

Лекция 6:
«Основы электродинамики.
Электрическое и магнитное поля»

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).

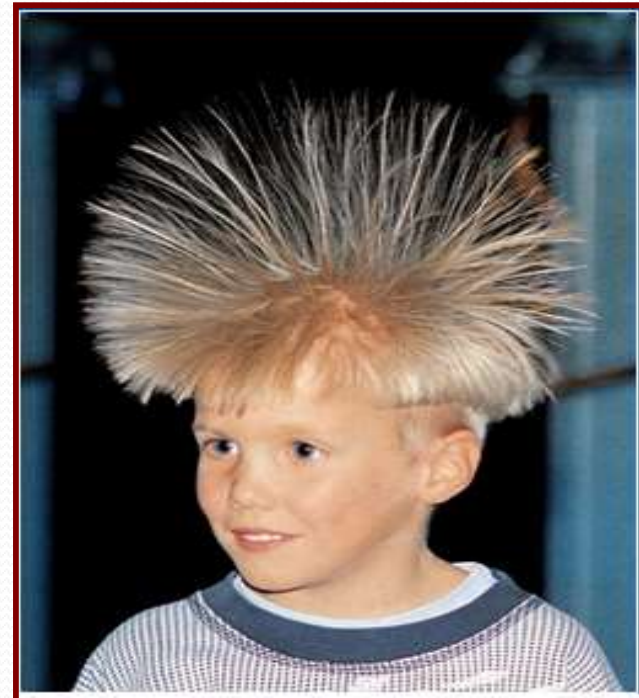
$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

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)

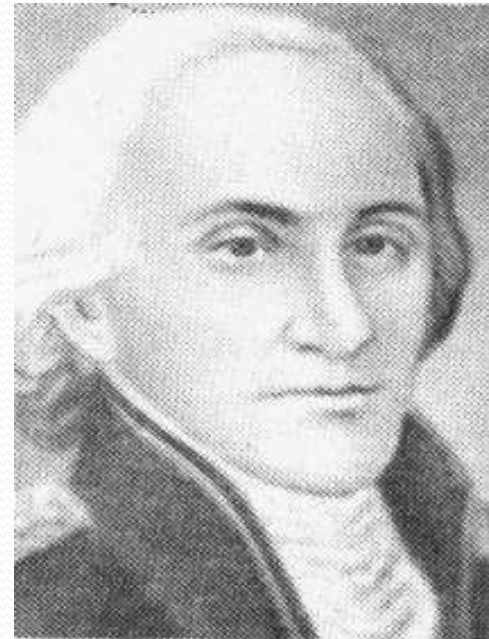
Опр. Электростатическая индукция – ф.я., при котором на ближайшем к заряженному телу конце другого тела появляются заряды противоположного знака (индуцированные заряды)



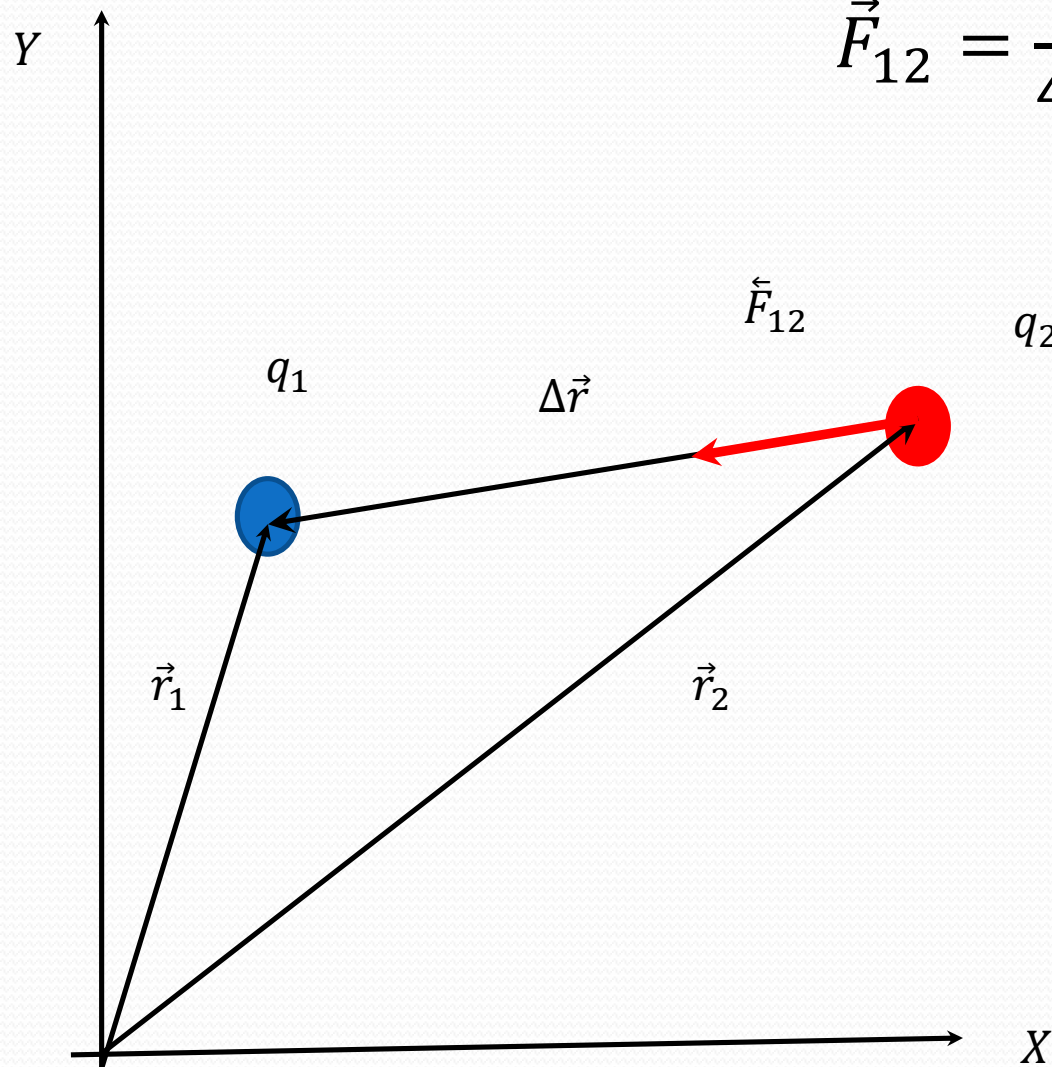
6. Опр. Точечный заряд (q) – идеализированный физический объект. Заряженное тело может считаться точечным электрическим зарядом, если его размеры пренебрежительно малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми оно взаимодействует.

