

# Электричество и магнетизм

*Семестр 2*

# ЛЕКЦИЯ № 7

## Основы магнитостатики

1. Магнитное поле. Силовая характеристика магнитного поля - вектор магнитной индукции.
2. Сила Лоренца и сила Ампера.
3. Магнитное поле проводника с током. Закон Био-Савара-Лапласа.
4. Принцип суперпозиции для магнитного поля.
5. Магнитное поле бесконечного прямолинейного тонкого проводника с током. Линии магнитной индукции.
6. Магнитное взаимодействие проводников с током. Единица силы постоянного тока в системе СИ.

# ***Основы магнитостатики***

**Магнитное поле. Силовая характеристика магнитного поля - вектор магнитной индукции**

**В основе магнитостатики, изучающей законы постоянного магнитного поля, лежат экспериментальные факты, установленные в XIX веке:**

- 1) магнитное поле действует на движущиеся электрические заряды,**
- 2) движущиеся электрические заряды создают магнитное поле.**

На электрический заряд  $q$ , движущийся в магнитном поле  $\vec{B}$  со скоростью  $\vec{v}$ , действует **сила Лоренца**

$$\vec{F}_L = q \left[ \vec{v}, \vec{B} \right]$$

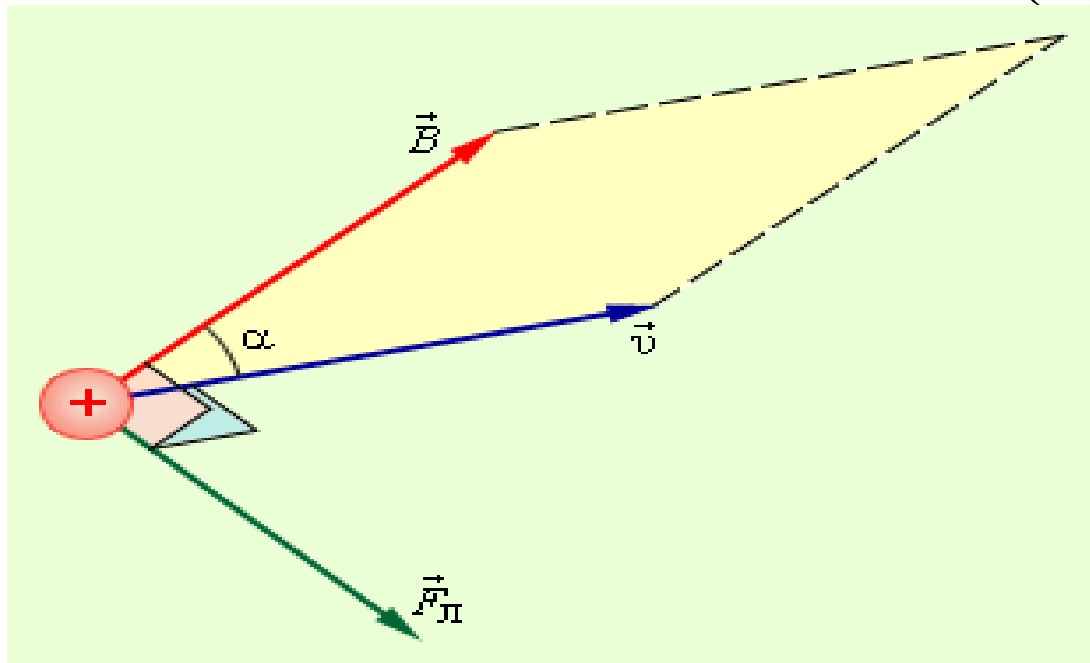
Лоренц (Lorentz) Хендрик  
(18.ҮII.1853 – 4.II.1928)



# ПРАВИЛО левой руки

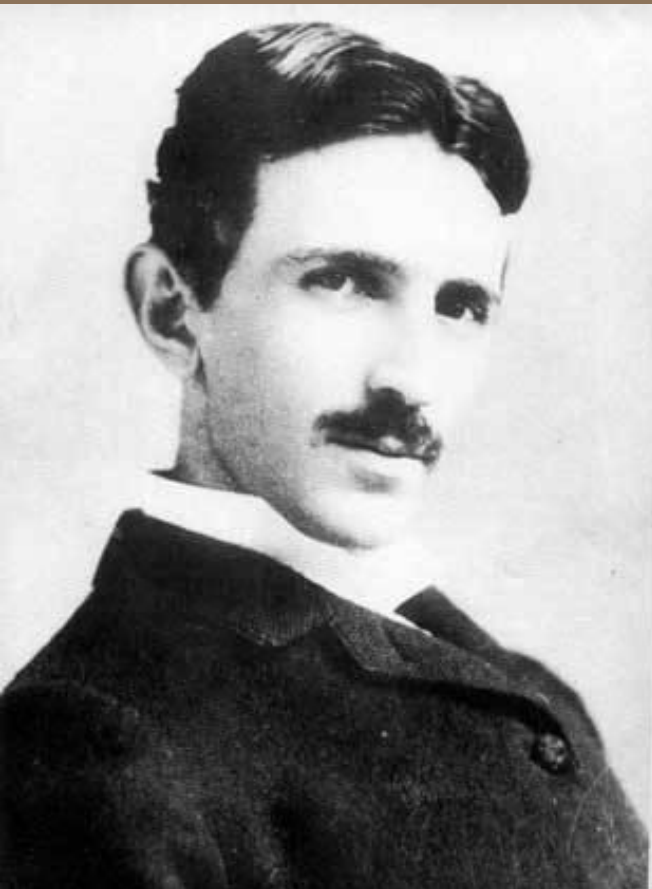


где  $\vec{B}$  - **вектор магнитной индукции**, основная характеристика магнитного поля  
Размерность  $B$  [Н/А·м], а единица измерения в системе СИ называется **тесла** (Тл).



Взаимное расположение векторов  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{F}_L$ .

Модуль силы Лоренца  $F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$  численно равен площади параллелограмма, построенного на векторах  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  умноженной на заряд  $q$ .



**ТЕСЛА Никола (1856 - 1943)-  
сербский ученый в области  
электротехники, радиотехники**

Разработал ряд конструкций многофазных генераторов, электродвигателей и трансформаторов. Сконструировал ряд радиоуправляемых самоходных механизмов.

Изучал физиологическое действие токов высокой частоты. Построил в 1899 радиостанцию на 200 кВт в Колорадо и радиоантенну высотой 57,6 м в Лонг-Айленде. Изобрел электрический счетчик, частотомер и др.

