

# Лекции №№ 7, 9, 10, 11 «Магнетизм.

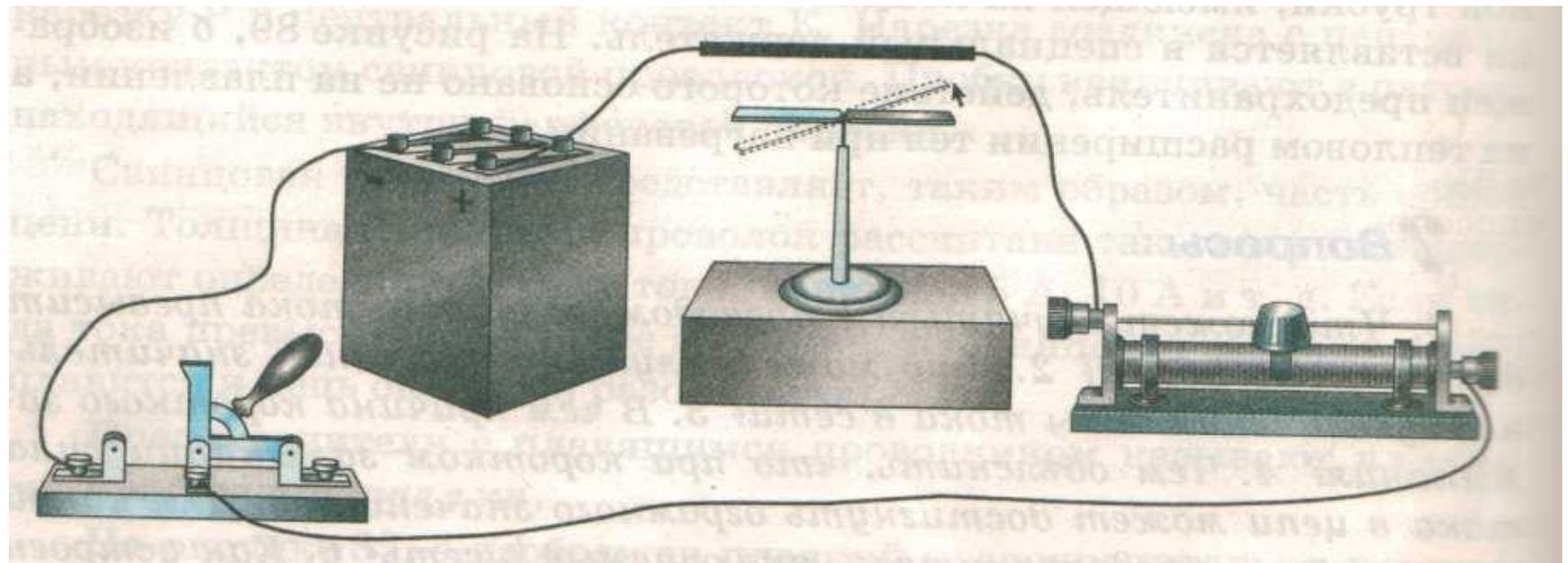
## Характеристики магнитных полей» (16.10.15),

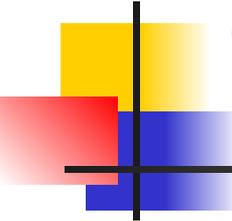
(23.10.15) (06.11.15) (13.11.15)

1. Действие магнитного поля на проводники с током. Индукция и напряженность магнитного поля.
2. Магнитное поле прямолинейного проводника с током.
3. Взаимодействие проводников с токами. Сила Ампера.
4. Закон Био – Савара – Лапласа. Расчет характеристик магнитных полей по принципу суперпозиции.
5. Магнитное поле кольцевого витка с током.
6. Магнитный момент контура с током. Элементарный контур (магнитный диполь). **Рамка с током в неоднородном магнитном поле.**
7. Энергия контура с током в магнитном поле. **(13.11.15)**
8. Циркуляция вектора магнитной индукции.
9. Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для магнитного поля.
10. Сила Лоренца.
11. Поле движущегося заряда. Магнетизм – релятивистский эффект.
12. Работа по перемещению проводника с током в

# 1. Действие магнитного поля на проводники с током. Индукция и напряженность магнитного поля.

- Впервые связь между электрическими и магнитными явлениями была открыта в 1820 г. Х.К. Эрстедом: при замыкании цепи магнитная стрелка отклоняется от своего первоначального положения (показано пунктиром). При размыкании цепи стрелка возвращается в свое первоначальное положение. Это означает, что *проводник с током и магнитная стрелка взаимодействуют друг с другом.*





# 1. Действие магнитного поля на проводники с током. Индукция и напряженность магнитного поля.

---

**Магнитное поле** — силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды и на тела, обладающие магнитным моментом, независимо от состояния их движения; магнитная составляющая электромагнитного поля.

## **Основные свойства магнитного поля:**

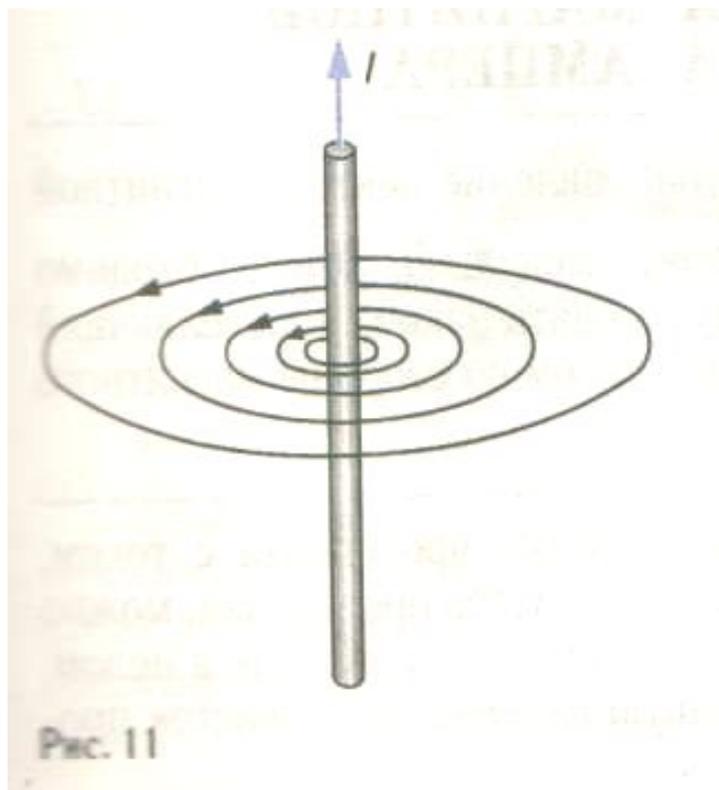
1. Магнитное поле порождается электрическим током (движущимися зарядами) и постоянными магнитами.
2. Магнитное поле обнаруживается по действию на электрический ток (движущиеся заряды).
3. Магнитное поле существует реально независимо от нас, от наших знаний о нем.

