

Лекция 4:  
«Основы электродинамики.  
Электрическое и магнитное поля  
Часть I»

## 4.1. Основные положения о взаимодействии электрических зарядах:

1. Электрические заряды не существуют сами по себе, а являются внутренними свойствами элементарных частиц – электронов, протонов и др.
2. Электрический заряд дискретен: заряд  $q$  любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда :  $q = n \times e$  (1914 г. Р. Милликен).

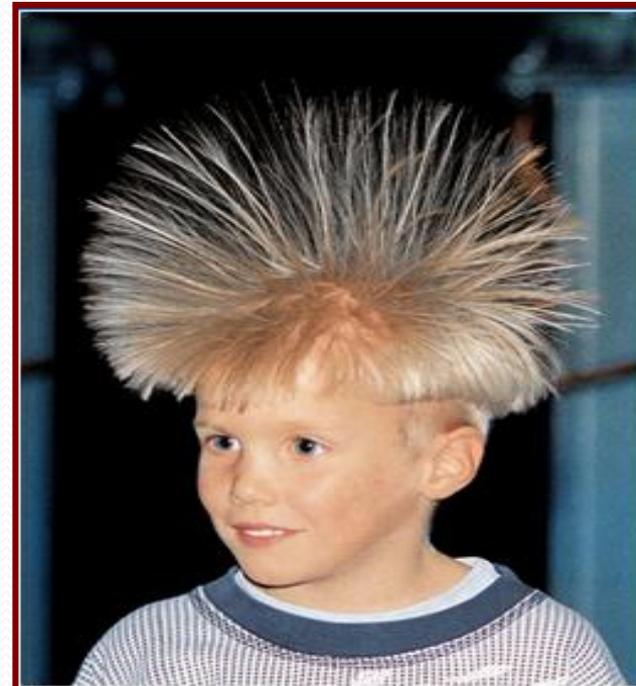
$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

3. *Закон сохранения заряда: алгебраическая сумма зарядов, возникающих при любом электрическом процессе на всех телах, участвующих в процессе равна нулю (1747 г. Б. Франклин, в 1843 г. М. Фарадей).*

4. Существуют только два вида электрических зарядов: заряды подобные тем, которые возникают на стекле, потертом о шелк – **положительные** на янтаре, потертом о мех - **отрицательные** (1746 г. Б. Франклин)

5. **Опр. Электризация** – ф.я., при котором наблюдается приобретение телом нескомпенсированного электрического заряда (электризация трением, электризация через влияние, электризация через соприкосновение)

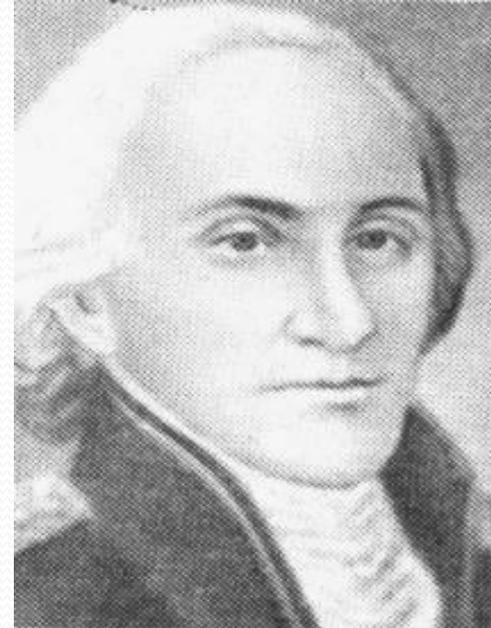
**Опр. Электростатическая индукция** – ф.я., при котором на ближайшем к заряженному телу конце другого тела появляются заряды противоположного знака (индуцированные заряды)



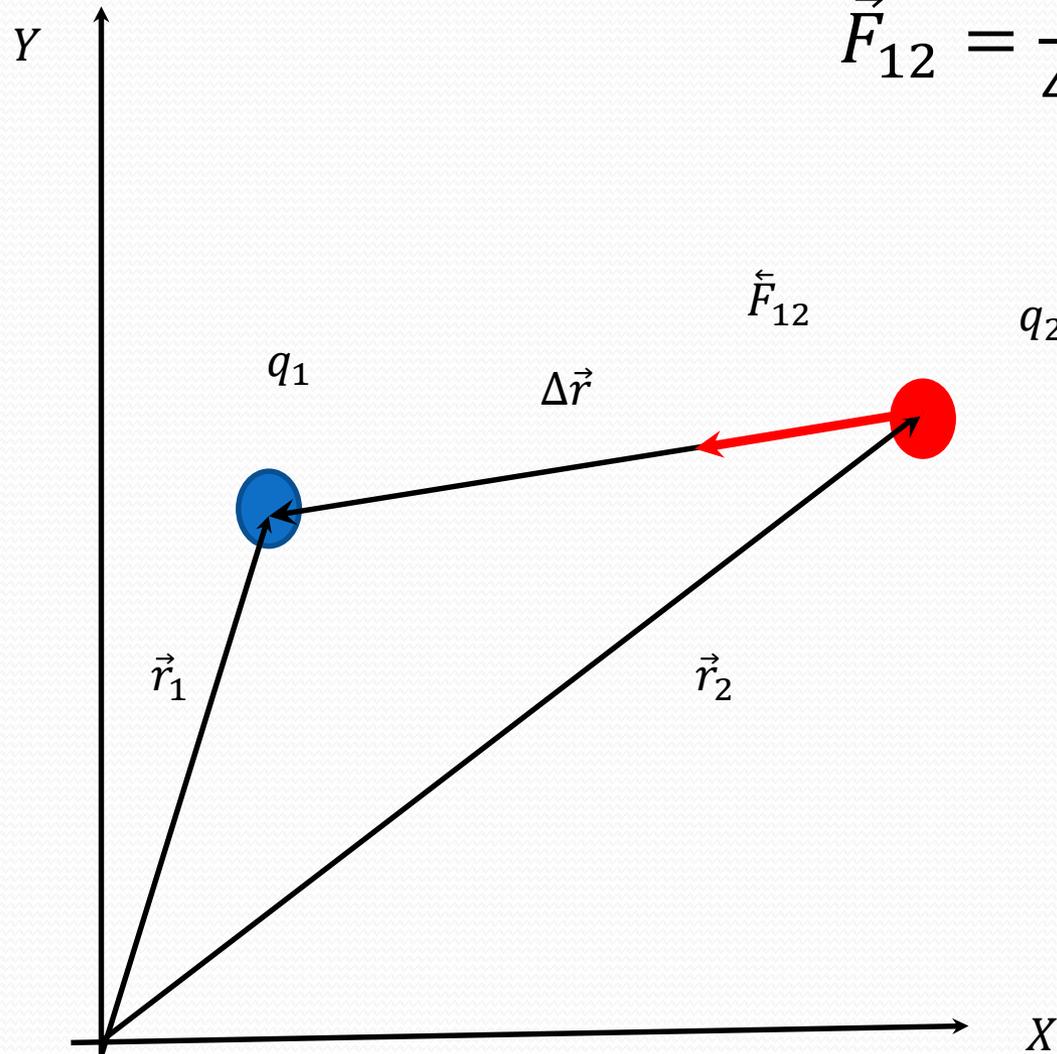
**6. Опр. Точечный заряд ( $q$ )** – идеализированный физический объект. Заряженное тело может считаться точечным электрическим зарядом, если его размеры пренебрежительно малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми оно взаимодействует.

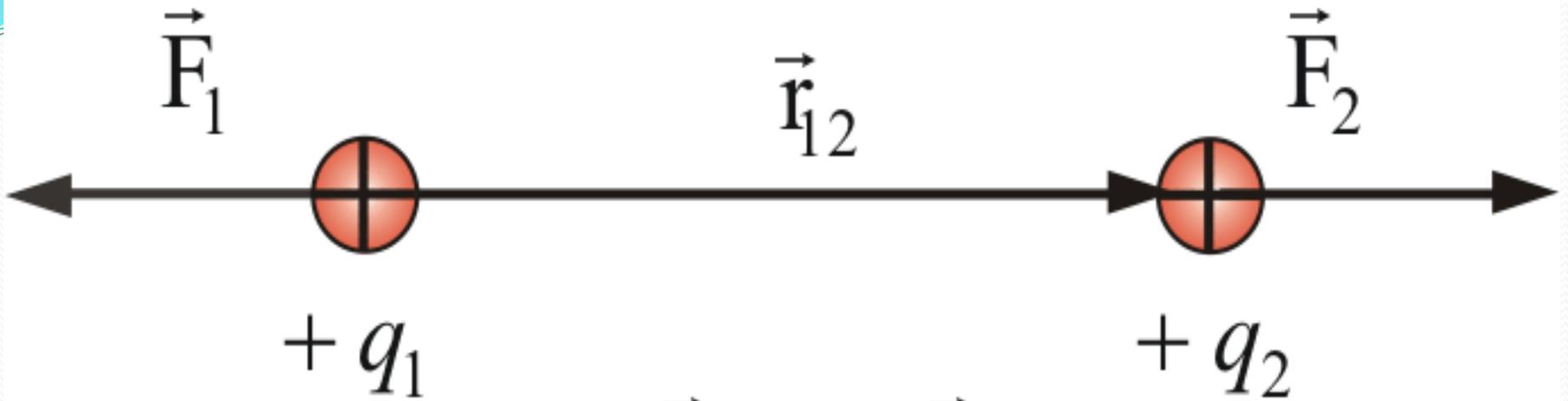
**Закон Кулона:** сила взаимодействия точечных зарядов в вакууме пропорциональна величине зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^3} \cdot \Delta\vec{r}$$

