

The background features a light blue gradient that transitions from a pale, almost white hue at the top to a deeper blue at the bottom. Scattered across this gradient are numerous water droplets of various sizes. Some droplets are large and prominent, showing clear highlights and shadows that give them a three-dimensional appearance. Others are smaller and more numerous, creating a sense of mist or a fresh atmosphere. The droplets are primarily concentrated in the upper-left and lower-right corners, with a few smaller ones scattered in the center.

Электростатика

Электризация трением

Любые два тела из разного материала при соприкосновении (трение их друг о друга только увеличивает эффект) электризуются



Наэлектризованные тела либо **ОТТАЛКИВАЮТСЯ**, либо **ПРИТЯГИВАЮТСЯ**

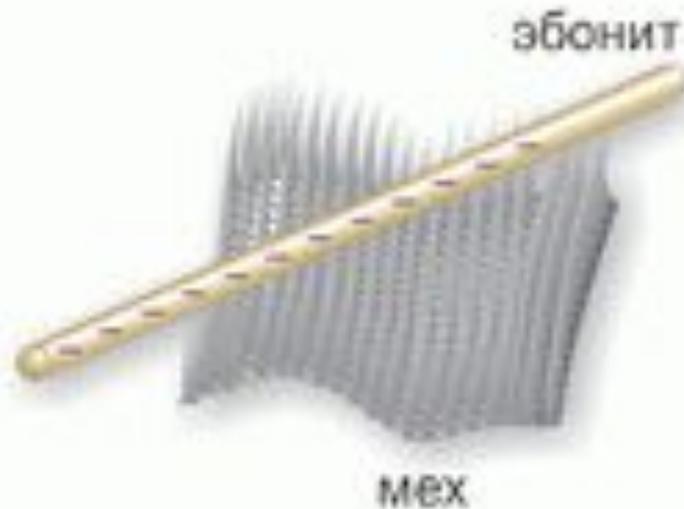
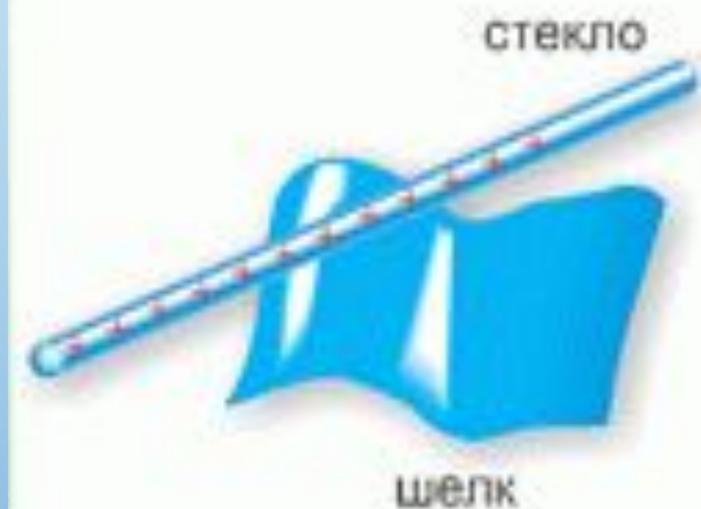


Потертая о бумагу линейка притягивает легкие предметы

электромагнитно
е
взаимодействие

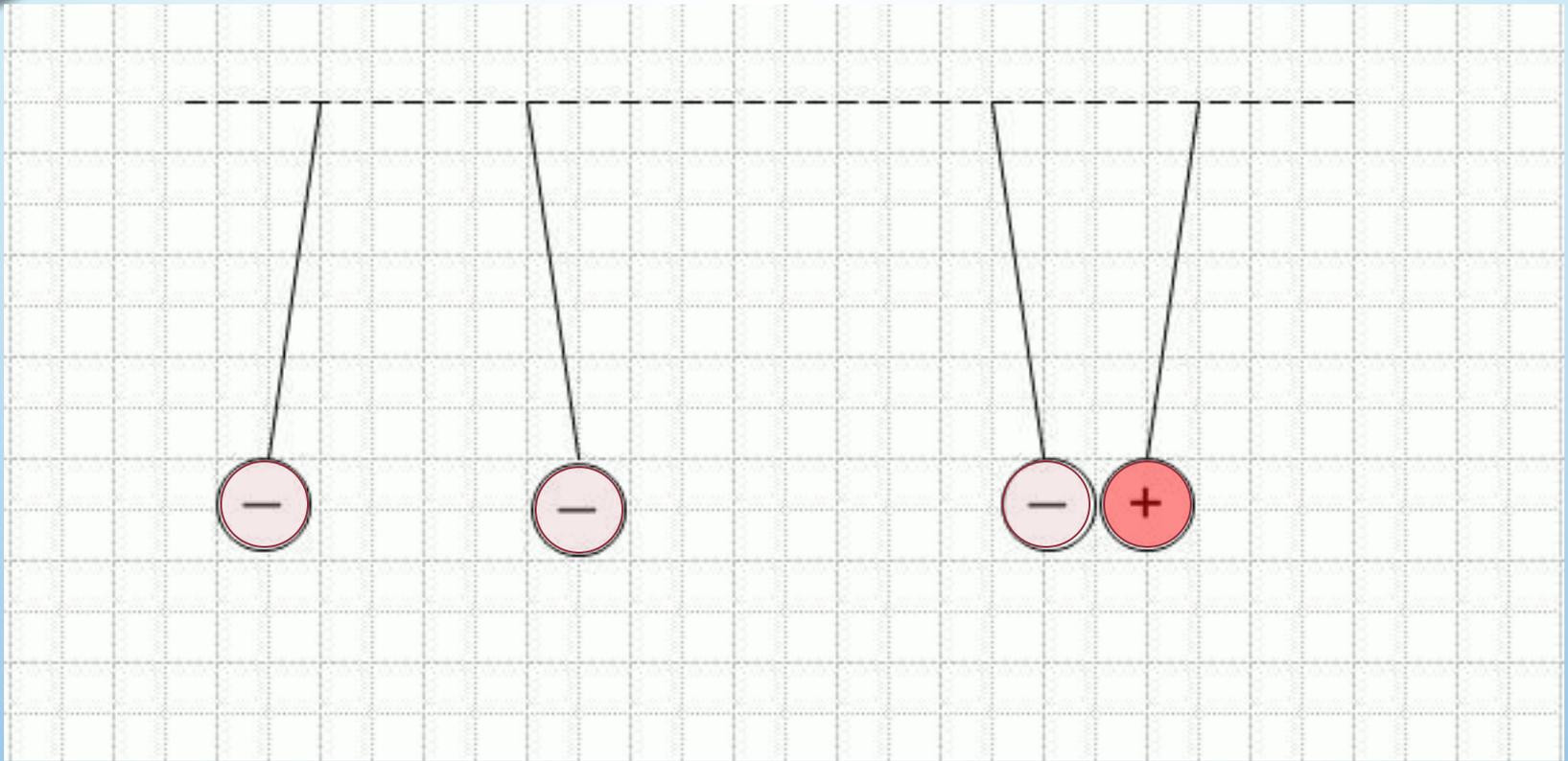
два вида зарядов

Условились!



положительны
й

отрицательны
й



одноименные -
отталкиваются,
разноименные -
притягиваются

Электрический заряд – это физическая величина, характеризующая свойство частиц или тел вступать в электромагнитные силовые взаимодействия.

Обозначение - q или Q

Единица измерения — 1Кл (**Кулон**) = 1А·1с

- Существует два рода электрических зарядов, условно названных **положительными и отрицательными**.
- Одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются.

