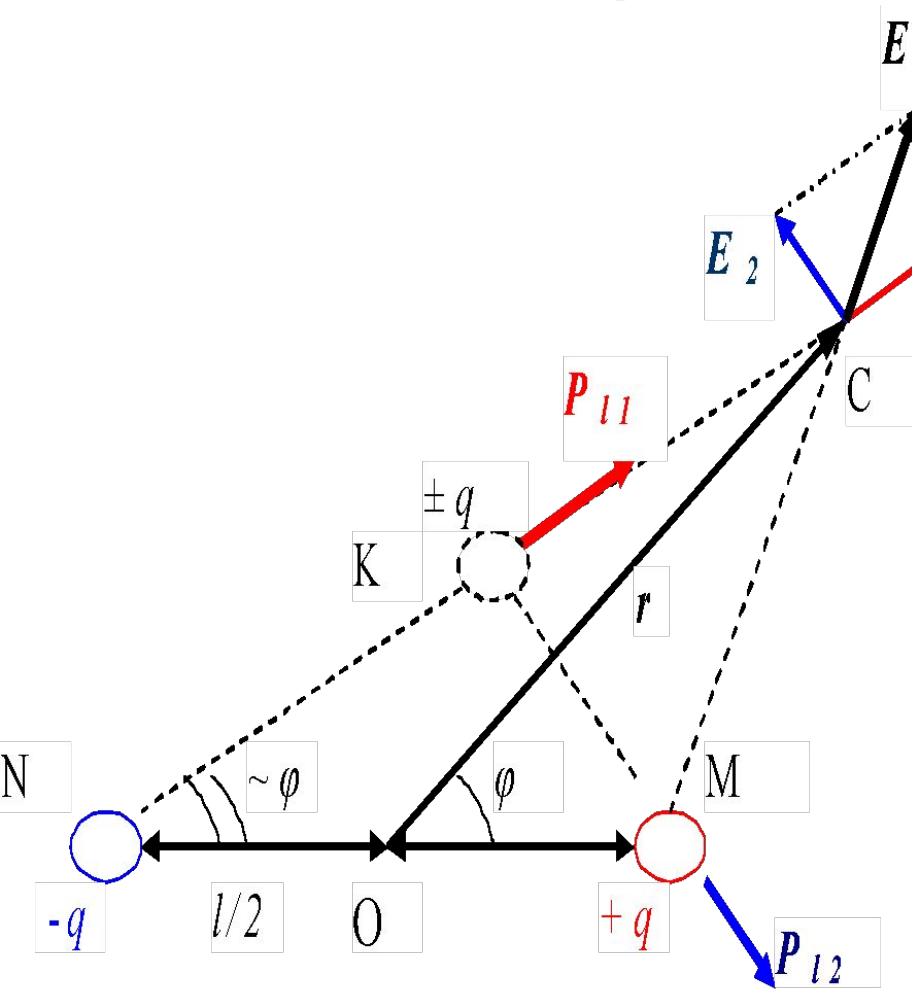
$$E \uparrow \downarrow p_l$$

$$p_l = ql$$

$$E = -\frac{p_l}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

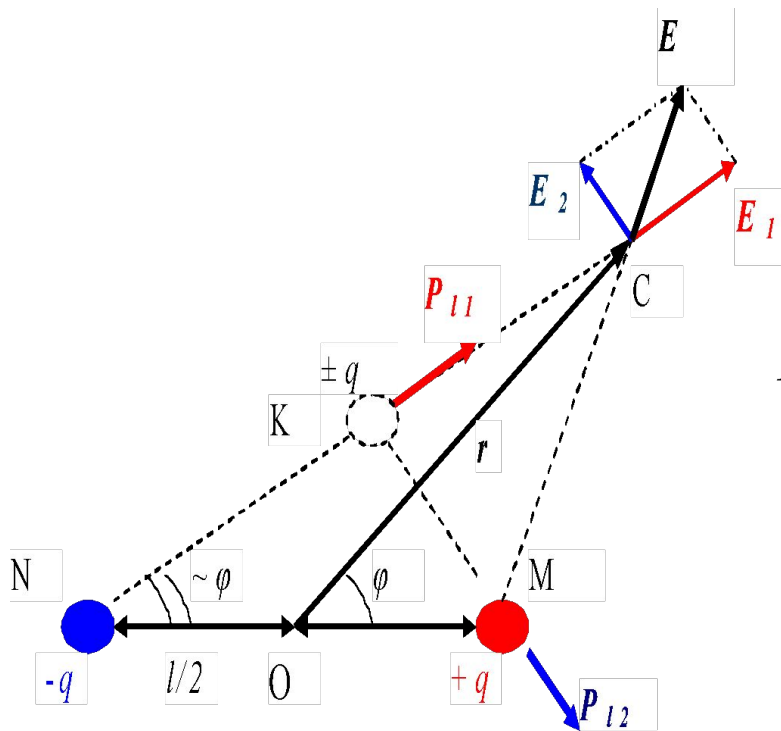


# Напряженность поля диполя в произвольной точке С, лежащей на расстоянии $r$ от середины диполя О.



Из точки  $M$  опускаем перпендикуляр на прямую  $NC$ , получаем точку  $K$ , в которую помещаем два точечных заряда  $+q$  и  $-q$ . Эти заряды нейтрализуют друг друга и не искажают поле диполя. Имеем 4 заряда, расположенных в точках  $M$ ,  $N$ ,  $K$ , которые можно рассматривать как два диполя:  $NK$  и  $MK$ .

