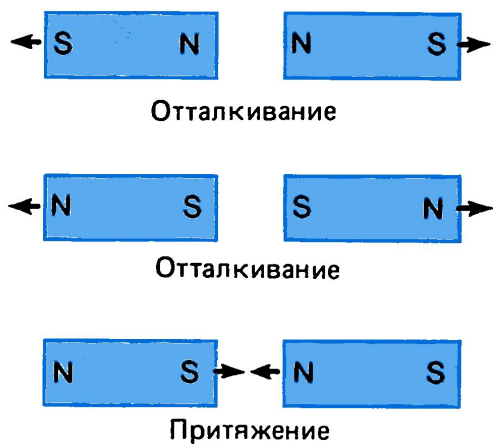
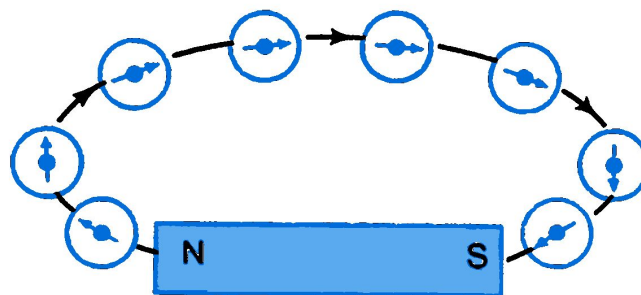


## Природные магниты

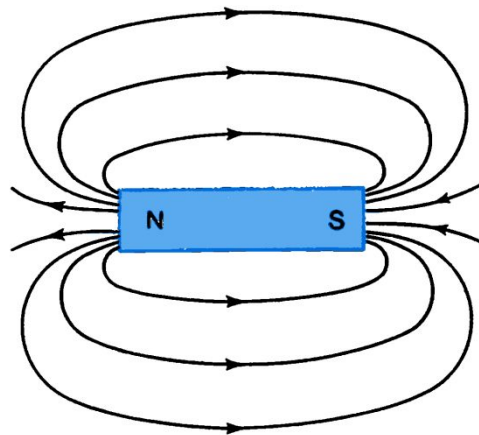
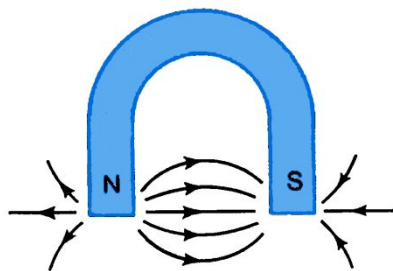


## Стрелка компаса рядом с магнитом

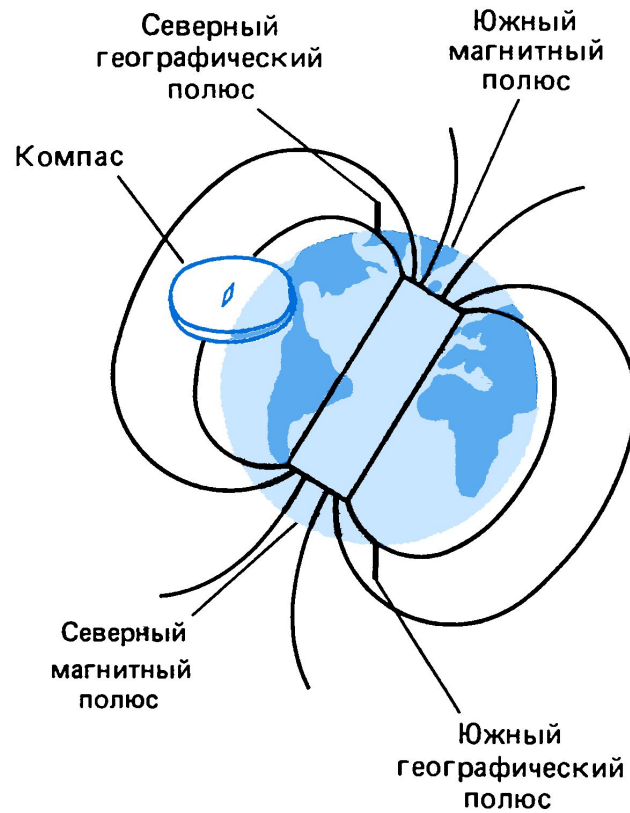


**Рис. 28.1.** Одноименные полюса магнитов отталкиваются, разноименные притягиваются.

## Силовые линии



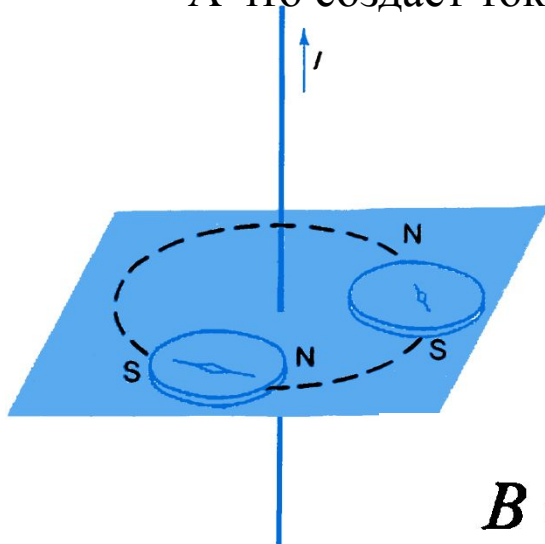
- 1) Направление
- 2) Концентрация



У поверхности Земли, вдали от полюсов, магнитное поле можно считать, направленным горизонтально вдоль магнитных меридианов

Электрический ток создает магнитное поле

А что создает ток?