- Элементарный электрический заряд

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

заряд электрона $-e$, заряд протона $+e$

- Электрический заряд **дискретен**
(квантован)

где n - целое число.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА

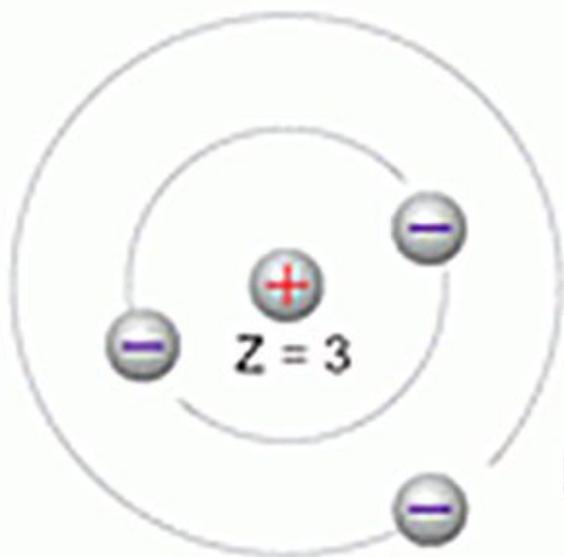
В ИЗОЛИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ СУММА ЗАРЯДОВ ВСЕХ ТЕЛ ОСТАЕТСЯ ПОСТОЯННОЙ

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

Следовательно - в замкнутой системе тел не могут наблюдаться процессы рождения или исчезновения зарядов только одного знака.

Состав атома

Литий



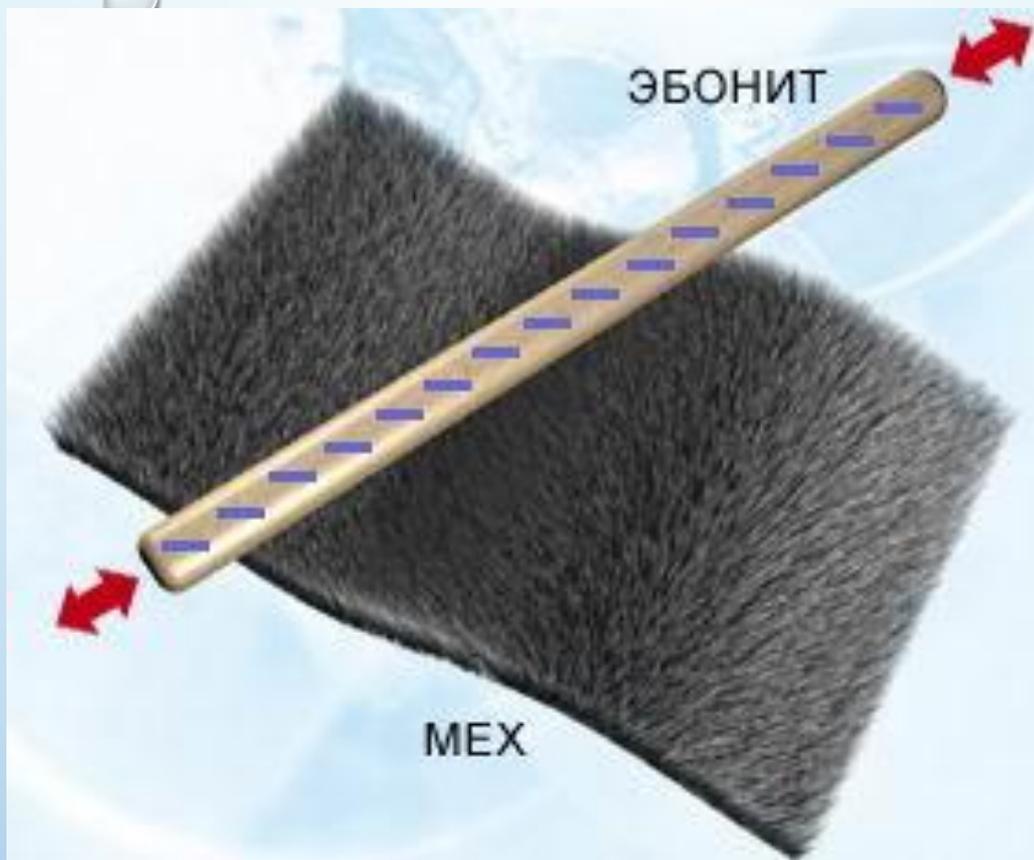
Ядро атома
содержит
 Z протонов

Около ядра
располагается
 Z протонов

Кислород



В нормальном состоянии атом нейтрален

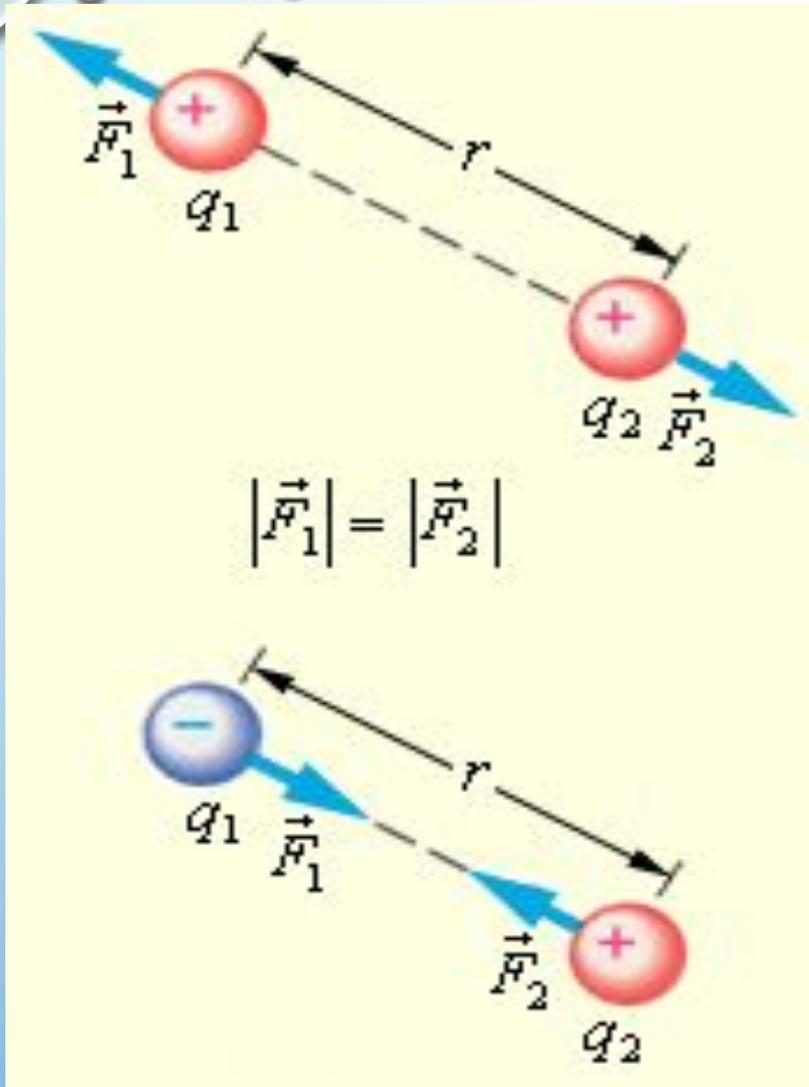


ПРИ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОНЫ ПЕРЕХОДЯТ ОТ
ОДНИХ ТЕЛ К ДРУГИМ

ЗАКОН КУЛОНА

СИЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕПОДВИЖНЫМИ ТОЧЕЧНЫМИ ЗАРЯДАМИ, НАХОДЯЩИМИСЯ В ВАКУУМЕ, ПРЯМО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА ПРОИЗВЕДЕНИЮ МОДУЛЕЙ ЗАРЯДОВ, ОБРАТНО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА КВАДРАТУ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ НИМИ

