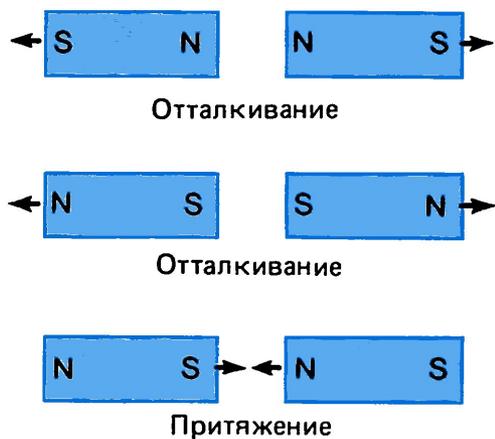
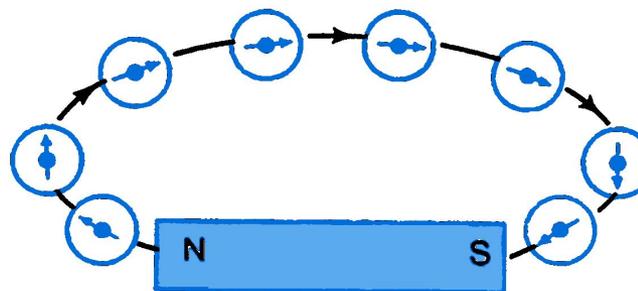