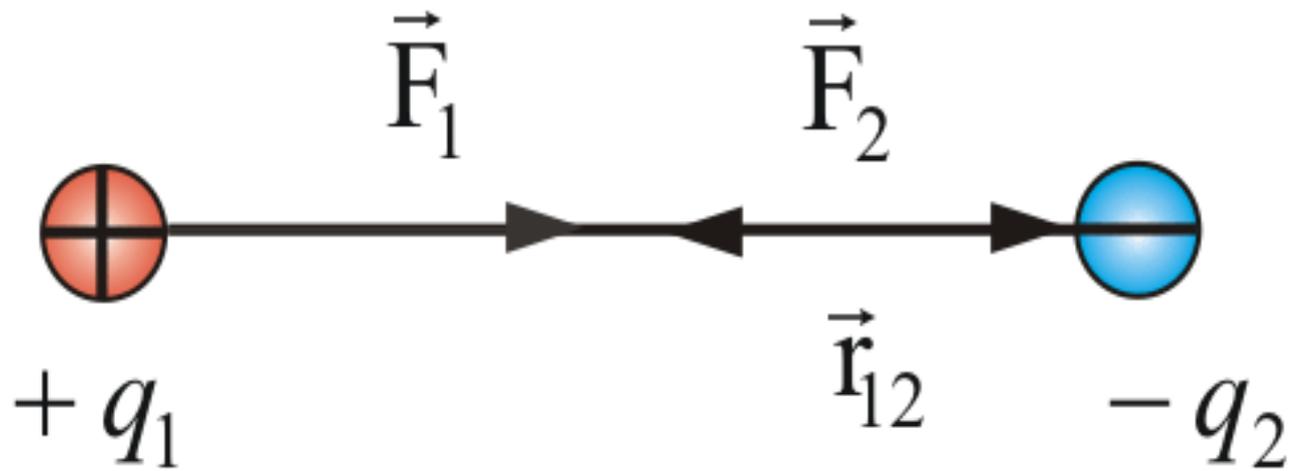


$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^3} \cdot \Delta\vec{r}$$





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



$$|\vec{F}_{12}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

## Электрическая постоянная

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

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

$$|\vec{F}_{12}| = \frac{k}{\epsilon} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

## 4.2. Основные положения об электрическом поле:

Вокруг заряда всегда есть электрическое поле.

**Опр.** Электрическое поле – ф.об., существующий вокруг неподвижных электрических зарядов и действующий на заряд (заряженное тело), помещенный(ое) в это поле.

Не существует статических электрических полей, не связанных с зарядами, как не существует «голых», не окруженных полем зарядов.

**Опр.** Напряженность электрического поля – ф.в., описывающая силу, действующая на пробный электрический заряд, помещенный в это поле.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \Rightarrow \vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \cdot \frac{|q_1||q_0|}{r^2} \cdot \Delta\vec{r} \cdot \frac{1}{|q_0|}$$

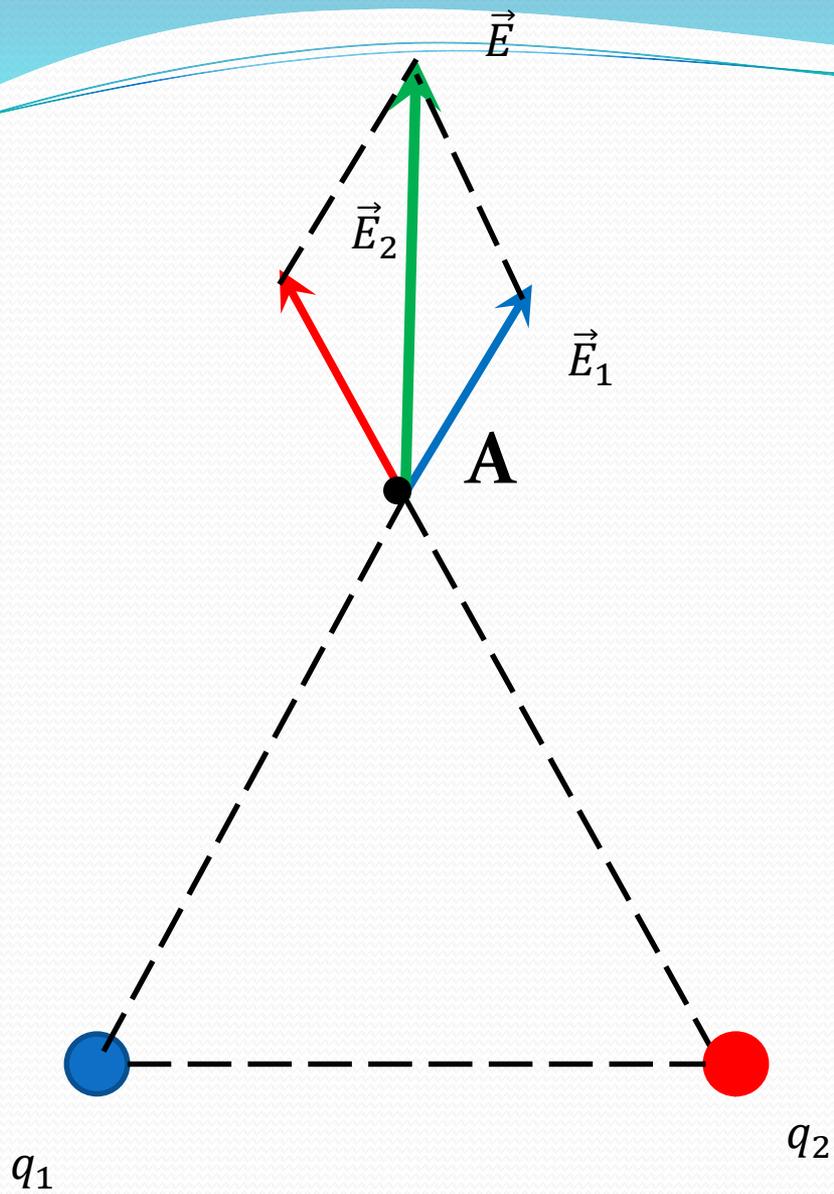
$$\Rightarrow \vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \cdot \frac{|q_1|}{r^2} \cdot \Delta\vec{r}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad \Rightarrow \quad \vec{E} = \left[ \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right]$$

**1 Н/Кл – напряженность такого поля, которое на точечный заряд 1 Кл действует с силой в 1 Н.**

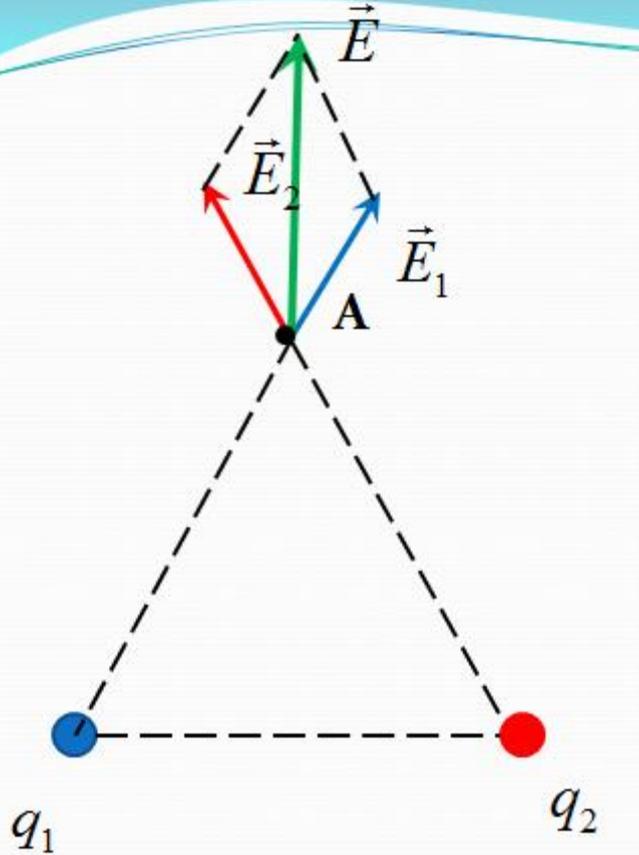
**Принцип суперпозиции полей:** напряженность результирующего поля, системы точечных зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, созданных в данной точке каждым из них в отдельности, т.е.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i .$$