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



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

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{H} \cdot \text{m}^2}{\text{Kл}^2}$$

Электрическим полем

- называют вид материи, посредством которой происходит взаимодействие электрических зарядов. Характеристики: напряженность и потенциал

- **НАПРЯЖЕННОСТЬ- СИЛОВАЯ**
ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

- **НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО**

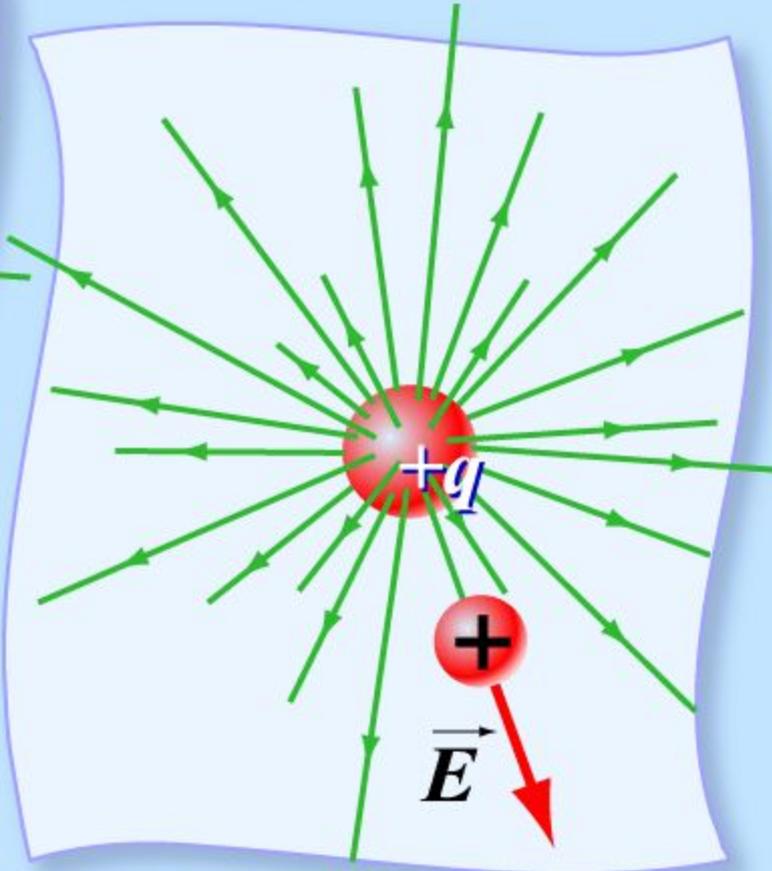
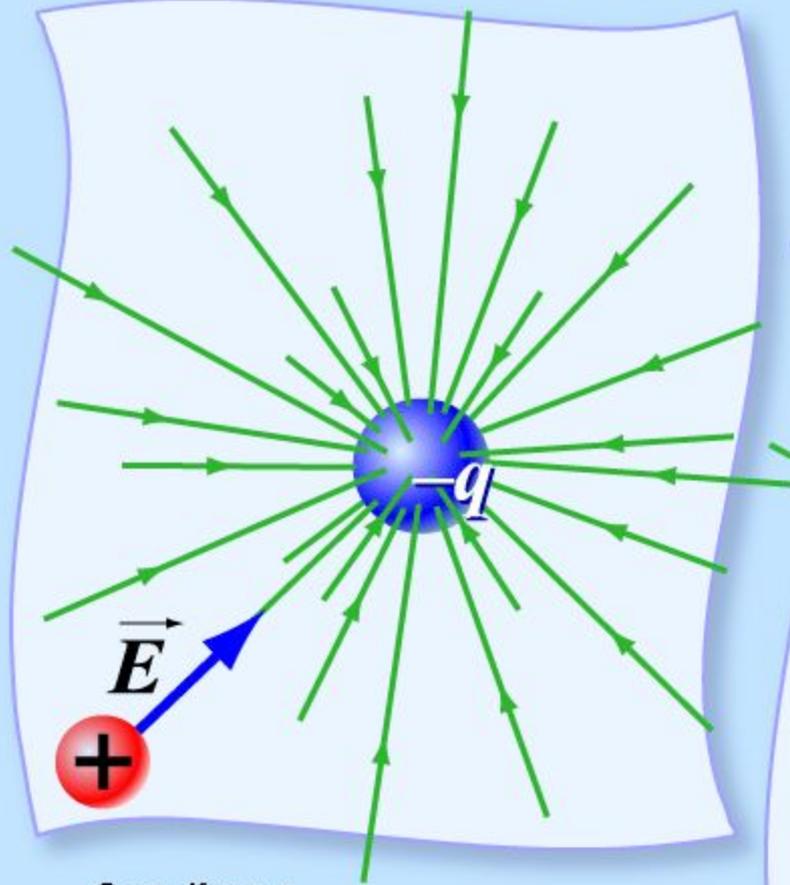
ПОЛЯ В ДАННОЙ ТОЧКЕ ЧИСЛЕННО РАВНА СИЛЕ, С КОТОРОЙ ПОЛЕ ДЕЙСТВУЕТ НА ЕДИНИЧНЫЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ЗАРЯД, ПОМЕЩЕННЫЙ В ЭТУ ТОЧКУ

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

$$\frac{Н}{Кл}; \frac{В}{м}$$

$$E = \frac{k \cdot |q|}{r^2}$$

- **ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ:**
- **НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА:**

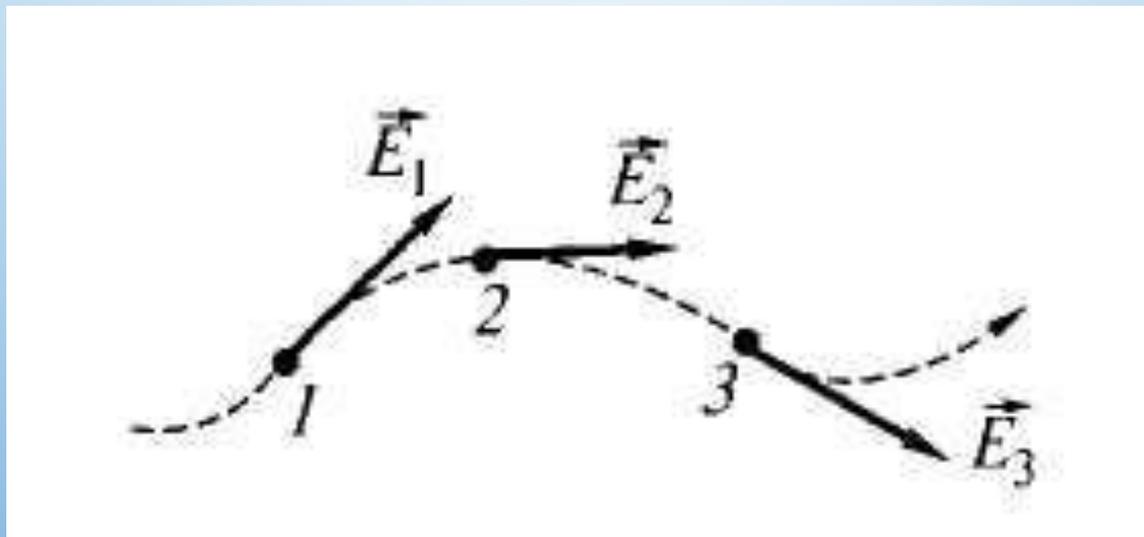


Закон Кулона

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

Линии напряженности

электростатического поля- линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают по направлению с вектором напряженности поля.