## Природные магниты

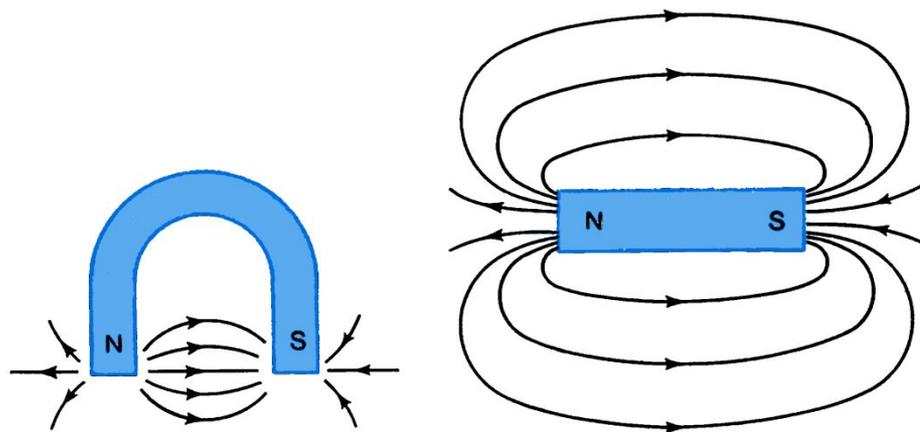


## Стрелка компаса рядом с магнитом

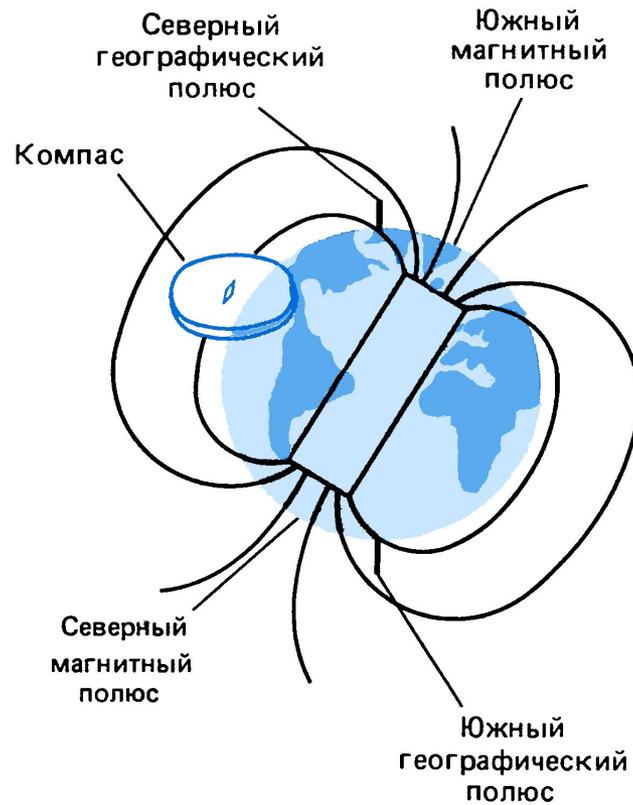


**Рис. 28.1.** Одноименные полюса магнитов отталкиваются, разноименные притягиваются.

## Силовые линии



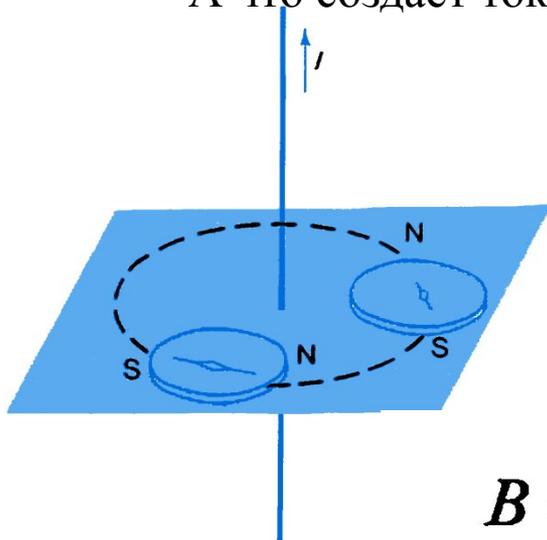
- 1) Направление
- 2) Концентрация



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

Электрический ток создает магнитное поле

А что создает ток?



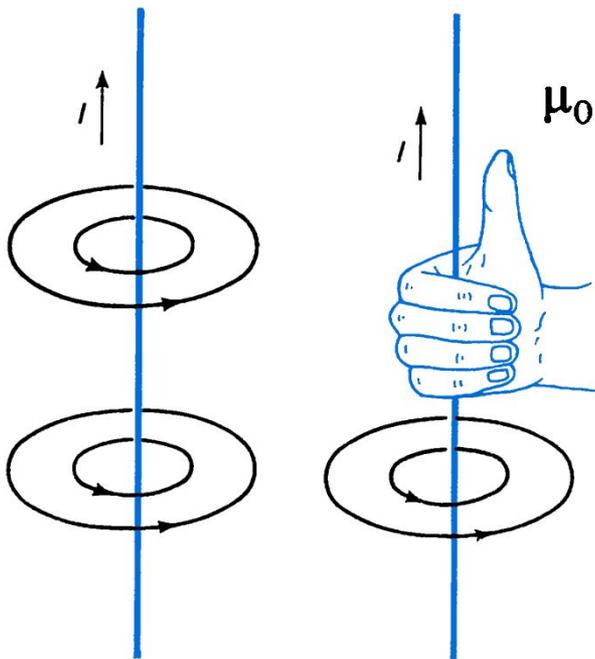
Концентрические окружности  
для прямого участка проводника