$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i.$$

Как определить значение (модуль) напряженности электрического поля?



$$|\vec{E}_1| = \frac{|q_1|}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \quad |\vec{E}_2| = \frac{|q_2|}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}$$

$$|\vec{E}| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha} =$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^4} + \frac{q_2^2}{r_2^4} + \frac{2q_1q_2}{r_1^2 r_2^2} \cos \alpha},$$

$$\cos \alpha = \frac{r^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}.$$

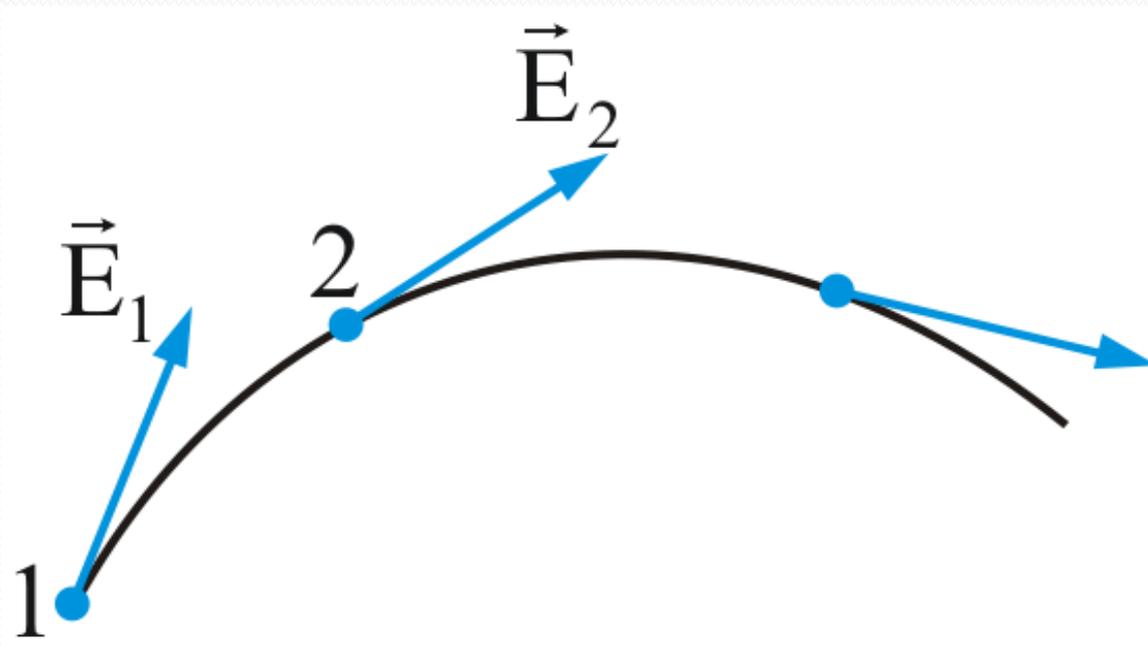
Если поле создается *не точечными зарядами*, то:

- 1) тело разбивают на бесконечно малые элементы
- 2) определяют напряженность поля, создаваемого каждым элементом
- 3) интегрируют по всему телу:

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

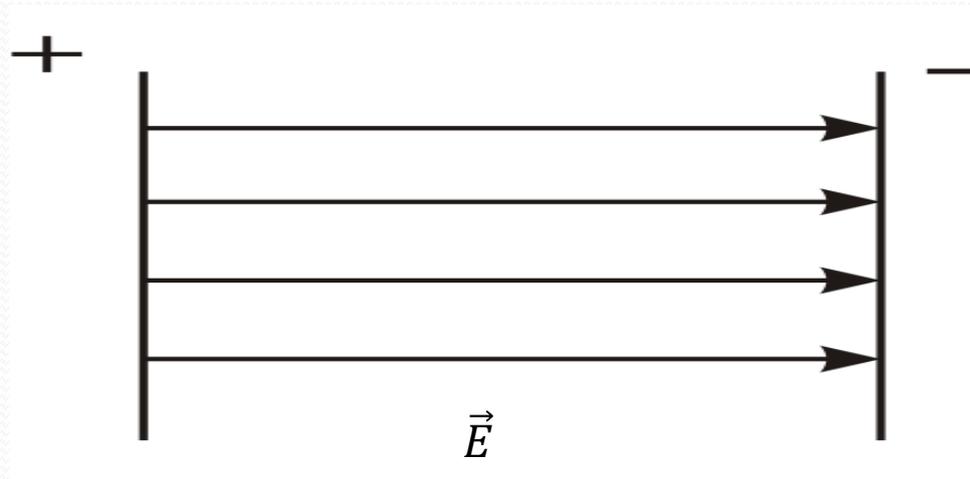
где  $d\vec{E}$  – напряженность поля, обусловленная заряженным элементом. Интеграл может быть линейным, по площади или по объему в зависимости от формы тела.

**Опр.** Линии напряженности электрического поля – линии, касательные к которым в любой точке поля совпадает с направлением вектора напряженности

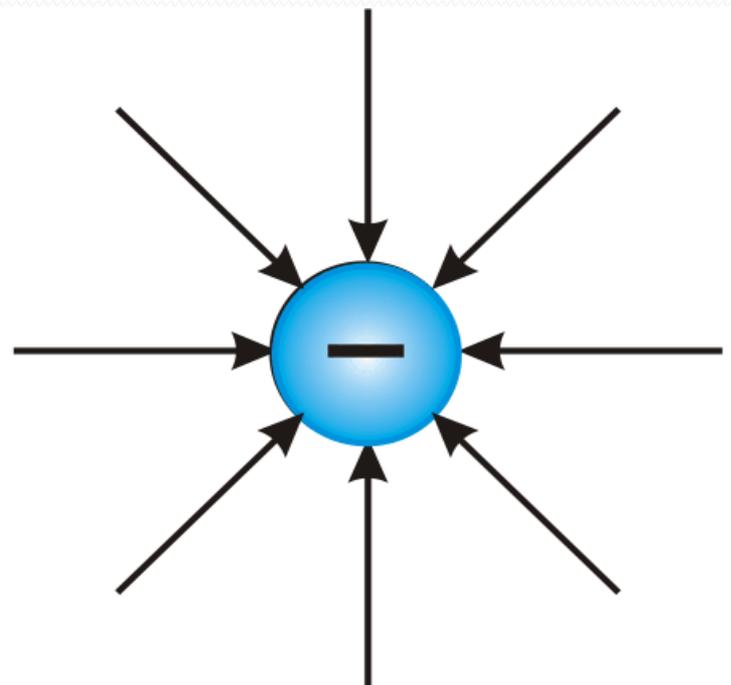
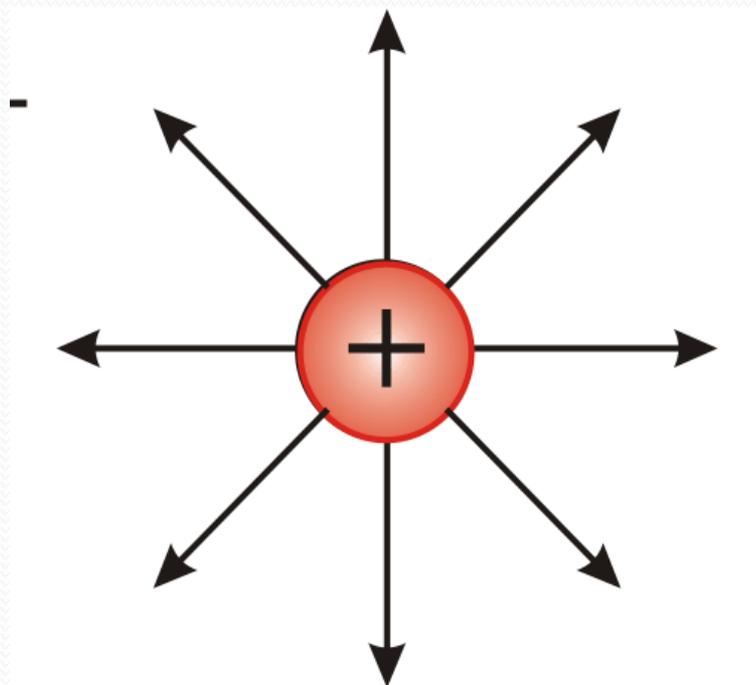


**Опр.** Однородное электрическое поле - электростатическое поле, во всех точках которого напряженность одинакова по величине и направлению.