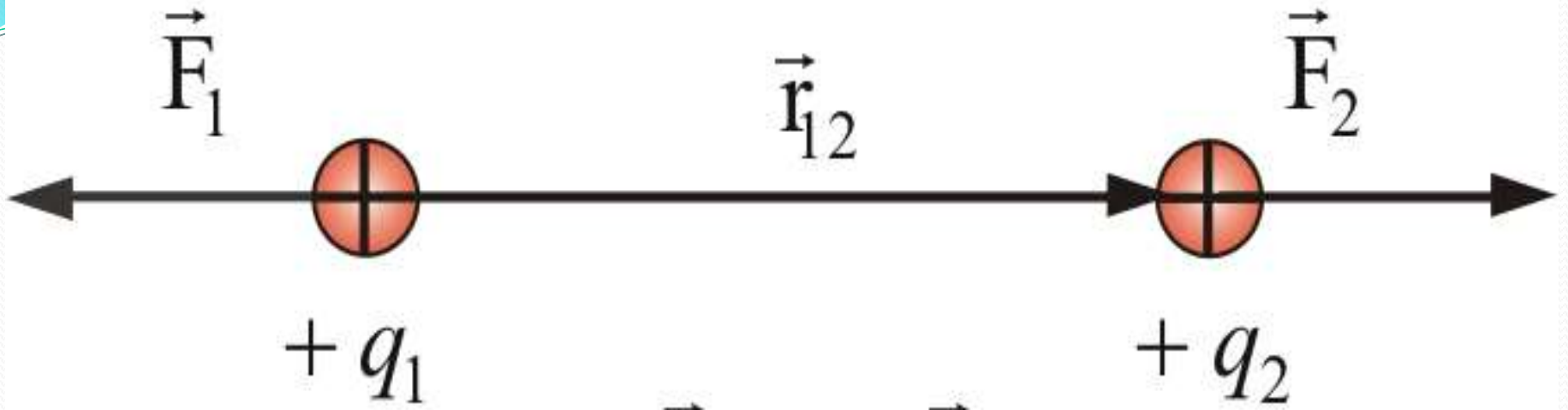
Закон Кулона: сила взаимодействия точечных зарядов в вакууме пропорциональна величине зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

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

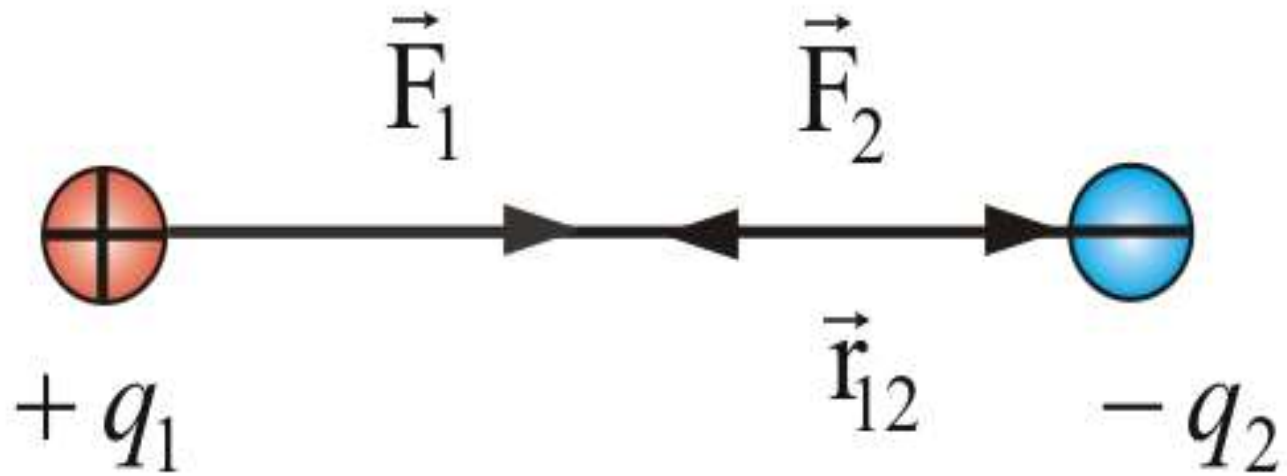


$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^3} \cdot \Delta\vec{r}$$





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



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

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.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \Rightarrow \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{|q_1||q_0|}{r^2} \cdot \Delta\vec{r} \cdot \frac{1}{|q_0|}$$

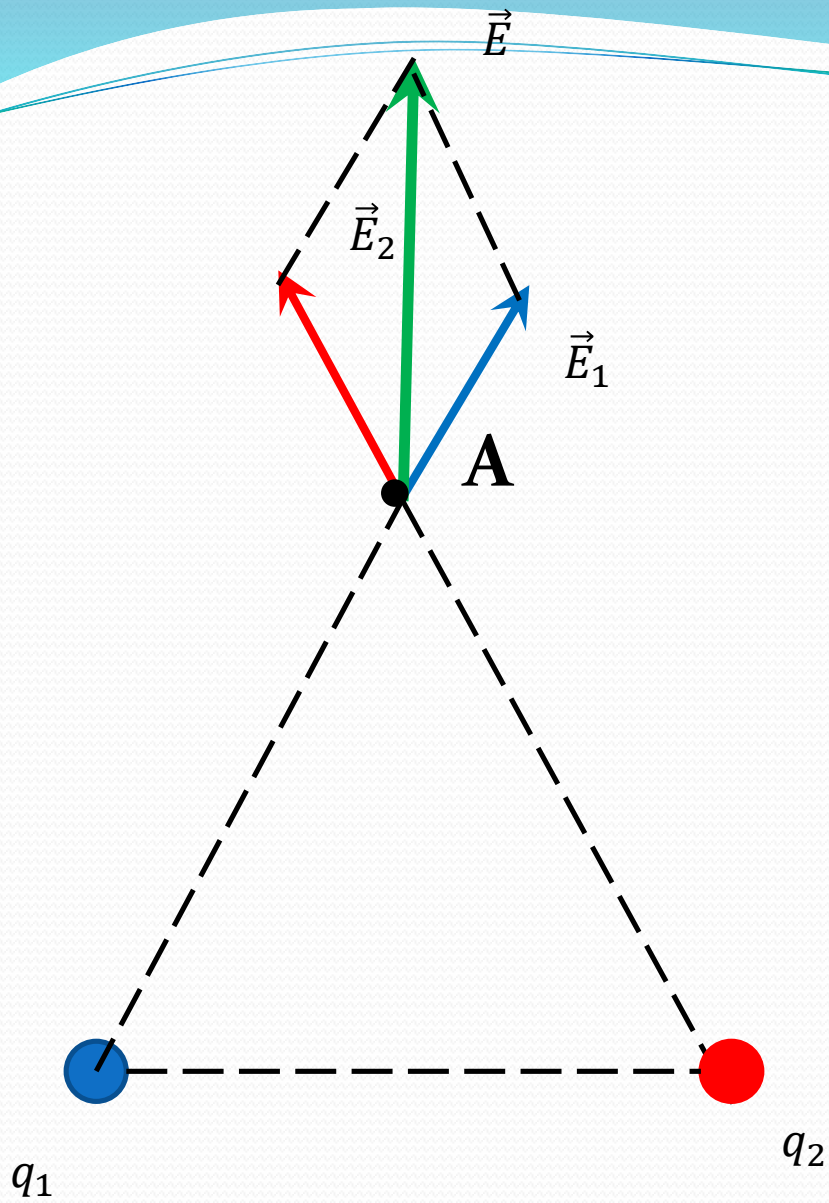
$$\Rightarrow \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{|q_1|}{r^2} \cdot \Delta\vec{r}$$

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

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

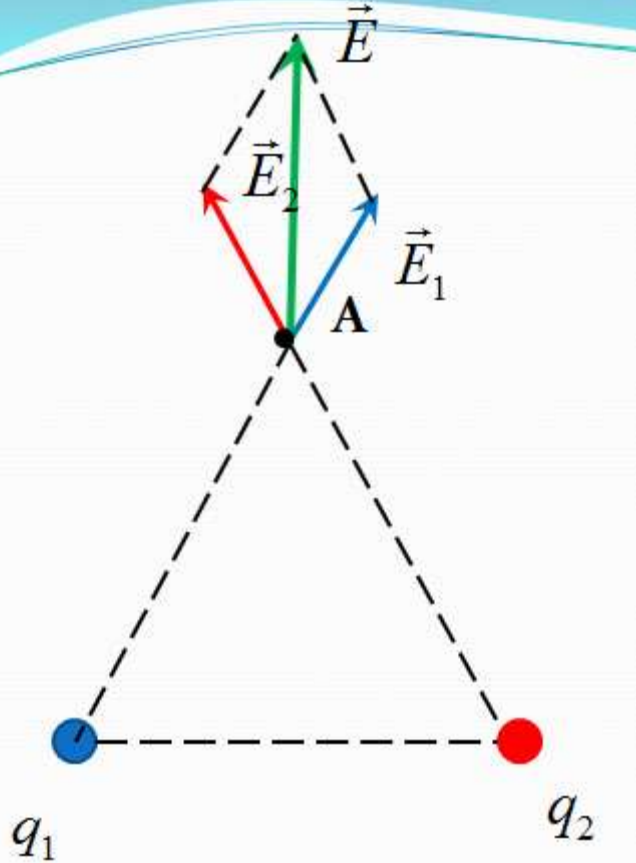
Принцип суперпозиции полей: напряженность результирующего поля, системы точечных зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, созданных в данной точке каждым из них в отдельности, т.е.