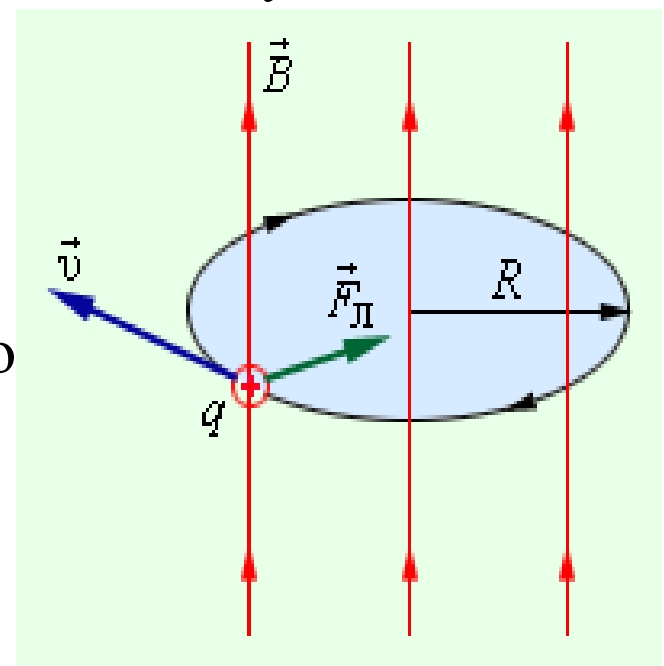


Сила Лоренца направлена перпендикулярно векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . При движении заряженной частицы в магнитном поле сила Лоренца работы не совершает. Поэтому модуль вектора скорости при движении частицы не изменяется. Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле под действием силы Лоренца, а ее скорость  $\vec{v}$  лежит в плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{B}$ , то частица будет двигаться по окружности радиуса:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Период обращения частицы в однородном магнитном поле равен:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$





## Сила Лоренца

$$\vec{F} = q [\vec{v} \vec{B}]$$

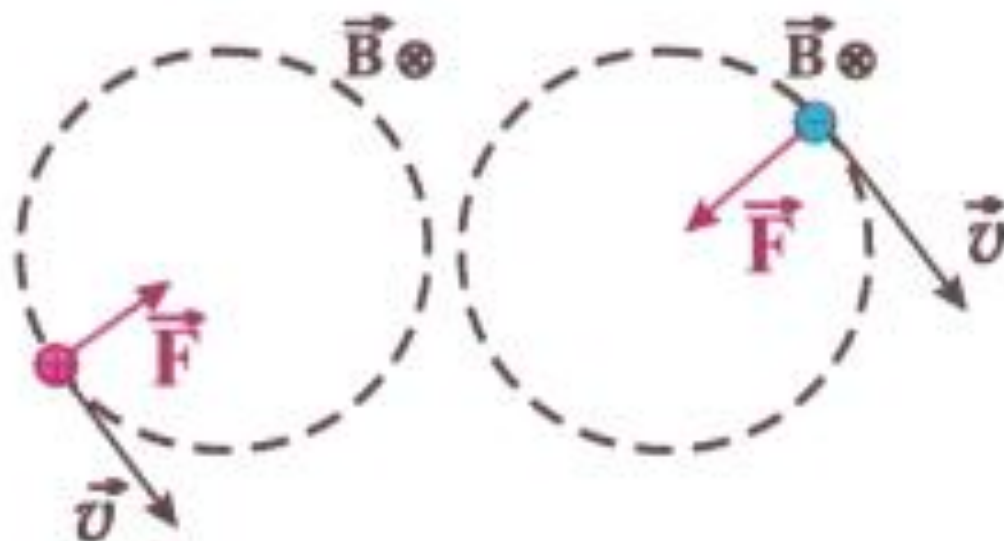
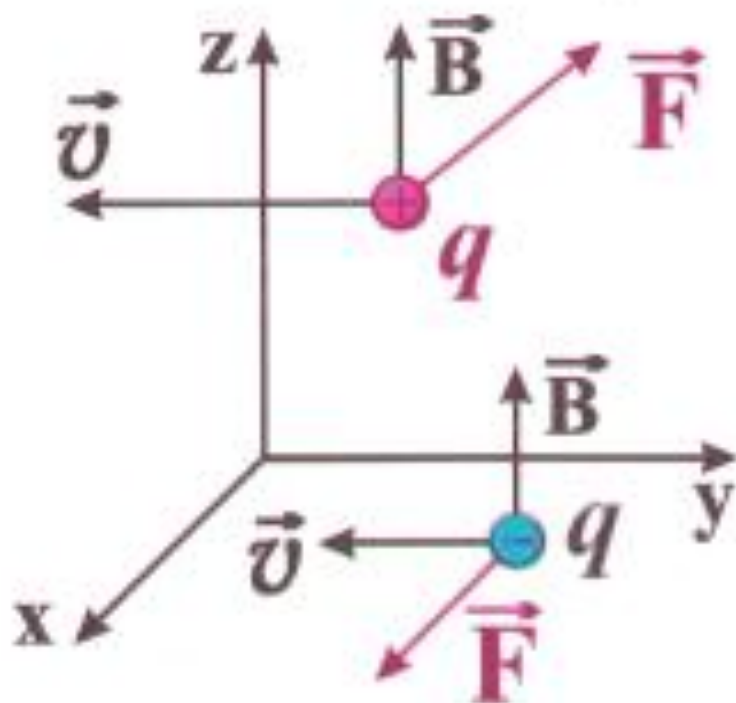
$$v = \text{const}, \quad a_{\tau} = 0,$$

$$a_n = \frac{F}{m} = \frac{qvB}{m}, \quad a_n = \frac{v^2}{R},$$

$$R = \frac{mv}{qB}, \quad T = \frac{2\pi m}{qB},$$

$$\omega = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$

Частота не зависит  
от скорости



Экспериментами установлено, что если заряд находится одновременно в **электрическом** и **магнитном** поле, то на него действует сила:

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

- иногда её тоже называют силой Лоренца

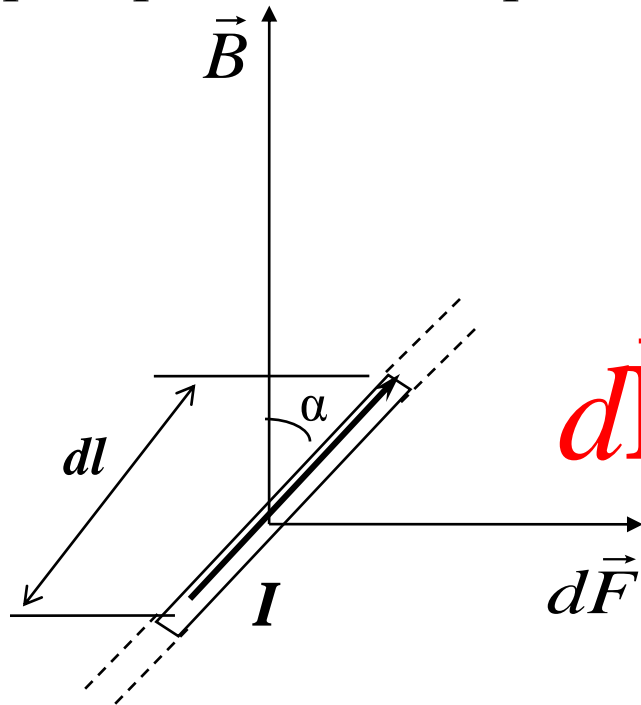
В формуле Лоренца  $\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]$  два слагаемых

Первое слагаемое не зависит от скорости движения заряда, и определяет компоненту силы, которая действует как на движущийся, так и на неподвижный заряды.  $\vec{E}$  - это напряженность электрического поля, т.е. сила, действующая на неподвижный единичный заряд со стороны других зарядов.

Второе слагаемое определяет компоненту силы, которая возникает только тогда, когда выделенный заряд имеет отличную от нуля скорость. Вектор  $\vec{B}$  - индукция магнитного поля. Магнитное поле, в свою очередь, может быть создано в пространстве только при наличии движущихся зарядов.

# Сила Ампера

Магнитное поле не действует на неподвижные заряды. В магнитном поле сила действует на электрический ток. Согласно закону Ампера, *максимальная* сила  $dF_{\max}$ , действующая на участок проводника  $dl$  с током  $I$ , пропорциональна произведению  $I dl$



$$dF_{\max} = I \cdot dl \cdot B$$

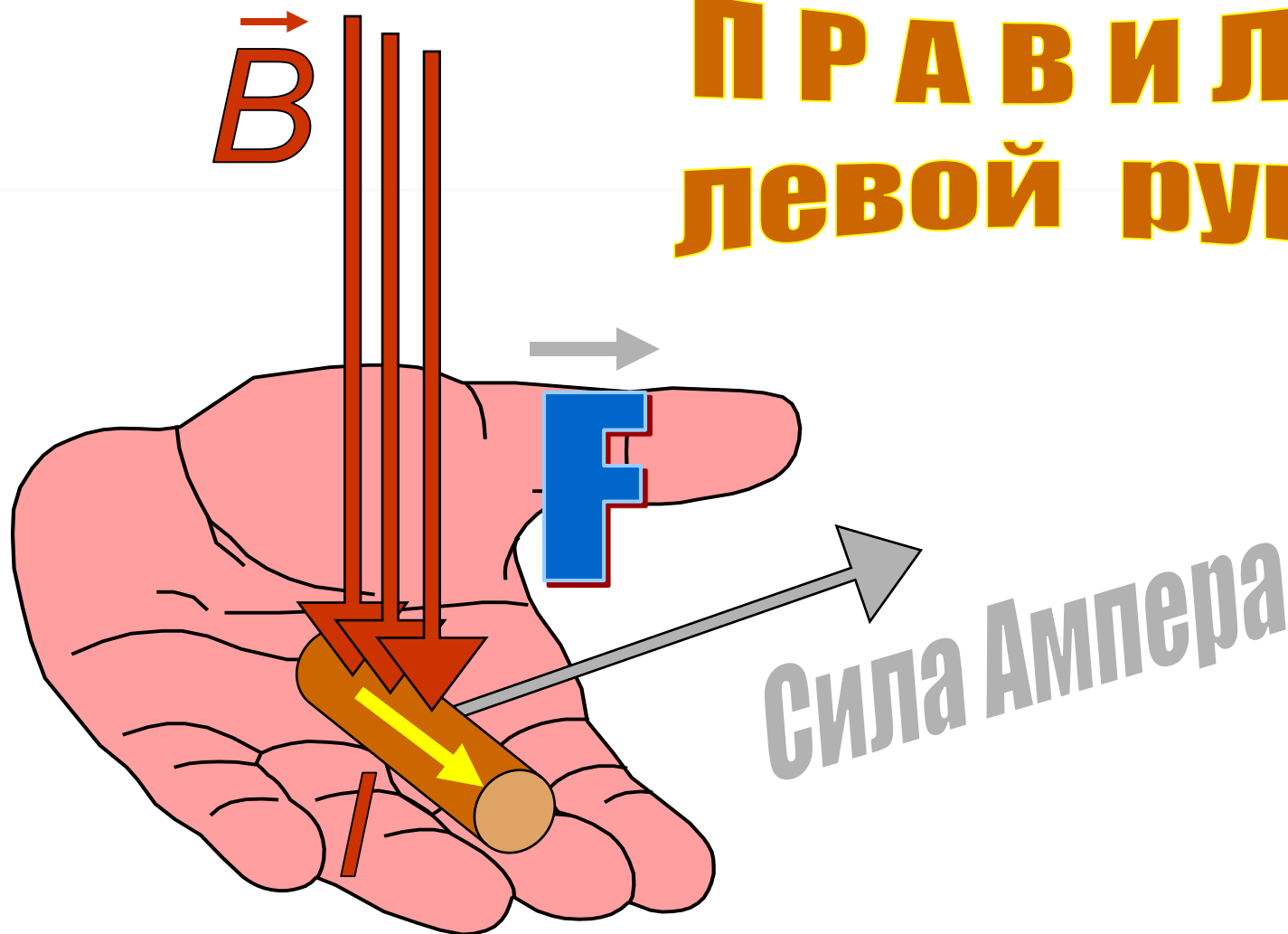
$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \times \vec{B}] \quad \text{сила Ампера}$$