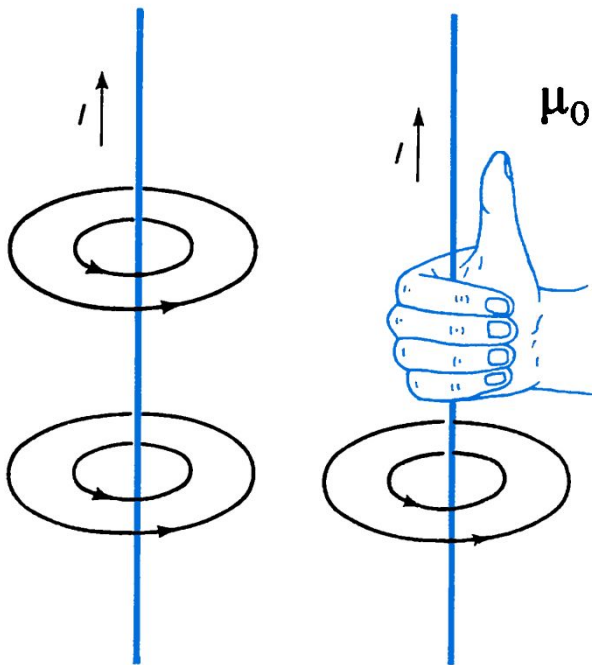
Концентрические окружности  
для прямого участка проводника

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

В окрестности длинного прямого  
проводника

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

Определение направления

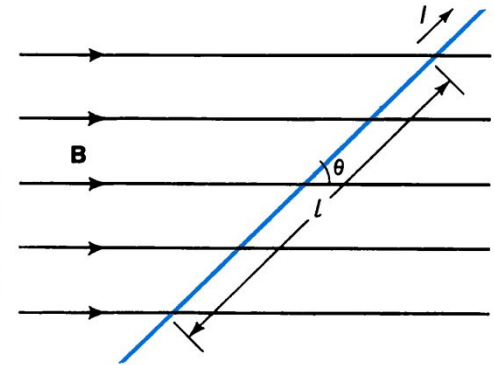
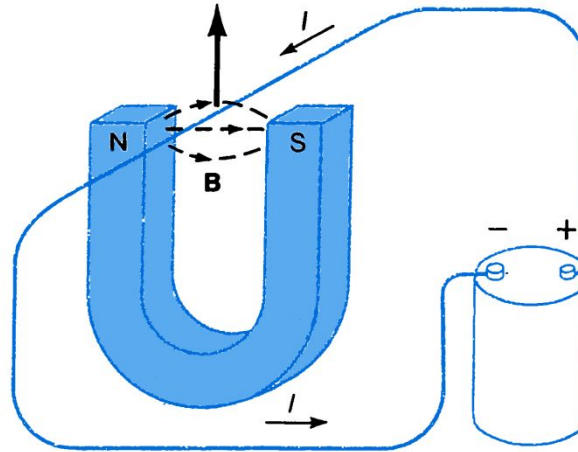
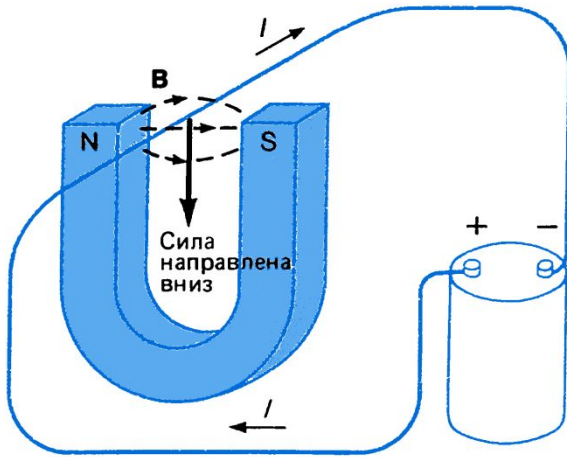