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



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

Как определить значение (модуль) напряженности электрического поля?



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

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

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

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

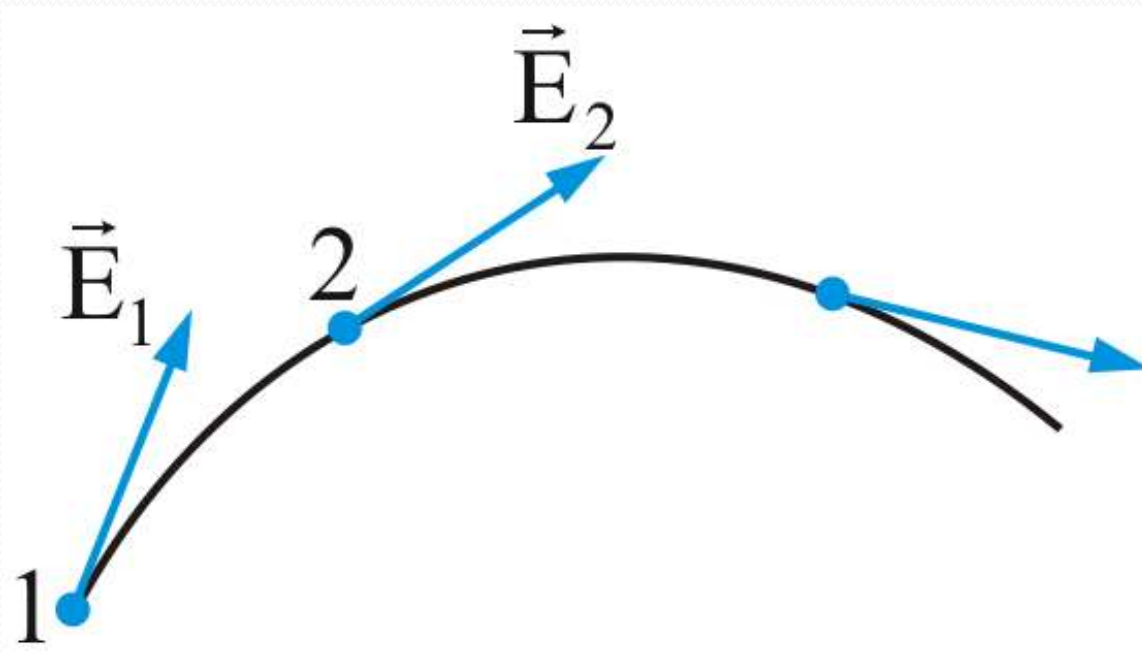
Если поле создается *не точечными зарядами*, то:

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

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

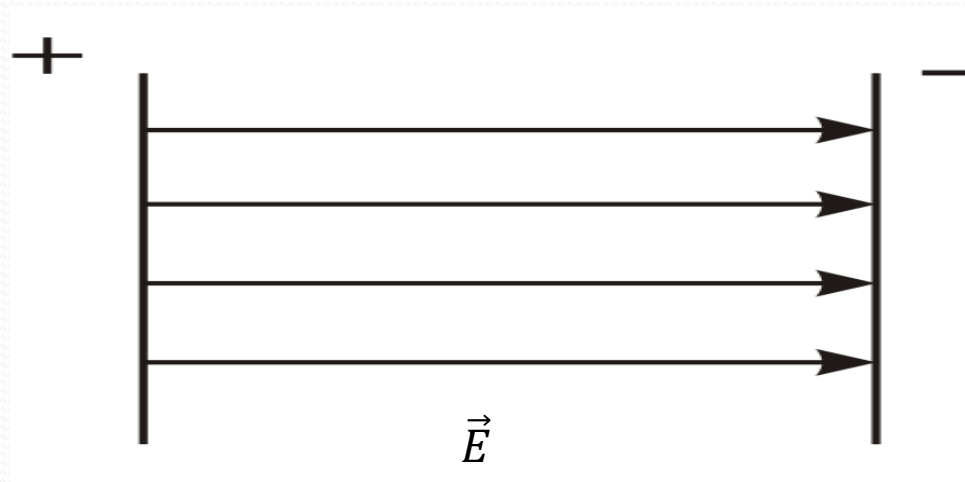
где $d\vec{E}$ – напряженность поля, обусловленная заряженным элементом. Интеграл может быть линейным, по площади или по объему в зависимости от формы тела.

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

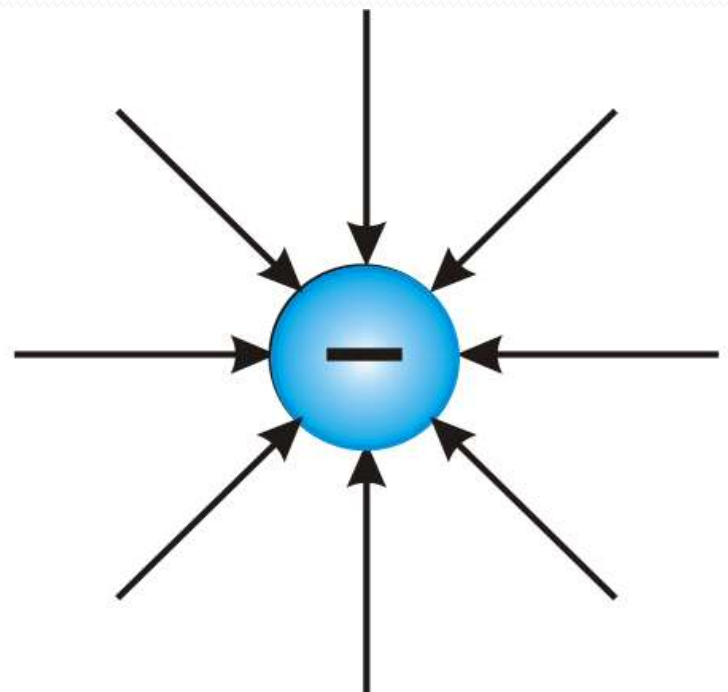
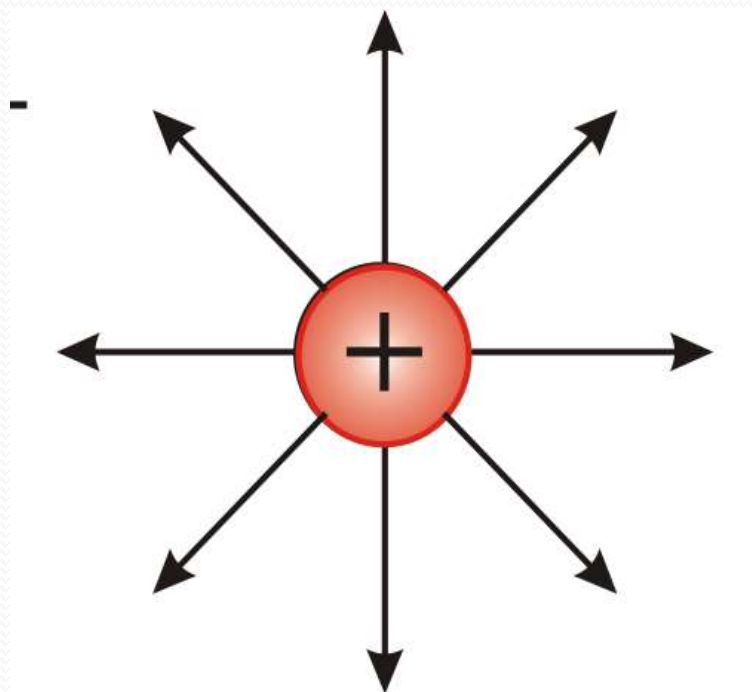


Опр. Однородное электрическое поле - электростатическое поле, во всех точках которого напряженность одинакова по величине и направлению.

