

Лектор: Переверзев  
Валентин Григорьевич

## Электричество и магнетизм

- Учебник: Т.И. Трофимова  
Основы физики. Книга 3.  
Электродинамика. М.ВШ, 2007
- Задачник: Т.И. Трофимова  
Сборник задач по курсу физики  
М. «Оникс 21 век»  
«Мир и образование» 2005

# ***1. Электростатическое поле и его характеристики***

## **1.1. Электрический заряд и закон его сохранения.**

# Примеры обнаружения явления статического электричества и электростатического взаимодействия

- а. Возникновение притяжения при причесывании. Волосы прилипают к расческе.
- б. Возникновение «прилипания» двух кусков синтетической ткани
- в. Натирание стекла шелком.
- г. Натирание шестью эбонитового стержня.

- Было обнаружено, что часть заряженных тел притягивается, а часть отталкивается.
- Выбор знака заряда был произвольным. Бенджамин Франклин предложил различать заряженные тела как положительные и отрицательные.
- Заряд на стекле договорились считать положительным, а на эбоните отрицательным.
- В ходе экспериментов обнаружили, что тела, заряженные одноименным знаком отталкиваются, а разноименным притягиваются.

# 1.1.2. Свойства электрического заряда.

1. Единица электрического заряда Кулон (Кл). В СИ эта единица производная.
2. *Заряд существует в двух видах.* Тела, заряженные одноименным знаком отталкиваются, а разноименным притягиваются.
3. *Электрический заряд инвариантен.* Его величина не зависит от системы отсчета, т.е. не зависит от того движется он или покоится.
4. *Электрический заряд дискретен.* Заряд не может уменьшаться до бесконечно малого значения, Заряд любого тела представляет собой кратное от наименьшего электрического заряда – элементарного заряда.
5. *Электрический заряд аддитивен.* Заряд системы тел (частиц) равен сумме зарядов тел (частиц), входящих в систему.

- Элементарный электрический заряд существует в двух видах. Элементарный положительный электрический заряд равен элементарному отрицательному электрическому заряду.
- Элементарный электрический заряд равен
- $1,6 \times 10^{-19}$  Кл
- Носителем элементарного положительного электрического заряда является протон.
- $m_p = 1,67 \times 10^{-27}$  кг.
- Носителем элементарного отрицательного электрического заряда является электрон.
- $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$  кг.

# *Свойства электрического заряда*

- Все тела в природе способны наэлектризовываться или электризоваться, т.е. заряжаться или приобретать электрический заряд.
- Всякий процесс заряжения сводится к разделению (поляризации) зарядов, когда на одном из тел или части тела возникает избыток положительного заряда, а на другом конце отрицательного.
- Общее количество зарядов обоих знаков находящихся в телах не меняется. Заряды только перераспределяются в системе.
- Так проявляется фундаментальный закон природы - *закон сохранения электрического заряда*.

# Закон сохранения электрического заряда:

- алгебраическая сумма электрических зарядов любой *замкнутой системы* остается неизменной, какие бы процессы в этой системе не происходили.
- *Замкнутой называют систему, не обменивающуюся зарядами с внешними телами.*



# 1.2. Закон кулона

## 1.2.1. Понятие точечного заряда.

- Для описания взаимодействия электрических зарядов вводится понятие **точечный заряд**
- **заряд**, сосредоточенный на теле, линейные размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми оно взаимодействует.
- Понятие точечного заряда, как и материальной точки, является *физической абстракцией*

## 1.2.2. Эмпирическая природа открытия закона Кулона.

- Силы взаимодействия неподвижных точечных зарядов описываются законом, экспериментально установленным Ш. Кулоном (1785) с помощью крутильных весов. Этот закон был открыт Г. Кавендишем, однако его забота оставалась неизвестной более 100 лет.

# Формулировка закона Кулона

- Сила взаимодействия  $F$  между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, пропорциональна зарядам  $Q_1$ ,  $Q_2$  и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}$$

# Векторная форма закона Кулона.

- Сила  $F$  направлена по прямой, соединяющей взаимодействующие заряды, т. е. является центральной, и соответствует притяжению ( $F < 0$ ) в случае разноименных зарядов и отталкиванию ( $F > 0$ ) в случае одноименных. Эту силу называют кулоновской.