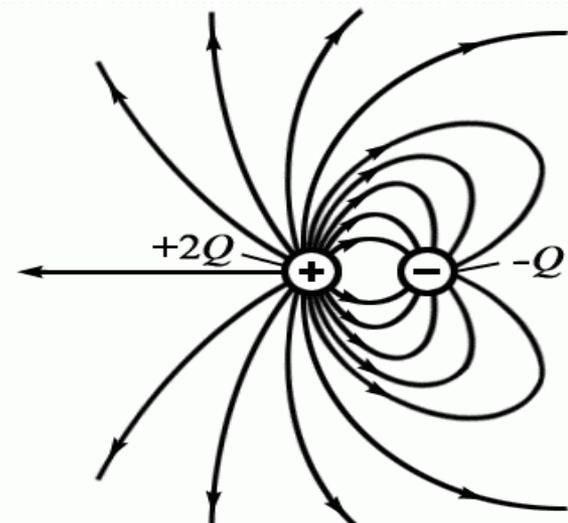
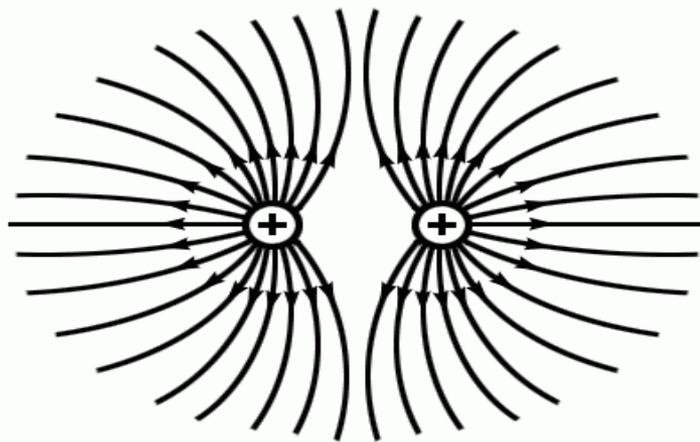
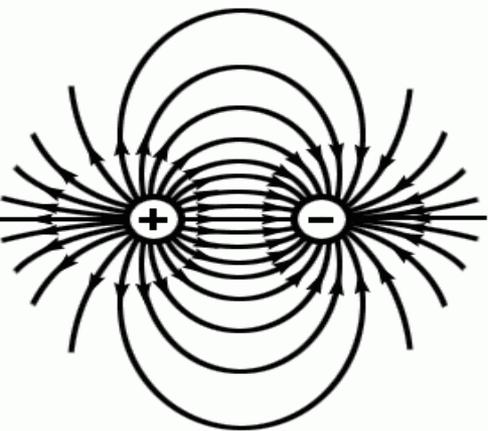
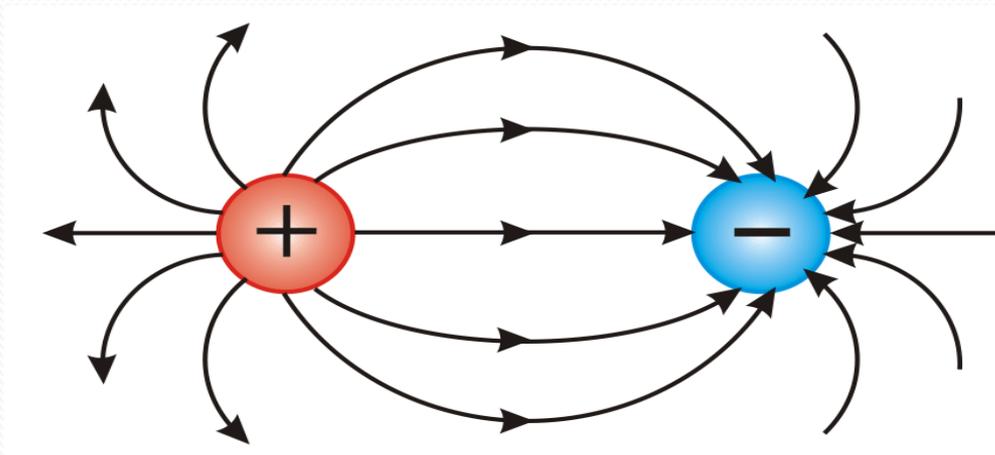
Однородное электростатическое поле изображается параллельными силовыми линиями на равном расстоянии друг от друга



Поле точечного заряда поле неоднородно - линии напряженности исходят из положительного заряда и уходят в бесконечность и из бесконечности входят в отрицательный заряд.



Для системы зарядов, как видим, силовые линии направлены от положительного заряда к отрицательному



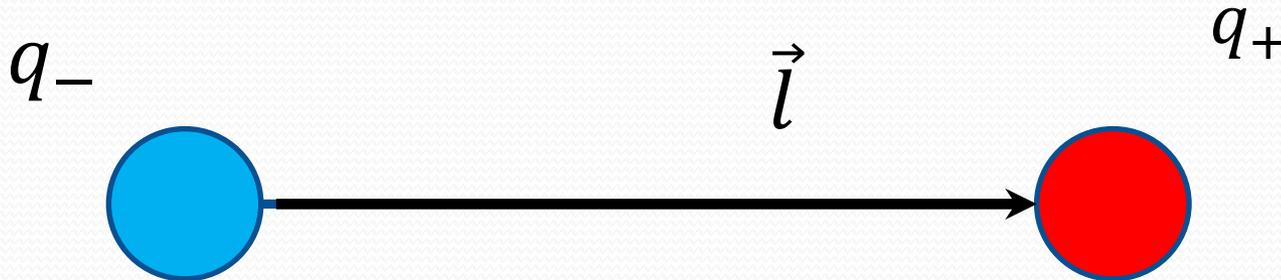
**Опр. Диэлектрики** – вещества, практически не проводящие электрического тока

**Опр. Диполь** – ф.о., состоящий из двух равных по модулю, но противоположных по знаку точечных зарядов

**Опр. Дипольный момент** – ф.в., характеризующая способность диполя ориентировать о внешнем электрическом поле

$$\vec{p} = q\vec{l}$$

$$\vec{p} = [\text{Кл} \cdot \text{м}]$$



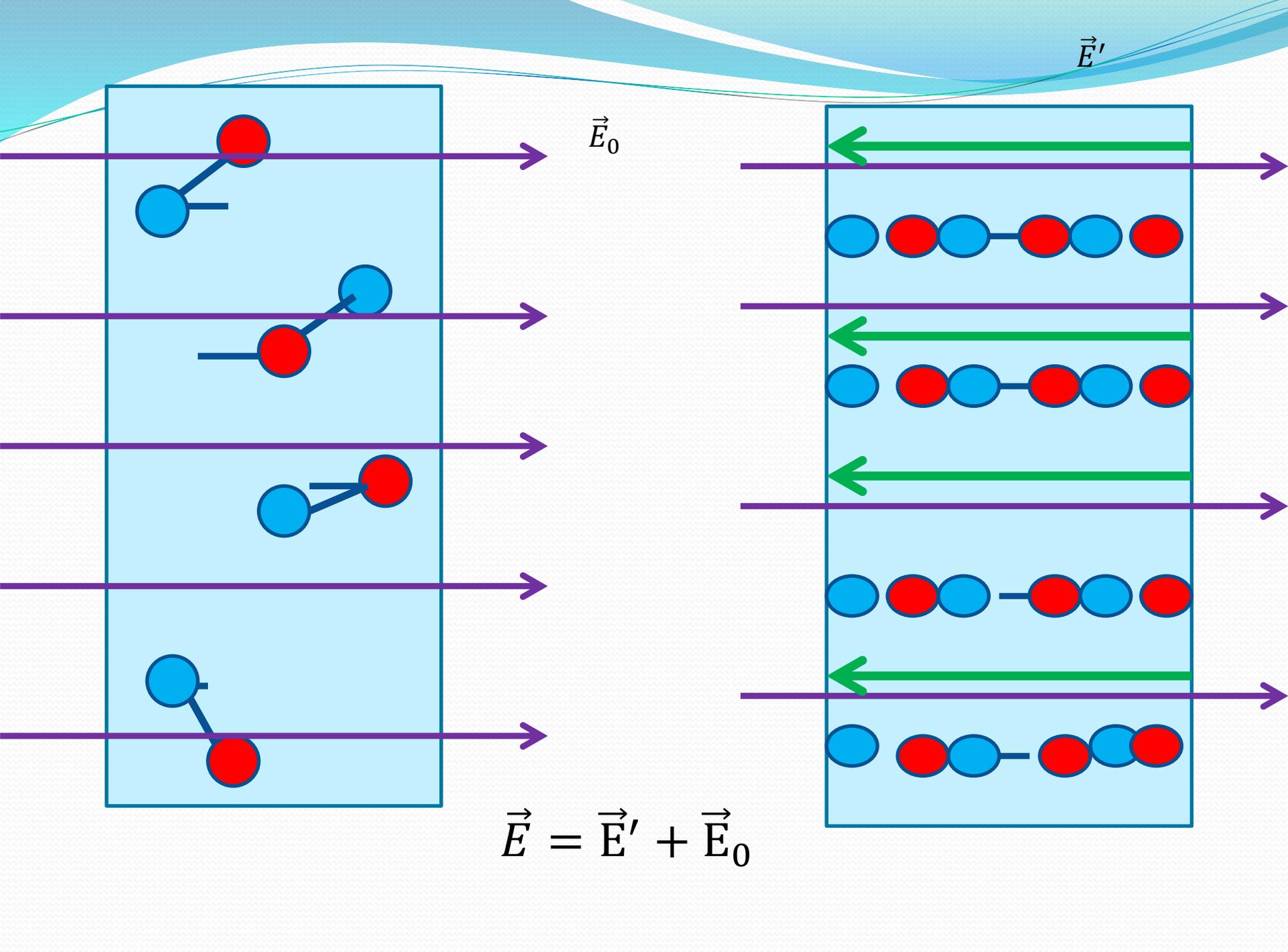
### 4.3. Электрическое поле в диэлектрике.