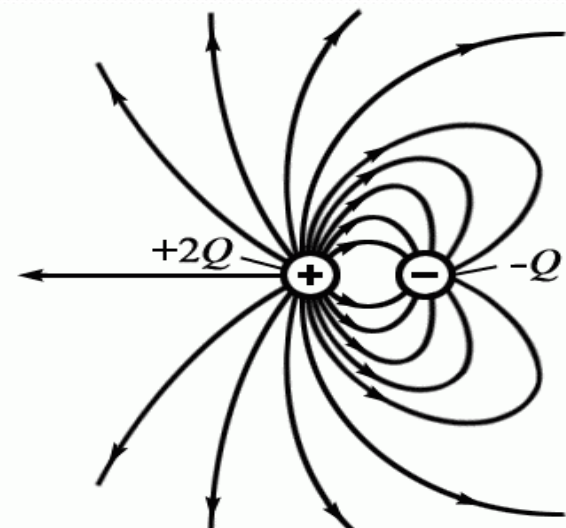
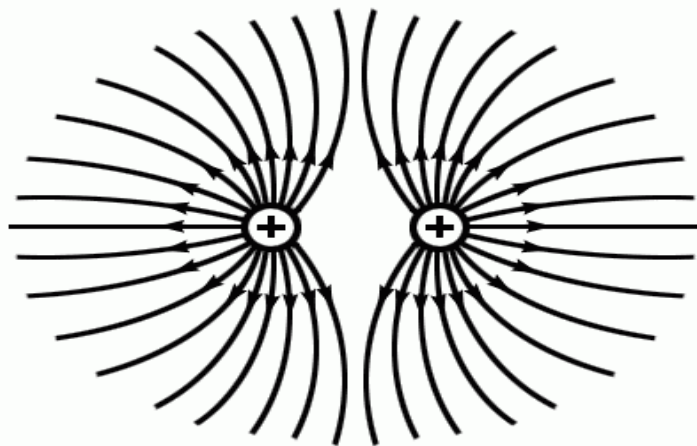
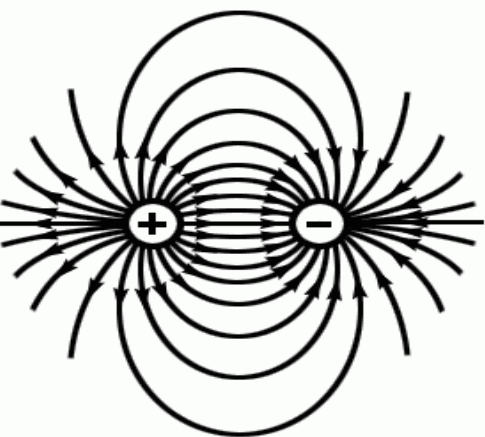
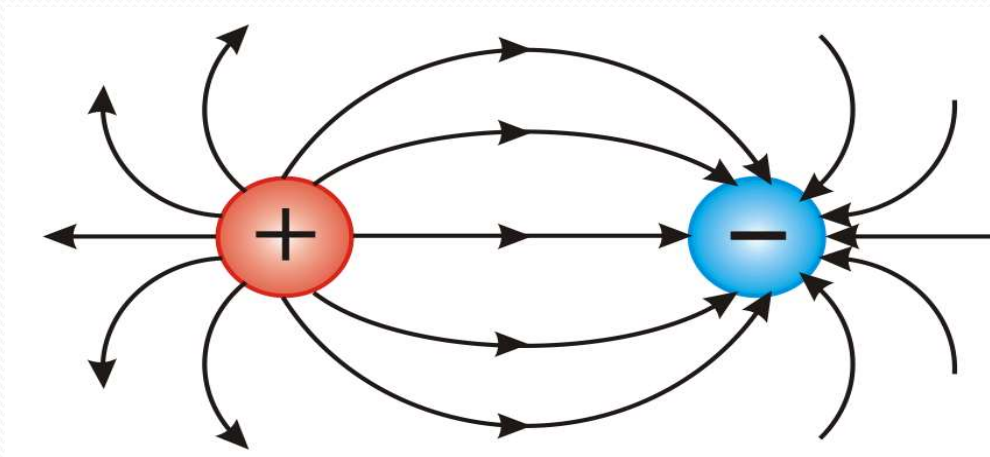
Однородное электростатическое поле изображается параллельными силовыми линиями на равном расстоянии друг от друга



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



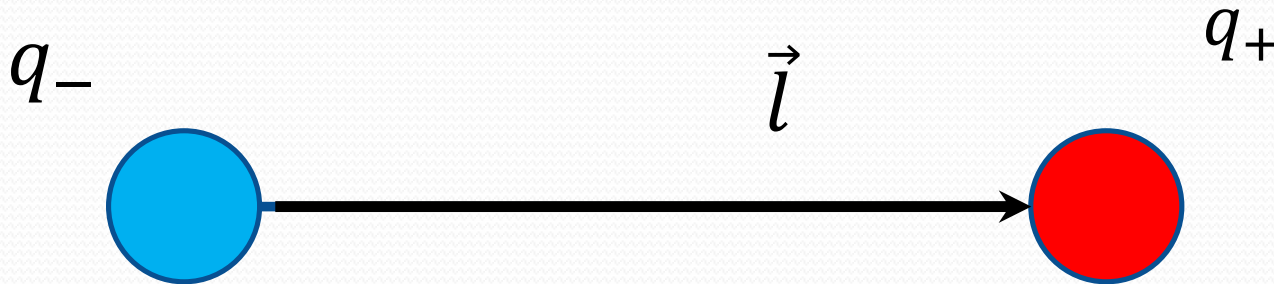
Опр. Диэлектрики – вещества, практически не проводящие электрического тока