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

В окрестности длинного прямого  
проводника

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

Определение направления

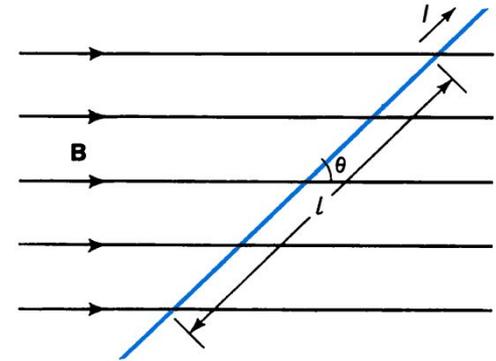
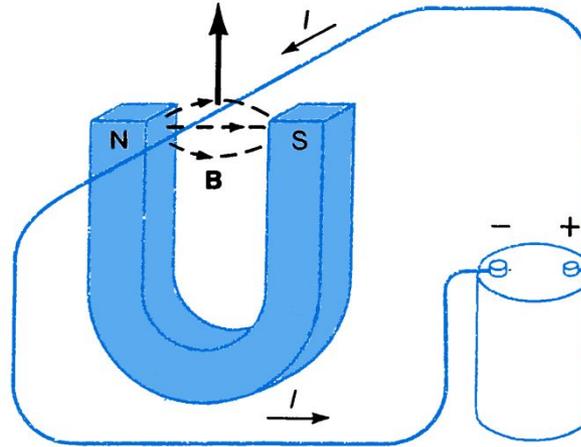
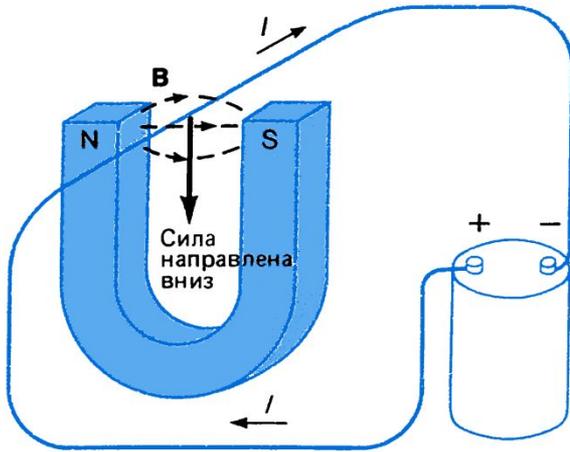


На проводник с током, находящийся во внешнем магнитном поле, действует сила

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

Сила направлена вверх

$$F = IlB \sin \theta$$

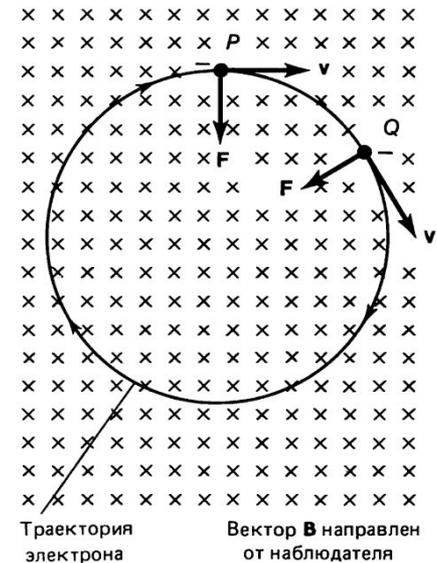
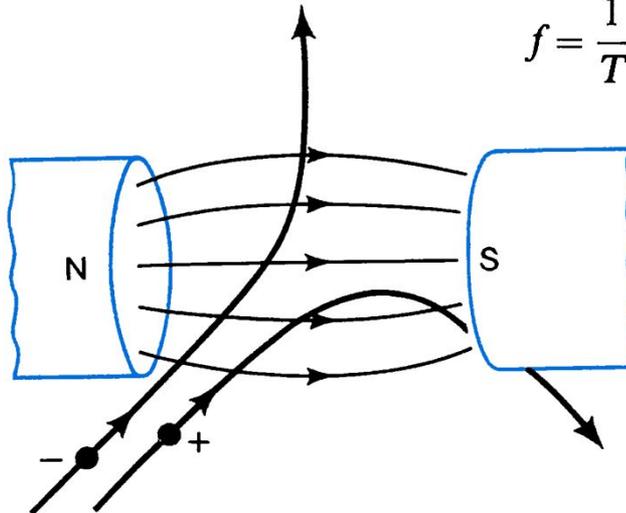