#### Диэлектрик во внешнем электрическом поле

**Опр.** Полярные диэлектрики – диэлектрики, в молекулах которых центры тяжести отрицательного заряда сдвинут относительно центра тяжести положительного заряда (молекулы обладают дипольным моментом)

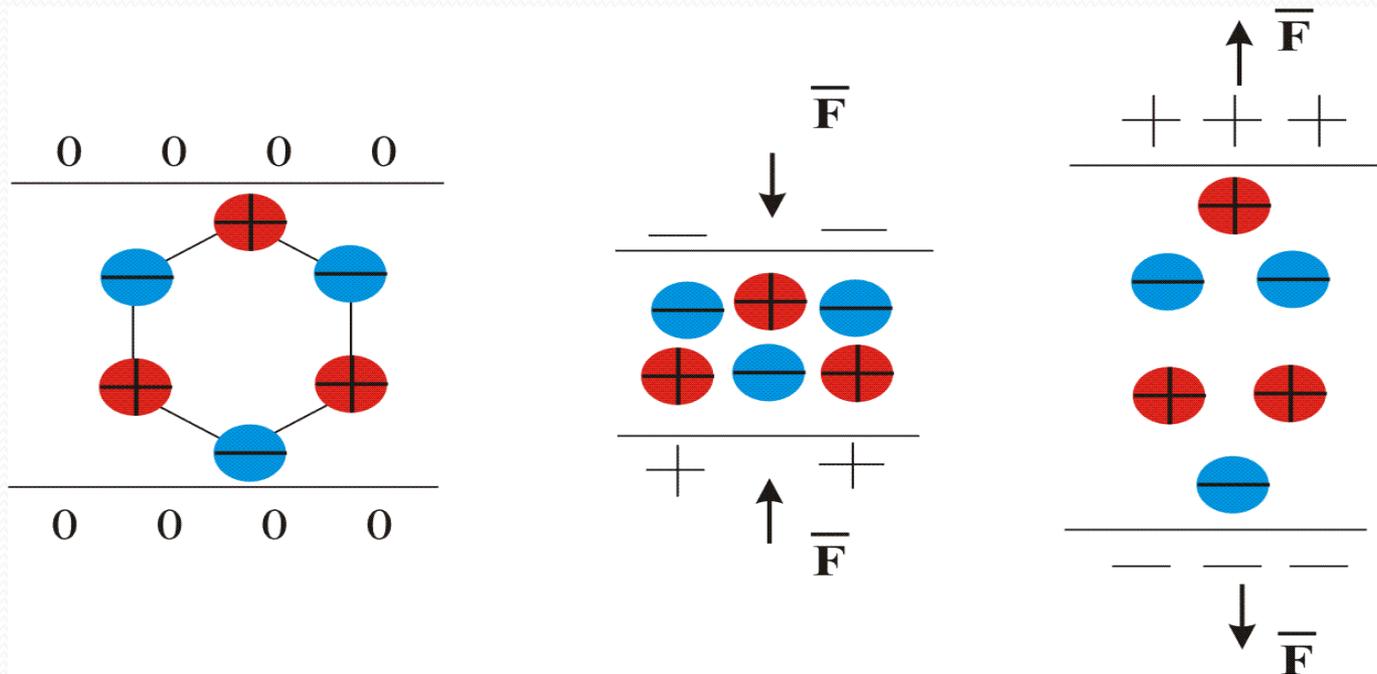
**Опр.** Неполярные диэлектрики – диэлектрики, в молекулах которых центры тяжести отрицательного заряда совпадают с центрами тяжести положительного заряда

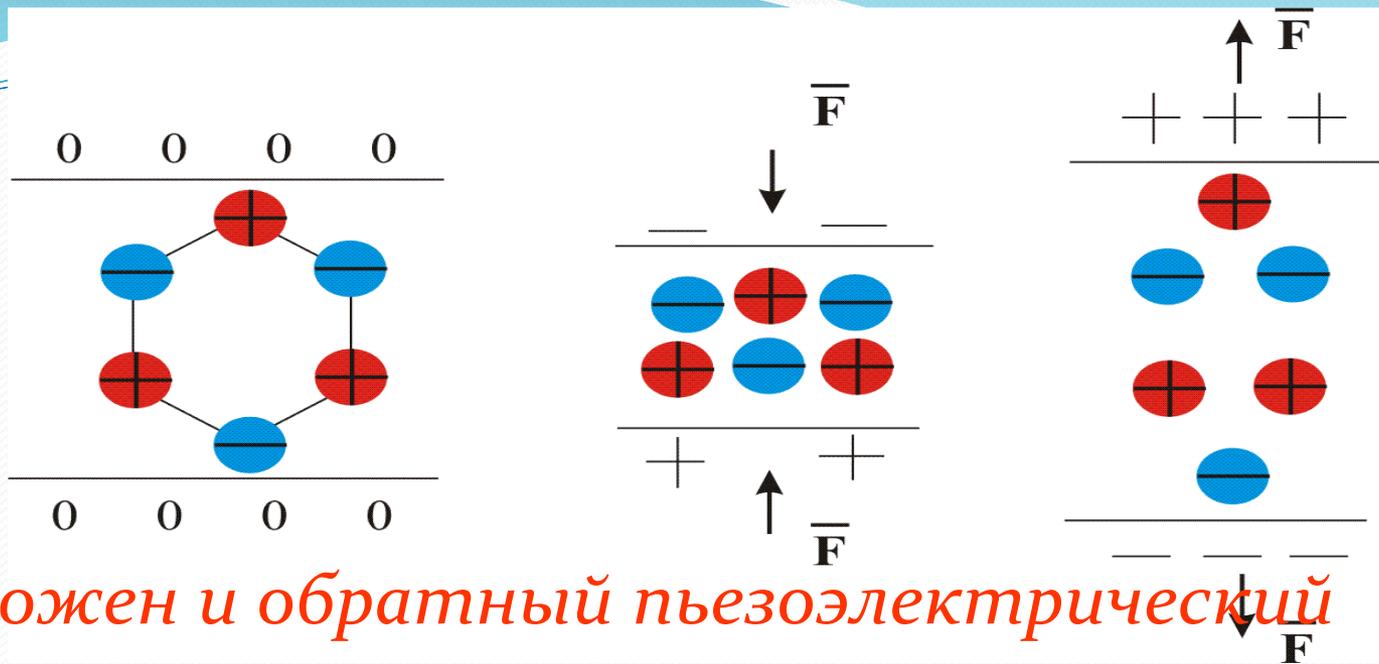
**Опр.** Поляризация – ф.я., при котором наблюдается смещение электрических зарядов в молекулах диэлектрика против внешнего электрического поля



**Опр. Пьезоэлектрический эффект** – ф.я., при котором наблюдается поляризация диэлектрика под действие механической деформации (Пьер и Жак Кюри в 1880 году).

Если на грани кристалла наложить металлические электроды (обкладки) то при деформации кристалла на обкладках возникнет разность потенциалов. Если замкнуть обкладки, то потечет ток.