# 1. Действие магнитного поля на проводники с током. Индукция и напряженность магнитного поля.

- Магнитное поле так же как и электрическое можно изображать графически при помощи **линий индукции** – это линии, касательные к которым направлены так же, как и вектор  $\vec{B}$  в данной точке поля.
- Подобно линиям напряженности электрического поля, линии магнитного поля проводят с такой густотой, чтобы число линий, пересекающих единицу поверхности, перпендикулярной к ним было пропорционально индукции магнитного поля в данном месте.
- Линии индукции магнитного поля замкнуты. Поля, обладающие такими линиями, называются **вихревыми**.
- Магнитное поле проводника с током описывается **вектором напряженности магнитного поля  $H$** . Для однородной изотропной среды вектор  $\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$

## 2. Магнитное поле прямолинейного проводника с током.

### Магнитные линии прямолинейного проводника



### 3. Взаимодействие проводников с токами. Сила Ампера.

**Сила Ампера** - это сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током.

Модуль силы Ампера  $F_A$  :

$$dF_A = idlB \sin \alpha \quad (*)$$

где  $\alpha$  – угол между вектором  $B$  и направлением тока в проводнике;  
 $dl$  – длина элемента участка проводника;  
 $i$  – сила тока в проводнике.

Величина  $idl$  называется **элементом тока** (векторная величина, направление которой определяется по направлению силы тока).

$$F_A = idl \times B$$

### 3. Взаимодействие проводников с токами. Сила Ампера.

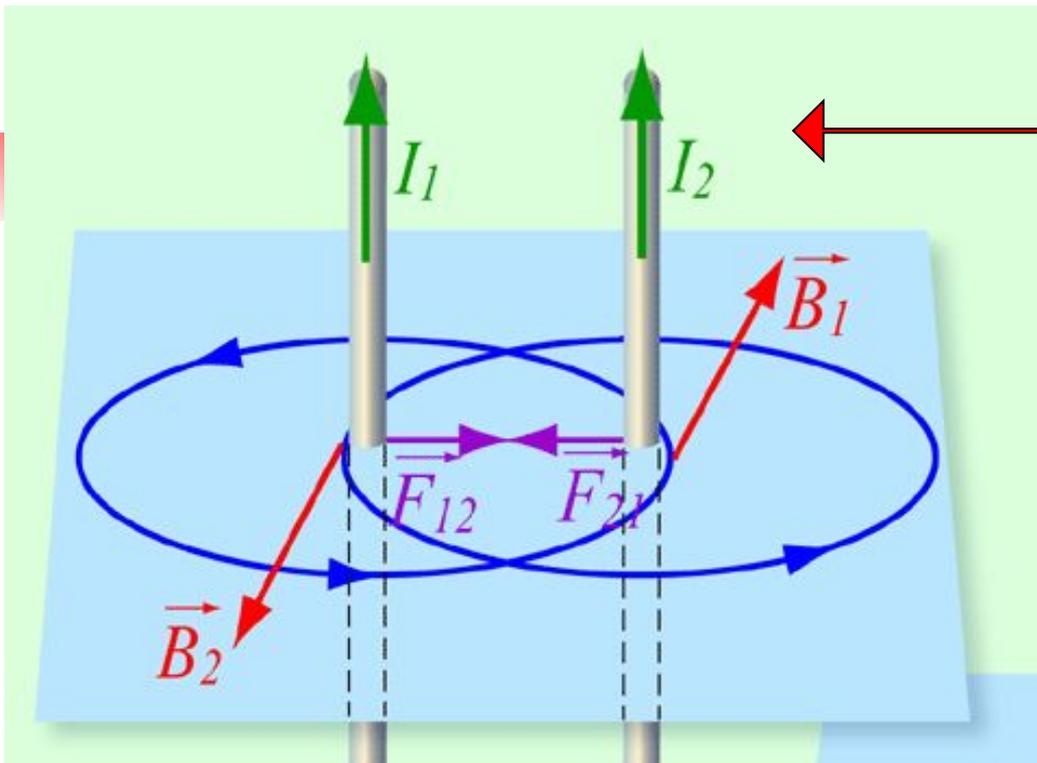
- **Модулем вектора магнитной индукции** называется отношение максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на участок проводника с током, к произведению силы тока на длину этого участка:

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}$$

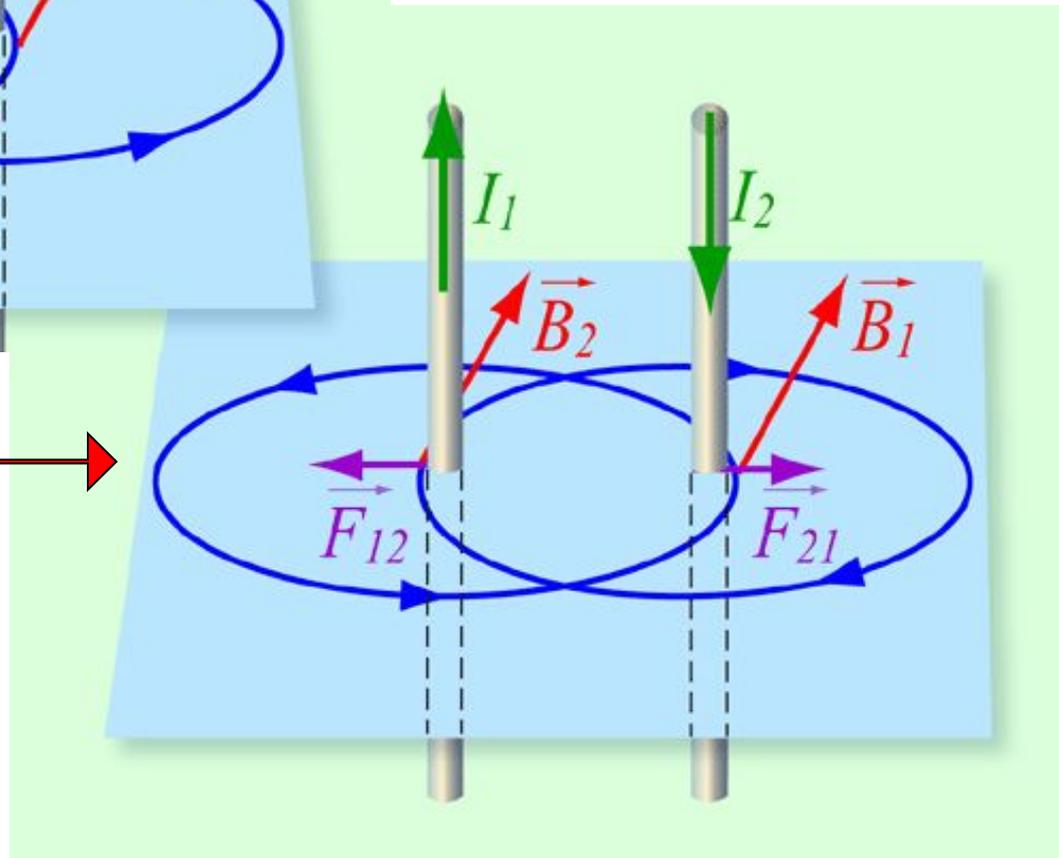
- За единицу магнитной индукции принимают магнитную индукцию однородного поля (во всех точках магнитного поля  $B = \text{const}$ ), в котором на участок проводника длиной 1 м при силе тока в нем 1 А действует со стороны поля максимальная сила 1 Н – **тесла**:

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$$

**Токи сонаправлены –  
силы Ампера  
направлены навстречу  
друг другу –  
проводники  
притягиваются**



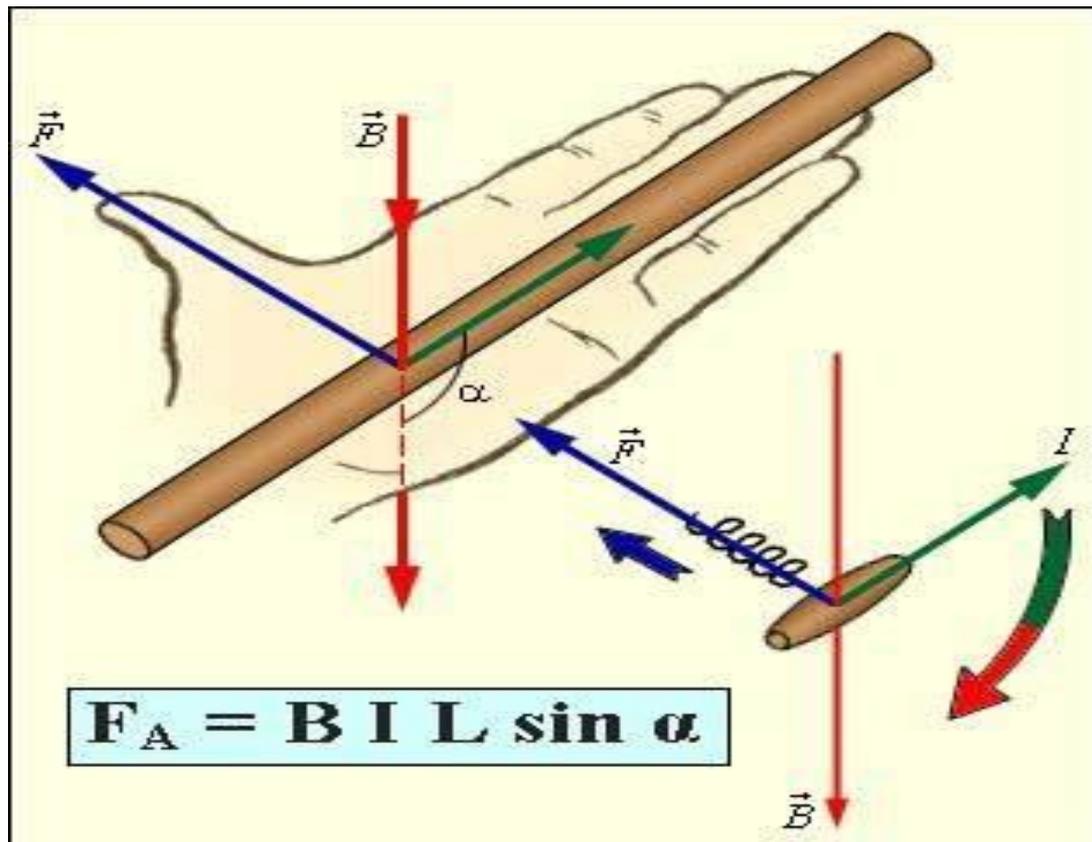
**Токи  
противоположно  
направлены - силы  
Ампера  
противоположны –  
проводники  
отталкиваются**



### 3. Взаимодействие проводников с токами. Сила Ампера.

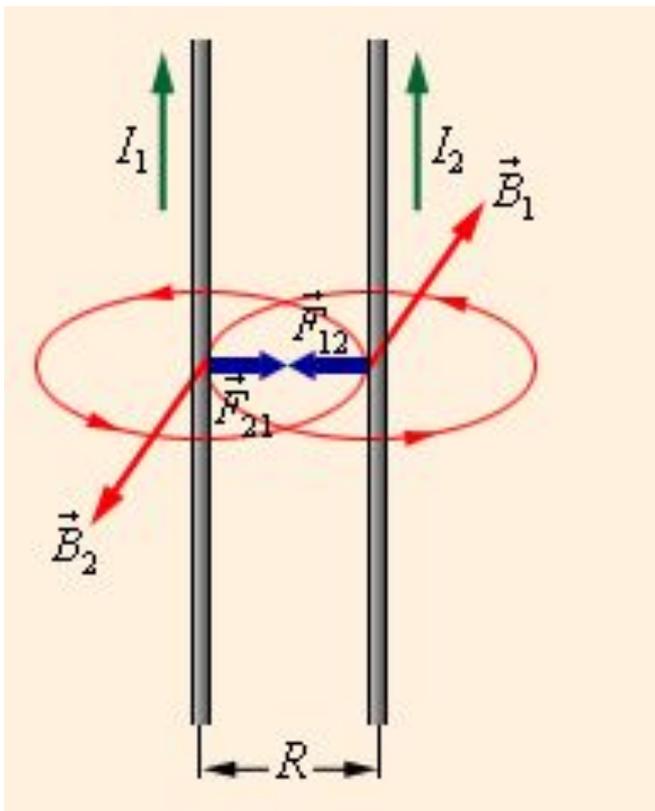
Направление  $F_A$  в пространстве, которое определяется по *правилу левой руки*:

Если левую руку расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а вытянутые четыре пальца были направлены вдоль тока, то отведенный на  $90^\circ$  большой палец укажет направление действия силы Ампера.



### 3. Взаимодействие проводников с токами. Сила Ампера.

Опыты показали, что модуль силы, действующей на отрезок длиной  $\Delta l$  каждого из проводников, прямо пропорционален силам тока  $I_1$  и  $I_2$  в проводниках, длине отрезка  $\Delta l$  и обратно пропорционален расстоянию  $R$  между ними:

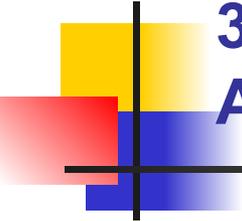


$$F_A = k \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R}$$
$$k = \frac{\mu_0}{2\pi} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{H}{A^2}$$



**Закон магнитного взаимодействия  
параллельных токов:**

$$F_A = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R}$$



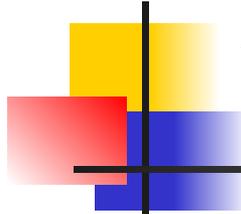
### 3. Взаимодействие проводников с токами. Сила Ампера.

---

*Единица измерения силы тока:*

**1 А – сила тока**, которая при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам, расположенным на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме, вызывала бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины.

## 4. Закон Био – Савара – Лапласа. Расчет характеристик магнитных полей по принципу суперпозиции.



Магнитное поле постоянных токов различной конфигурации изучалось экспериментально французскими учеными Ж. Био и Ф. Саваром (1820 г.).

Они пришли к выводу, что индукция магнитного поля токов, текущих по проводнику, определяется совместным действием всех отдельных участков проводника. Магнитное поле подчиняется принципу суперпозиции: *магнитное поле, создаваемое несколькими движущимися зарядами или токами, равно векторной сумме магнитных полей, создаваемых каждым зарядом или током в отдельности.*

Пусть магнитное поле создается постоянным электрическим током, тогда выделив в этом токе точечный движущейся заряд а затем просуммировав все эти элементарные заряды, можно найти магнитное поле ***B***, создаваемое данным током.

## 4. Закон Био – Савара – Лапласа. Расчет характеристик магнитных полей по принципу суперпозиции.

Элементарный заряд  $q$  равен  $\rho dV$ , где  $dV$  – элементарный объем,  $\rho$  – объемная плотность заряда, являющегося носителем тока, учтем также, что  $\rho \mathbf{v} = \mathbf{j}$  – плотность тока. Тогда магнитное поле, создаваемое таким зарядом равно:

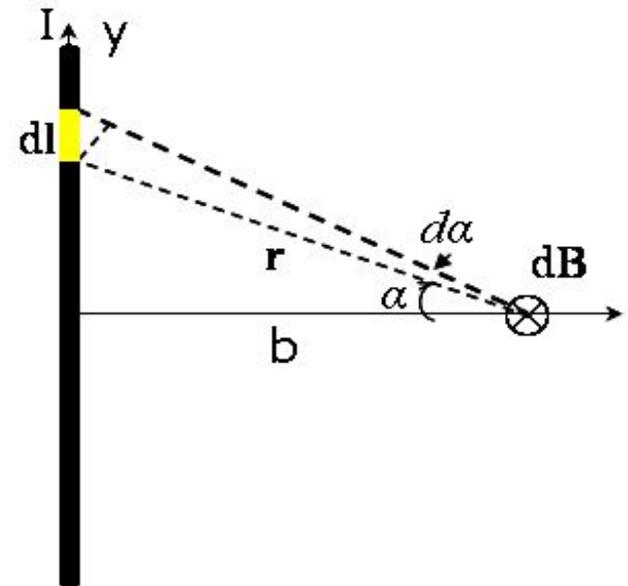
$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(\mathbf{j} \times \mathbf{r}) dV}{r^3}$$

Магнитное поле, создаваемое *линейным элементом тока*:

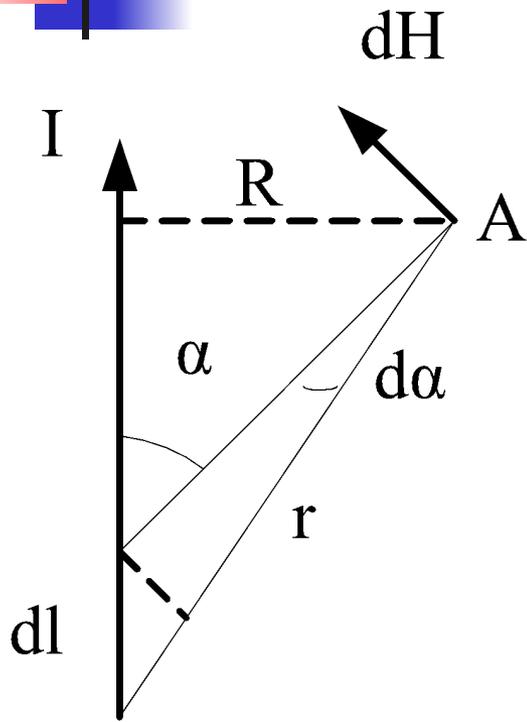
$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

Полное поле  $\mathbf{B}$  в соответствии с принципом суперпозиции находим интегрированием этих выражений по всем элементам тока