ПОТЕНЦИАЛ

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА, РАВНАЯ
ОТНОШЕНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ
ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ
К ЗАРЯДУ, НАЗЫВАЕТСЯ
ПОТЕНЦИАЛОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПОЛЯ

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ЗАРЯДА В
ПОЛЕ РАБОТА СИЛ ПОЛЯ РАВНА
ПРОИЗВЕДЕНИЮ ЗАРЯДА НА
РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ
НАЧАЛЬНОЙ И КОНЕЧНОЙ ТОЧЕК
ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯДА

$$A = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$$

ПОТЕНЦИАЛ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА

$$\varphi = k \cdot \frac{q}{r}$$

The background features a light blue gradient that transitions from a pale, almost white hue at the top to a deeper blue at the bottom. Scattered across this gradient are numerous water droplets of various sizes and shapes. Some droplets are large and prominent, while others are small and delicate. Each droplet is rendered with a realistic effect, showing highlights and shadows that give them a three-dimensional appearance. The droplets are more densely packed in the upper-left and lower-right corners, with fewer and more widely spaced droplets in the center.

Магнитостатика

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

История

4500 лет тому назад изобретен компас. Он появился в Европе приблизительно в XII веке новой эры.

В XIX веке была обнаружена связь между электричеством и магнетизмом - возникло представление о магнитном поле.



1820 г. - опыты датского физика Х. Эрстеда . На магнитную стрелку, расположенную вблизи проводника с током, действуют силы, которые стремятся повернуть стрелку.

Ханс Христиан Эрстед

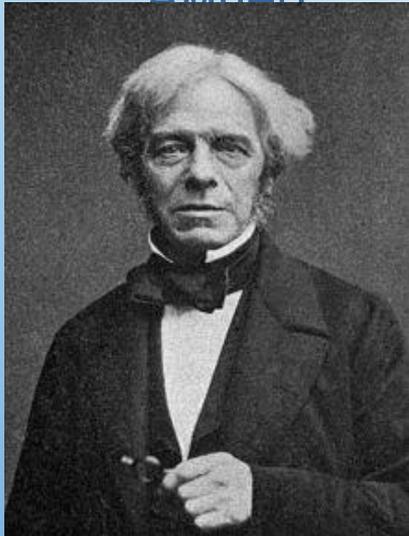
История



1820 г. - французский физик [А. Ампер](#) наблюдал силовое взаимодействие двух проводников с токами и установил закон взаимодействия токов.



Андре-Мари
Ампер



1845 г. - английский физик Фарадей вводит термин магнитное поле.

Майкл
Фарадей

Магнитное и электрическое поля

Магнитное поле токов принципиально отличается от электрического поля:

- источники **электростатического поля** – неподвижные заряды;
- источники **магнитного поля** – движущиеся заряды (токи).

Аналогия

напряженность электрического
поля \vec{E}

силовые линии

напряженность электрического
поля \vec{E}

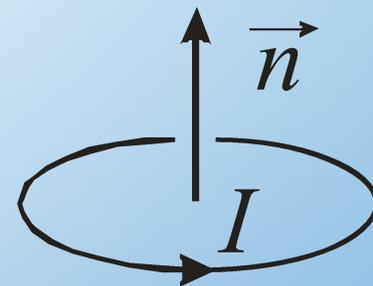
линии магнитной индукции

Исследуем магнитное поле

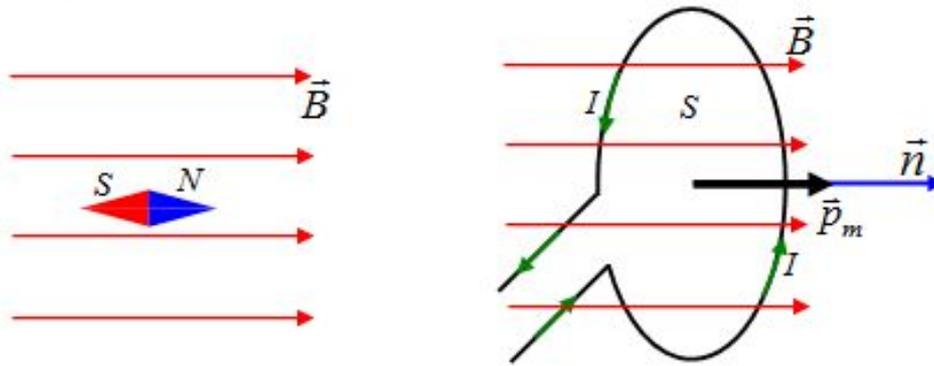
Используем пробный ток, циркулирующий в плоском замкнутом контуре очень малых размеров.

Ориентацию контура в пространстве характеризуют направлением нормали к контуру, связанной с направлением тока правилом правого винта. Такую нормаль мы будем называть положительной.

МП оказывает на контур с током такое же ориентирующее действие, как и на магнитную стрелку: положительная нормаль контура разворачивается в ту же сторону, что и северный полюс магнитной стрелки.



Характеристика рамки с током - магнитный момент: $\vec{p}_m = IS\vec{n}$ (1)



Методы обнаружения магнитного поля:
магнитная стрелка (слева), рамка с током

За направление магнитного поля принято:

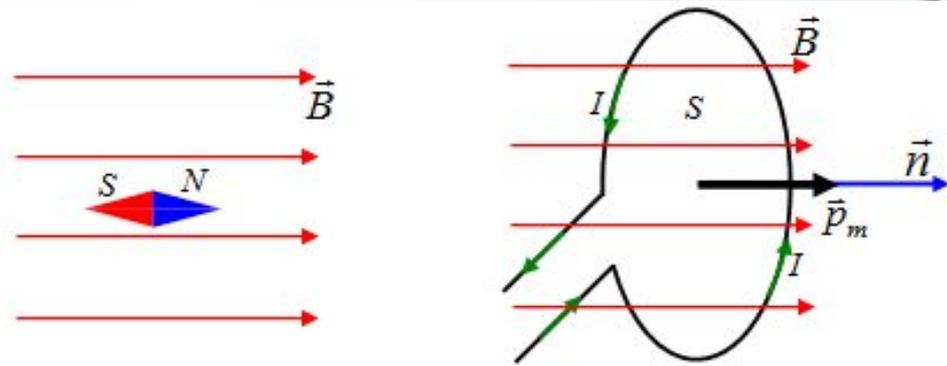
- направление силы, действующей на северный полюс магнитной стрелки;
- направление нормали (вектора магнитного момента рамки с током).

На рамку площадью S с током I действует вращающий момент, зависящий как от свойств поля, так и от свойств рамки

$$\overset{\square}{M} = \left[\overset{\square}{p}_m \times \overset{\square}{B} \right]$$

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}, \text{ Тл (тесла)} \quad (2)$$

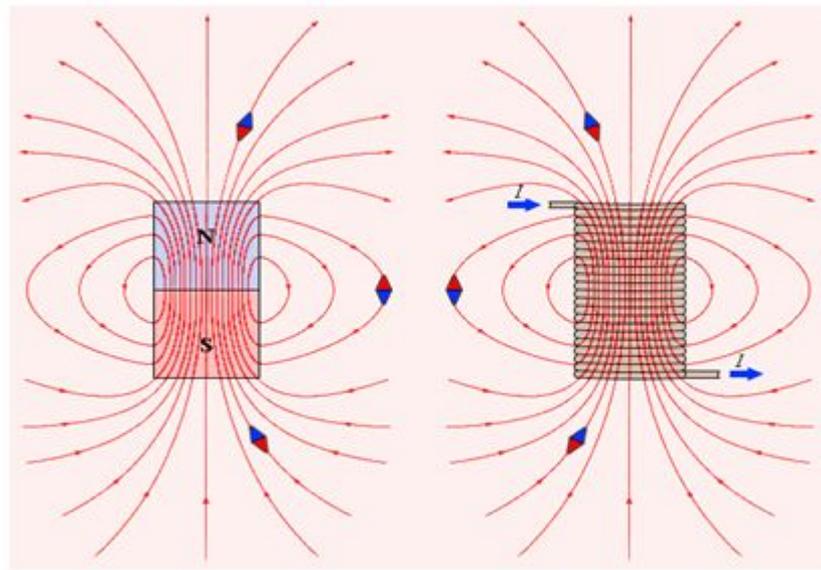
$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}$$



Методы обнаружения магнитного поля:
магнитная стрелка (слева), рамка с током

Магнитная индукция в данной точке однородного магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с единичным магнитным моментом, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля.