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

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

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



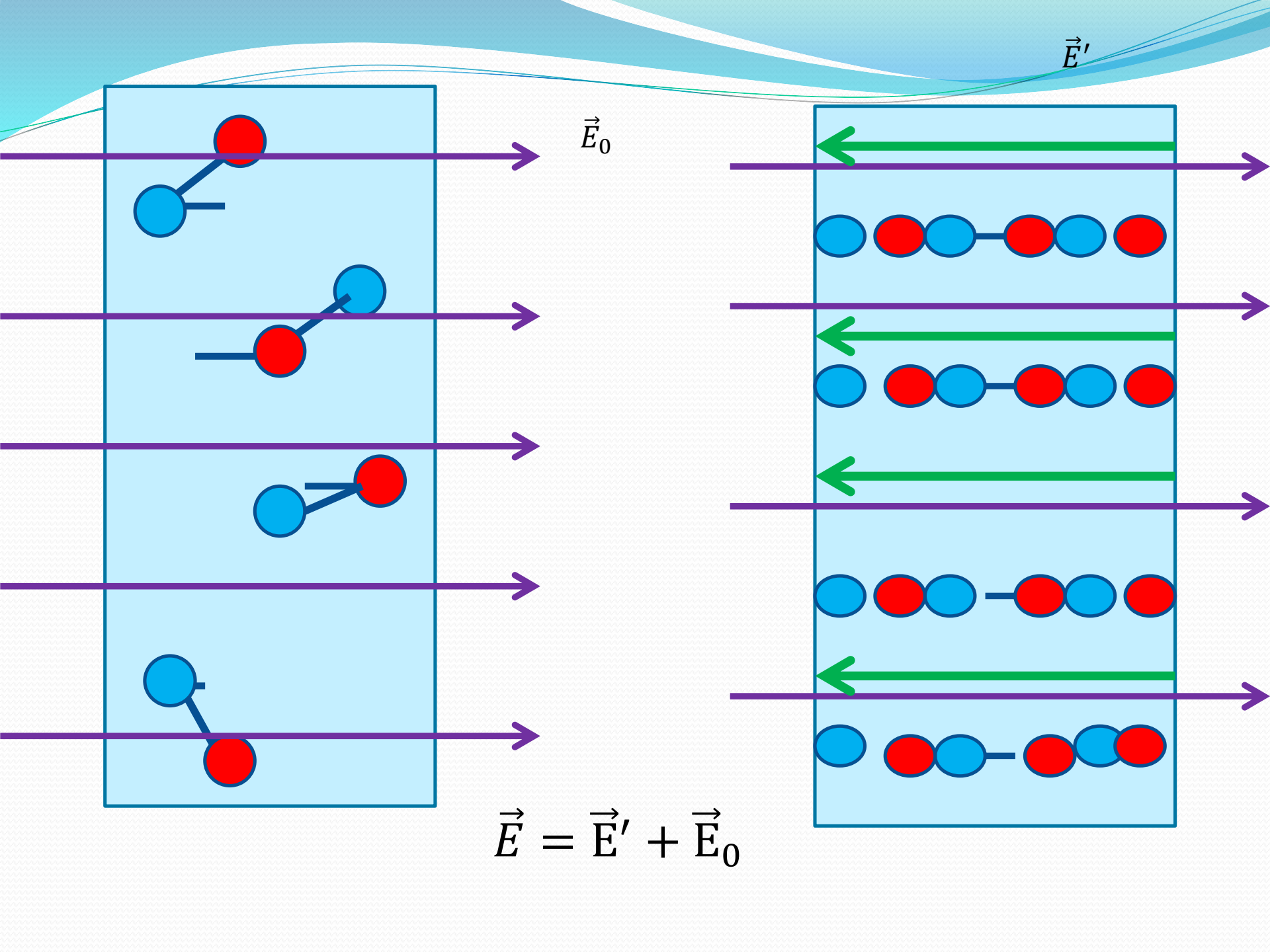
4.3. Электрическое поле в диэлектрике.

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)

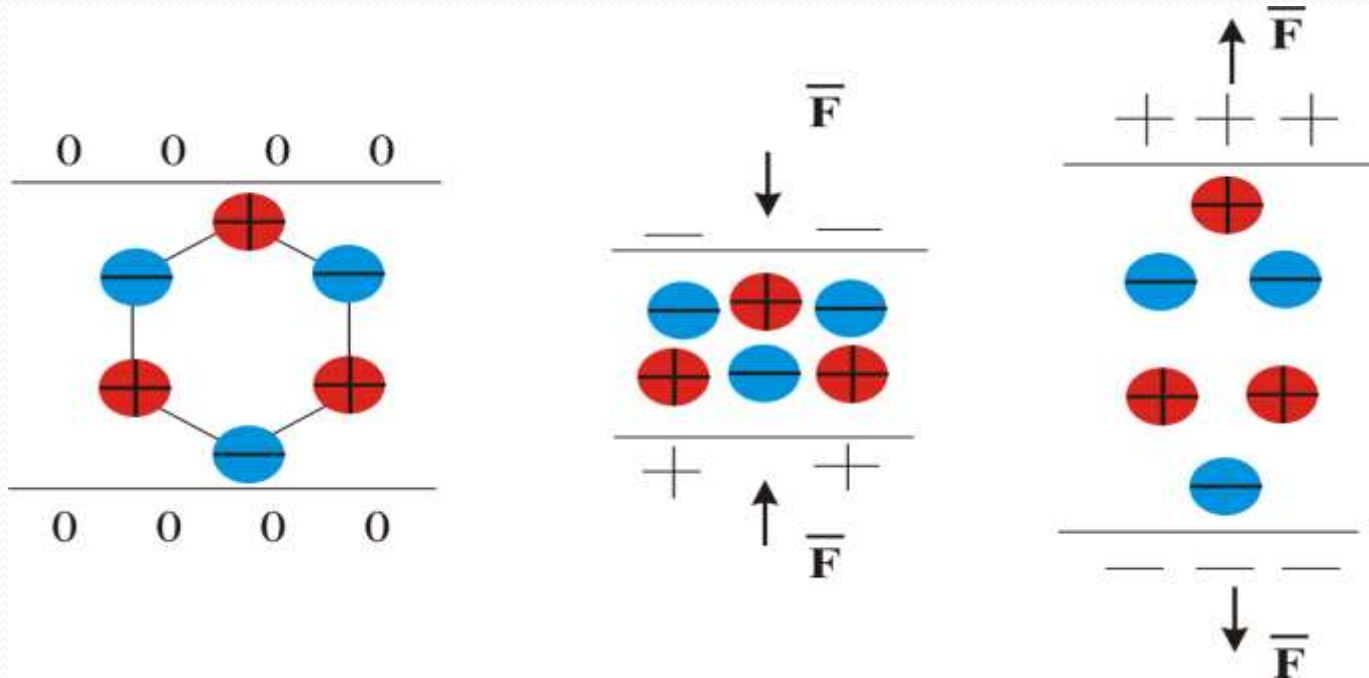
Опр. Неполярные диэлектрики – диэлектрики, в молекулах которых центры тяжести отрицательного заряда совпадают с центрами тяжести положительного заряда

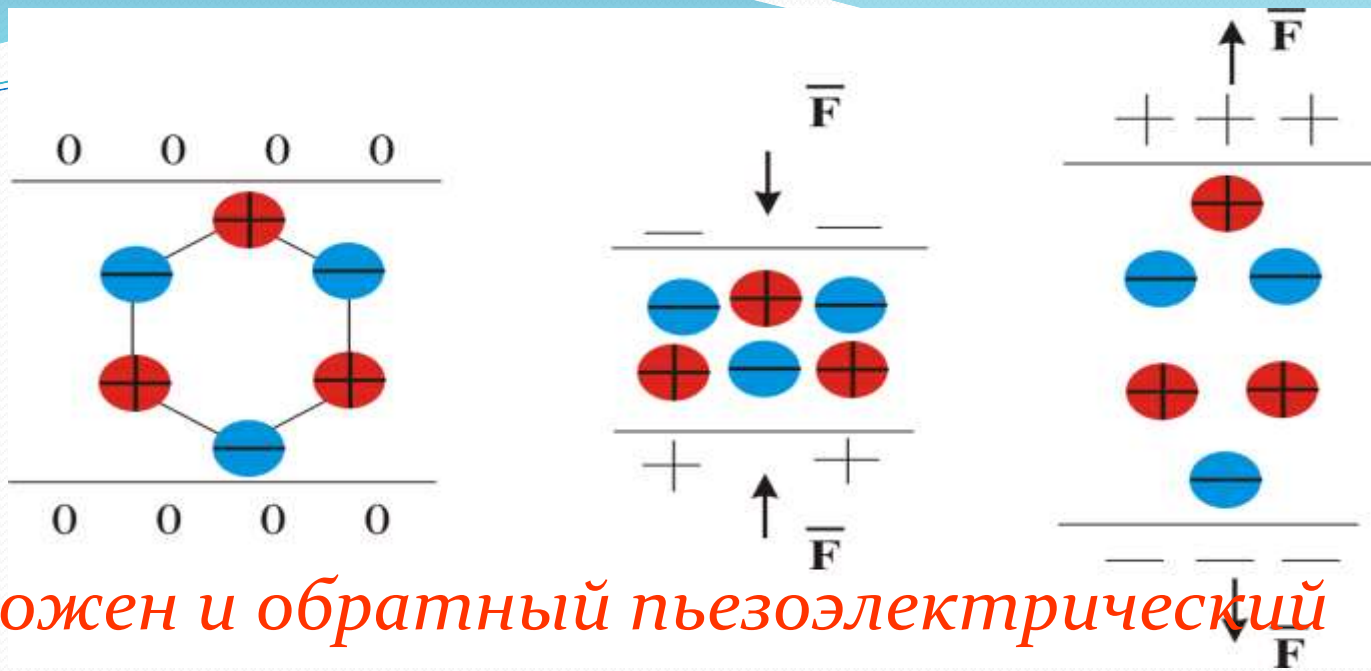
Опр. Поляризация – ф.я., при котором наблюдается смещение электрических зарядов в молекулах диэлектрика против внешнего электрического поля