На заряженную частицу, движущуюся во внешнем магнитном поле, действует сила

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

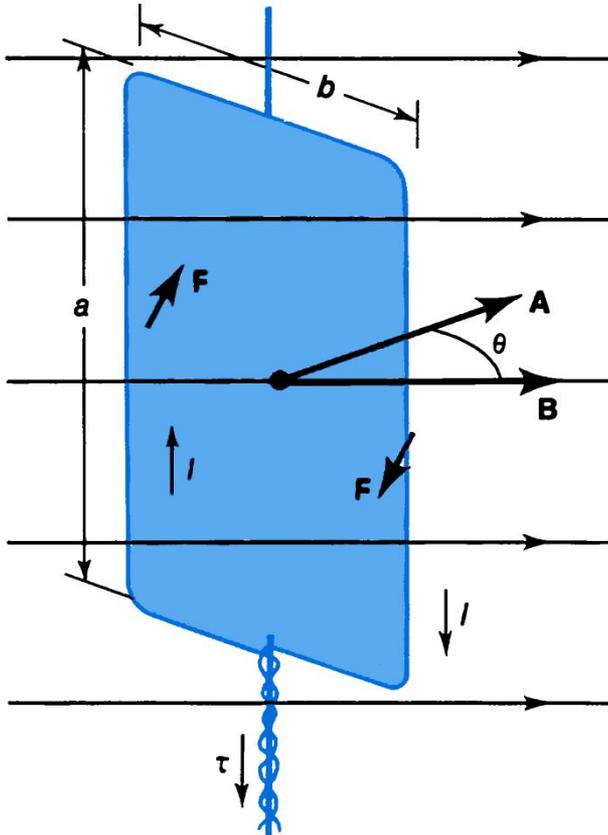
$$F = qvB \sin \theta$$

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



# 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

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

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

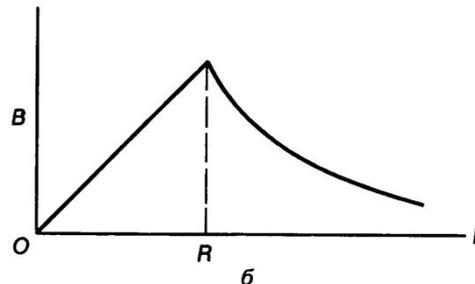
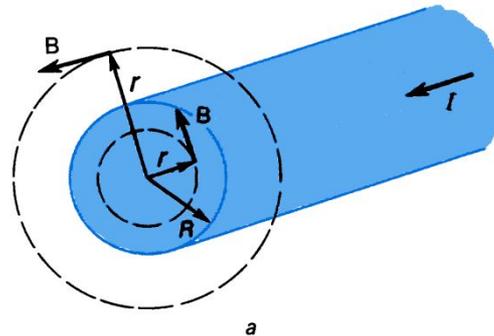
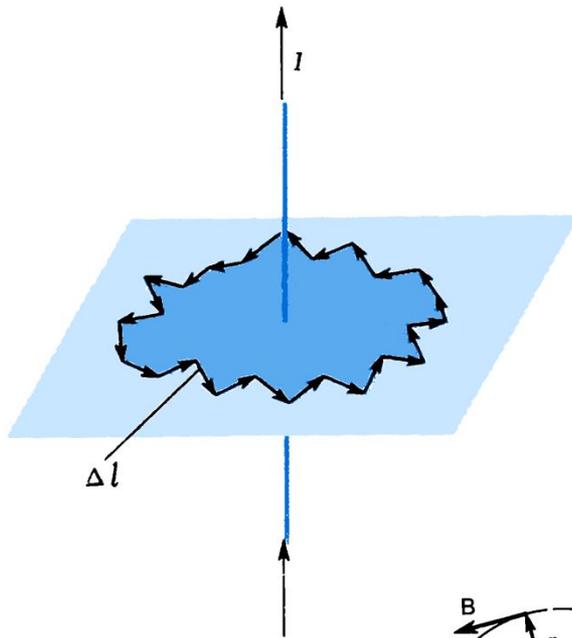
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

(снаружи)