Линии магнитной индукции всегда замкнуты, они нигде не обрываются.



Линии магнитной индукции полей постоянного магнита и катушки с током

⇔ магнитное поле не имеет источников – магнитных зарядов

Силовые поля, обладающие этим свойством, называются вихревыми в отличие от потенциальных полей (электростатического, гравитационного).

Для электростатического поля

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}$$

напряженность электрического
поля \vec{E}

напряженность электрического
поля \vec{E}

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$$

(3)

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ – магнитная постоянная;

μ – магнитная проницаемость среды...

2 УЧЕБНЫЙ ВОПРОС: ЗАКОН БИО – САВАРА – ЛАПЛАСА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.

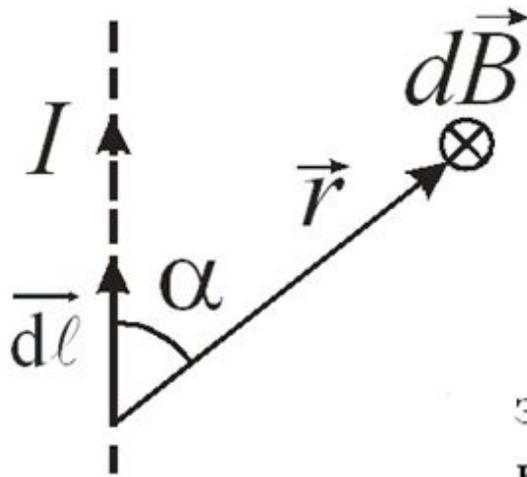
Био и Савар в 1820 г. исследовали магнитные поля, токов, текущих по тонким проводам различной формы. Лаплас на основе экспериментальных данных установил принцип суперпозиции.

Для магнитной индукции поля, создаваемого элементом тока длины $d\vec{\ell}$ имеем:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{\ell} \times \vec{r}}{r^3}$$

(4)

μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м



$d\vec{\ell}$ – вектор, совпадающий с элементарным участком тока и направленный в ту сторону, в какую течет ток.

\vec{r} – вектор, проведенный от элемента тока в ту точку, в которой определяется $d\vec{B}$.

Направление вектора $d\vec{B}$ можно определить по **правилу буравчика**: кратчайший поворот буравчика от $d\vec{\ell}$ к \vec{r} приведёт к поступательному перемещению буравчика в сторону $d\vec{B}$.

Для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции:

магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами, равна векторной сумме магнитных индукций складываемых полей, создаваемых каждым током в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_i \Delta \vec{B}_i$$

или, переходя от малого к бесконечно малому элементу тока

$$\Delta l \rightarrow dl$$

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

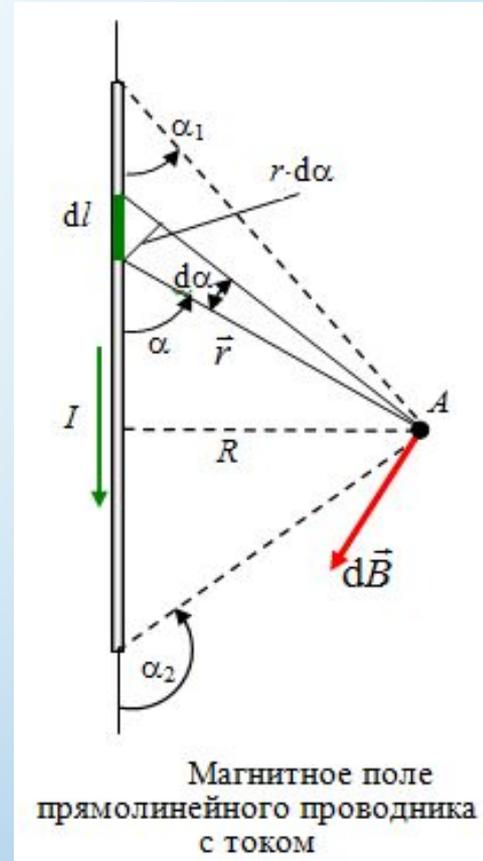
(5)

2.1. Поле прямолинейного проводника с током

$$r = \frac{R}{\sin\alpha} \quad dl = \frac{rd\alpha}{\sin\alpha} = \frac{Rd\alpha}{\sin^2\alpha}$$

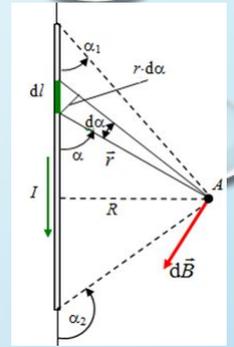
Магнитное поле, создаваемое
прямолинейным отрезком провода с током I
в произвольной точке A

$$\begin{aligned} dB &= \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \frac{I \cdot dl \cdot \sin\alpha}{r^2} = \\ &= \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \frac{I \cdot \frac{Rd\alpha}{\sin^2\alpha} \cdot \sin\alpha}{\left(\frac{R}{\sin\alpha}\right)^2} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \frac{I}{R} \sin\alpha d\alpha \end{aligned}$$



$$dB = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} \sin \alpha d\alpha$$

С использованием принципа суперпозиции



$$|B| = \int_l dB = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = -\frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} \cos \alpha \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2} = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

$$|B| = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad |H| = \frac{I}{4\pi R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (6)$$

Для бесконечно длинного проводника:

$$\alpha_1 = 0 \quad \alpha_2 = \pi \quad (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = \cos 0 - \cos \pi = 1 - (-1) = 2$$

$$|B| = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi R} \text{ Тл} \quad |H| = \frac{I}{2\pi R} \text{ , } \left[\frac{\text{А}}{\text{м}} \right] \quad (7)$$

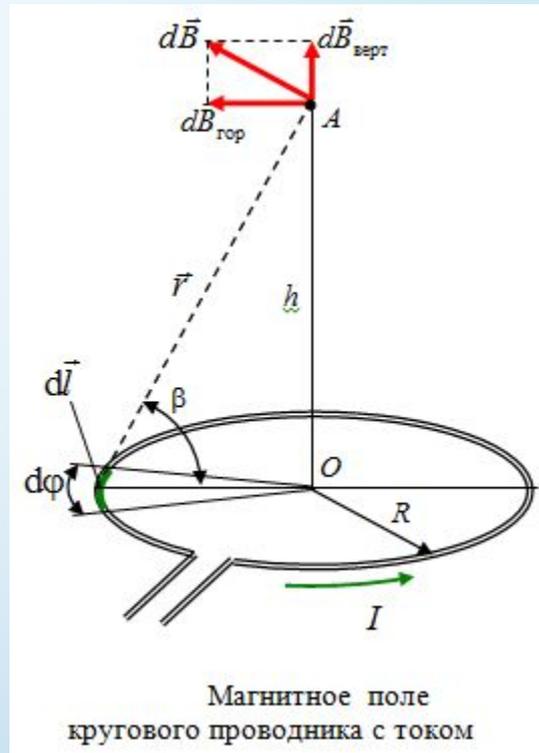
2.2. Поле кругового проводника с током

$$r^2 = R^2 + h^2 \quad \cos \beta = \frac{R}{r} = \frac{R}{(R^2 + h^2)^{1/2}}$$

Магнитное поле, создаваемое
прямолинейным отрезком провода с током
 I в произвольной точке A :