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.





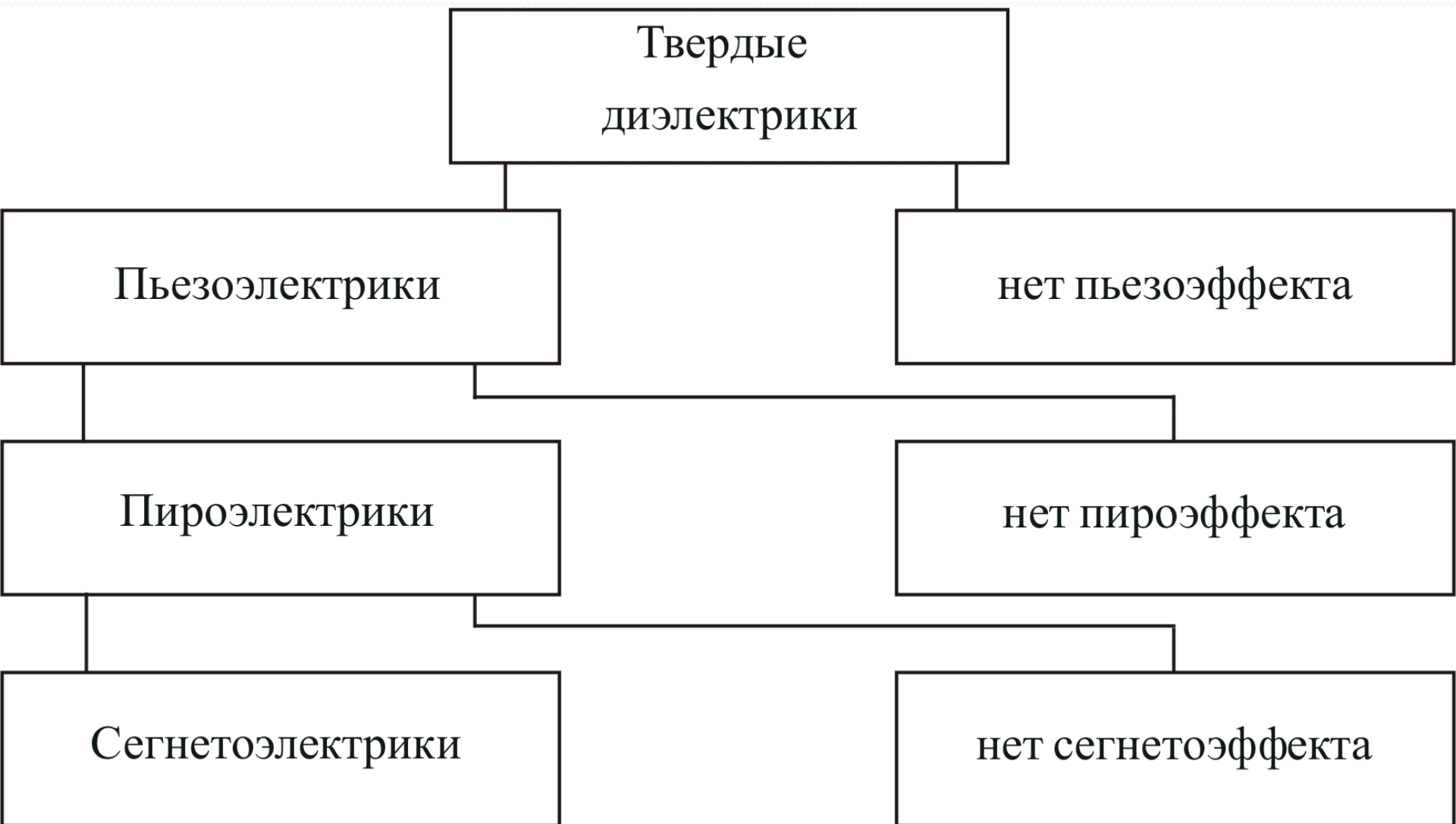
Возможен и обратный пьезоэлектрический эффект:

- 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 пирозэлектрики являются пьезоэлектриками, но не наоборот. Некоторые пирозэлектрики 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.

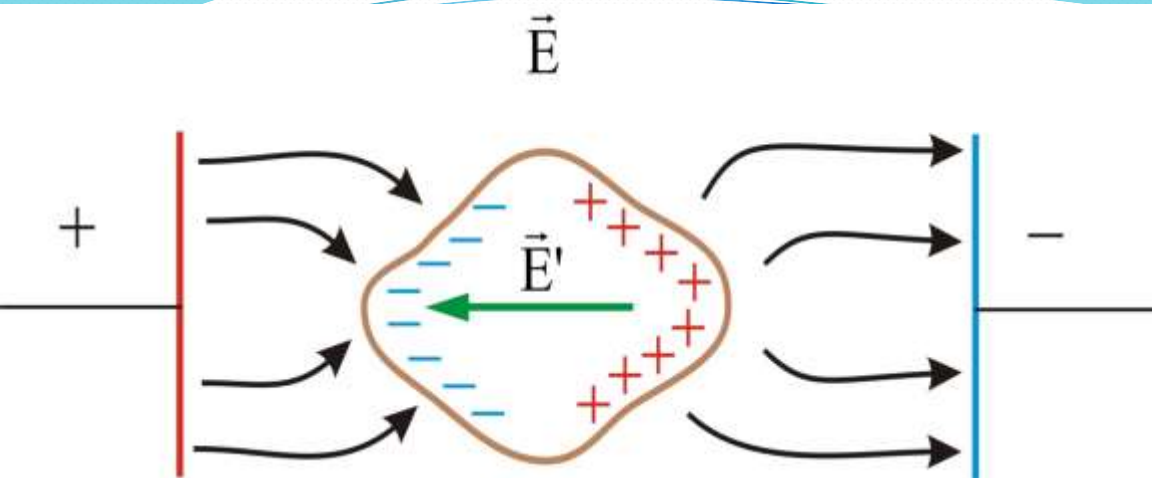
4.4. Напряженность и потенциал электростатического поля в проводнике

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_{τ} , 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 ϕ . Но если этот же заряд сообщить другому проводнику, то потенциал будет другой. Это зависит от геометрических параметров проводника. Но в любом случае, потенциал ϕ пропорционален заряду q .

