

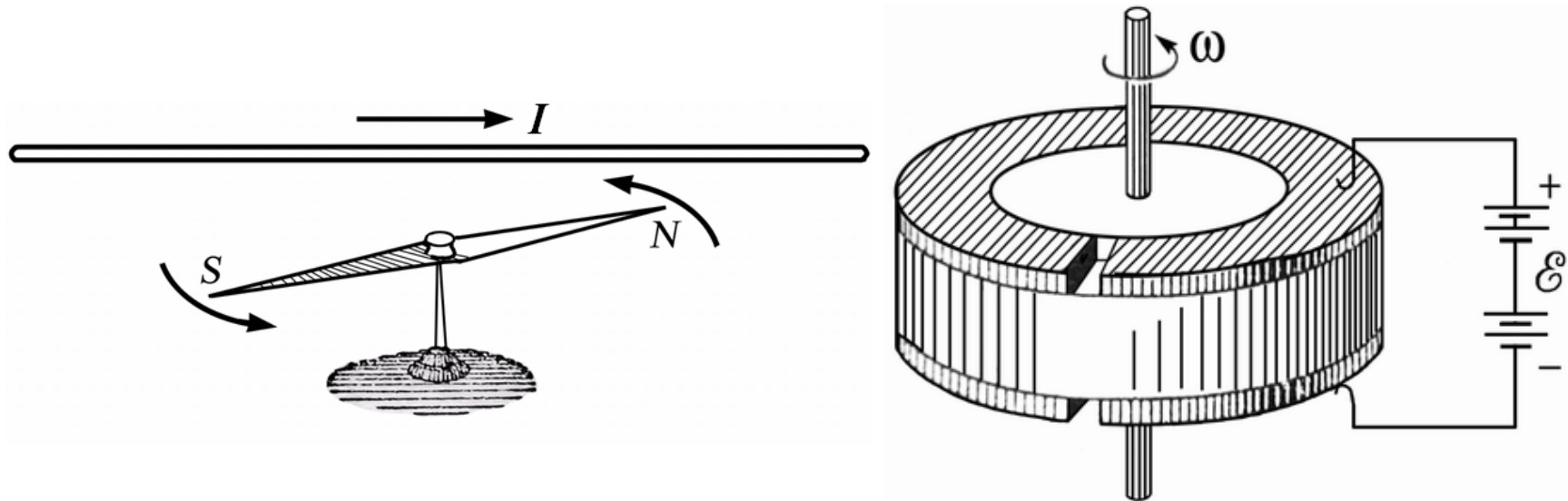
ОБЩАЯ ФИЗИКА.  
Электромагнетизм.  
Лекции №13-14  
**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ**

- Понятие о магнитном поле
- Вектор магнитной индукции – силовая характеристика магнитного поля
- Силовые линии магнитного поля
- Магнитный поток. Закон Гаусса для магнитного потока в дифференциальной и интегральной форме
- Закон Био – Савара – Лапласа
- Применение закона Био–Савара–Лапласа для расчета магнитных полей
- Закон полного тока
- Закон полного тока в интегральной форме
- Применение закона полного тока для вычисления простейших полей
- Закон полного тока в дифференциальной форме