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{(\mathbf{j} \times \mathbf{r}) dV}{r^3}; \quad \mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$$



## 4. Закон Био – Савара – Лапласа. Расчет характеристик магнитных полей по принципу суперпозиции.



- Вектор напряженности магнитного поля перпендикулярен плоскости в которой лежат вектора элемента тока и радиус- вектор данной точки.
- *Модуль вектора напряженности магнитного создаваемого элементом тока определяется по формуле*

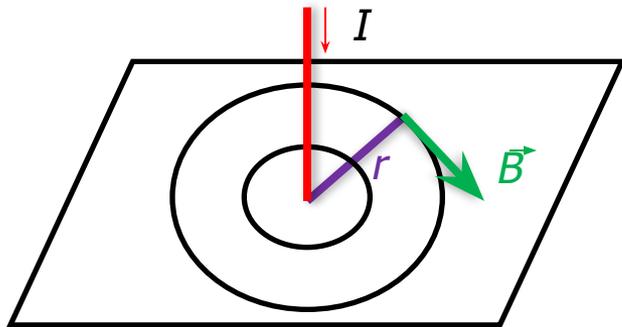
$$dH = \frac{Idl \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

Этот закон позволяет рассчитать полную напряжённость магнитного поля для проводника любой формы.

# 4. Закон Био – Савара – Лапласа. Расчет характеристик магнитных полей по принципу суперпозиции.

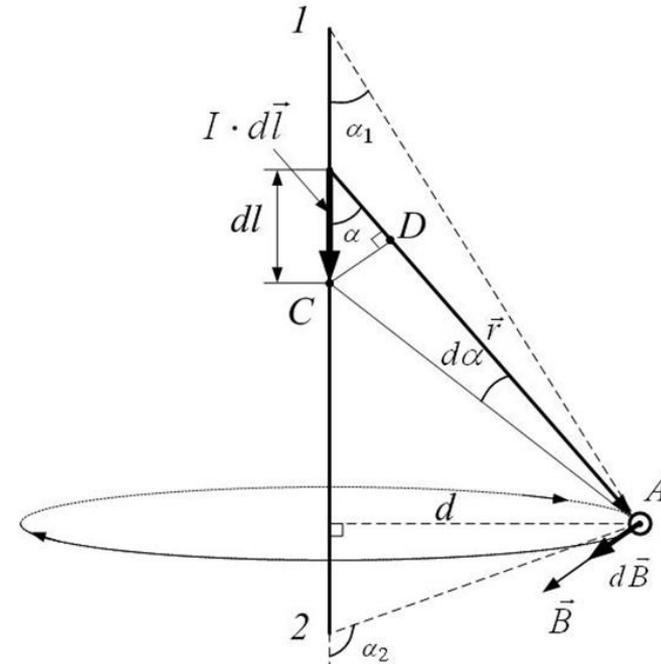
Индукция магнитного поля проводника с током:

А)  $\infty$  длины:



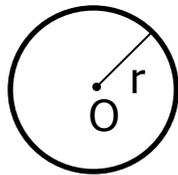
$$B = \mu_0 \frac{I}{2 \pi r}$$

Б) конечной длины:



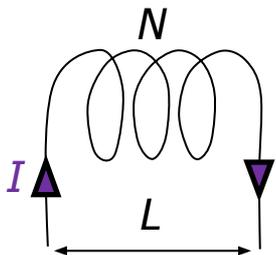
$$B = \frac{\mu \mu_0 \cdot I}{4 \pi \cdot d} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

Индукция магнитного поля в центре кругового тока



$$B = \mu_0 \frac{I}{2 r}$$

Индукция магнитного поля внутри соленоида



$N$  – число витков соленоида

$L$  – длина соленоида

$$B = \mu_0 \frac{IN}{L}$$

## 6. Магнитный момент контура с током.

### Элементарный контур (магнитный диполь).

Для изучения магнитного поля можно взять замкнутый контур малых размеров (рис. 4).

Выяснить характер магнитного поля на контур с током можно с помощью следующего опыта (рис. 5).

Пусть магнитное поле создается постоянными магнитами (рис. 6).

Магнитное поле оказывает на рамку с током ориентирующее действие.