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r}$$

# Силы кулоновского взаимодействия и III закон Ньютона.

- Кулоновские силы подчиняются третьему закону Ньютона, они равны по модулю; направлены противоположно друг другу вдоль прямой, соединяющей точечные заряды. Силы действуют парами; являются силами одной природы; приложены к разным телам (зарядам)

# Электрическая постоянная

- $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$
- $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$
- $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \times 10^9 (\text{Н} \cdot \text{м}^2)/\text{Кл}^2 = 9 \times 10^9 \text{ м/Ф}$

# Экспериментальная проверка закона Кулона на макро и микро дистанциях.

- Точность выполнения закона Кулона на больших расстояниях, вплоть до  $10^7$  м, установлена с помощью спутников в околоземном пространстве.
- Считается, что закон Кулона должен соблюдаться и для больших расстояний, однако прямых экспериментов не проводилось.
- Этот закон выполняется и для малых расстояний, вплоть до  $10^{-5}$  м (доказано в опытах Резерфорда).
- Дальнейшие эксперименты по упругому рассеянию электронов с энергией ( $10^9$  эВ) убедительно доказали выполнимость закона Кулона на расстояниях ( $10^{-17}$  м).

# Физических смысл величин в законе Кулона

- Из формулировки закона Кулона

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}$$

- следует, что два точечных заряда по 1 Кл каждый, расположенных в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, взаимодействуют с силой  $9 \cdot 10^9$  Н.
- На практике пользуются дольными единицами 1 мкКл ( $10^{-6}$  Кл), 1 нКл, ( $10^{-9}$  Кл) или 1 пКл ( $10^{-12}$  Кл).



# Напряженность электростатического поля.

- Электрический заряд создает **электрическое поле** (на этот факт впервые указал Фарадей).  
Посредством этого поля электрические заряды взаимодействуют между собой.
- Электрические поля, которые создаются *неподвижными электрическими зарядами* называются **электростатическими**.
- В настоящее время в физике принята теория близкодействия, согласно которой взаимодействие электрических зарядов результат действия **поля** одного заряда на другой заряд и **поля** второго заряда на первый.
- Взаимодействие между зарядами осуществляется посредством **электрического поля**, непрерывно распределенного в пространстве.

- Электромагнитные поля распространяются в пространстве со скоростью света.  
Электромагнитное поле - особая форма материи, посредством которой осуществляются электромагнитные взаимодействия заряженных тел, в общем случае движущихся относительно данной системы отсчета.
- Электрическое поле - составная часть единого электромагнитного поля.

- Для обнаружения и опытного исследования электростатического поля используется ***пробный точечный положительный заряд*** — такой заряд, который не искажает исследуемое поле (не вызывает перераспределения зарядов, создающих поле).
- Если в поле, создаваемом зарядом  $Q$ , поместить пробный заряд  $Q_0$ , то на него действует сила  $F$ , различная в разных точках поля, которая, согласно закону Кулона, пропорциональна пробному заряду  $Q_0$

- **Напряженность** электростатического поля в данной точке есть физическая величина, определяемая силой, действующей на пробный единичный положительный заряд, помещенный в эту точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}$$

- Единица напряженности электростатического поля в СИ *ньютон на кулон* (Н/Кл)
- 1 Н/Кл - напряженность такого поля, которое на точечный заряд 1 Кл действует силой в 1 Н
- Обычно в таблицах используют размерность напряженности В/м (1 Н/Кл = 1 В/м),

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}$$

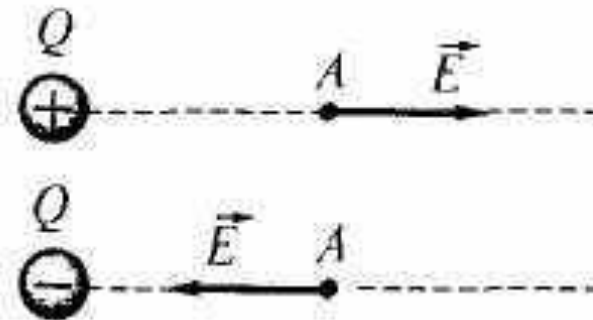
- Отношение не зависит от  $Q_0$  и характеризует электростатическое поле в той точке, где пробный заряд находится. *Напряженность является силовой характеристикой электростатического поля.*