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I \cdot dl \cdot \sin(\overset{\vee}{dl}, \overset{\boxtimes}{r})}{r^2} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I \cdot dl}{(R^2 + h^2)}$$

$$\sin(\overset{\vee}{dl}, \overset{\boxtimes}{r}) = 1$$



При использовании принципа суперпозиции горизонтальные составляющие $dB_{гор}$ взаимно уничтожаются, вертикальные составляющие $dB_{вер}$ дают

$$|B| = \int_0^{2\pi R} dB_{верт} = \int_0^{2\pi R} dB \cos \beta = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I \cdot dl}{R^2 + h^2} \frac{R}{(R^2 + h^2)^{1/2}} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I \cdot R}{(R^2 + h^2)^{3/2}} 2\pi R$$

$S = \pi R^2$ - площадь витка;

$$p_m = I \cdot S$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2p_m}{(R^2 + h^2)^{3/2}}$$

$$H = \frac{1}{4\pi} \frac{2p_m}{(R^2 + h^2)^{3/2}}$$

(8)

В центре кругового тока ($h = 0$)

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}$$

$$H = \frac{I}{2R}$$

(9)

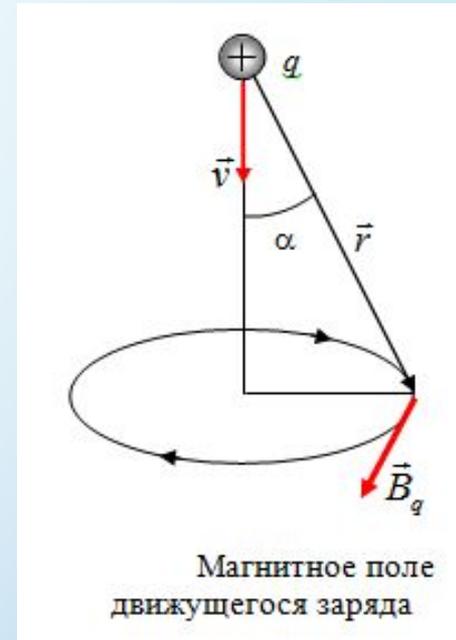
2.3. Поле движущегося заряда

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I \left[d\vec{l} \times \vec{r} \right]}{r^3}$$

напряженность электрического поля \vec{E}

$$I = j S$$

Для зарядов q [Кл], концентрацией n [1/м³], движущихся со скоростью v , плотность тока



$$j = qn \left[\frac{\text{М}}{\text{М}^3} \frac{\text{А}}{\text{с}} \rightarrow, \frac{\text{А}}{\text{М}^2} \right]$$

$$S dl = dV \quad n dV = dn$$

$$I d\vec{l} = j \cdot S \cdot d\vec{l} = q \cdot n \cdot \vec{v} \cdot S \cdot d\vec{l} = q \cdot n \cdot \vec{v} \cdot dV = q \cdot \vec{v} \cdot dn$$

$$d\vec{B}_q = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I \left[d\vec{l} \times \vec{r} \right]}{r^3} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{q dn \left[\vec{v} \times \vec{r} \right]}{r^3}$$

Магнитная индукция одного заряда

$$\vec{B}_q = \frac{d\vec{B}_q}{dn} = \frac{\mu_0 \mu q}{4\pi} \frac{[\vec{v} \times \vec{r}]}{r^3}$$

$$B_q = \frac{\mu_0 \mu q \cdot v \cdot \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

(10)

3 УЧЕБНЫЙ ВОПРОС: ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ. СИЛА АМПЕРА.

Сила, действующая со стороны магнитного поля на проводник с током, называется **силой Ампера**.

$$d\vec{F}_A = I(d\vec{\ell} \times \vec{B}) \quad (11)$$

модуль этой силы:

$$|d\vec{F}_A| = I dl B \sin \alpha$$

$$\alpha = \angle d\vec{\ell} \vec{B}$$

Определить направление Силы Ампера можно по двум правилам:

- правило левой руки;
- правило буравчика.

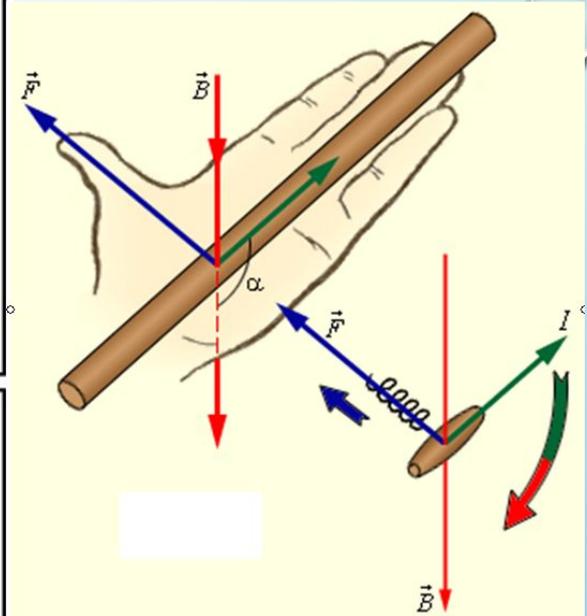
Направление силы Ампера

Правило левой руки

Если расположить левую руку так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник.

Правило буравчика (правого винта)

Воображаемый буравчик располагается перпендикулярно плоскости, содержащей вектор магнитной индукции и проводник с током, затем его рукоятка поворачивается от направления тока к направлению вектора магнитной индукции. Поступательное перемещение буравчика показывает направление силы Ампера



Сила Ампера – нецентральная сила (в отличие от центральных сил (Кулона, тяжести и др.).

При $\alpha = \pi/2$ $F = I \cdot l \cdot B \Rightarrow$

$$B = \frac{F}{I \cdot l} \quad 1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{м}^2}$$

В системе единиц СИ за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н. Эта единица называется тесла (Тл).

Магнитное поле Земли приблизительно равно $0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл.
Большой лабораторный электромагнит может создать поле не более 5 Тл.

Взаимодействие параллельных проводников с током

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1}{d} \quad F_2 = I_2 B_1 l_2 \sin\alpha = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2 l_2}{d}$$

При $I_1 = I_2 = I$ $F_1 = F_2 = F$

$$F = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2 l}{d} \quad (12)$$

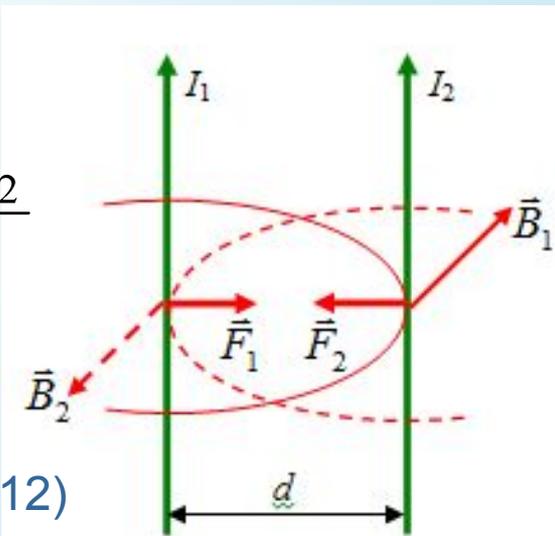


Схема взаимодействия параллельных проводников с током

Эталон единицы силы тока:

1Ампер – это сила постоянного тока при длине проводников и расстоянию между ними в 1 м в вакууме, равная $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

$$\Rightarrow \mu_0 = \frac{4\pi F d}{2I^2 l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \rightarrow \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}} \rightarrow \frac{\text{Дж}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}} \rightarrow \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \right]$$