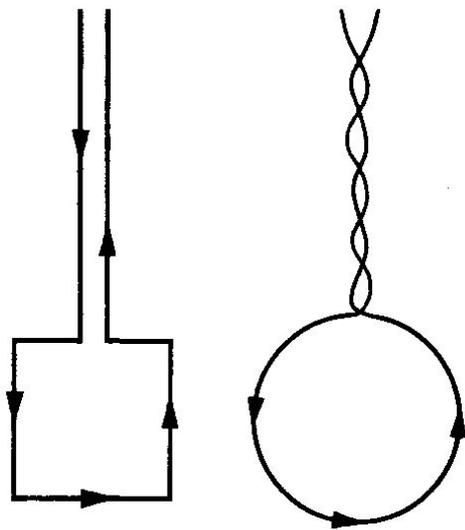


Рис. 4

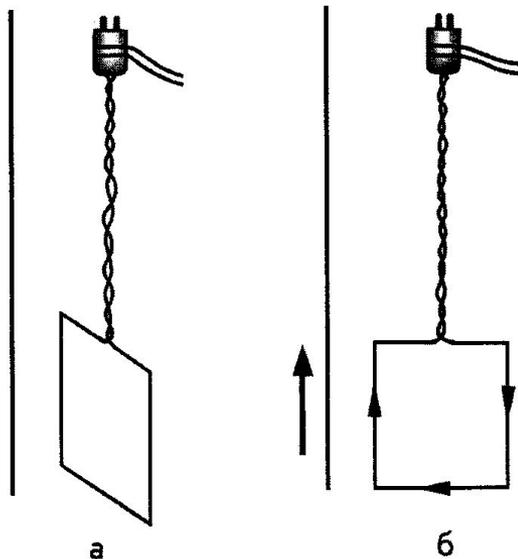


Рис. 5

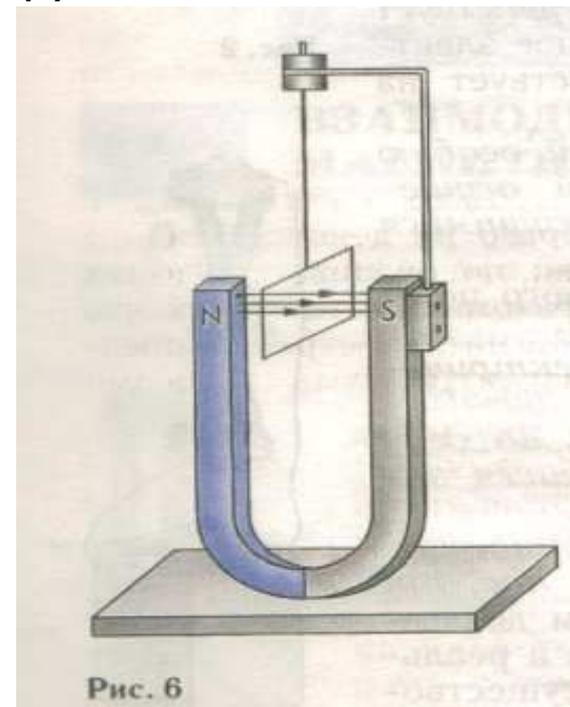
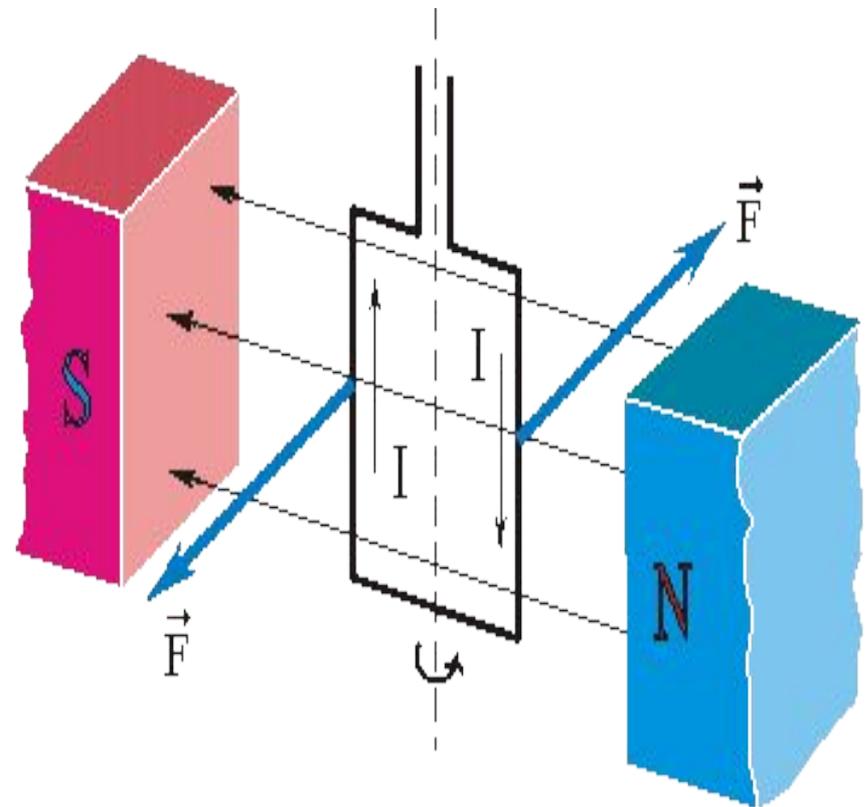
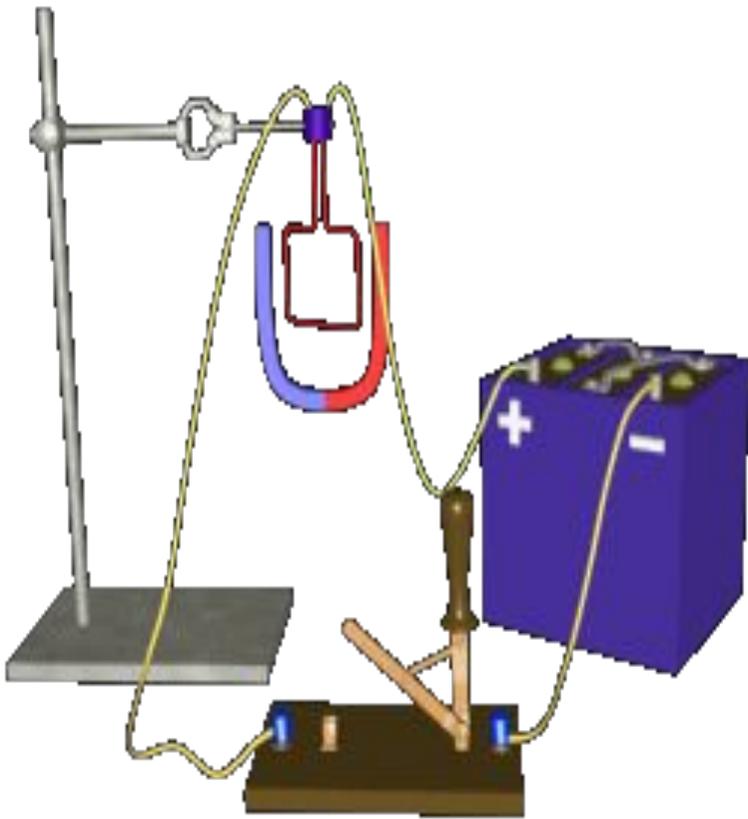


Рис. 6

## 6. Магнитный момент контура с током. Элементарный контур (магнитный диполь).

В магнитном поле возникает пара сил, момент которых приводит катушку во вращение.



## 6. Магнитный момент контура с током.

### Элементарный контур (магнитный диполь).

Рассмотрим поведение витка с током в магнитном поле.