# ***Напряженность поля точечного заряда в вакууме***

- подставив в формулу определения напряженности закон Кулона получим

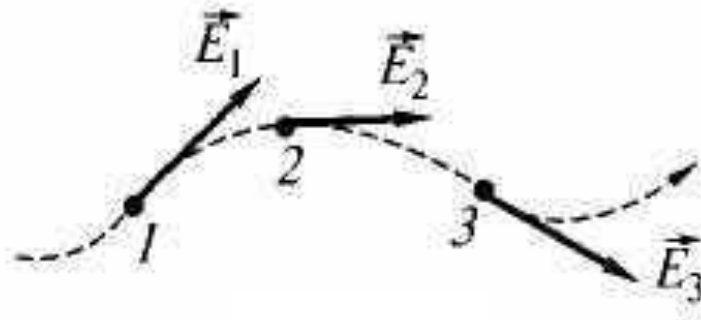
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

- **Направление вектора  $\vec{E}$**  совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.
- Если поле создается положительным зарядом, то вектор  $\vec{E}$  направлен вдоль радиуса-вектора от заряда во внешнее пространство.  
(отталкивание пробного положительного заряда)
- Если поле создается отрицательным зарядом, то вектор  $\vec{E}$  направлен к заряду  
(притяжение пробного положительного заряда)



# Графическое изображение электростатических полей.

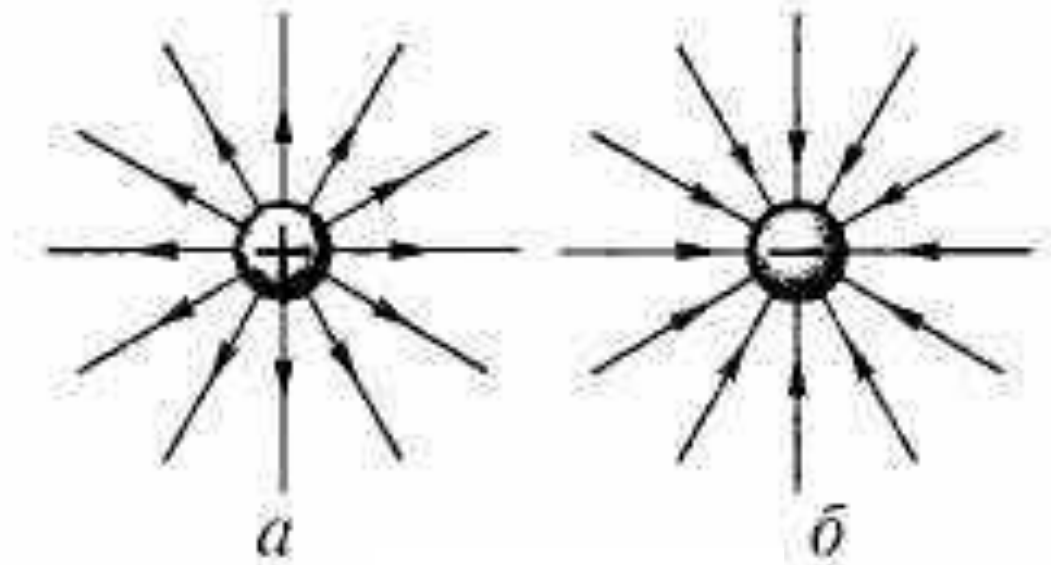
- Линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора поля. называются **СИЛОВЫЕ ЛИНИИ** поля. Они описывают напряженность поля.
- В этом случае их можно называть - *линиями напряженности*
- Линиям напряженности приписывают направление, совпадающее с направлением вектора  $\vec{E}$  в рассматриваемой точке линии.