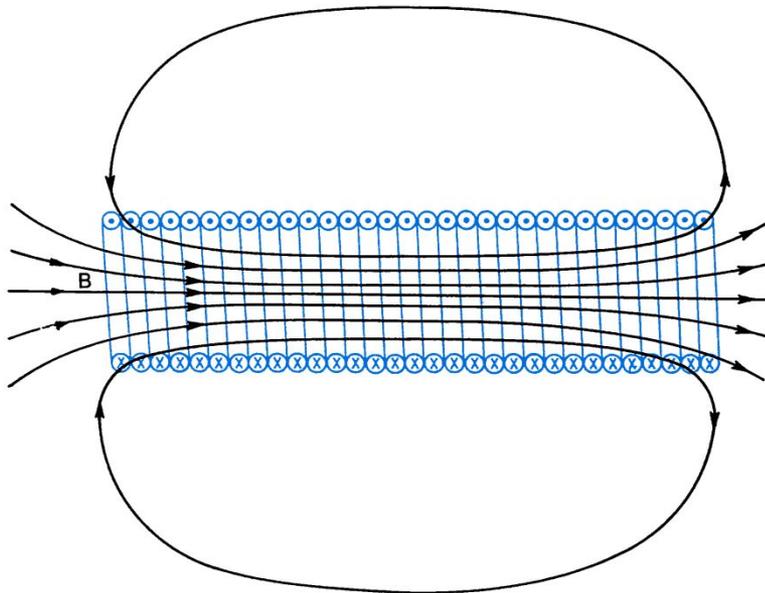
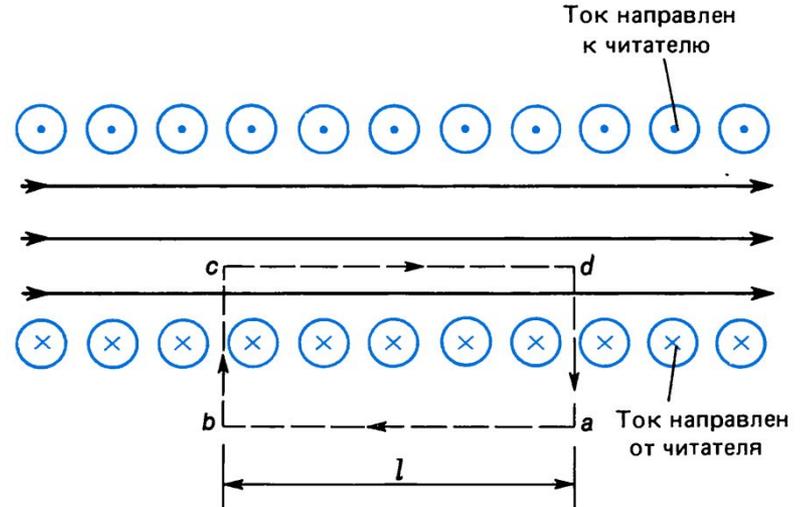
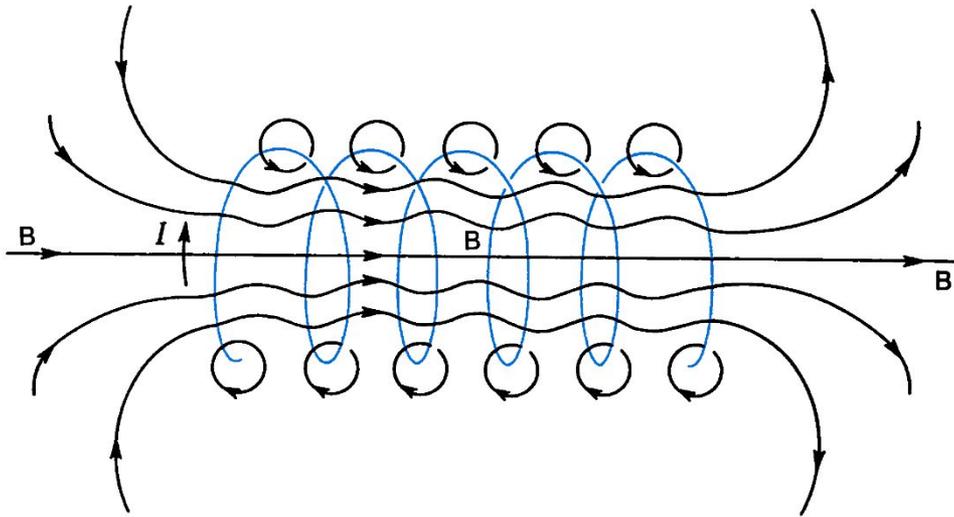
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = B(2\pi r) = \mu_0 I \left( \frac{\pi r^2}{\pi R^2} \right)$$