- Рамка с током  $I$  находится в однородном магнитном поле  $\vec{B}$ ,  $\alpha$  – угол между  $\vec{B}$  и  $\vec{n}$  (направление нормали связано с направлением тока *правилом буравчика*)

- Сила Ампера действующая на сторону рамки длиной  $l$  равна:  
$$\vec{F}_1 = I \vec{l} \times \vec{B}, \text{ где } \vec{B} \perp \vec{l}$$

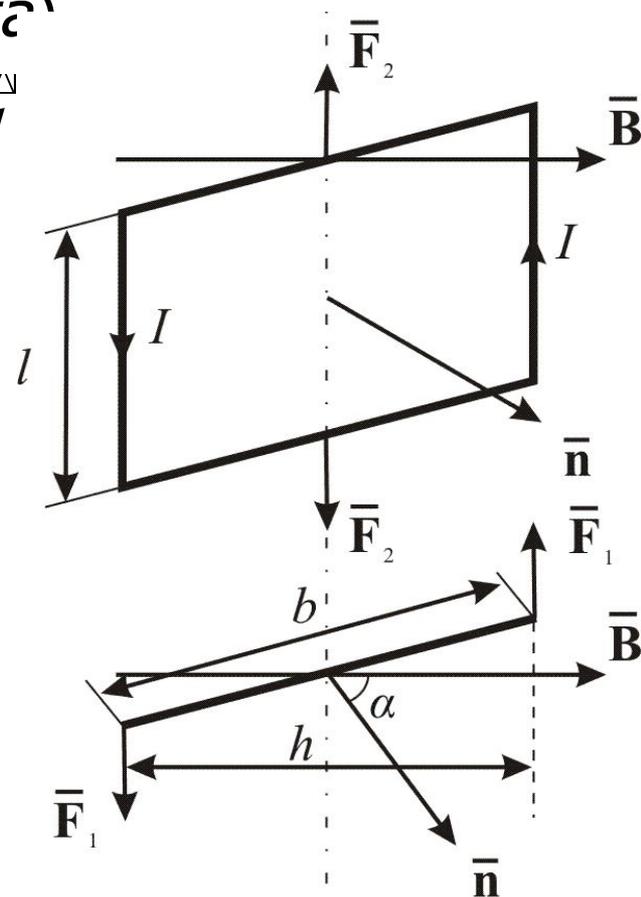
- На другую сторону длиной  $l$  действует такая же сила. Получается *пара сил* или **вращающий момент**:  
$$M = I l B b \sin \alpha,$$

где *плечо*  $h = b \sin \alpha$ .

Т. к.  $lb = S$  – площадь рамки,

тогда можно записать:

$$M = I S B \sin \alpha = P B \sin \alpha$$



## 6. Магнитный момент контура с током.

### Элементарный контур (магнитный диполь).

■ Таким образом, для контура с током в однородном магнитном поле:  $M = p_m \times B$

■ Модуль момента сил  $M = p_m B \sin(\angle p_m, B)$

■ Величина  $p_m = ISn$  называется

**магнитным моментом** контура с током.  $p_m \uparrow \downarrow B$ ,  $M = 0$ .

■ Если  $p_m \uparrow \downarrow B$  или  $p_m \uparrow \uparrow B$ , то  $M = 0$ . При  $p_m \uparrow \downarrow B$  положение равновесия неустойчивое.

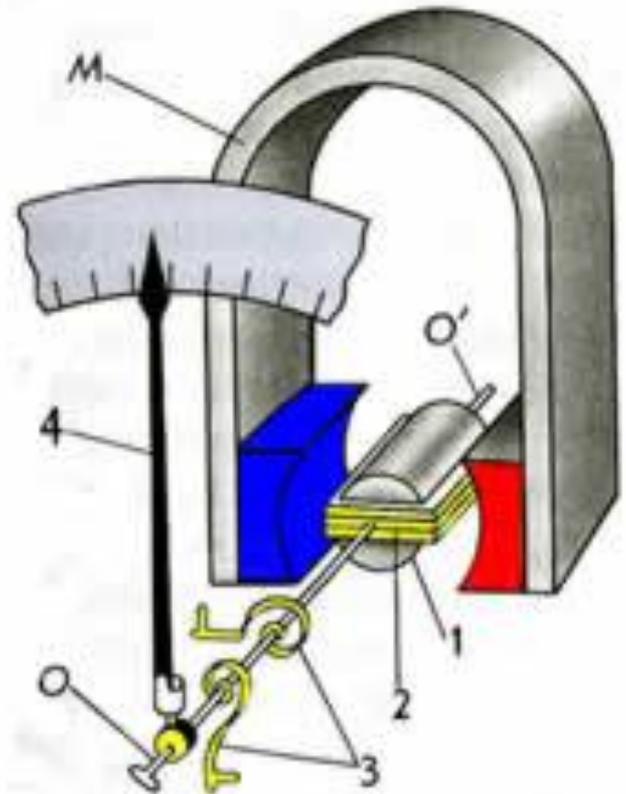
■ Итак, под действием вращающего момента рамка с током повернется так, что  $n \parallel B$ .

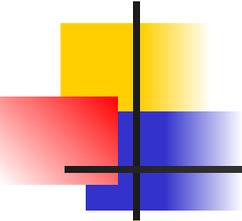
■ В неоднородном поле рамка повернется и будет втягиваться в область более сильного поля.  $F = p_m \frac{\partial B}{\partial n}$ .

## Применение силы Ампера. 6. Магнитный момент контура с током. Элементарный контур (магнитный диполь).

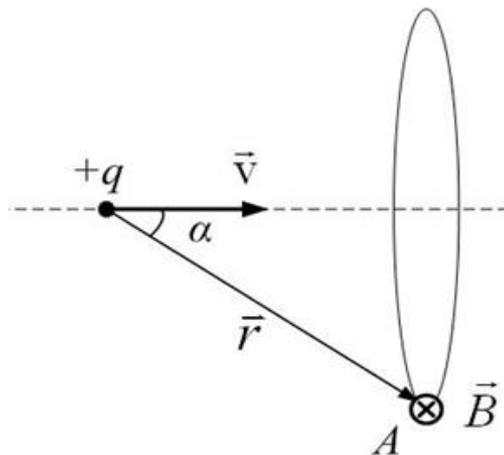
Ориентирующее действие МП на контур с током используют в электроизмерительных приборах магнитоэлектрической системы – *амперметрах и вольтметрах.*

Сила, действующая на катушку, прямо пропорциональна силе тока в ней. При большой силе тока катушка поворачивается на большой угол, а вместе с ней и стрелка. Остается проградуировать прибор – т.е. установить каким углом поворота соответствуют известные значения силы тока.



- 
- 
- 6. Рамка с током в неоднородном магнитном поле.
  - 7. Энергия контура с током в магнитном поле.
  - 8. Циркуляция вектора магнитной индукции.
  - 9. Теорема Гаусса для магнитного поля.
  - 10. Сила Лоренца.