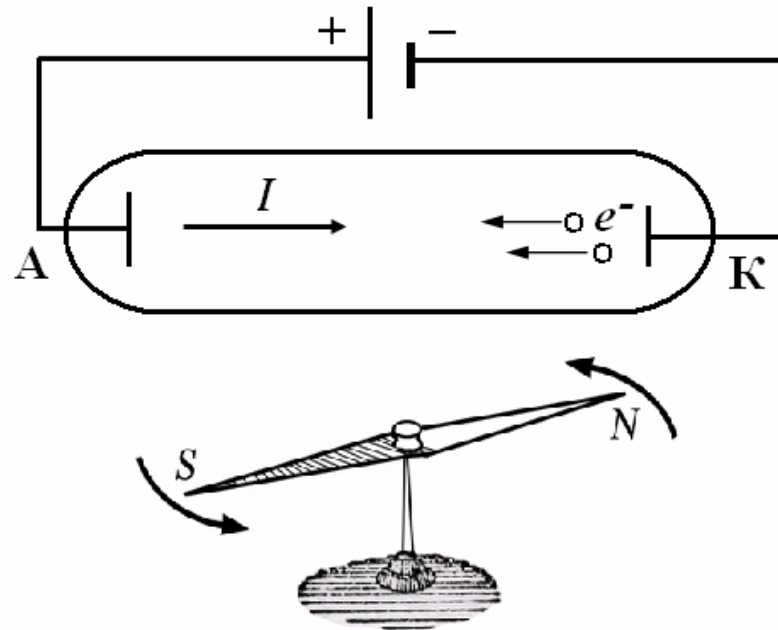
# Понятие о магнитном поле

Опыты показывают, что вокруг проводников с током и постоянных магнитов существует силовое поле, которое оказывает силовое действие на другие проводники с током или постоянные магниты. Это поле было названо *магнитным*.

Опыт Эрстеда (1820 г.)    Опыт Эйхенвальда (1901 г.)



## Опыт Иоффе (1911 г.)



*Эксперименты показывают.*

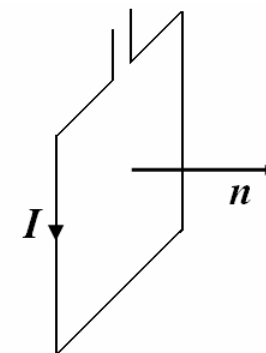
- 1) Движущиеся относительно системы отсчета заряды (токи) создают магнитное поле.*
- 2) Магнитное поле действует на движущиеся заряды, а на неподвижные не действует.*

# Вектор магнитной индукции – силовая характеристика магнитного поля

1) Магнитное поле можно было бы измерить путем внесения в различные точки поля элемента тока. Однако элемент тока выделить невозможно, так как токи протекают по замкнутой цепи.

2) Магнитное поле можно было бы измерить путем измерения действия на магнитную стрелку. Численный расчет её магнитных свойств затруднителен.

*Поэтому для изучения и измерения магнитного поля используется рамка или контур с током.*



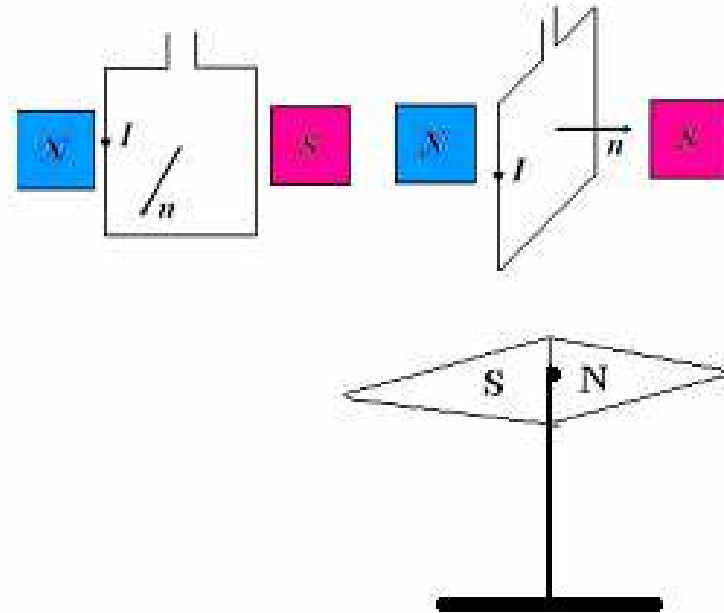
Магнитный момент рамки:  $P_m = I \cdot S$ . Так как рамка характеризуется ориентацией в пространстве, то магнитный момент – величина векторная:  $\vec{P}_m = P_m \vec{n} = IS\vec{n}$ .