На проводник с током, находящийся во внешнем магнитном поле, действует сила

$$\mathbf{F} = I\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

Сила направлена вверх

$$F = IlB \sin \theta$$

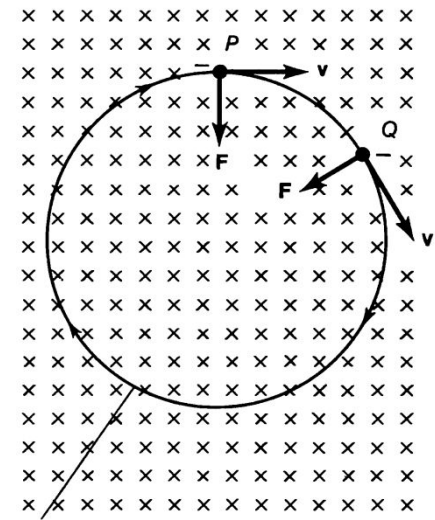
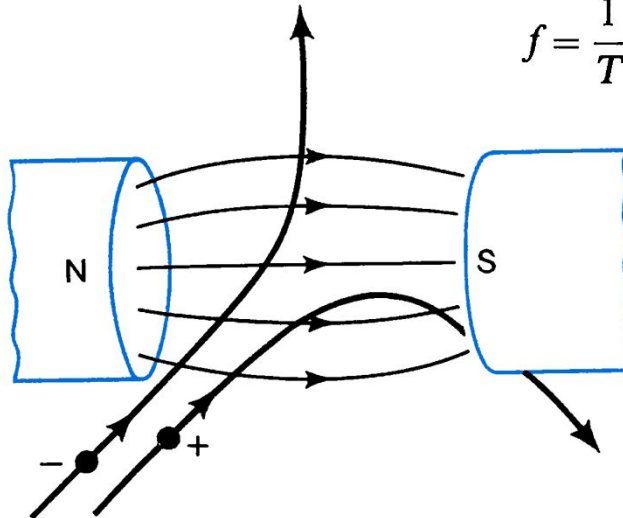


На заряженную частицу, движущуюся во внешнем магнитном поле, действует сила

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$F = qvB \sin \theta$$

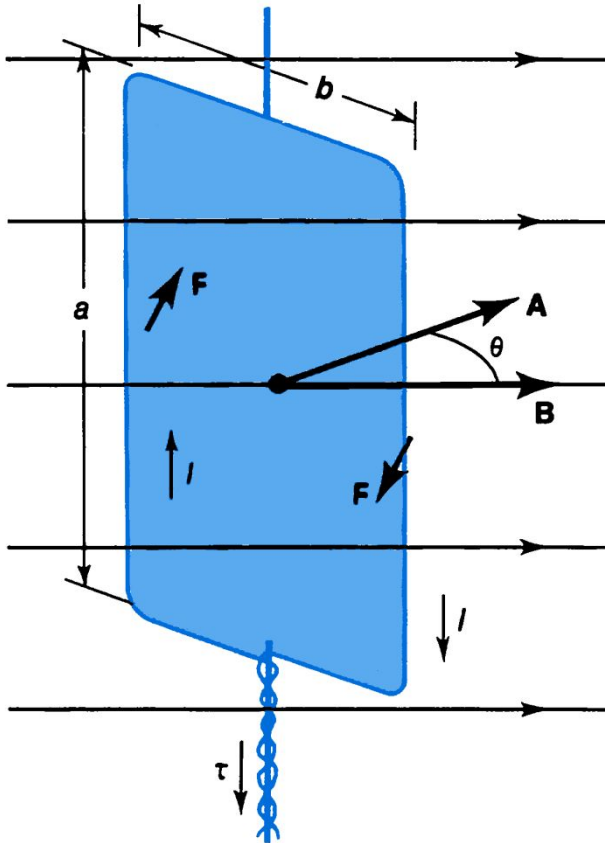
$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$



Траектория электрона  
Вектор  $\mathbf{B}$  направлен от наблюдателя

# Магнитный дипольный момент

## Вращающий момент рамки с током в магнитном поле



$$F = I a B$$

$$\tau = N I A B \sin \theta$$

Вращающий момент  
(момент силы)

$$\boldsymbol{\mu} = N I \mathbf{A}$$

Магнитный дипольный момент

$$\boldsymbol{\tau} = N I \mathbf{A} \times \mathbf{B}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}$$

Рамка с током – магнитный диполь,  
который обладает потенциальной  
энергией во внешнем магнитном поле

# Закон Ампера

$$\sum B_{\parallel} \Delta l = \mu_0 I$$

- 1) Контур замкнутый
- 2) На каждом участке  $\Delta l$  параллельная составляющая магнитного поля постоянна

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = B(2\pi r) = \mu_0 I$$

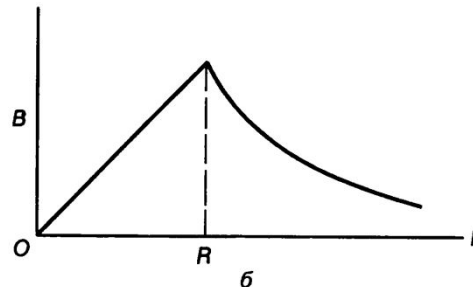
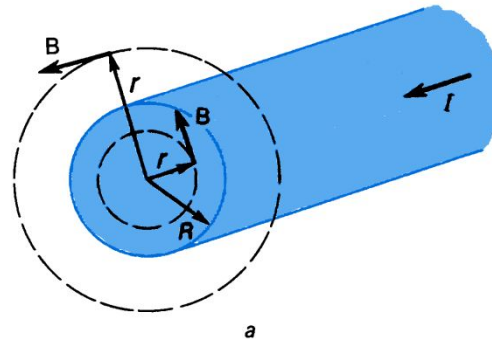
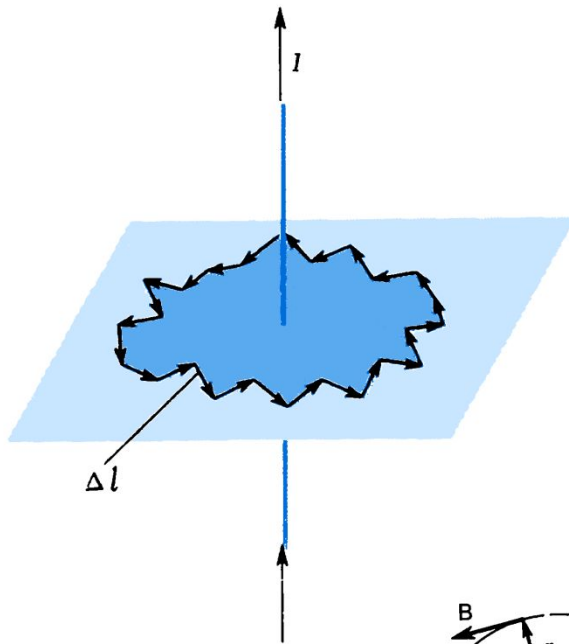
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