4 УЧЕБНЫЙ ВОПРОС: ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЙСЯ ЗАРЯД. СИЛА ЛОРЕНЦА

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}]$$

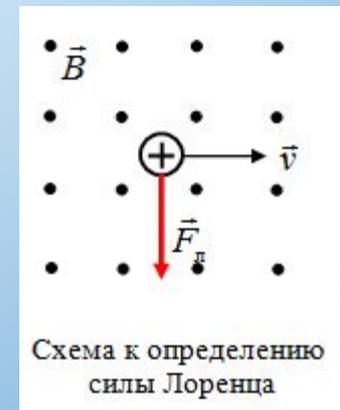
$$Id\vec{l} = q \cdot \vec{v} \cdot dn$$

Сила, действующую на одну заряженную частицу (сила Лоренца)

$$\vec{F}_Л = q [\vec{v} \times \vec{B}] \quad (13)$$

$$F_Л = q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\vec{v}, \vec{B}) = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha \quad (14)$$

Правило левой руки. Если расположить левую руку так, чтобы линии индукции магнитного поля входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль скорости движения частицы, то отведенный большой палец укажет направление силы Лоренца.



Сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно скорости, поэтому при движении заряженной частицы в магнитном поле сила Лоренца работы не совершает.

Частные случаи

напряженность электрического
поля \vec{E}

напряженность электрического поля \vec{E}

$$\frac{m v^2}{R} = q \cdot v \cdot B$$

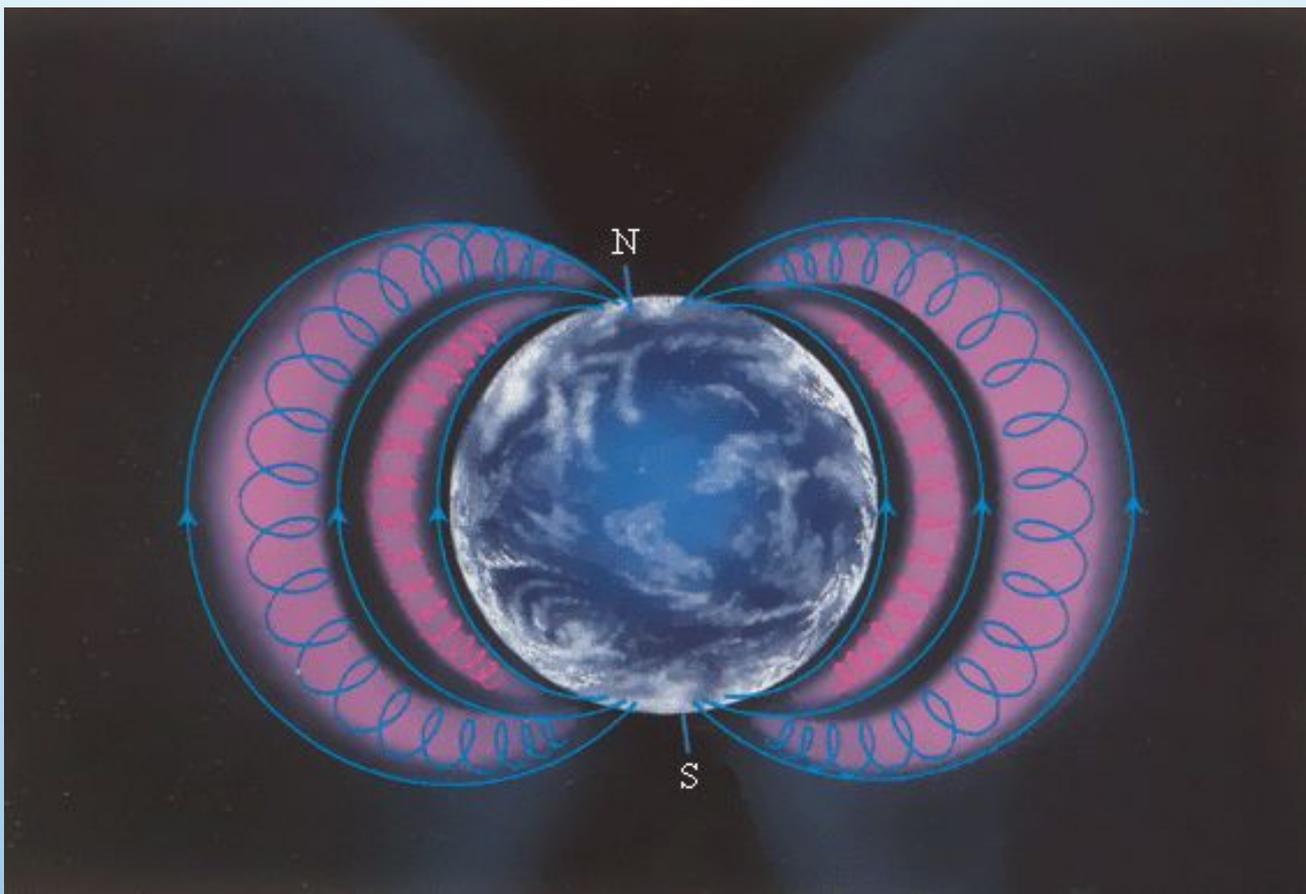
$$R = \frac{m v}{q \cdot B}$$

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi \cdot m v}{v \cdot q \cdot B} = \frac{m v}{q \cdot B}$$



т.е. частица движется по окружности с периодом T , не зависящим от скорости.

Магнитное поле Земли



Полярное сияние



В общем случае, когда на заряженную частицу действуют электрическое и магнитное поля:

$$\vec{F} = q \vec{E} + q \left[\vec{v}, \vec{B} \right] = q \left(\vec{E} + \left[\vec{v}, \vec{B} \right] \right)$$

(15)

5 УЧЕБНЫЙ ВОПРОС: ЗАМКНУТЫЙ КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.

Пара сил Ампера, действующих на стороны CD и AE, образуют момент сил:

$$M = F_A \cdot a \cdot \sin\alpha = I B b a \sin\alpha$$

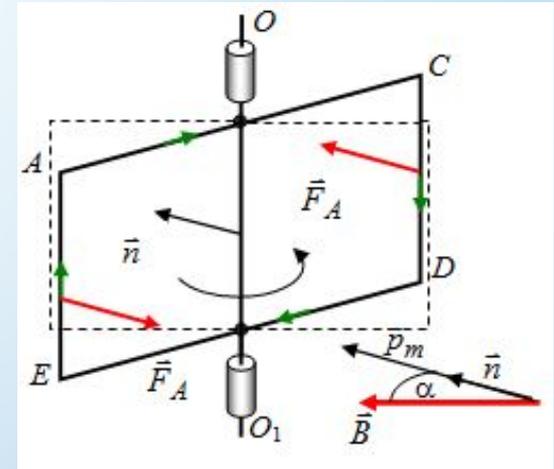
$$S = ab \quad M = IBS \sin\alpha$$

$$\vec{p}_m = I S \vec{n} \quad \text{- магнитный момент рамки}$$

$$M = p_m B \sin\alpha$$

$$\vec{M} = \left[\vec{p}_m \times \vec{B} \right]$$

(16)



$$|AE|=|CD|=b, |AC|=|ED|=a$$

6 УЧЕБНЫЙ ВОПРОС: ЦИРКУЛЯЦИЯ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА

напряженность электрического
поля \vec{E}

$$\left(\overset{\nabla}{B} \cdot \overset{\nabla}{l} \right) = B l \cos \alpha \quad (17)$$

напряженность электрического
поля \vec{E}

$$\oint_L \left(\overset{\nabla}{B} \cdot \overset{\nabla}{dl} \right) \quad (18)$$

Для кругового проводника с током:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \Rightarrow \oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{l}) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{R} \int_0^{2\pi R} dl = \mu_0 I \quad (19)$$

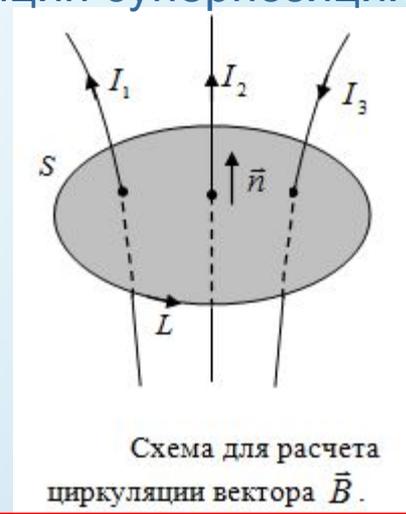
Справедливо для любого замкнутого контура.