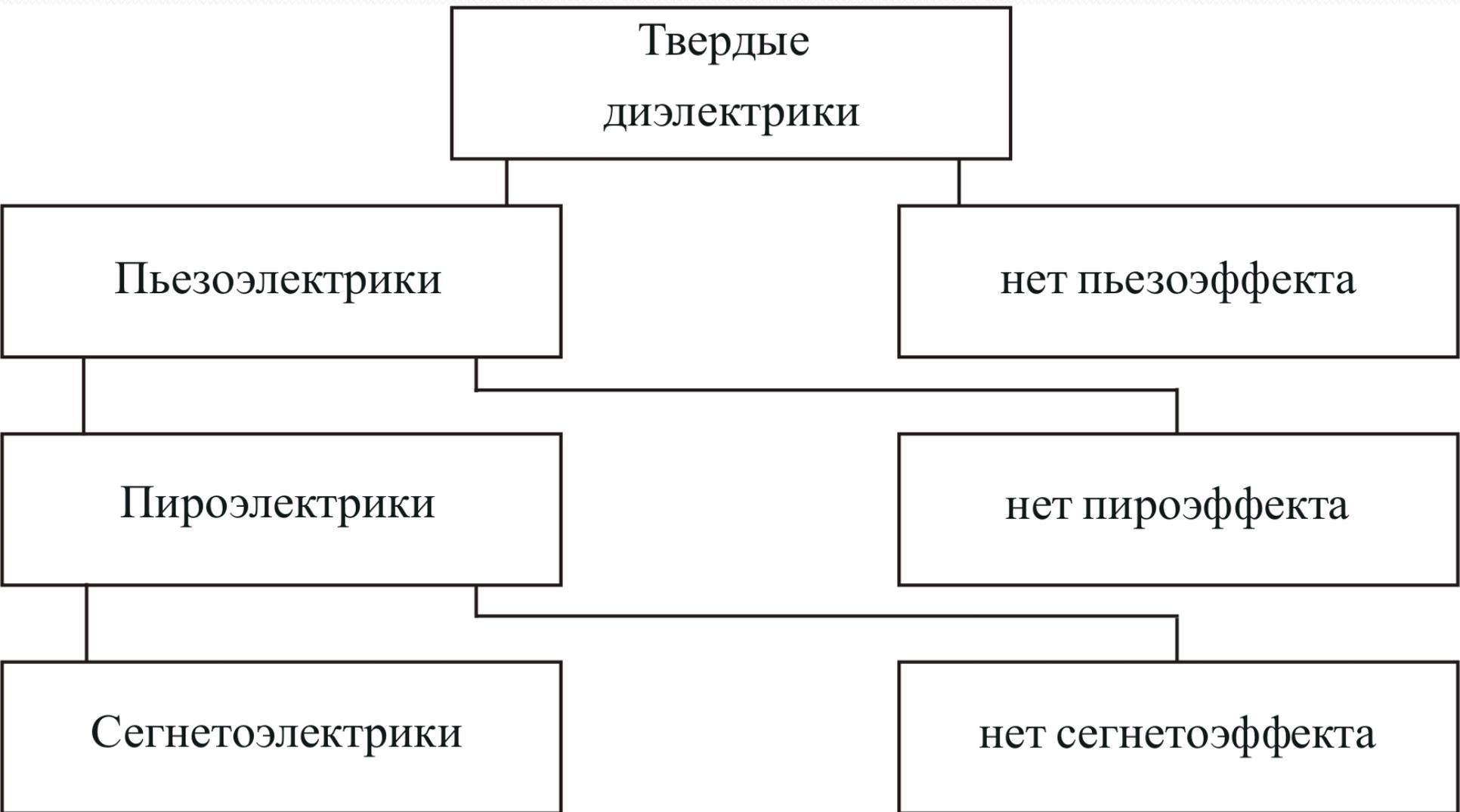
*Возможен и обратный пьезоэлектрический эффект:*

- Возникновение поляризации сопровождается механическими деформациями.
- Если на пьезоэлектрический кристалл подать напряжение, то возникнут механические деформации кристалла, причем, деформации будут пропорциональны приложенному электрическому полю  $E_0$ .

**Опр. Пироэлектричество** – появление электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов при их нагревании или охлаждении.

- При нагревании один конец диэлектрика заряжается положительно, а при охлаждении он же – отрицательно.
- Появление зарядов связано с изменением существующей поляризации при изменении температуры кристаллов.

Все пьезоэлектрики являются пьезоэлектриками, но не наоборот. Некоторые пьезоэлектрики обладают сегнетоэлектрическими свойствами.



В течение последних 5-7 лет сформировалась и интенсивно развивается новая отрасль медицины, основанная на использовании близкодействующих статических электрических полей для стимулирования позитивных биологических процессов в организме человека.

Попадая вместе с имплантатом в организм человека, электретная пленка своим полем оказывает дозированное локальное воздействие на поврежденный орган, способствуя его лечению в оптимальных биофизических условиях.

В основе этого процесса лежит природный эффект, состоящий в том, что внешнее близкодействующее электрическое поле определенной величины и знака, действуя на клеточном уровне, является катализатором появления здоровых новообразований в живых тканях.



Характерные фотографии срезов костной ткани, полученные в результате серии экспериментов. Электретное покрытие существенно ускоряет процессы заживления.

К концу третьего месяца после операции вокруг имплантатов с электретным покрытием практически полностью завершается процесс формирования костной ткани, отсутствуют признаки воспалительной реакции.

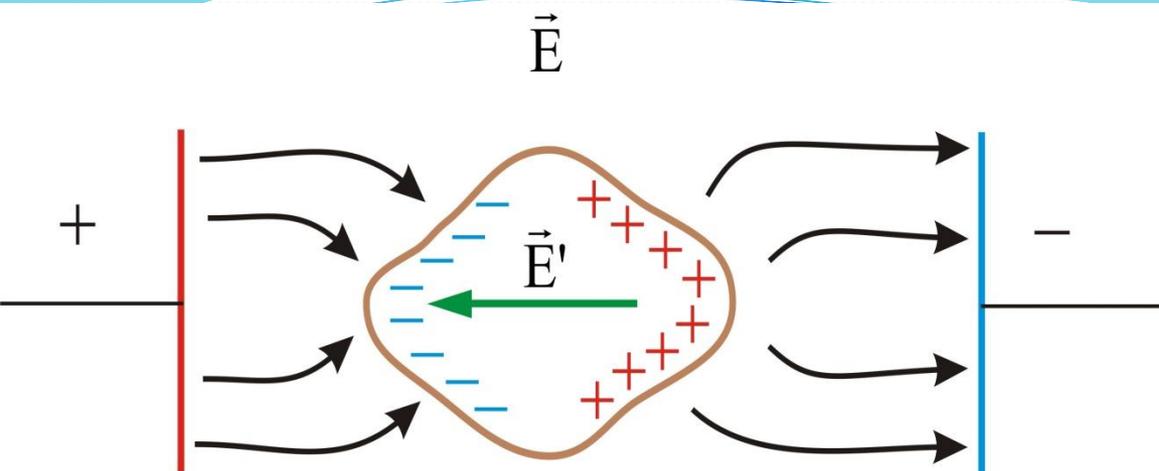
## 4.4. Напряженность и потенциал электростатического поля в проводнике

В проводниках имеются электрически заряженные частицы – носители заряда (электроны в металлах, ионы в электролитах) способные перемещаться по всему объему проводника под действием внешнего электростатического поля.

*Носителями заряда в металлах являются электроны проводимости.* Они возникают при конденсации паров металла за счет обобществления валентных электронов.

*При отсутствии электрического поля металлический проводник является электрически нейтральным* – электростатическое поле создаваемое положительными и отрицательными зарядами внутри него компенсируется.

- При внесении металлического проводника во внешнее электростатическое поле, **электроны проводимости перемещаются (перераспределяются)** до тех пор, пока всюду внутри проводника поле электронов проводимости и положительных ионов не скомпенсирует внешнее поле.
- **В любой точке внутри проводника, находящимся в электростатическом поле  $E = 0$ ;  $d\varphi = 0$ ; т. е.  $\varphi = \text{const}$ .**
- **Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\text{Me}} \rightarrow \infty$ .**
- **На поверхности проводника напряженность  $\vec{E}$  направлена по нормали к этой поверхности**, иначе, под действием составляющей  $E_{\tau}$ , касательной к поверхности, заряды перемещались бы по проводнику, а это противоречило бы их статическому распределению.
- Вне заряженного проводника – поле есть, следовательно, должен быть вектор  $\vec{E}$ , и направлен он перпендикулярно поверхности!



В установившемся состоянии в проводнике, помещенном в электростатическое поле мы имеем:

- Появление у заряженной поверхности на металле заряда противоположного знака – **электростатическая индукция**. Этот процесс очень краток  $\sim 10^{-8}$  секунд.
- **Электростатическое экранирование** – внутри проводника поле не проникает.
- Во всех точках внутри проводника  $\mathbf{E} = \mathbf{0}$ , а во всех точках на поверхности  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_n$  ( $\mathbf{E}_\tau = \mathbf{0}$ );
- Весь объем проводника, находящегося в электростатическом поле **эквипотенциален**.

При сообщении проводнику заряда, на его поверхности появляется потенциал  $\phi$ . Но если этот же заряд сообщить другому проводнику, то потенциал будет другой. Это зависит от геометрических параметров проводника. Но в любом случае, потенциал  $\phi$  пропорционален заряду  $q$ .

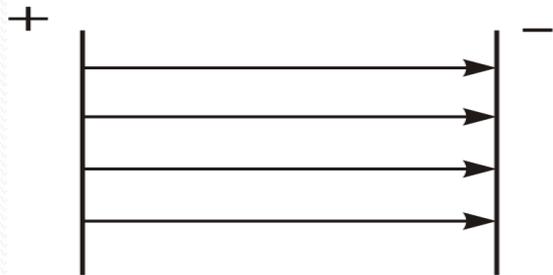
$$q = C\phi$$

Коэффициент пропорциональности называют

**Опр. Емкость** – физическая величина, численно равна заряду, который необходимо сообщить проводнику для того, чтобы изменить его потенциал на единицу.

Единица измерения емкости в СИ – фарада  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В}$ .

- **Опр. Конденсатор** – два проводника, называемые обкладками, расположенные близко друг к другу. Конструкция такова, что внешние окружающие конденсатор тела не оказывают влияние на емкость конденсатора. Это будет выполняться, если **электростатическое поле будет сосредоточено внутри конденсатора между обкладками**.