(снаружи)

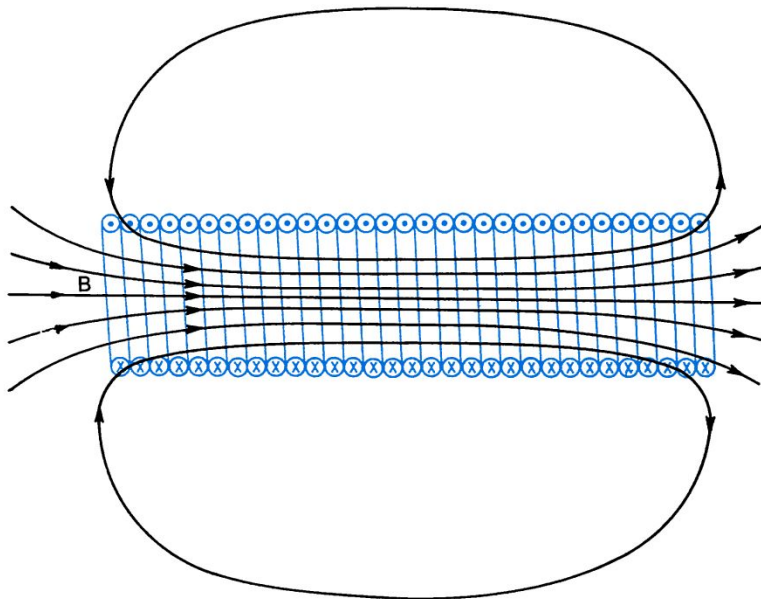
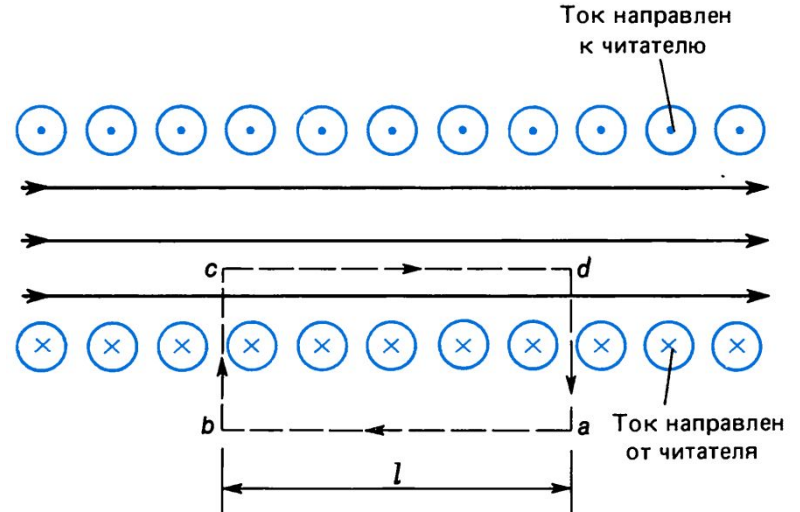
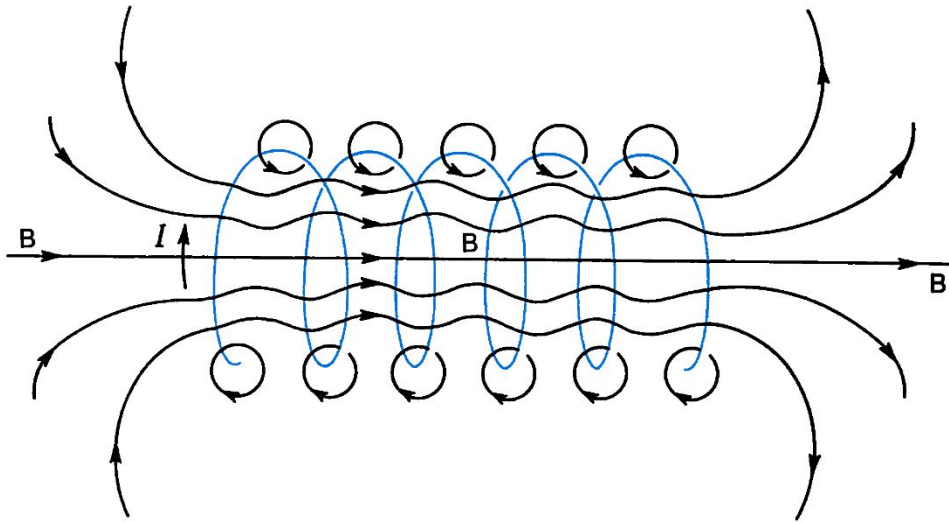
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = B(2\pi r) = \mu_0 I \left( \frac{\pi r^2}{\pi R^2} \right)$$

$$B = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2} \quad [r < R]$$

(внутри)