Опыты показывают, что для данной точки пространства отношение  $M_{max}$  и  $P_m$  величина постоянная:

$$\frac{M_{max}}{P_m} = \frac{M_{max}}{IS} = B$$

### **Магнитная индукция $B$**

в данной точке однородного магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с единичным магнитным моментом  $P_m = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ , когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля (вектору  $B$ ).

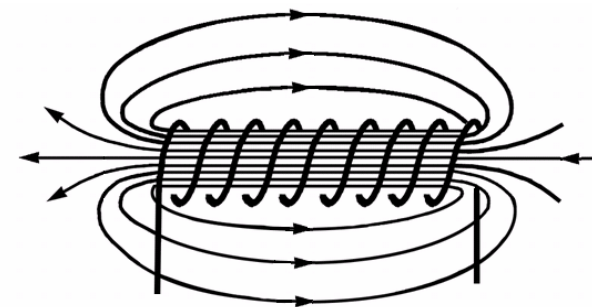
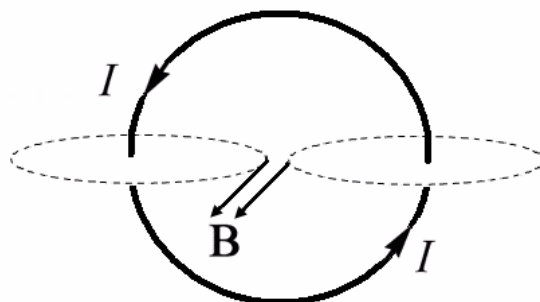
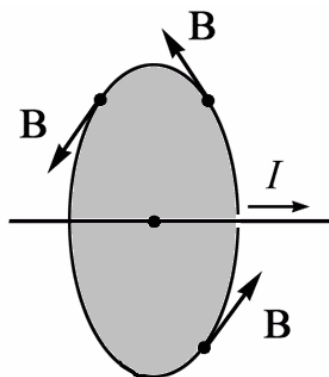


# Силовые линии магнитного поля

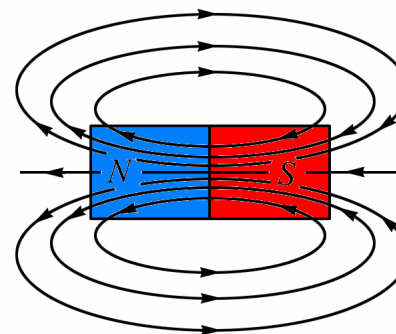
Линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , называются *силовыми линиями* магнитного поля.

Магнитное поле – *вихревое*.

- Прямой ток
- Круговой ток
- Соленоид



- Постоянный магнит



## Магнитный поток. Закон Гаусса для магнитного потока в дифференциальной и интегральной форме

Силовые линии магнитного поля замкнуты, следовательно, дивергенция вектора  $\mathbf{B}$  равна нулю.

Элементарный поток вектора индукции  $\mathbf{B}$  магнитного поля:

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{S}; \quad \Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}.$$

По теореме Остроградского-Гаусса:  $\oint_S \vec{B} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \vec{B} dV,$

$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$  - закон Гаусса для вектора  $\mathbf{B}$  в интегральной форме.