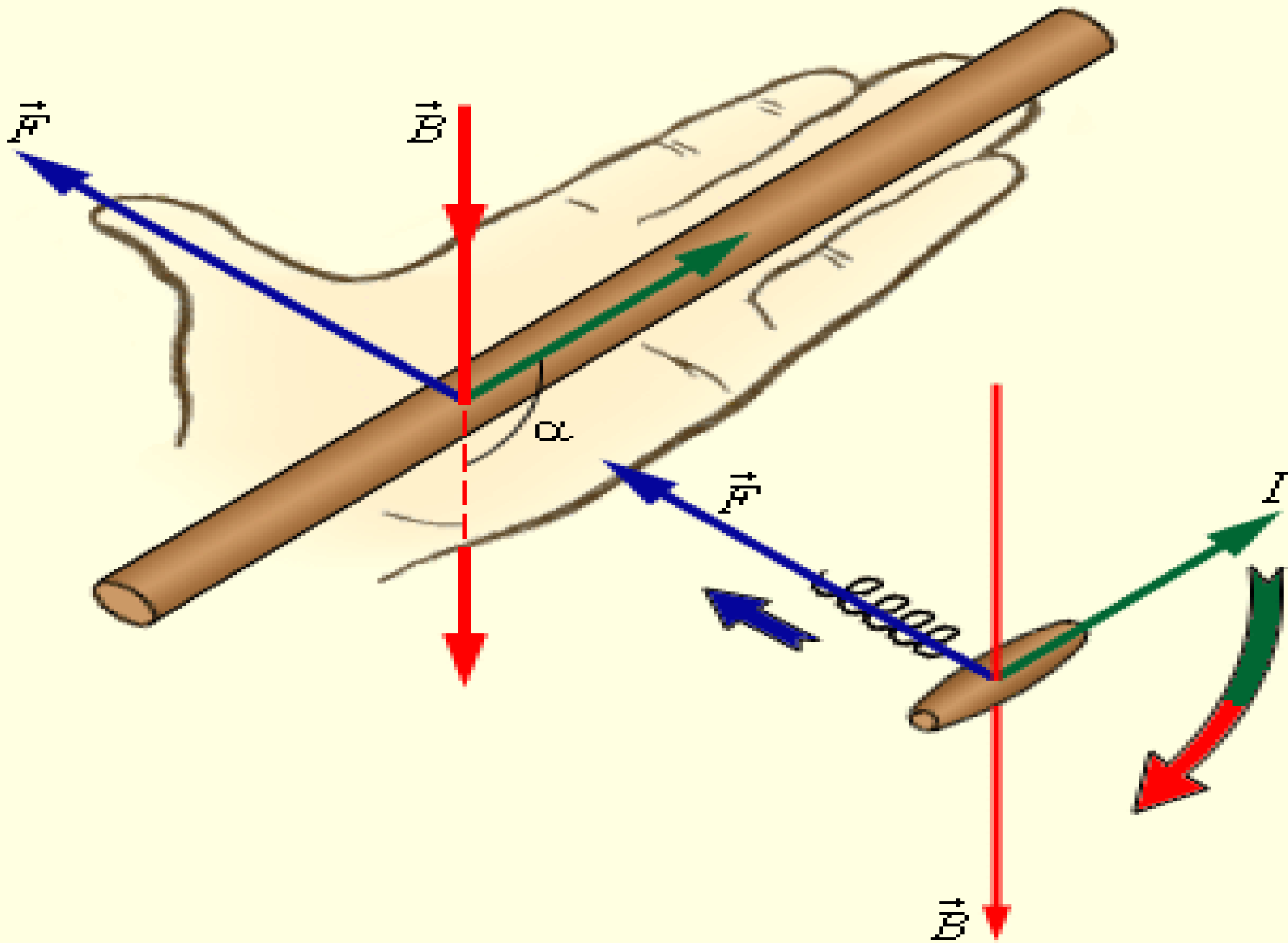
$$dF = I \cdot dl \cdot B \sin \alpha$$

Ампер (Ampere) Андре-Мари  
(22.I.1775 – 10.VI.1836)



# ПРАВИЛО левой руки





# Закон Био-Савара-Лапласа

Токи, текущие по проводникам, создают в окружающем пространстве магнитное поле. **Как вычислить магнитное поле произвольного тока?** В электростатике: взаимодействие точечных зарядов, затем - принцип суперпозиции. В магнитостатике - тот же прием. Аналог точечных зарядов - малые прямолинейные участки проводников с током - **элементы тока**. Важно знать закон, по которому вычисляется магнитное поле, созданное элементом тока. Для магнитной индукции поля, создаваемого элементом тока  $I$  длиной  $dl$ , была получена формула:

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

- **закон Био-Савара-Лапласа**

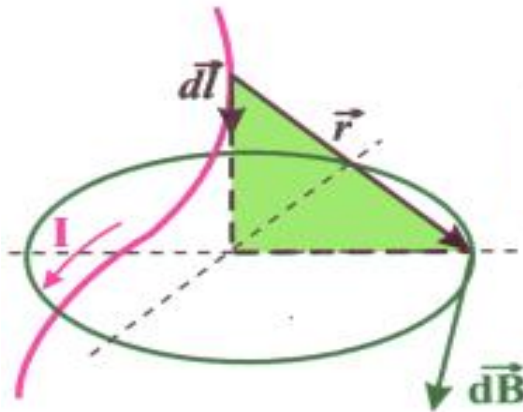


Магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля.

Модуль  $dB$  определяется как:

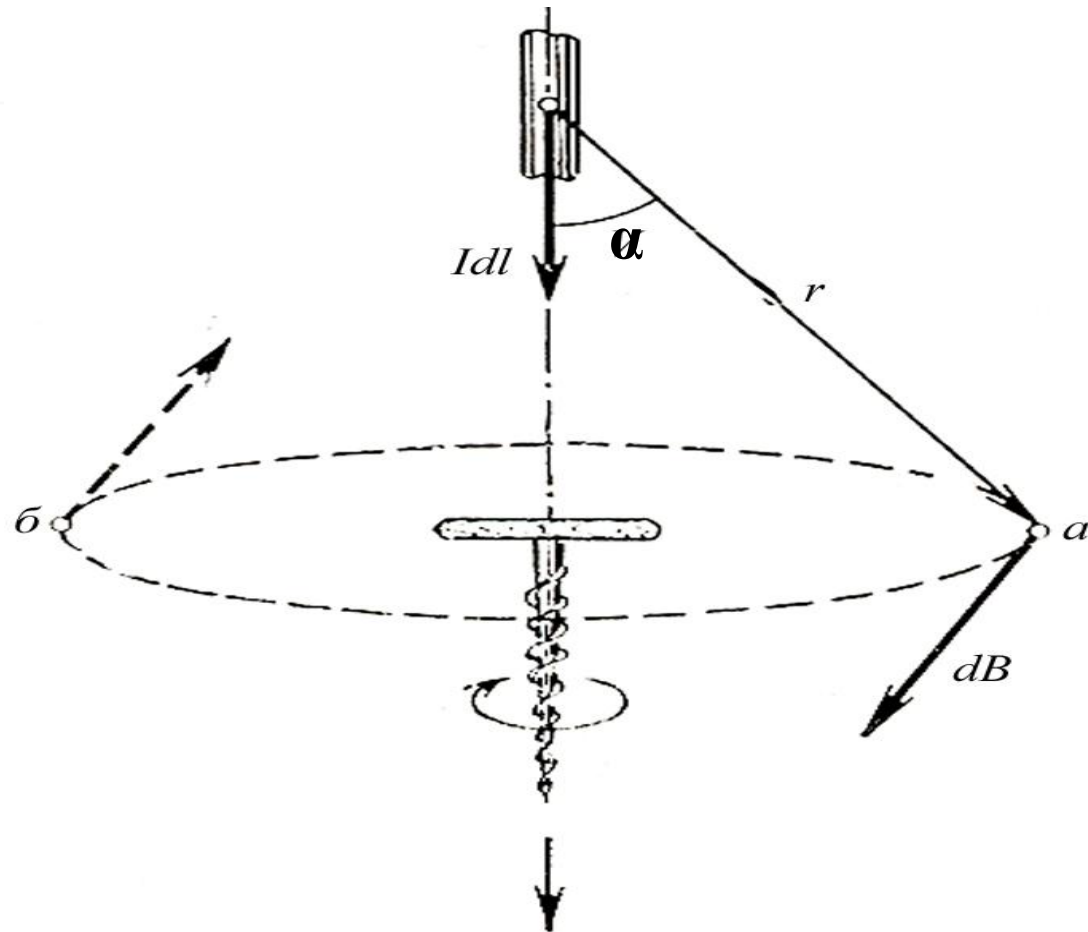
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl r \sin \alpha}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2}$$

где  $\alpha$  - угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ ,



$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

«Элементарным кирпичиком» магнитного поля является элемент тока  $I$  длиной  $dl$



Зная поле элемента тока, можно теперь, опираясь на принцип суперпозиции магнитных полей, рассчитать поле любого тока.

Для вектора **индукции магнитного поля**  $\vec{B}$  справедлив **принцип суперпозиции**:

— магнитная индукция результирующего поля равна геометрической сумме магнитных индукций  $\vec{B}_i$  складываемых полей:

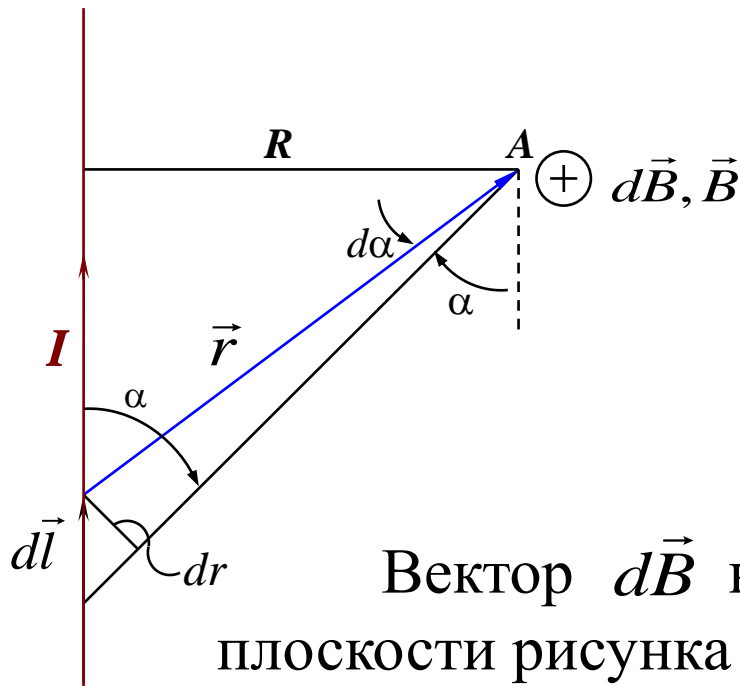
$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$$

или в случае непрерывного проводника:

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

# Магнитное поле прямолинейного тока

Ток  $I$  течёт по бесконечному прямолинейному проводнику. Вычислим индукцию магнитного поля этого тока на расстоянии  $R$  от проводника.



Элемент тока  $I d\vec{l}$  создаёт в рассматриваемой т. А магнитное поле:

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

Вектор  $d\vec{B}$  направлен перпендикулярно плоскости рисунка от нас (правило буравчика). В скалярной форме это уравнение можно записать так:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2} \sin \alpha$$

Для отыскания полного поля в точке  $A$  нужно просуммировать вклады всех элементов данного тока, то есть, рассмотреть интеграл:

$$B_A = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_{l=-\infty}^{\infty} \frac{dl}{r^2} \sin \alpha$$

Как следует из рисунка:

$$r = \frac{R}{\sin \alpha}, \quad dl = \frac{dr}{\sin \alpha} = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha} = \frac{R d\alpha}{\sin^2 \alpha}$$

Используя эти данные, получим:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot R d\alpha \sin \alpha \sin^2 \alpha}{\sin^2 \alpha R^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \sin \alpha d\alpha$$

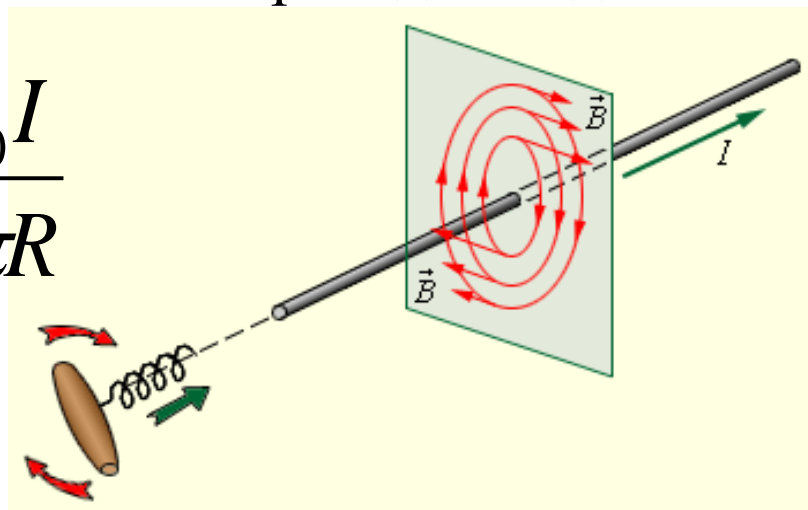
Теперь при сложении этих вкладов, то есть, при интегрировании, будет меняться только угол  $\alpha$  в пределах от 0 до  $\pi$ :

$$B_A = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} (-\cos \alpha) \Big|_0^\pi = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

Вектор магнитной индукции поля прямолинейного тока пропорционален величине тока  $I$  и обратно пропорционален расстоянию  $R$  от проводника до рассматриваемой точки.