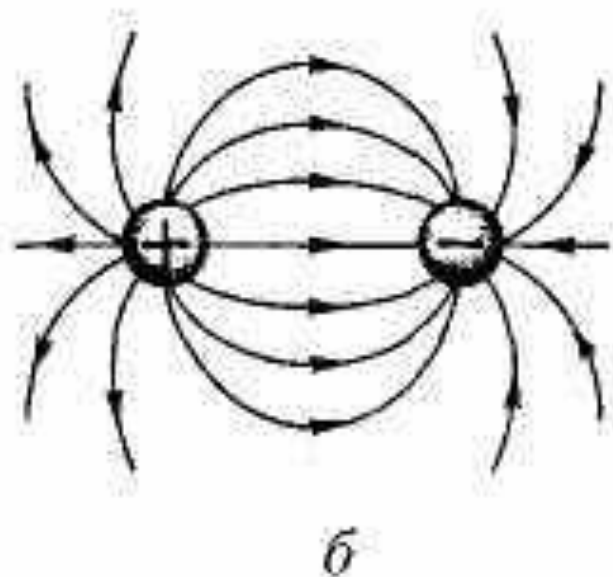
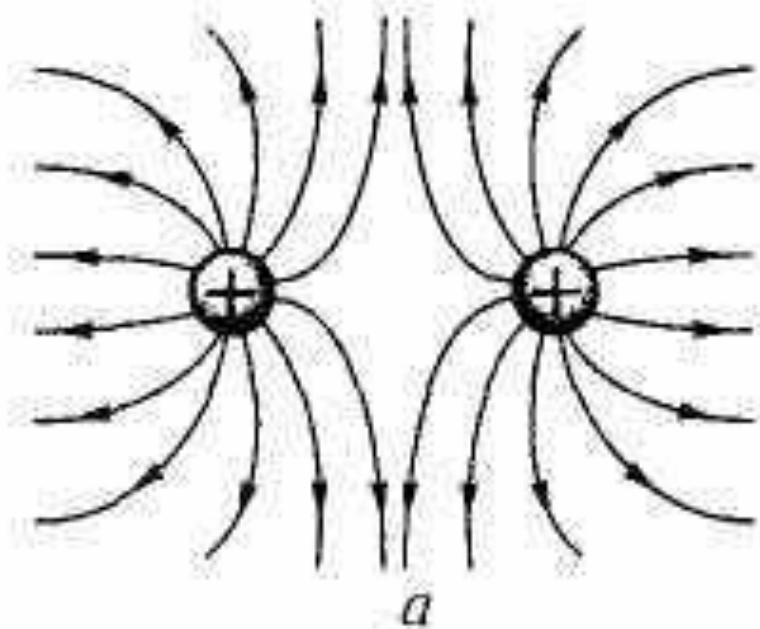


- Так как в каждой данной точке пространства вектор напряженности имеет лишь одно направление, то силовые линии векторного поля напряженности никогда не пересекаются.
- В случае однородного поля (вектор напряженности в любой точке постоянен по модулю и направлению) - линии напряженности параллельны вектору напряженности.
- Если поле создается точечным положительным зарядом, то линии напряженности - радиальные прямые, выходящие из заряда.
- Если поле создается точечным отрицательным зарядом, то линии напряженности - радиальные прямые, входящие в заряд

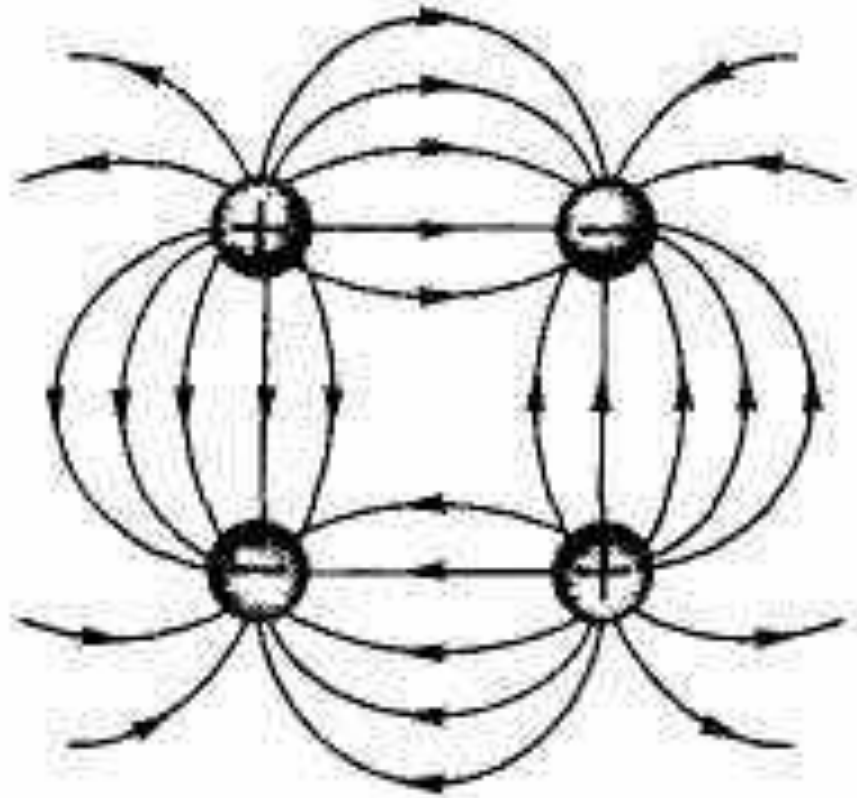
- Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных электрических зарядах и заканчиваются на отрицательных либо уходят в бесконечность.