# Соленоид



Витки плотно намотаны  
 Поле внутри практически однородно  
 Снаружи поле незначительно

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} + \int_b^c \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} + \int_c^d \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} + \int_d^a \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$$

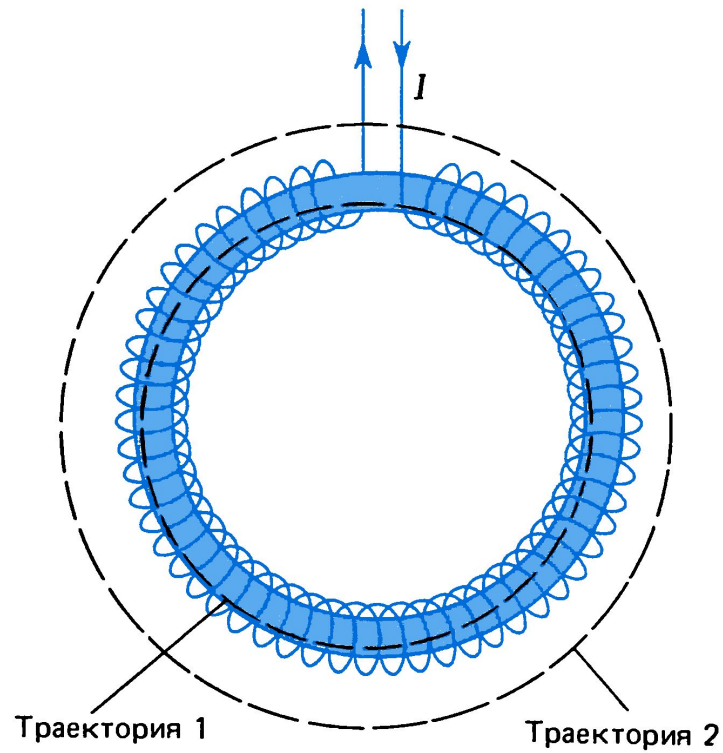
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \int_c^d \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = Bl$$