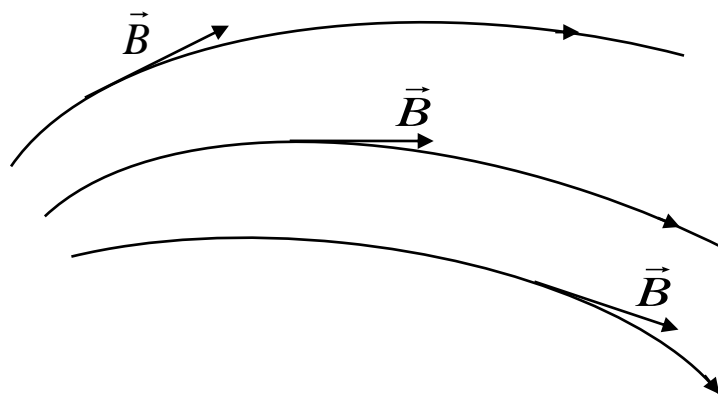
Магнитное поле прямолинейного проводника с током на расстоянии  $R$  от него

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



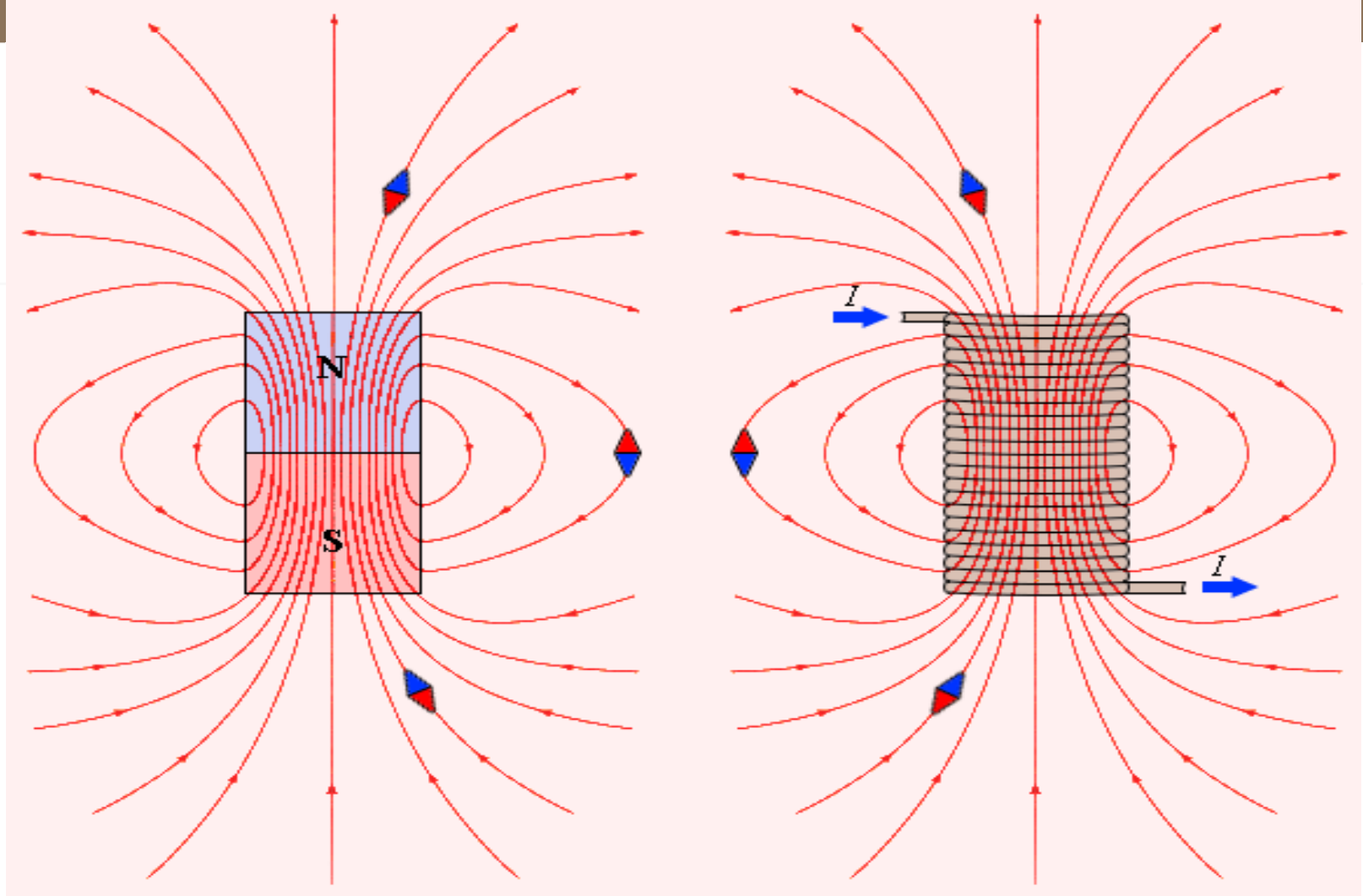
# Линии магнитной индукции

Магнитное поле, также как и электростатическое, принято представлять графически магнитными силовыми линиями. Как и прежде, это, в общем случае, кривая, касательные к любой точке которой совпадают по направлению с векторами магнитной индукции в данных точках



Густота магнитных силовых линий равна значению индукции в данной области пространства. «Густота» — это число силовых линий, проходящих через единичную поверхность, ориентированную перпендикулярно магнитному полю.