# Закон Био–Савара–Лапласа

Магнитная индукция зависит от:

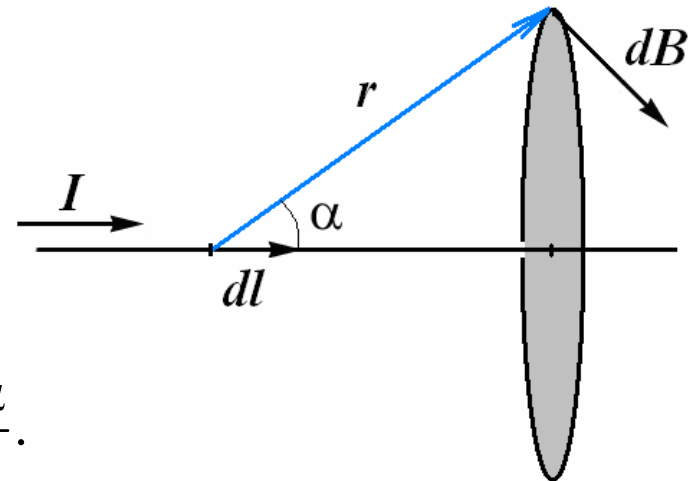
- 1) силы тока  $I$ , протекающего по проводнику
- 2) формы и размеров проводника
- 3) положения точки относительно проводника
- 4) состояния окружающей среды (магнитной проницаемости)

Закон Био–Савара–Лапласа:

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

В скалярном виде:

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



Отношение магнитной индукции в среде  $B_{\text{ср}}$  к магнитной индукции в вакууме  $B_0$  называется **относительной магнитной проницаемостью среды**:

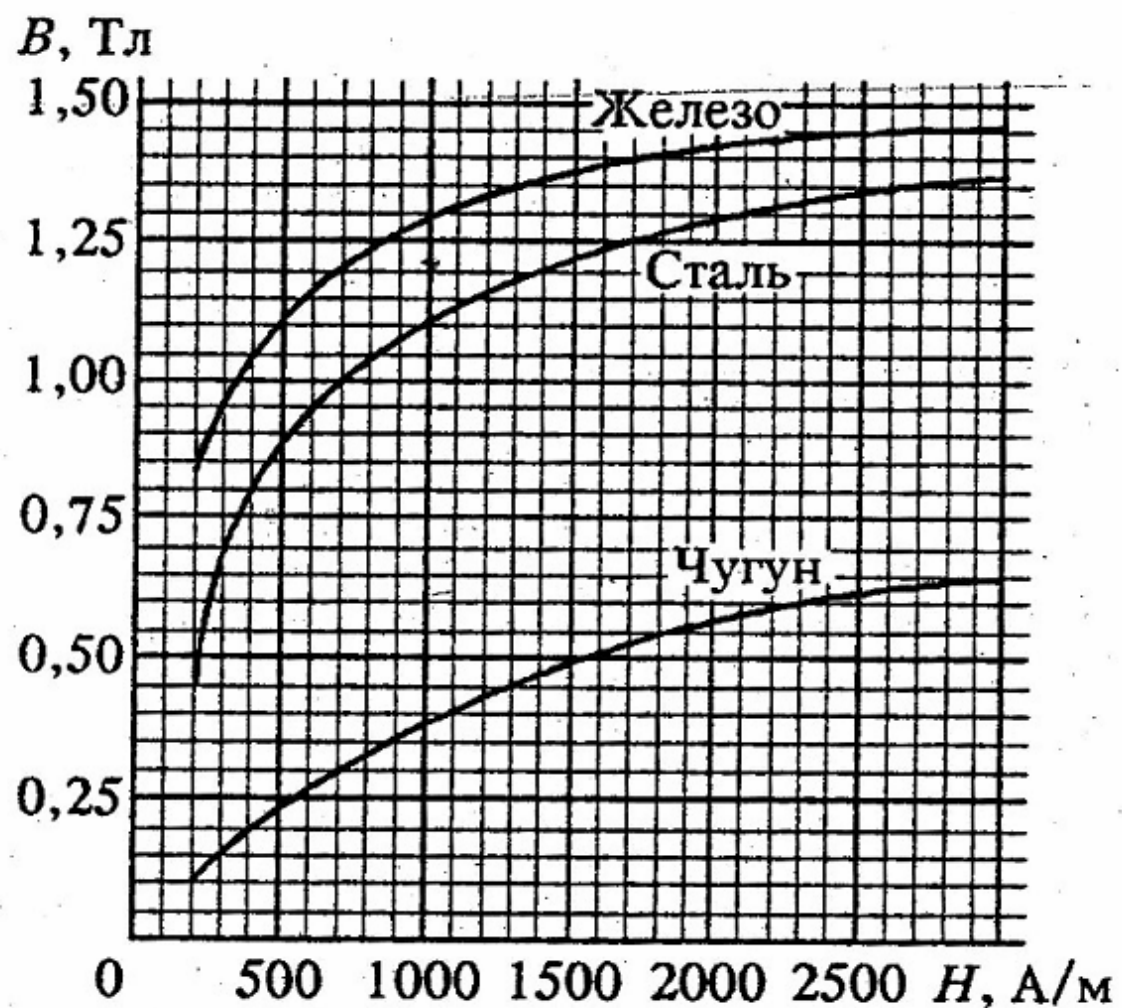
$$\mu = \frac{B_{\text{ср}}}{B_0}$$

Если  $\mu < 1$ , то среда – диамагнетик,  
 $\mu > 1$  – парамагнетик,  
 $\mu \gg 1$  – ферромагнетик.

Принцип суперпозиции для магнитного поля:  $\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$   
Закон Био–Савара–Лапласа для напряженности магнитного поля:

$$d\vec{H} = \frac{I \left[ d\vec{l}, \vec{r} \right]}{4\pi r^3}.$$

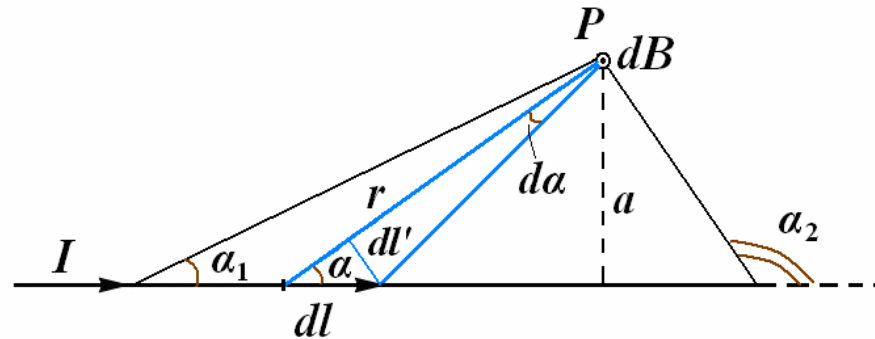
# Связь $B$ и $H$ для ферромагнетиков



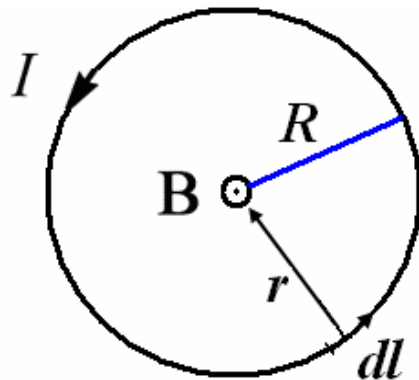
# Применение закона Био–Савара–Лапласа для расчета магнитных полей