- Так как электростатическое поле находится внутри конденсатора, то линии электрического смещения начинаются на положительной обкладке и заканчиваются на отрицательной – и никуда не исчезают. Следовательно, заряды на обкладках **противоположны по знаку, но одинаковы по величине**.

- Емкость конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}$$

- Емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$$

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками.

- Как видно из формулы, диэлектрическая проницаемость вещества очень сильно влияет на емкость конденсатора. Это можно увидеть и экспериментально: заряжаем электроскоп, подносим к нему металлическую пластину – получили конденсатор (за счет электростатической индукции, потенциал увеличился).

$$W_c = \frac{CU^2}{2}$$

Где же сосредоточена энергия конденсатора? На обкладках? То есть на зарядах? А может, в пространстве между обкладками? Только опыт может дать ответ на этот вопрос.

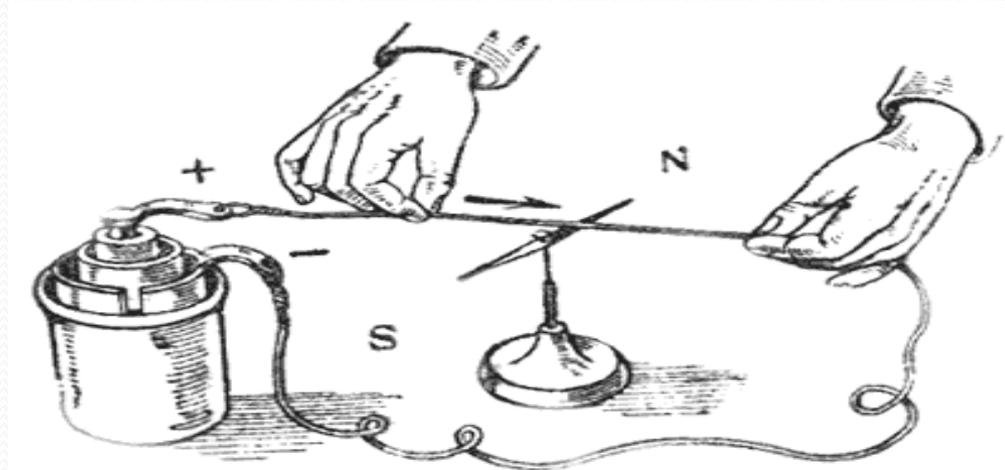
В пределах электростатики дать ответ на этот вопрос невозможно. Поля и заряды, их образовавшие не могут существовать обособленно. Их не разделить. Однако переменные поля могут существовать независимо от возбуждавших их зарядов (излучение солнца, радиоволны, ...) и они переносят энергию. Эти факты заставляют признать, что носителем энергии является электростатическое поле.

## 4.5. Магнитное поле



1600 г. Английский ученый-физик Уильям Гильберт труд «О магните, магнитных телах и большом магните – Земле»

В 1820 г. Х. Эрстед открыл магнитное поле

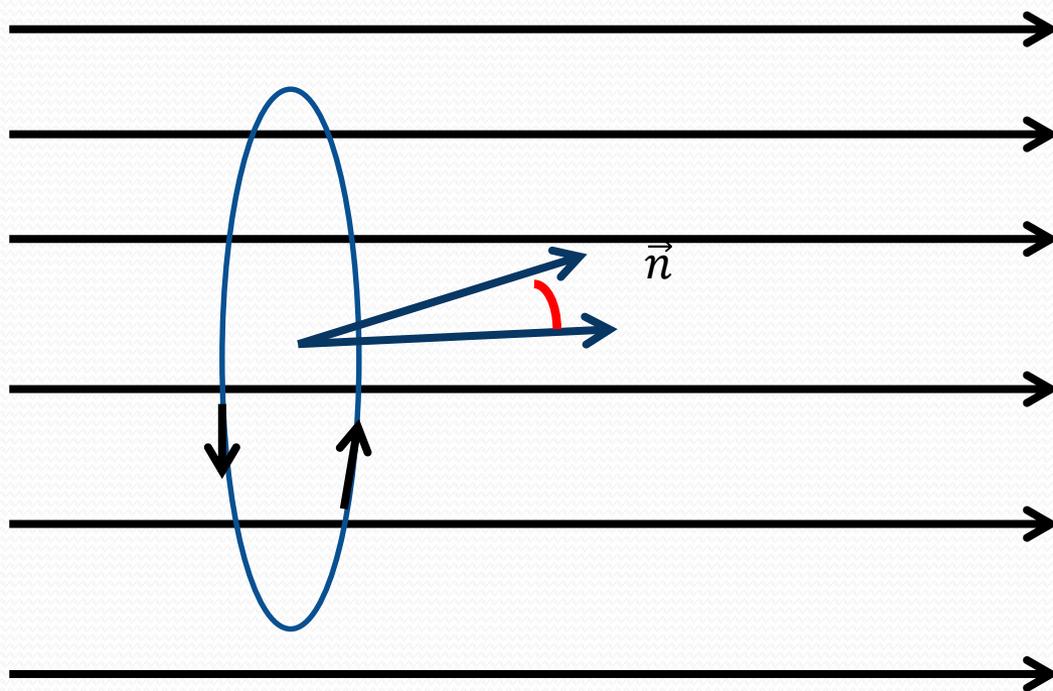


Опыт Эрстеда.

**Опр. Магнитное поле** - ф.об., существующий вокруг движущихся зарядов и действующий на другие движущиеся заряды, помещенные в это поле

Вокруг всякого движущегося заряда помимо электрического поля существует еще и магнитное.

Пусть контур с током  $I$  поместили в магнитное поле. Так как магнитное поле способно действовать на движущиеся электрические заряды с определенной силой, то на контур действует крутящий момент и он будет ориентироваться в поле.



Вращающий момент прямо пропорционален величине тока  $I$ , площади контура  $S$  и синусу угла между направлением магнитного поля и нормали

$$M \sim IS \sin(\vec{n}, \vec{B})$$

**Опр.** Магнитный момент контура – ф.в., характеризующая способность контура площадью  $S$  и током  $I$  вращаться под действие магнитного поля (аналогичен электрическому моменту диполя  $\vec{p} = q\vec{l}$  ).

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

$$\vec{p}_m = [A \cdot \text{м}^2]$$

Отношение момента силы к магнитному моменту  $\vec{M}$  для данной точки магнитного поля будет одним  $\vec{p}_m$  и тем же и может служить характеристикой магнитного поля, названной **магнитной индукцией**

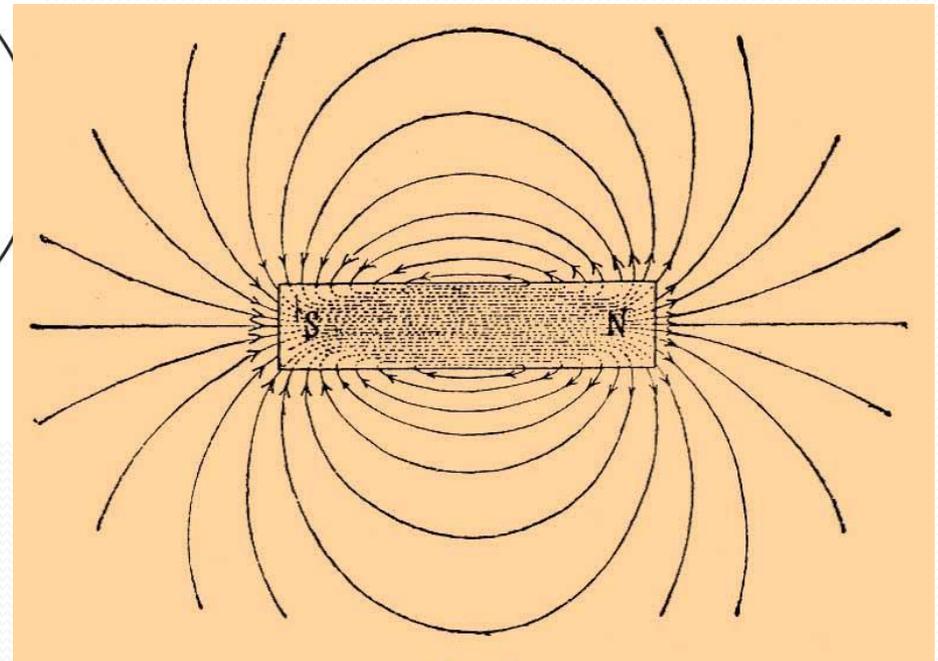
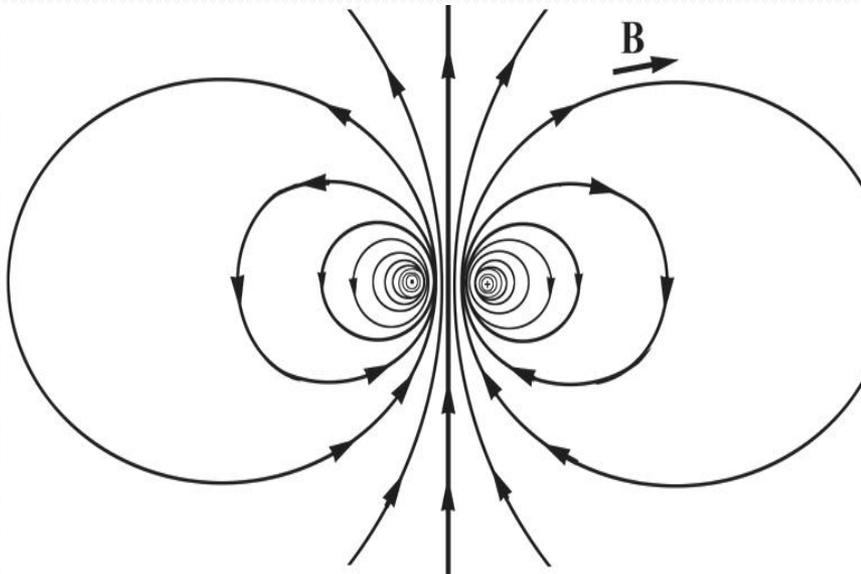
**Опр.** Магнитная индукция – ф.в., характеризующая вращающий момент сил, действующий со стороны магнитного поля на контур, помещенный в это поле