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

(внутри)



# Соленоид



Витки плотно намотаны  
 Поле внутри практически однородно  
 Снаружи поле незначительно

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

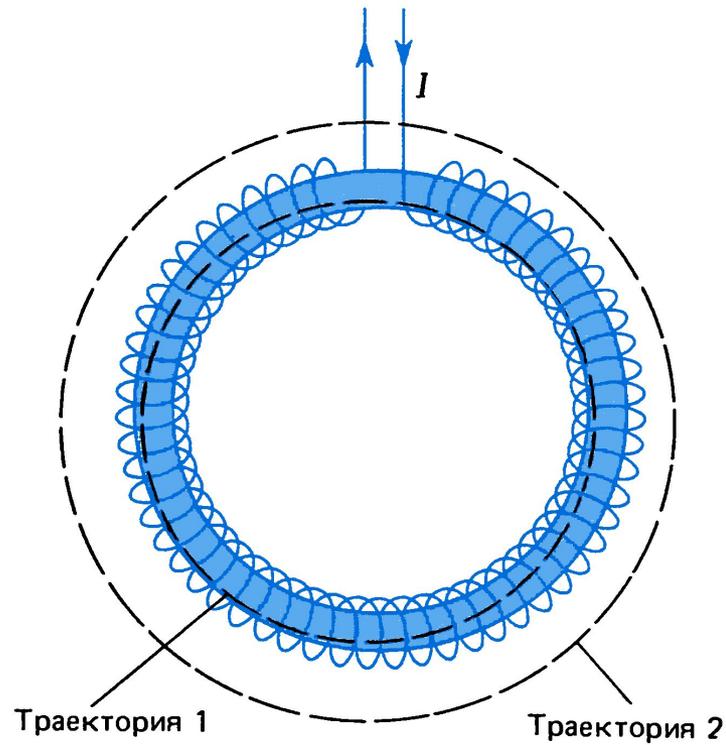
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \int_c^d \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = Bl$$