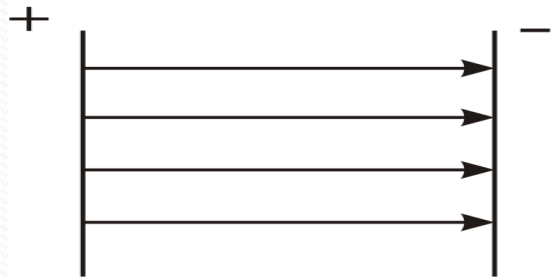
$$q = C\phi$$

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

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

ϵ – 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.

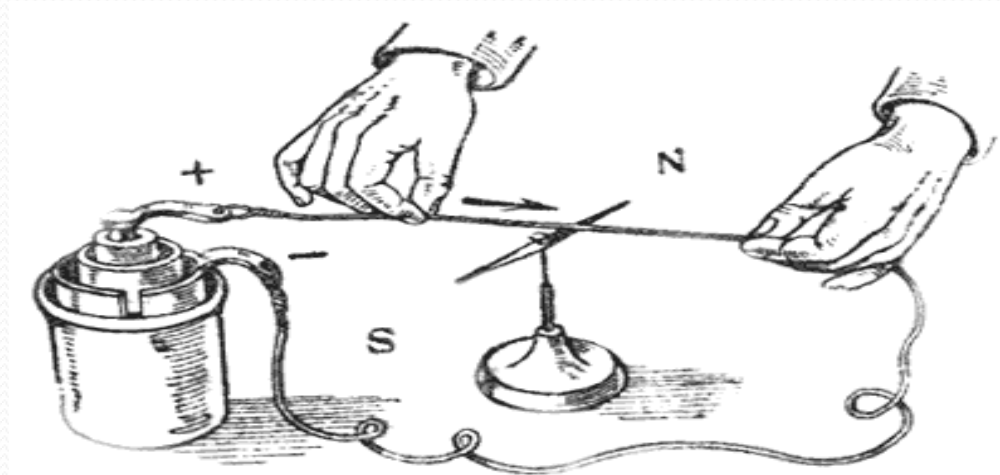
В пределах электростатики дать ответ на этот вопрос невозможно. Поля и заряды, их образовавшие не могут существовать обособленно. Их не разделить. Однако переменные поля могут существовать независимо от возбуждавших их зарядов (излучение солнца, радиоволны, ...) и они переносят энергию. Эти факты заставляют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

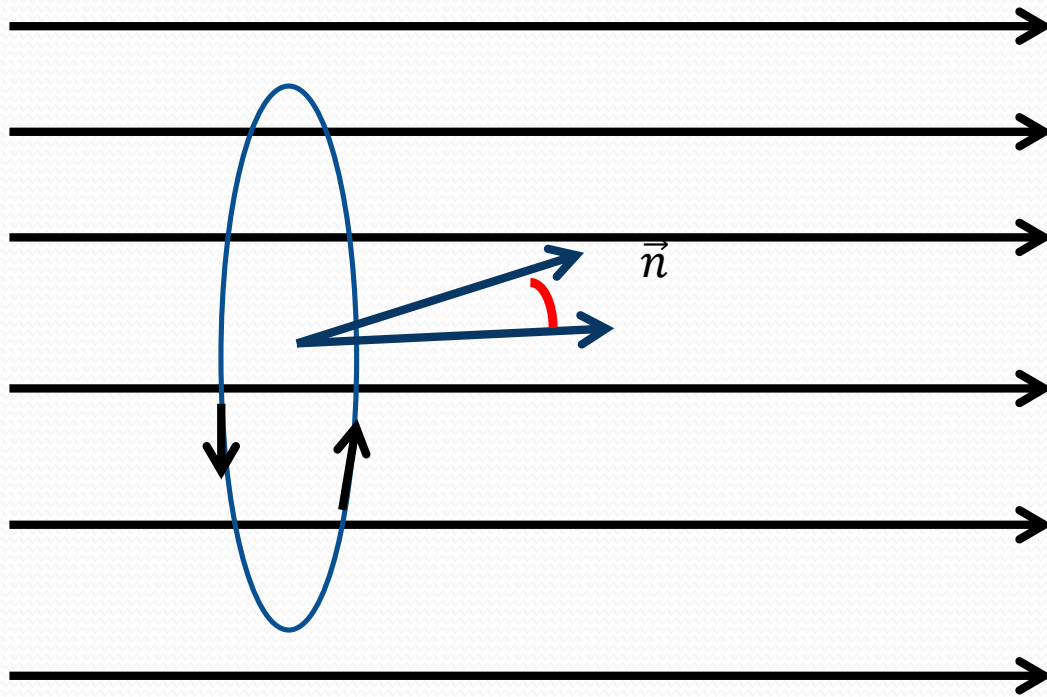


Опыт Эрстеда.

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**

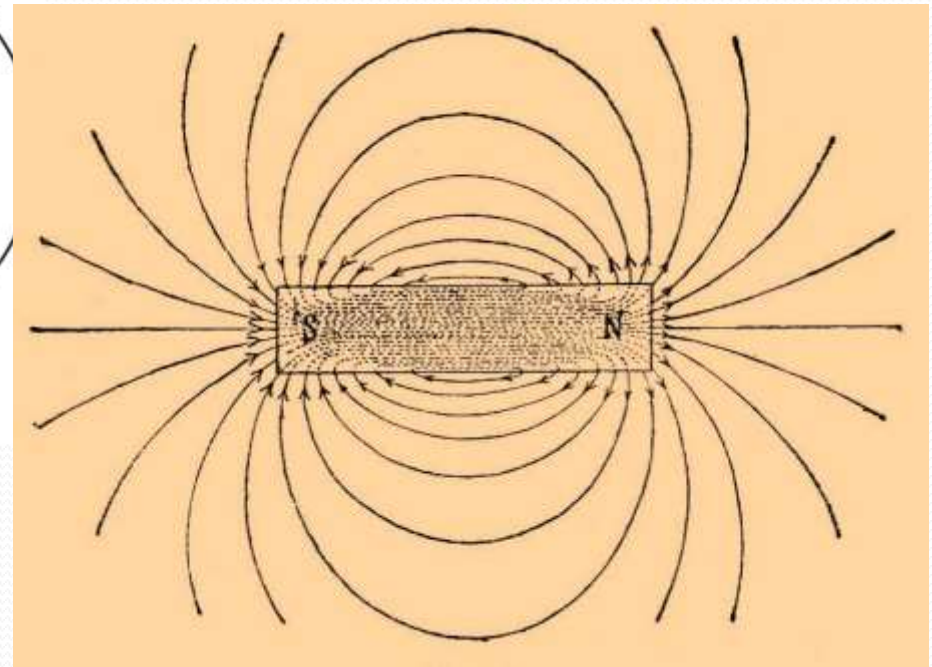
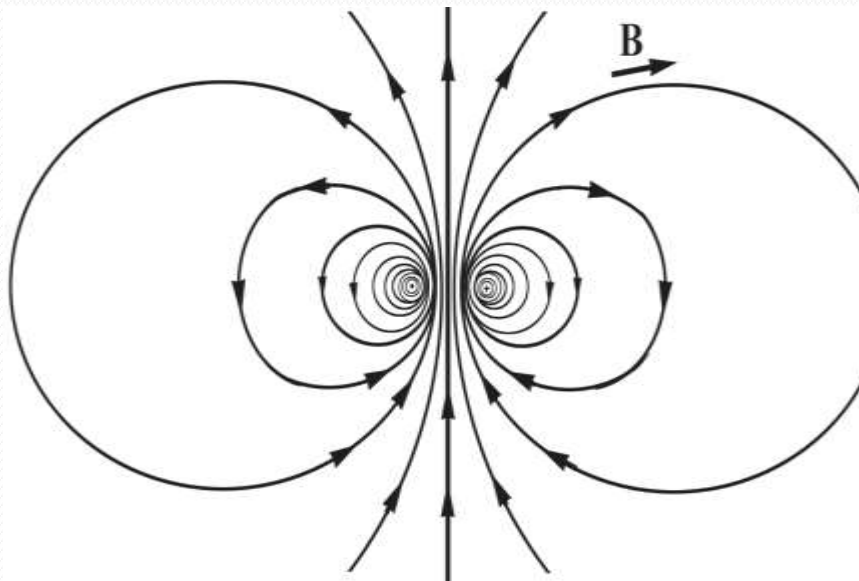
Опр. Магнитная индукция – ф.в., характеризующая вращающий момент сил, действующий со стороны магнитного поля на контур, помещенный в это поле