Циркуляция вектора магнитной индукции не равна нулю, поэтому магнитное поле называется **непотенциальным** или **вихревым** в отличие от потенциального электростатического поля, для которого

$$\oint_L (\vec{E}, d\vec{l}) = 0$$

Если контур охватывает несколько токов, то справедлив принцип суперпозиции:

$$\oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{l}) = \mu_0 \sum_i I_i \quad (20)$$



Закон полного тока в вакууме:

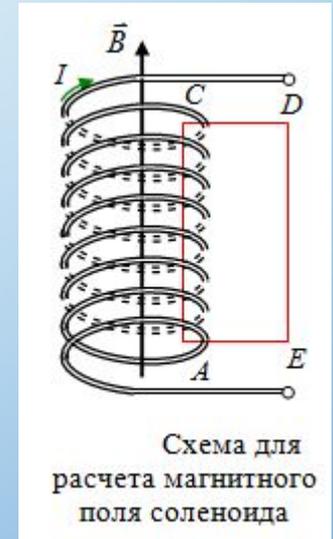
Циркуляция вектора магнитной индукции вдоль замкнутого контура в вакууме равна произведению магнитной постоянной на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром.

Направление обхода контура и направление нормали к натянутой на него поверхности связаны правилом буравчика. Если ток идет по направлению нормали, то его следует считать положительным, если наоборот – отрицательным.

7 УЧЕБНЫЙ ВОПРОС: МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛЕНОИДА

Соленоидом называется катушка из тонкого провода, витки которой намотаны вплотную на сердечник в форме прямого цилиндра.

Найдем магнитное поле внутри соленоида длиной L с числом витков N и током I . В качестве контура обхода выберем прямоугольный контур $ACDE$ так, что отрезок AC приблизительно лежит в средней части соленоида, а отрезок DE удален на большое расстояние от соленоида.



$$\oint_{ACDE} (\vec{B}, d\vec{l}) = \int_{AC} (\vec{B}, d\vec{l}) + \int_{CD} (\vec{B}, d\vec{l}) + \int_{DE} (\vec{B}, d\vec{l}) + \int_{EA} (\vec{B}, d\vec{l}) = \mu_0 \sum_i I_i$$

На отрезках контура CD и EA:

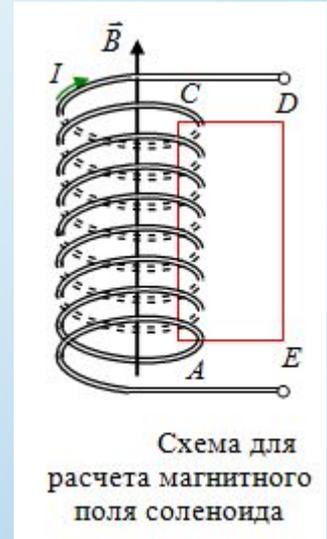
$$(\vec{B} \cdot d\vec{l}) = B dl \cos \pi/2 = 0$$

На отрезке AC:

$$(\vec{B} \cdot d\vec{l}) = B dl \cos 0 = B dl$$

На отрезке DE:

$$(\vec{B} \cdot d\vec{l}) = 0$$



$$\oint_{ACDE} (\vec{B}, d\vec{l}) = B \cdot |AC| = \mu_0 \sum_i I_i \qquad \sum_i I_i = N \cdot I = n \cdot L \cdot I$$

n - число витков, приходящееся на единицу длины соленоида.

$$B \cdot |AC| = \mu_0 \cdot n \cdot L \cdot I$$

$$B = \mu_0 n I = \frac{\mu_0 N I}{L}$$

(21)

8 УЧЕБНЫЙ ВОПРОС: ПОТОК ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ.

Потоком вектора магнитной индукции (магнитным потоком) через площадку dS называется скалярная физическая величина

$$d\Phi_B = \vec{B} d\vec{S} = B \cos\alpha dS = B_n dS$$

напряженность электрического поля \vec{E}

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B_n dS$$

При $B_n = \text{const}$ $\Phi_B = B_n \cdot S$ $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$

В системе СИ единица измерения магнитного потока Вебер (Вб).

Теорема о потоке вектора магнитной индукции (теорема Гаусса). Поток вектора магнитной индукции через произвольную замкнутую поверхность S равен нулю:

$$\oint_S (\vec{B} \cdot \vec{n}) dS = 0 \quad (22)$$

=> магнитных зарядов в природе не существует.

Сравнение электростатического и магнитного полей в вакууме

	Электрическое поле	Магнитное поле
Теорема Гаусса	$\oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i$	$\oint_S B_n dS = 0$
Теорема о циркуляции	$\oint_{\ell} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = 0$	$\oint_{\ell} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \sum_i I_i$

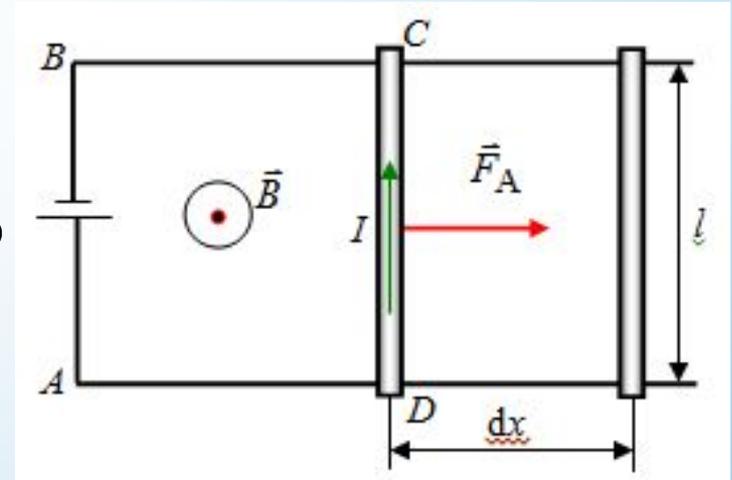
Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

Сила Ампера: $F = I \cdot B \cdot l$,

$$dA = F dx = I B l dx = I B dS = I d\Phi$$

$$dA = I d\Phi$$

$$A = \int I d\Phi \quad (23)$$



Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на магнитный поток, пересеченный движущимся проводником.

$$A = I \Delta \Phi$$

Работа по перемещению рамки с током в магнитном поле равна произведению силы тока в рамке на изменение магнитного потока, сцепленного с рамкой.

$$\begin{aligned} A &= I \Delta \Phi = I(\Phi_2 - \Phi_1) = I(B S \cos \varphi_2 - B S \cos \varphi_1) = \\ &= I S B (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1) = p_m B (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1). \end{aligned}$$

Если рамка поворачивается из устойчивого положения равновесия, то $\varphi_1 = 0$

$$A = -p_m B (1 - \cos \varphi_2)$$

$$\text{При } \varphi_2 = \pi/2 \quad A = -p_m B$$