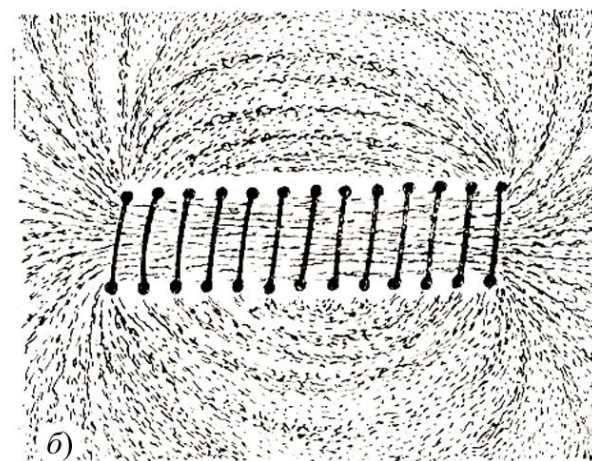
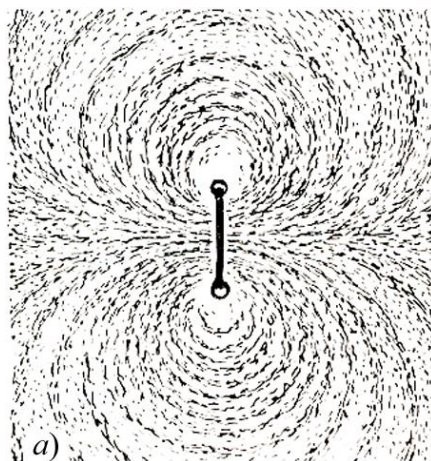




Линии магнитной индукции полей постоянного магнита и катушки с током. Индикаторные магнитные стрелки ориентируются по направлению касательных к линиям индукции.

Обратите внимание на аналогию магнитных полей постоянного магнита и катушки с током. Линии магнитной индукции всегда замкнуты, они нигде не обрываются. Это означает, что **магнитное поле не имеет источников — магнитных зарядов**. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются вихревыми. Картину магнитной индукции можно наблюдать с помощью мелких железных опилок, которые в магнитном поле намагничиваются и, подобно маленьким магнитным стрелкам, ориентируются вдоль линий индукции.

Поля кругового тока и катушки с током (соленоида)



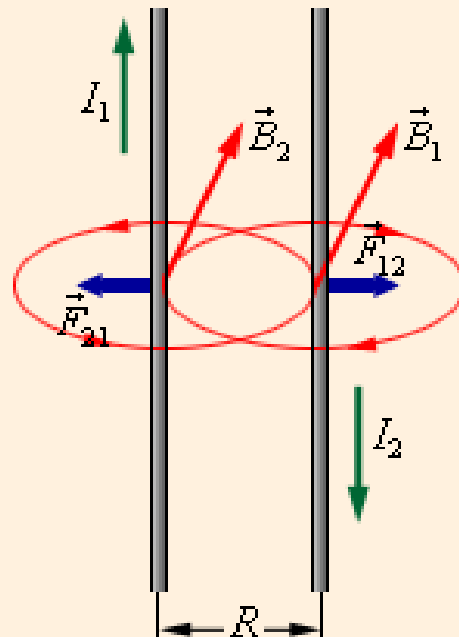
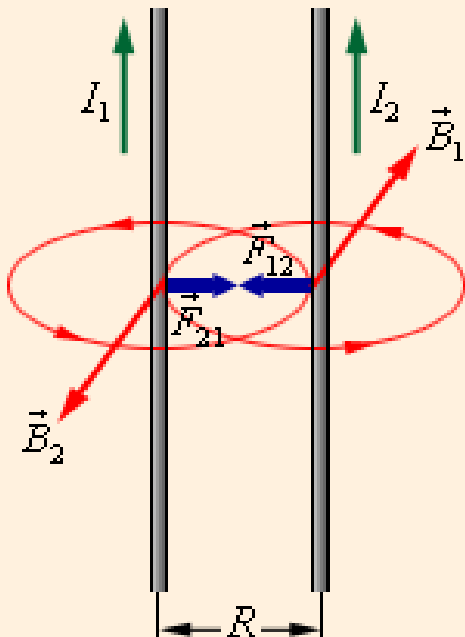
## Магнитное взаимодействие проводников с током

Первый ток  $I_1$  в месте нахождения второго создаёт магнитное поле:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R}$$

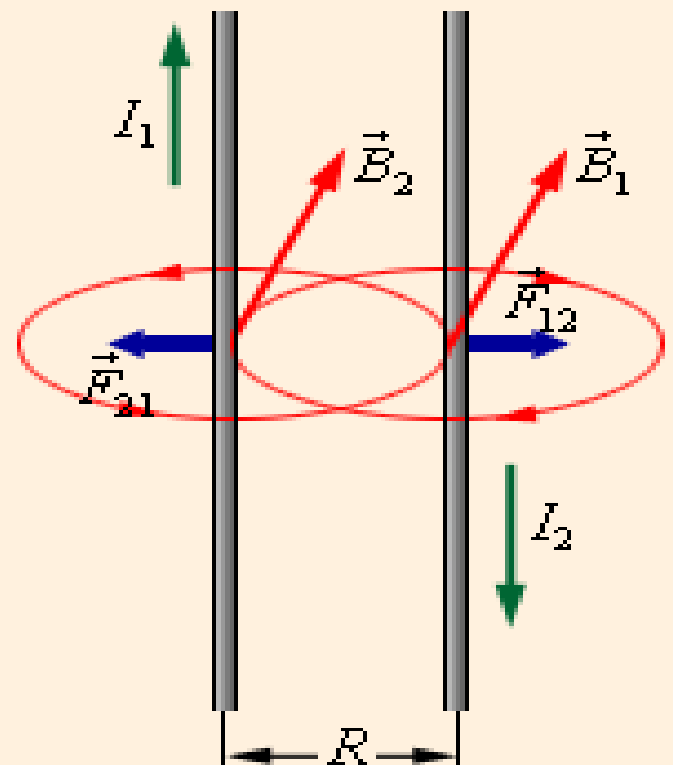
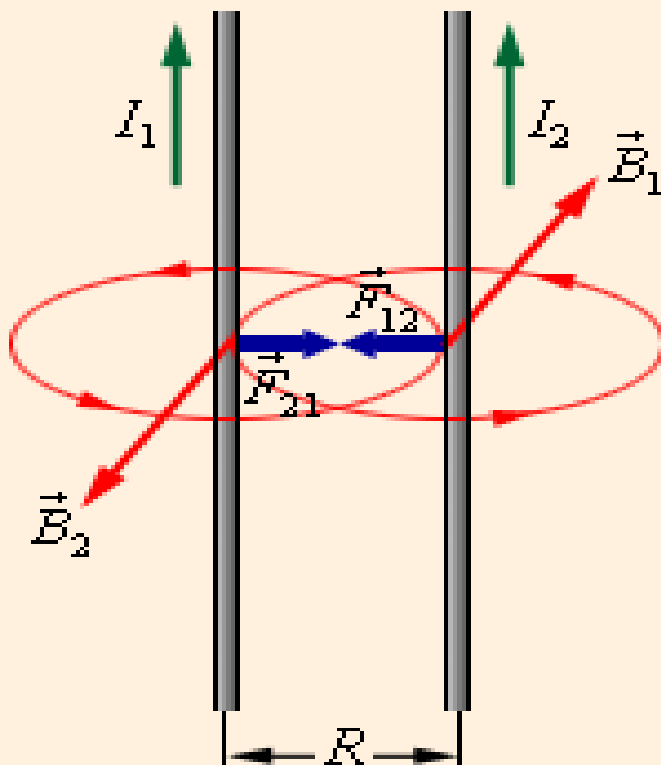
Где поле  $B_1$  действует на ток  $I_2$  с силой Ампера:

$$F_{12} = F_A = I_2 \cdot l \cdot B_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \cdot l}{2\pi R}$$



Магнитное взаимодействие параллельных и антипараллельных токов.