- **Магнитное поле прямолинейного проводника с током**

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$



- **Магнитное поле в центре кругового тока**

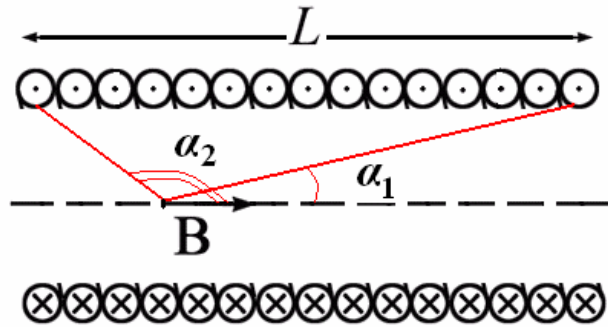


$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

- **Магнитное поле на оси кругового тока**

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

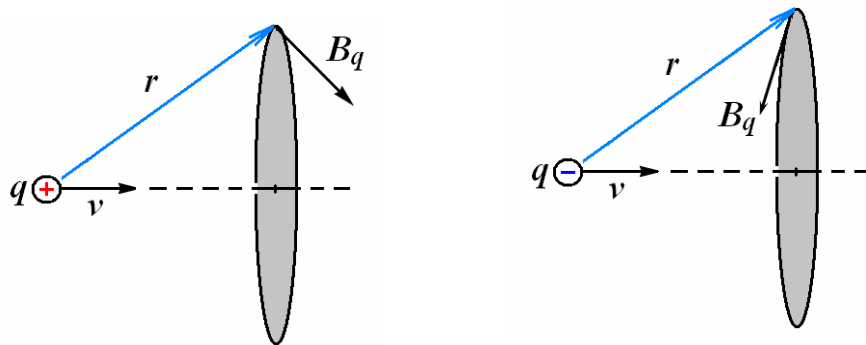
- **Поле соленоида**



$$B = \frac{\mu_0}{2} nI (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$$

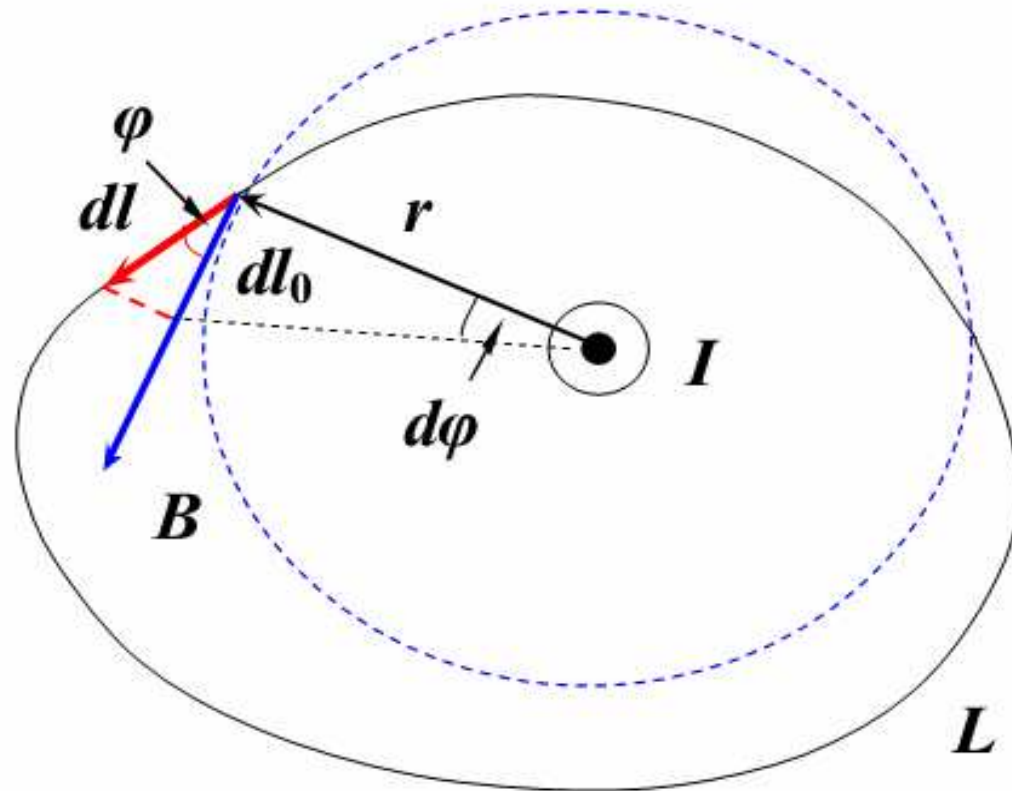
Если соленоид имеет бесконечную длину, то  $B = \mu\mu_0 nI$