# Напряженность поля диполя в произвольной точке С, лежащей на расстоянии $r$ от середины диполя О.



$l \ll r \rightarrow$  Угол  $\angle CNM \approx \varphi \rightarrow$

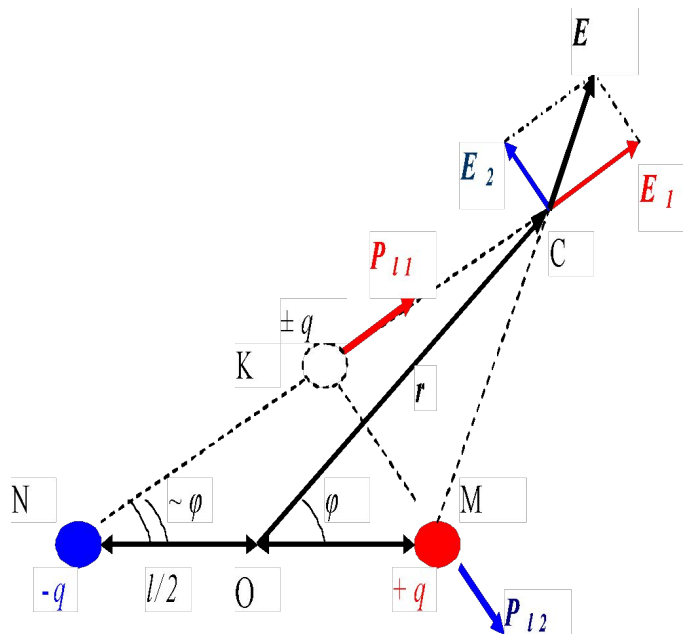
- Электрический момент диполя  $NK$ :

$$p_{11} = q|NK| = ql \cos \varphi = p_l \cos \varphi (1)$$

- Электрический момент диполя  $MK$ :

$$p_{12} = q|KM| = ql \sin \varphi = p_l \sin \varphi (2)$$

$$\underline{\underline{p_{11}}} \perp \underline{\underline{p_{12}}}$$



Для диполя НК точка С  
лежит на его оси

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2p_{l1}}{r^3} \quad (3)$$

Для диполя МК точка С  
лежит на перпендикуляре

$$E_2 = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{p_{l2}}{r^3} \quad (4)$$

$$p_{l1} \perp p_{l2} \Rightarrow E_1 \perp E_2 \Rightarrow$$

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^3} \cdot \sqrt{(2p_{l1})^2 + p_{l2}^2}$$

Уравнения (1), (2)  $\rightarrow$  (5):

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^3} \cdot \sqrt{4p_l^2 \cos^2 \varphi + p_l^2 \sin^2 \varphi} = \\ &= \frac{p_l}{4\pi\epsilon_0 r^3} \cdot \sqrt{4 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} = \\ &= \frac{p_l}{4\pi\epsilon_0 r^3} \cdot \sqrt{3 \cos^2 \varphi + 1} \end{aligned}$$

В предельных случаях:

а) если ,  $\varphi = 0^\circ$  есть точка лежит на оси диполя, то получим

$$E = \frac{2p_l}{4\pi\epsilon_0 r^3}.$$

б) если ,  $\varphi = 90^\circ$  есть точка лежит на перпендикуляре к оси диполя, то получим

$$E = \frac{p_l}{4\pi\epsilon_0 r^3}.$$

# Линейная, поверхностная и объемная плотности зарядов

Хотя электрический заряд дискретен, число его носителей в макроскопических телах столь велико, что можно ввести понятие плотности заряда, используя представление о непрерывном «размазанном» распределении заряда в пространстве.



- **Линейная**

плотность заряда:

заряд, приходящийся на единицу длины.

$$\tau = \frac{dq}{dl}, \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{м}} \right]$$

- **Поверхностная**

плотность заряда:

заряд, приходящийся на единицу площади.

$$\sigma = \frac{dq}{dS}, \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \right]$$

- **Объемная**

плотность заряда:

заряд, приходящийся на единицу объема.

$$\rho = \frac{dq}{dV}, \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3} \right]$$

# Линейная, поверхностная и объемная плотности зарядов

Поле

$$\left. \begin{aligned} dq &= \tau \cdot dl \\ dq &= \sigma \cdot dS \\ dq &= \rho \cdot dV \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} dE &= k \frac{\tau \cdot dl}{r^2} \\ dE &= k \frac{\sigma \cdot dS}{r^2} \\ dE &= k \frac{\rho \cdot dV}{r^2} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} E &= \int_l k \frac{\tau \cdot dl}{r^2} \\ E &= \int_S k \frac{\sigma \cdot dS}{r^2} \\ E &= \int_V k \frac{\rho \cdot dV}{r^2} \end{aligned}$$