# 11. Поле движущегося заряда. Магнетизм – релятивистский эффект.

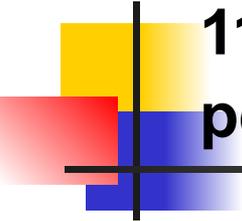


Движущаяся заряженная частица тоже создаёт магнитное поле. Индукцию его можно получить из закона Био-Савара-Лапласа, заменив:

$$Id\vec{l} \rightarrow q\vec{v} ; d\vec{B} \rightarrow \vec{B}$$

Замену можно обосновать: сам движущийся заряд создаёт некоторый эквивалентный электрический ток; по размерности величины  $Id\vec{l}$  и  $q\vec{v}$  совпадают ( $[Idl] = A \cdot m$ ,  $[qv] = \text{Кл} \cdot \frac{m}{c} = \frac{\text{Кл}}{c} \cdot m = A \cdot m$ ).

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{q[\vec{v} \times \vec{r}]}{r^3} ; B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{qv \sin \alpha}{r^2}$$



## 11. Поле движущегося заряда. Магнетизм – релятивистский эффект.

---

Полная сила, действующая на заряженную частицу в электромагнитном поле, равна

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}] + q\vec{E}.$$

Это – обобщенная формула Лоренца.

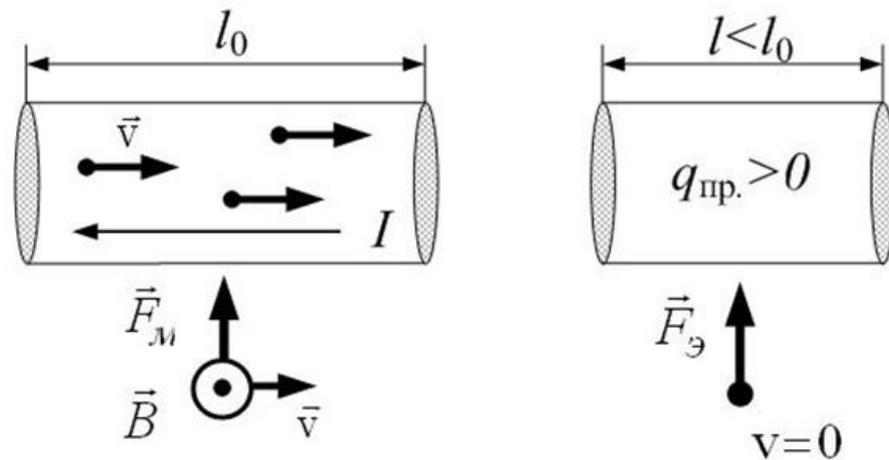
Первое слагаемое – сила Лоренца – это *магнитная составляющая полной силы*, действующей на частицу в электромагнитном поле; второе – *электрическая составляющая*.

$$\vec{F}_m = q[\vec{v} \times \vec{B}]; \quad \vec{F}_e = q\vec{E}.$$

Поля – электрическое и магнитное – неразрывно связаны.

При переходе к другой системе отсчёта полная сила останется прежней; изменится лишь наше её объяснение.

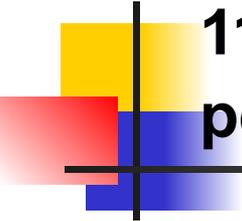
# 11. Поле движущегося заряда. Магнетизм – релятивистский эффект.



В системе отсчёта, связанной с электроном,  $\vec{F}_M = 0$ , т. к. электрон покоится. Сила не исчезла; это – электрическая составляющая силы Лоренца: проводник оказался заряжен положительно в этой системе отсчёта из-за релятивистского сокращения его длины, поскольку он сам в этой системе движется со скоростью  $v$ :

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < l_0.$$

В результате объём его уменьшился, концентрация положительных ионов увеличилась и не компенсируется отрицательным зарядом электронов.



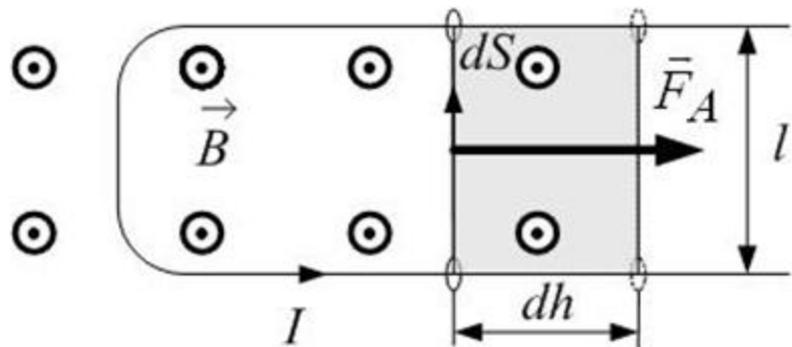
## 11. Поле движущегося заряда. Магнетизм – релятивистский эффект.

---

Обе силы в обеих системах отсчёта одинаковы. Сила не исчезла, изменилось её описание: в одной системе отсчёта на электрон действовало магнитное поле тока, в другой – электрическое поле заряженного проводника. Нет отдельно поля только электрического или только магнитного; есть единое электромагнитное поле. В одной системе отсчёта это поле может выглядеть как только магнитное; в другой – как электрическое; в третьей присутствует и магнитное, и электрическое.

Существуют релятивистские формулы преобразования векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  при переходе из одной системы отсчёта в другую. Магнетизм невозможно описать без теории относительности. Магнетизм – релятивистский эффект.

## 12. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле.



Пусть проводник с током  $I$  длиной  $l$ , перпендикулярный индукции магнитного поля  $\vec{B}$ , перемещается в магнитном поле перпендикулярно полю под действием силы Ампера. Тогда работа силы Ампера при перемещении на  $dh$  равна:

$$dA = F_A dh = IlBdh = IBdS = Id\Phi.$$

$$dA = Id\Phi.$$

Если сила тока не меняется, то  $\Delta A = I\Delta\Phi$ .

**Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на изменение магнитного потока (на пересечённый проводником магнитный поток).**

Площадка  $dS$  – это *заметённая* проводником в процессе движения площадь.