$$Bl = \mu_0 NI$$

# Соленоид, свернутый в тор

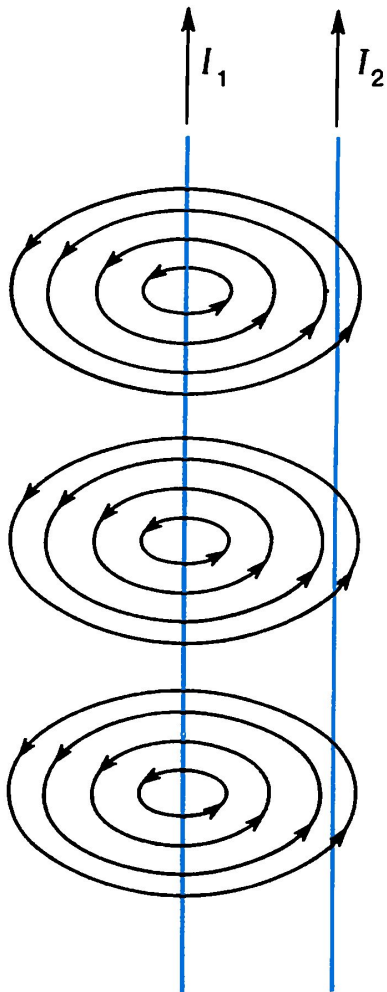
$$B(2\pi r) = \mu_0 NI$$

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





# Сила, действующая между двумя проводниками с током



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

$$\frac{F}{l} = I_2 B_1$$

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi L}$$

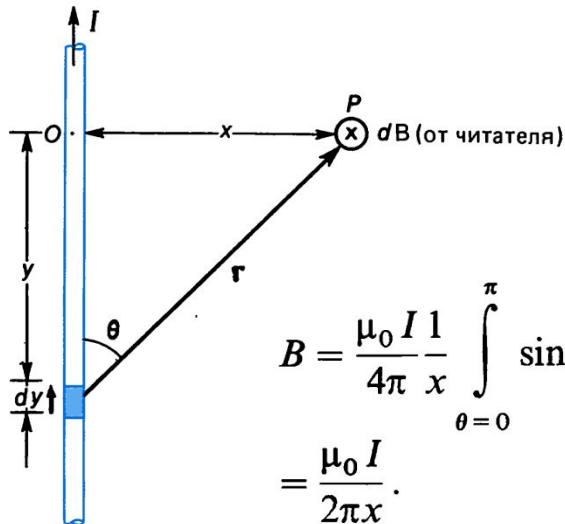
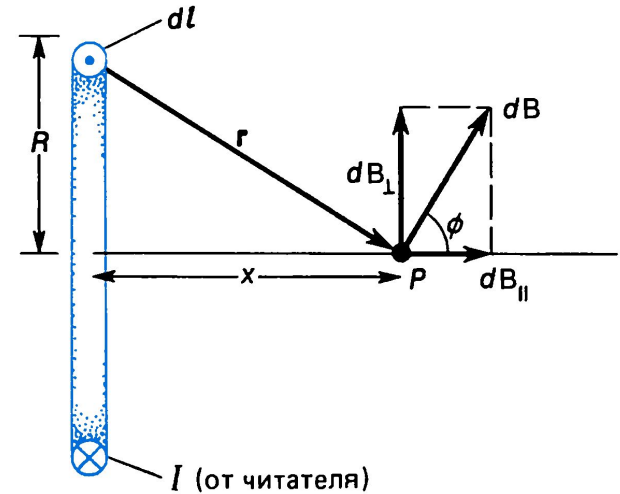
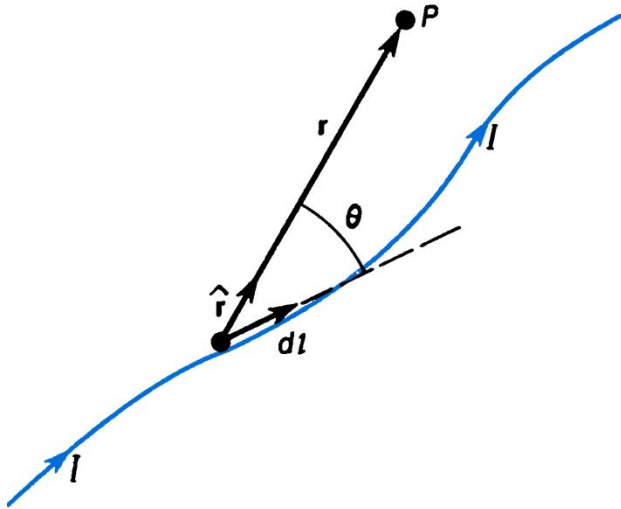
# Закон Био-Савара

$\hat{\mathbf{r}}$  – единичный вектор в направлении  $\mathbf{r}$  ( $\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/r$ )

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

$$d\mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{I [d\mathbf{l}, \mathbf{r}]}{r^3}$$

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



$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dy \sin \theta}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi x} \int_{\theta=0}^{\pi} \sin \theta d\theta = -\frac{\mu_0 I}{4\pi x} \cos \theta \Big|_0^{\pi} = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{R}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \int dl = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

● Магнитная индукция  $\mathbf{B}$  связана с напряженностью  $\mathbf{H}$  магнитного поля (в случае однородной, изотропной среды) соотношением

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м/А}$$

или в вакууме

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}.$$

● Магнитная индукция в центре кругового проводника с током

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

где  $R$  — радиус кривизны проводника.

● Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечно длинным прямым проводником с током,

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

где  $r$  — расстояние от оси проводника.

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком проводника,

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2).$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I}{r_0} \cos \varphi$$

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i.$$

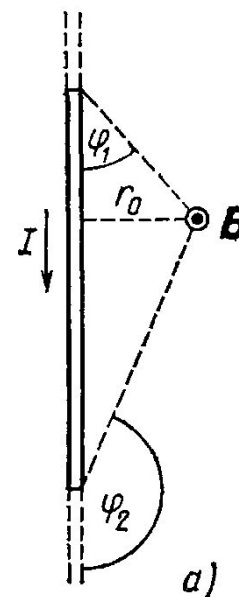
В частном случае наложения двух полей

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2,$$

а модуль магнитной индукции

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1 B_2 \cos \alpha},$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$ .



● Магнитная индукция поля, создаваемого соленоидом в средней его части (или тороида на его оси),

$$B = \mu_0 \mu n I,$$

где  $n$  — число витков, приходящихся на единицу длины соленоида;  $I$  — сила тока в одном витке.

21.5. По обмотке очень короткой катушки радиусом  $r=16$  см течет ток  $I=5$  А. Сколько витков  $N$  проволоки намотано на катушку, если напряженность  $H$  магнитного поля в ее центре равна  $800$  А/м?

А<sub>о</sub>

21.10. Длинный прямой соленоид из проволоки диаметром  $d=0,5$  мм намотан так, что витки плотно прилегают друг к другу. Какова напряженность  $H$  магнитного поля внутри соленоида при силе тока  $I=4$  А? Толщиной изоляции пренебречь.

21.17. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводам текут токи  $I_1=50$  А и  $I_2=100$  А в противоположных направлениях. Расстояние  $d$  между проводами равно  $20$  см. Определить магнитную индукцию  $B$  в точке, удаленной на  $r_1=25$  см от первого и на  $r_2=40$  см от второго провода.

21.22. По бесконечно длинному прямому проводу, изогнутому так, как это показано на рис. 21.14, течет ток  $I=100$  А. Определить магнитную индукцию  $B$  в точке  $O$ , если  $r=10$  см.

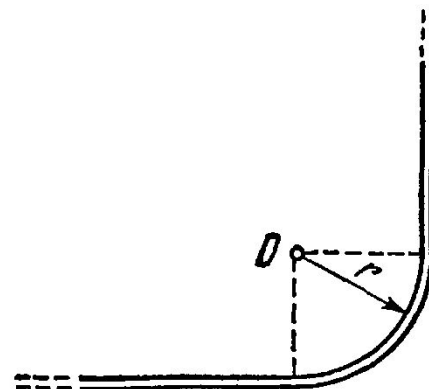


Рис. 21.14

21.31. Бесконечно длинный тонкий проводник с током  $I=50$  А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом  $R=10$  см. Определить в точке  $O$  магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого этим током, в случаях  $a$ — $e$ , изображенных на рис. 21.15.