$$\vec{B} = \frac{\vec{M}_{\max}}{\vec{p}_m}$$

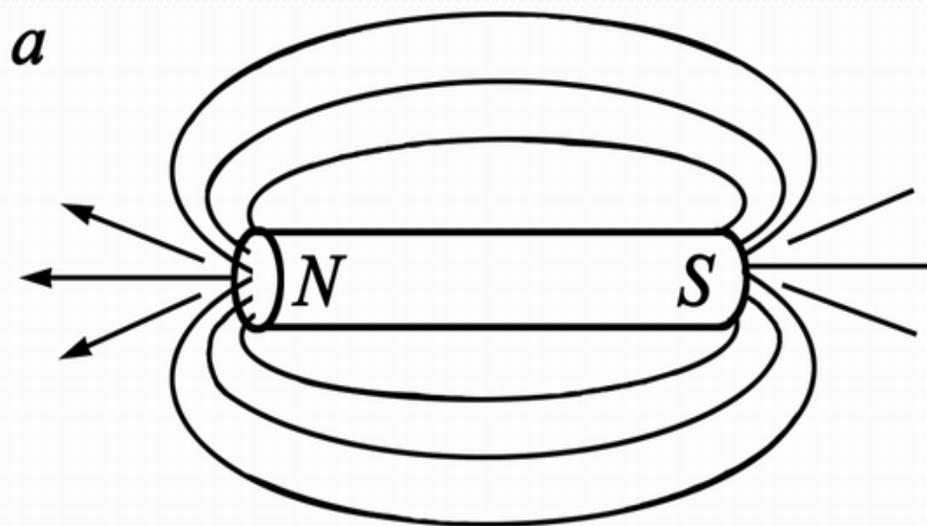
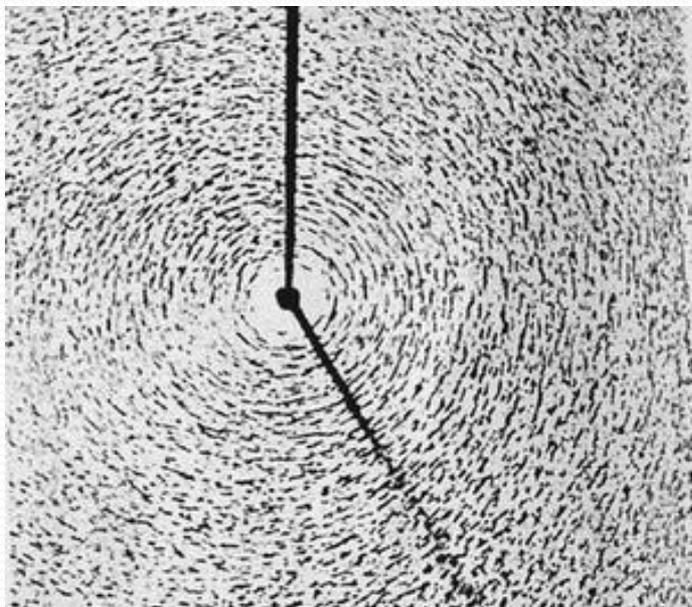
$$|\vec{B}| = \frac{|\vec{M}|}{|\vec{p}_T| \sin(\vec{n}, \vec{B})}$$

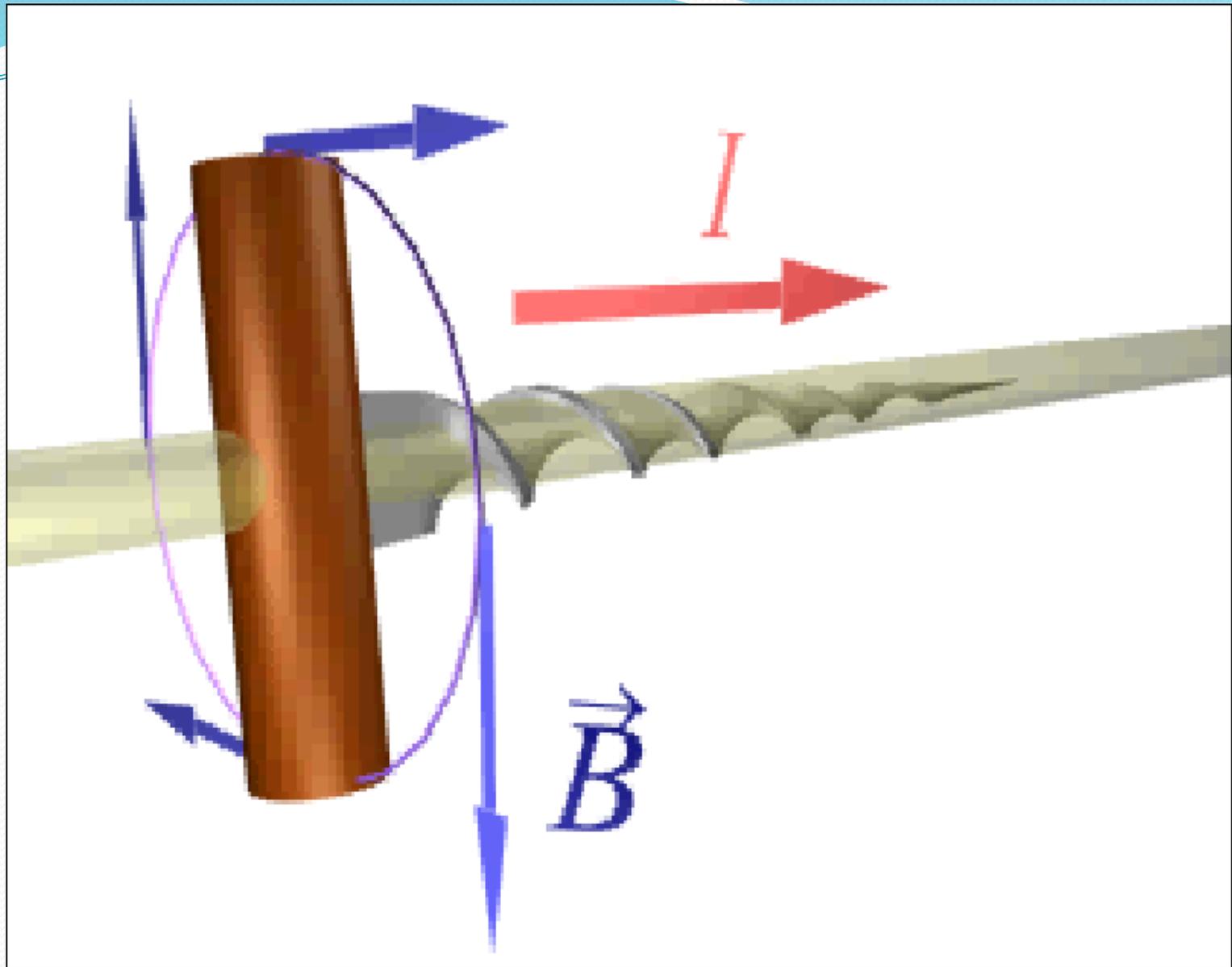
Магнитная индукция  $\vec{B}$  характеризует силовое действие магнитного поля на ток

**Опр.** Линии магнитной индукции – линии, в каждой точки которых касательные совпадают с вектором магнитной индукции



Магнитное поле в пространстве не потенциально и является вихревым. Его силовые линии замкнуты. Его источником служат электрические токи.





BURAV.AVI

## Принцип суперпозиции полей:

магнитная индукция поля, образованного несколькими магнитными полями, есть векторная сумма магнитных индукций полей, создаваемых ими

$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i .$$

Магнитное поле любого проводника может быть представлено как сумма полей, образованного отдельными элементарными участками тока:

$$\vec{B} = \int d\vec{B}_i$$