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

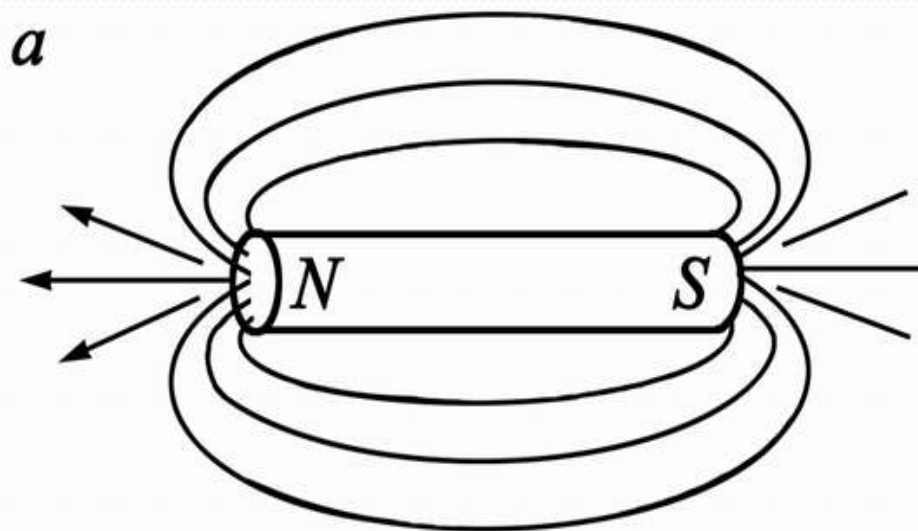
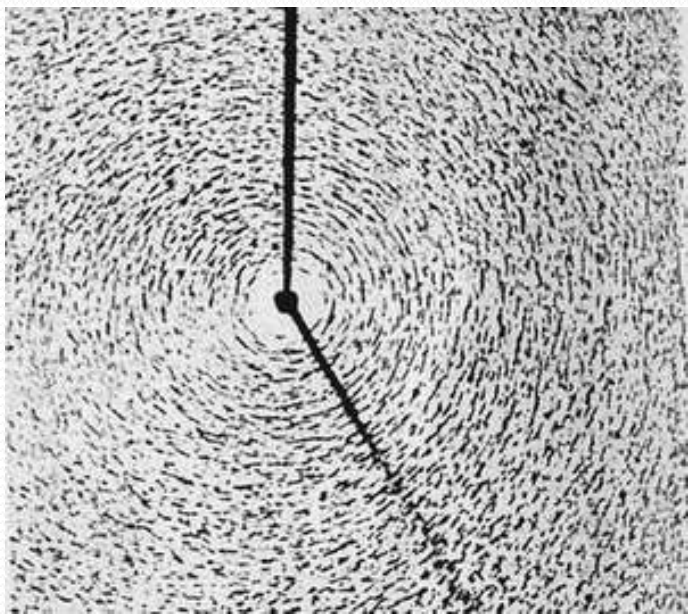
$$|\vec{B}| = \frac{|\vec{M}|}{|\vec{p}_T| \sin(\vec{n}, \vec{B})}$$

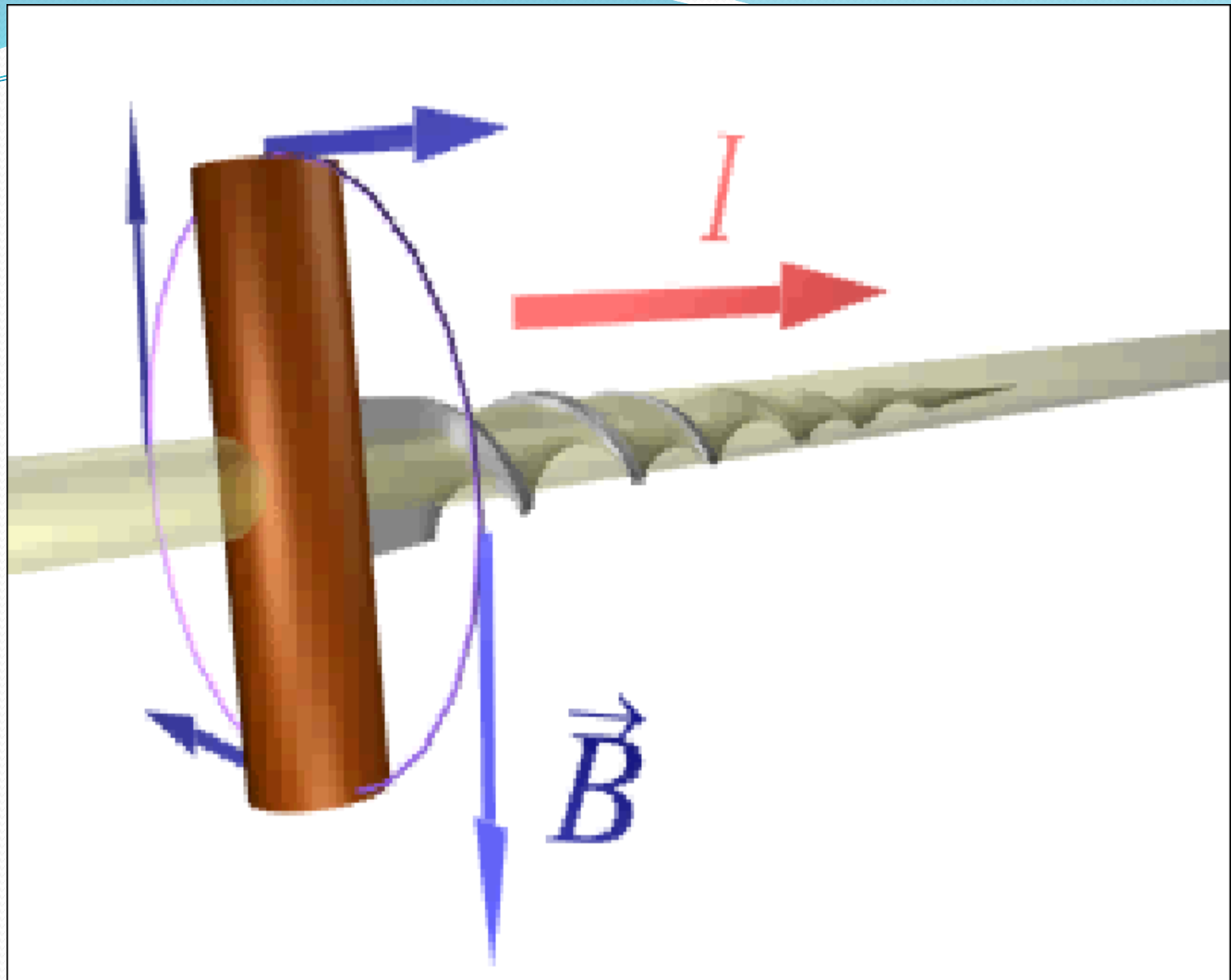
Магнитная индукция \vec{B} характеризует силовое действие магнитного поля на ток

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:

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