- **Магнитное поле движущегося заряда**



$$B_q = \frac{d\vec{B}_N}{dN} = \frac{\mu_0 q [\vec{v}, \vec{r}]}{4\pi r^3}$$

# Закон полного тока в интегральной форме



# Закон полного тока в интегральной форме

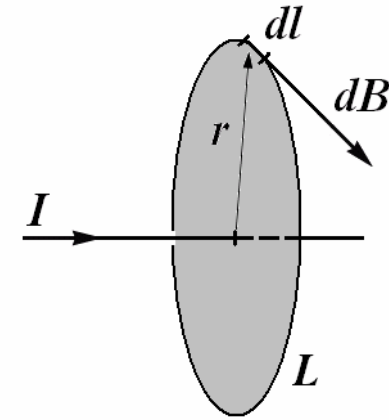
Циркуляция вектора  $\vec{B}$  по замкнутому контуру  $L$ :

$$\left. \begin{aligned} \oint_L \vec{B} d\vec{l} &= \oint_L B dl \cos \varphi = \oint_L B dl_0. \\ B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \\ dl_0 &= r d\varphi. \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \oint_L \vec{B} d\vec{l} &= \oint_L \frac{\mu_0 I}{2\pi r} r d\varphi = \frac{\mu_0 I r}{2\pi r} \int_0^{2\pi} d\varphi = \mu_0 I. \\ \oint_L \vec{B} d\vec{l} &= \mu_0 \int_S \vec{j} d\vec{S} \end{aligned}$$

**Циркуляция вектора магнитной индукции по замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, пронизывающих этот контур.**

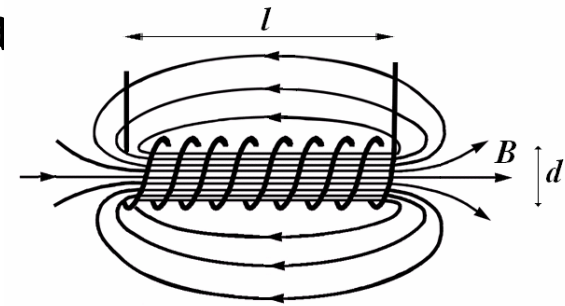
- Поле бесконечного прямого тока

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



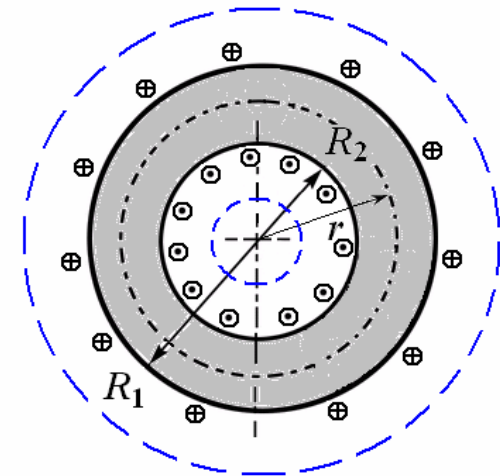
- Магнитное поле длинного соленоида

$$B = \mu_0 n I$$



- Магнитное поле тороида

$$B_{\text{ср}} = \frac{\mu_0 N}{2\pi R_{\text{ср}}} I = \mu_0 n I$$





# Закон полного тока в дифференциальной форме

$$\left. \begin{aligned} \int_S \operatorname{rot} \vec{B} d\vec{S} &= \mu_0 \int_S \vec{j} d\vec{S} \\ \operatorname{rot} \vec{B} &= \mu_0 \vec{j}; \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} \end{aligned} \right\}$$

Отсюда  $\operatorname{rot} \vec{B}$  совпадает с вектором плотности тока в данной точке поля по направлению.

Магнитное поле – поле вихревое.