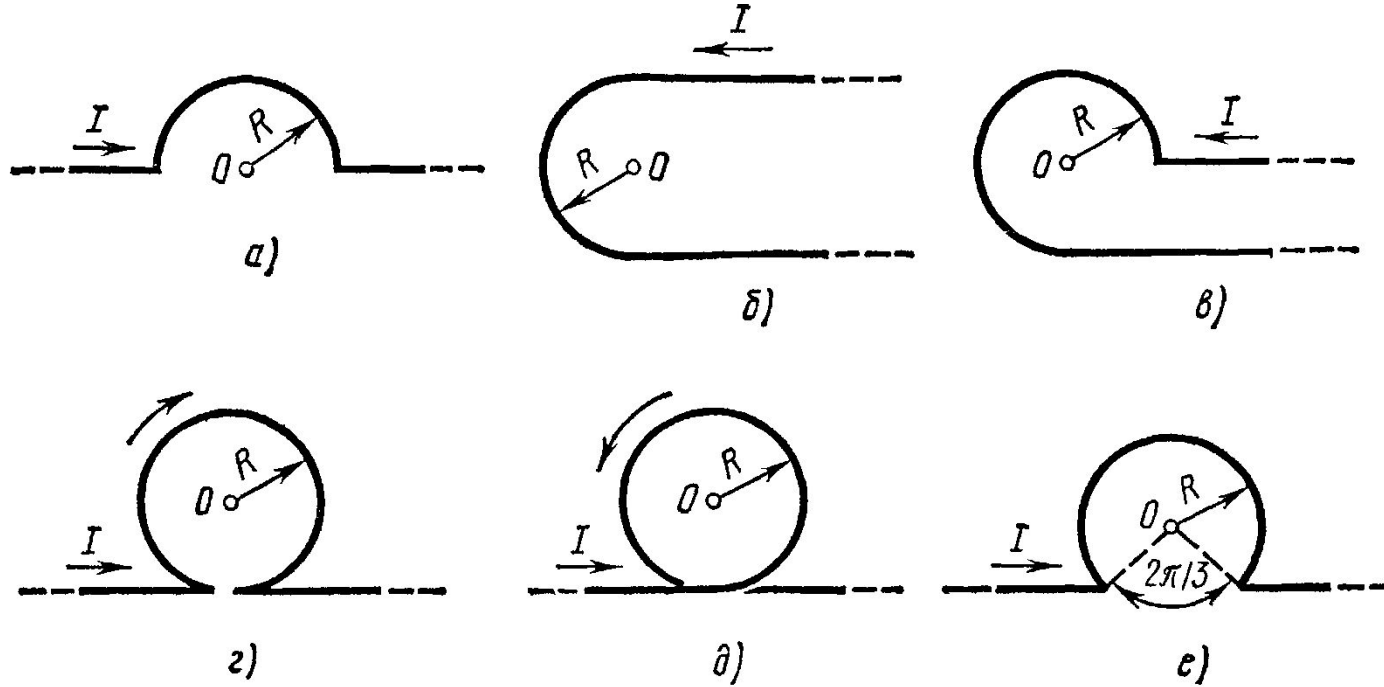


Рис. 21.15

21.34. Определить максимальную магнитную индукцию  $B_{\max}$  поля, создаваемого электроном, движущимся прямолинейно со скоростью  $v=10$  Мм/с, в точке, отстоящей от траектории на расстоянии  $d=1$  нм.

3.126. Определить магнитную индукцию на оси тонкого проволочного кольца радиусом  $R = 5$  см, по которому течет ток  $I = 10$  А, в точке  $A$ , расположенной на расстоянии  $d = 10$  см от центра кольца. [112 мкТл]

3.231. Найти магнитную индукцию в точке  $O$ , если проводник с током  $I = 8,0$  А имеет вид, показанный:  
 а) на рис. 3.67, а; б) на рис. 3.67, б.