- Линии напряженности электростатического поля для двух одинаковых по модулю одноименных и разноименных точечных зарядов.



- Системы из двух положительных и двух отрицательных точечных зарядов (заряды по модулю одинаковы).



# Принцип суперпозиции электростатических полей

- Рассмотрим систему неподвижных точечных зарядов  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ . Экспериментально доказано, что результирующая сила  $F$ , действующая со стороны поля на пробный заряд  $Q_0$  в любой точке поля, равна векторной сумме сил  $F_i$ , приложенных к нему со стороны каждого из зарядов  $Q$

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

Согласно определению напряженности

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

получим

$$F = Q_0 E \quad \text{и} \quad F_i = Q_0 E_i$$

$E$ - напряженность результирующего поля,

$E_i$  - напряженность поля, создаваемого зарядом  $Q_i$ .

Подставив эти выражения в формулу

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

получим:

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

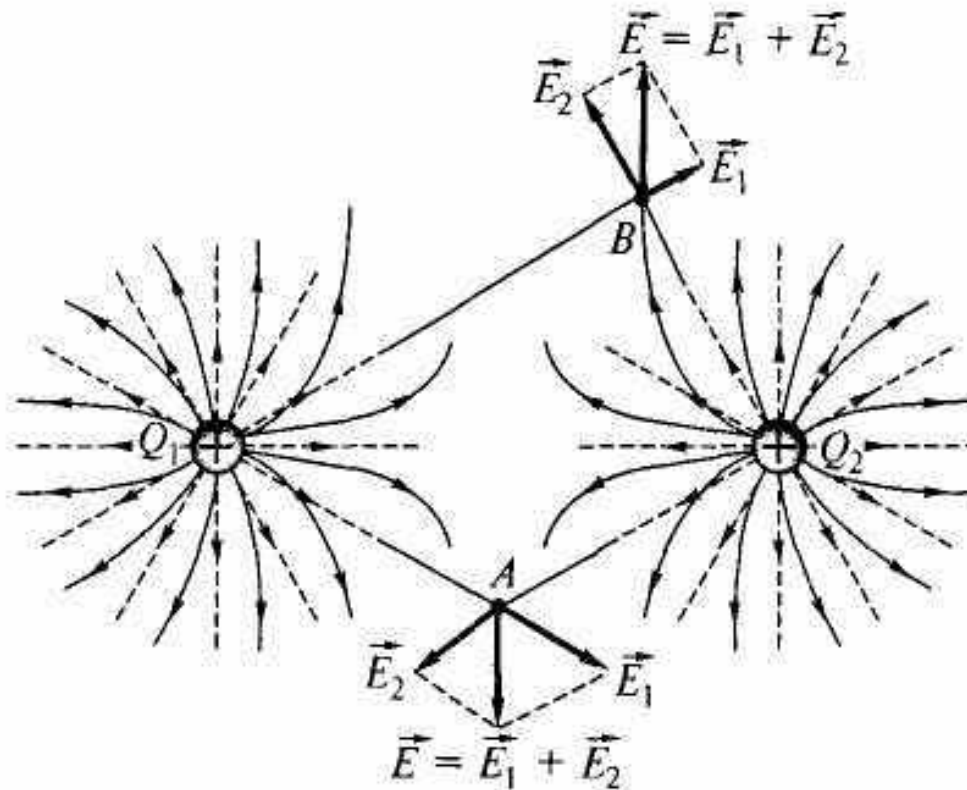
- Эта формула выражает **принцип суперпозиции (наложения) электростатических полей**
- напряженность результирующего поля, создаваемого системой зарядов, равна геометрической сумме напряженностей полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.

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

Рассмотрим пример применения принципа суперпозиции для нахождения напряженности результирующего электростатического поля в точках  $A$  и  $B$ , создаваемого двумя неподвижными точечными положительными равными зарядами  $Q_1$  и  $Q_2$

Точка  $A$  равно удалена от зарядов, а точка  $B$  расположена ближе к заряду  $Q_2$

- Точка  $A$  равно удалена от зарядов, а точка  $B$  расположена ближе к заряду  $Q_2$
- Принцип суперпозиции позволяет вычислять напряженность результирующего поля любой системы неподвижных зарядов.