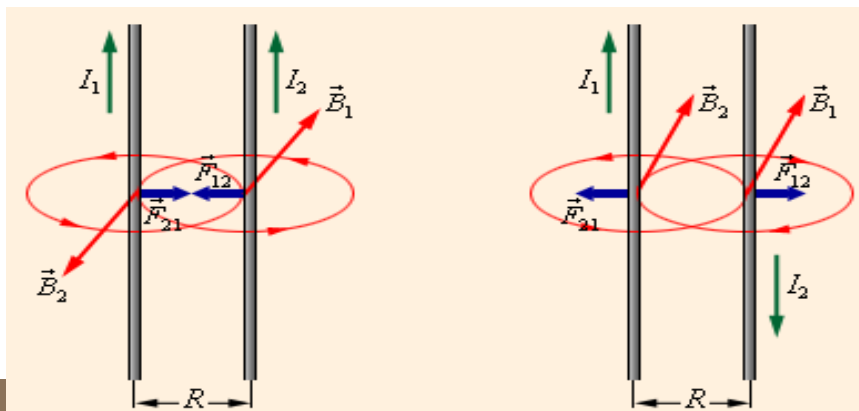
При магнитном взаимодействии параллельные токи притягивались, а антипараллельные отталкивались, линии магнитной индукции поля прямолинейного проводника направлены по часовой стрелке, если смотреть вдоль проводника по направлению  $\vec{B}_1$  или  $\vec{B}_2$  и образуют замкнутые окружности.



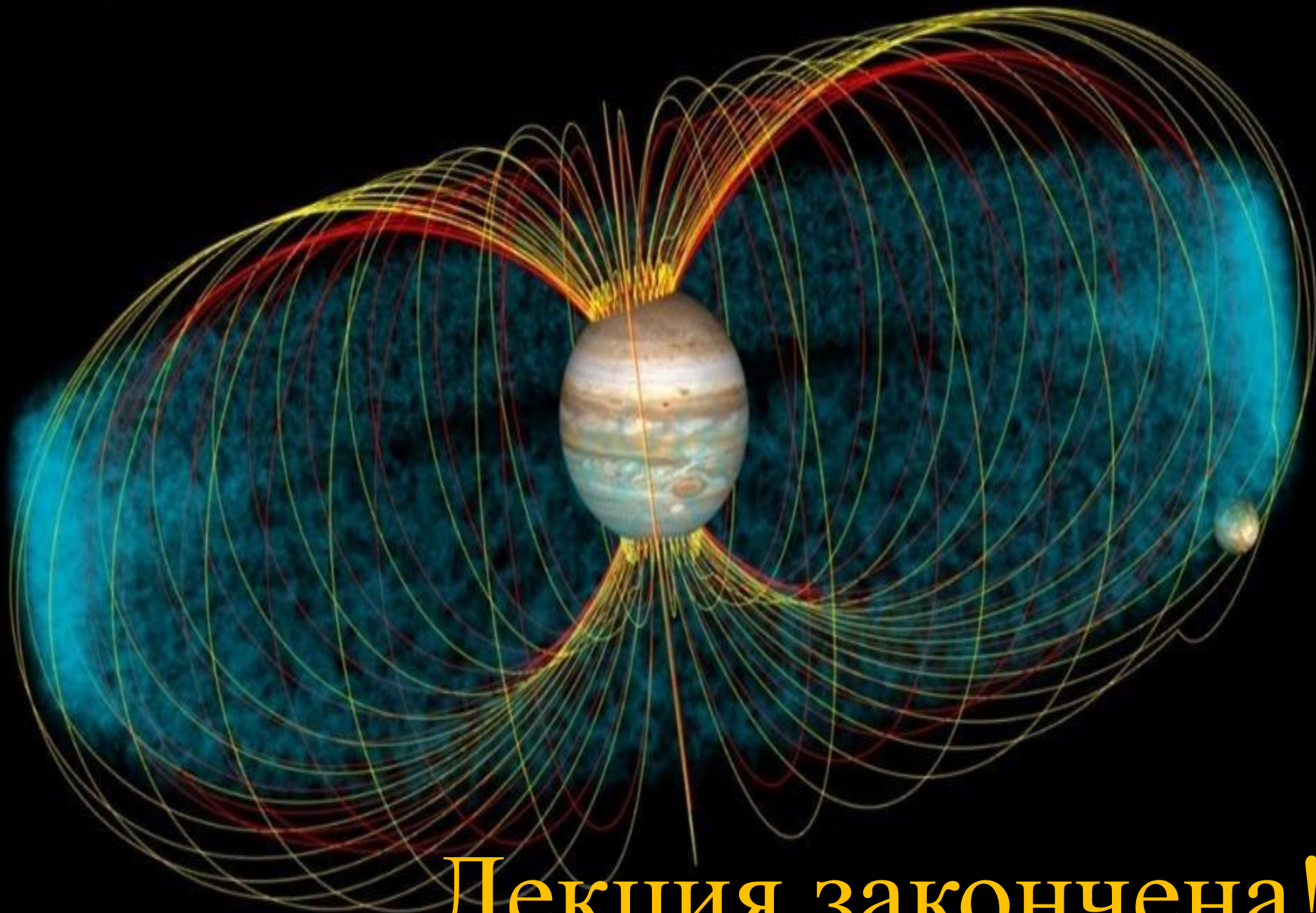
# Единица силы тока

На основе закона Ампера устанавливается эталон единицы силы тока в системе СИ:

Силе постоянного тока в **1 А** (Ампер) соответствует ток, при прохождении которого по двум параллельным прямолинейным длинным проводникам, расположенным в вакууме **на расстоянии одного метра**, соответствует сила магнитного взаимодействия на каждый метр длины проводников, равная  **$2 \cdot 10^{-7}$  Н.**







Лекция закончена!