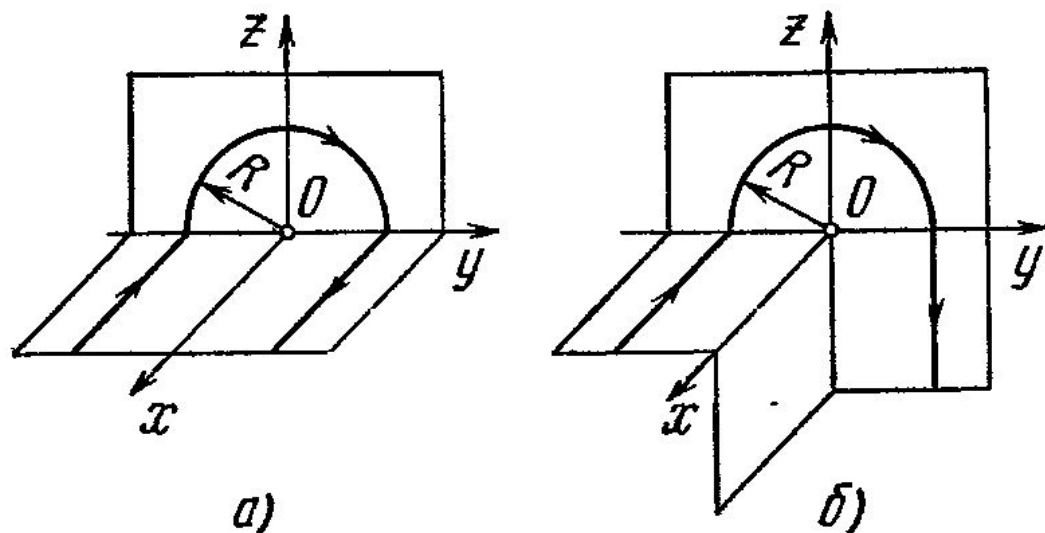


Рис. 3.67

● Закон Ампера. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле,

$$\mathbf{F} = [\mathbf{IB}]l,$$

где  $I$  — сила тока;  $\mathbf{l}$  — вектор, равный по модулю длине  $l$  проводника и совпадающий по направлению с током;  $\mathbf{B}$  — магнитная индукция поля.

Модуль вектора  $\mathbf{F}$  определяется выражением

$$F = BIl \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{l}$  и  $\mathbf{B}$ .

● Сила взаимодействия двух прямых бесконечно длинных параллельных проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$ , находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга, рассчитанная на отрезок проводника длиной  $l$ ,

выражается формулой

$$F = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} l.$$

● Магнитный момент контура с током

$$\mathbf{p}_m = IS,$$

где  $\mathbf{S}$  — вектор, равный по модулю площади  $S$ , охватываемой контуром, и совпадающий по направлению с нормалью к его плоскости.

● Механический момент, действующий на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле,

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m \mathbf{B}].$$

Модуль механического момента

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

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{p}_m$  и  $\mathbf{B}$ .

3.131. Два бесконечных прямолинейных параллельных проводника с одинаковыми токами, текущими в одном направлении, находятся друг от друга на расстоянии  $R$ . Чтобы их раздвинуть до расстояния  $2R$ , на каждый сантиметр длины проводника затрачивается работа  $A = 138$  нДж. Определить силу тока в проводниках [10 А]

3.134. По тонкому проволочному полукольцу радиусом  $R = 50$  см течет ток  $I = 1$  А. Перпендикулярно плоскости полукольца возбуждено однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл. Найти силу, растягивающую полукольцо. Действие на полукольцо магнитного поля подводющих проводов и взаимодействие отдельных элементов полукольца не учитывать. [0,01 Н]



**3.138.** Согласно теории Бора, электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите радиусом  $r = 52,8$  пм. Определить магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого электроном в центре круговой орбиты.  
[  $1,25 \cdot 10^{-23}$  Тл ]

**22.17.** Электрон в невозбужденном атоме водорода движется вокруг ядра по окружности радиусом  $r = 53$  пм. Вычислить магнитный момент  $p_m$  эквивалентного кругового тока и механический момент  $M$ , действующий на круговой ток, если атом помещен в магнитное поле, линии индукции которого параллельны плоскости орбиты электрона. Магнитная индукция  $B$  поля равна  $0,1$  Тл.

**22.28.** Короткая катушка площадью  $S$  поперечного сечения, равной  $150$  см<sup>2</sup>, содержит  $N = 200$  витков провода, по которому течет ток  $I = 4$  А. Катушка помещена в однородное магнитное поле напряженностью  $H = 8$  кА/м. Определить магнитный момент  $p_m$  катушки, а также вращающий момент  $M$ , действующий на нее со стороны поля, если ось катушки составляет угол  $\alpha = 60^\circ$  с линиями индукции.

22.38. Длинный прямой соленоид, содержащий  $n=5$  витков на каждый сантиметр длины, расположен перпендикулярно плоскости магнитного меридиана \*. Внутри соленоида, в его средней части, находится магнитная стрелка, установившаяся в магнитном поле Земли. Когда по соленоиду пустили ток, стрелка отклонилась на угол  $\alpha=60^\circ$ . Найти силу тока  $I$ .

\* Горизонтальную составляющую  $B_H$  магнитной индукции поля Земли принять равной 20 мкТл.

## Проверочная работа

3.89. Определить напряженность электрического поля в алюминиевом проводнике объемом  $V = 10 \text{ см}^3$ , если при прохождении по нему постоянного тока за время  $t = 5 \text{ мин}$  выделилось количество теплоты  $Q = 2,3 \text{ кДж}$ . Удельное сопротивление алюминия  $\rho = 26 \text{ нОм} \cdot \text{м}$ .  
[0,141 В/м]

20.2. Определить среднюю скорость  $\langle v \rangle$  упорядоченного движения электронов в медном проводнике при силе тока  $I = 10 \text{ А}$  и сечении  $S$  проводника, равном  $1 \text{ мм}^2$ . Принять, что на каждый атом меди приходится два электрона проводимости.

Молярная масса меди  $63,546 \text{ г/моль}$ . Плотность меди  $8930 \text{ кг/м}^3$ .

## Домашнее задание М1

- **Т. 3.120**
- **Ч. 21.7 ||| 21.9 ||| 21.15 ||| 21.32 (б,д)**

## Домашнее задание М2

- **Т. 3.133**
- **Ч. 22.2 ||| 22.8 ||| 22.18 ||| 22.29 ||| 22.36**