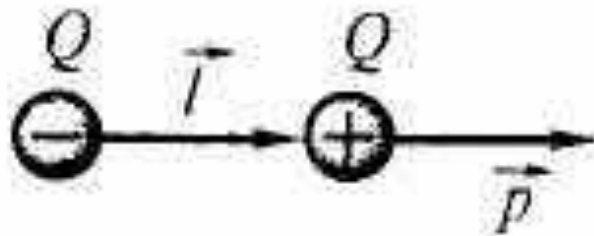
- Отметим, что принцип суперпозиции является обобщением опытных данных и, возможно, нарушается на малых расстояниях менее  $10^{-15}$  м.
- Принцип суперпозиции позволяет рассчитать электростатические поля любой системы неподвижных зарядов, поскольку если заряды не точечные, то их можно всегда мысленно разделить на малые части, считая каждую из них точечным зарядом.

# Поле электрического диполя в вакууме

- **Электрический диполь** — система двух равных по модулю разноименных точечных зарядов  $(+Q, -Q)$ ,
- расстояние  $l$  между которыми значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек поля.
- Вектор, направленный по оси диполя (прямой, проходящей через оба заряда)
- от отрицательного заряда к положительному
- и равный расстоянию между ними,
- называют **плечом диполя**  $l$  .

- Вектор совпадающий по направлению с плечом диполя и равный произведению заряда  $|Q|$  на плечо  $l$ ,
- называют **электрическим моментом диполя**, или **дипольным моментом**

$$\vec{p} = |Q|\vec{l}$$



- Применяя принцип суперпозиции электростатических полей, напряженность  $E$  поля диполя в произвольной точке

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

- где  $E_+$  и  $E_-$  — напряженности полей, создаваемых соответственно положительным и отрицательным зарядами.

- Рассмотрим два случая
- **1. Напряженность поля на продолжении оси диполя в точке A** направлена вдоль оси диполя

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



- Обозначив расстояние от точки  $A$  до середины оси диполя через  $r$ , используя соотношение

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

- получим

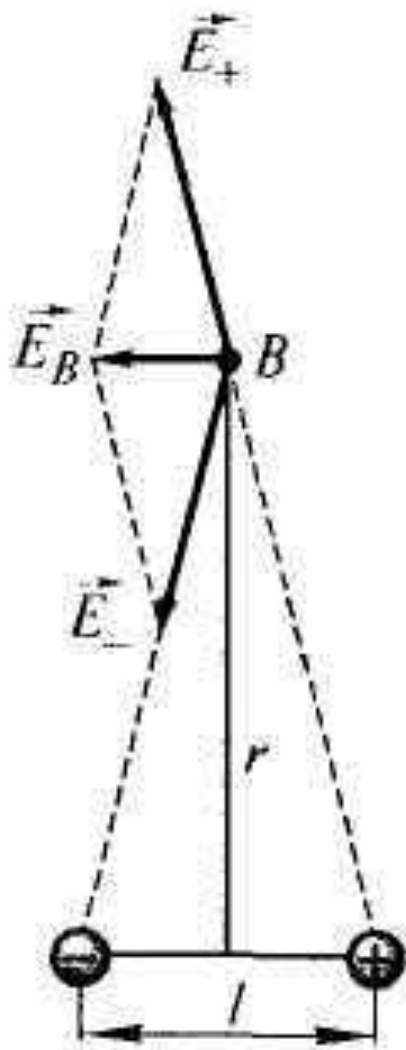
$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{Q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{Q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \right] = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2 + \left(r + \frac{l}{2}\right)^2}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2 \left(r + \frac{l}{2}\right)^2}$$

учтя, что  $l_2 \ll r_2$  и  $\vec{p} = |Q|\vec{l}$

получим:

$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}$$

**2-й случай. Напряженность поля на перпендикуляре, восстановленном к оси из его середины, в точке  $B$ .**





Точка В равноудалена от зарядов, поэтому

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2 + \frac{l^2}{4}} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

где  $r$  - расстояние от точки  $B$  до середины плеча диполя.

Из подобия равнобедренных треугольников, опирающихся на плечо диполя и вектор  **$E_B$** , получим

$$\frac{E_B / 2}{E_+} = \frac{l / 2}{r}$$

упростим

$$E_B = \frac{E_+ l}{r}$$

подставим выражение для  $E_+$

$$E_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ql}{r^3} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}$$

- Сравним 
$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}$$

$$E_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ql}{r^3} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}$$

- Таким образом, создаваемое диполем электростатическое поле при  $r \gg l$  убывает обратно пропорционально третьей степени расстояния  $r$  от диполя/
- Модель электрического диполя оказалась хорошим приближением для описания электрических свойств атомов и молекул, поэтому при рассмотрении многих задач пользуются представлением атомов и молекул в виде электрических диполей