$$Bl = \mu_0 NI$$

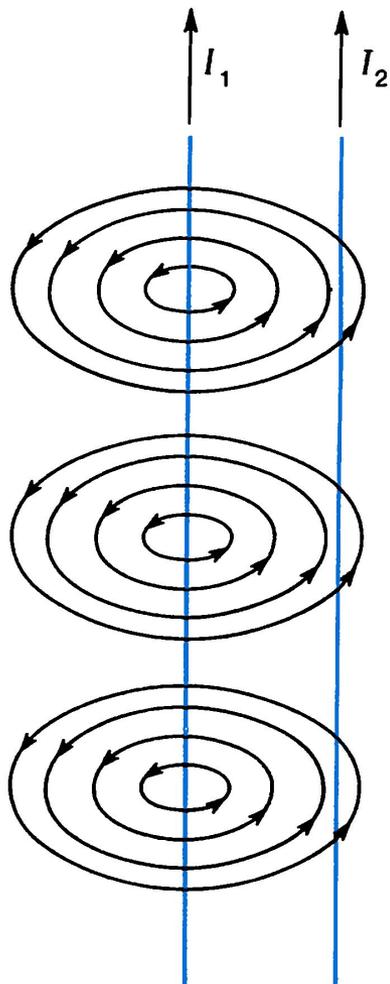
# Соленоид, свернутый в тор

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

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



# Сила, действующая между двумя проводниками с током

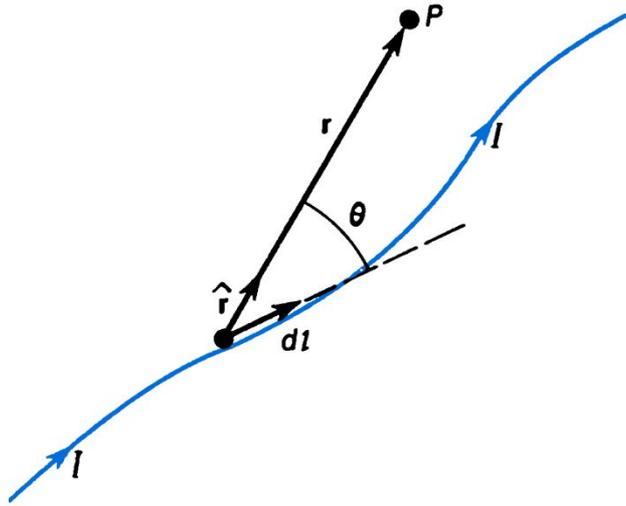


$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi L}$$

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

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

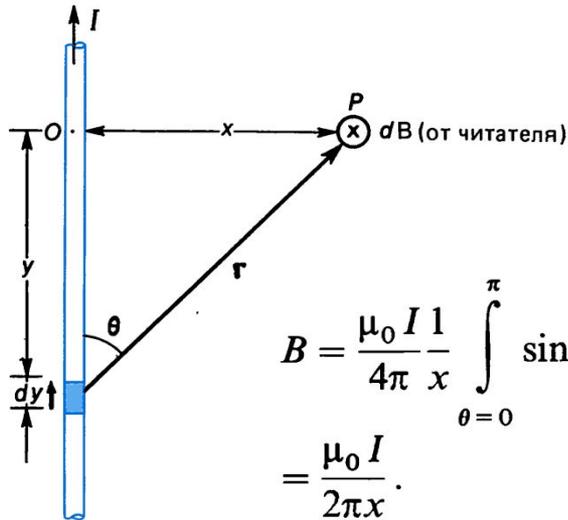
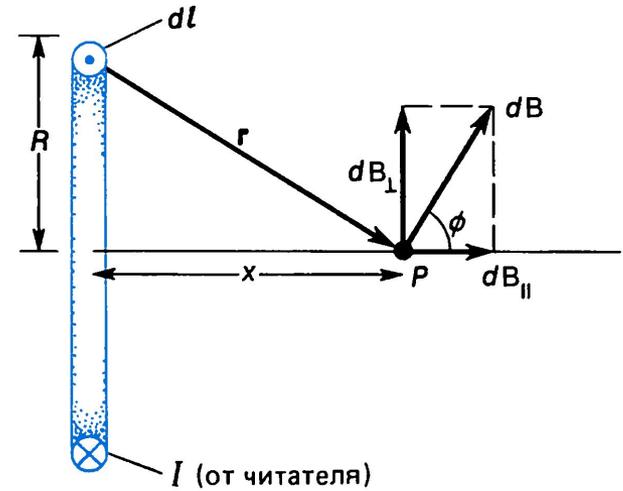
# Закон Био-Савара



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

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

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

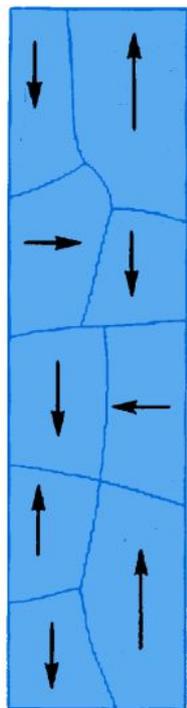


$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dy \sin \theta}{r^2}$$

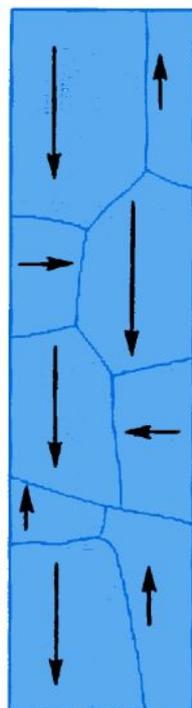
$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi x} \int_{\theta=0}^{\pi} \sin \theta d\theta = -\frac{\mu_0 I}{4\pi x} \cos \theta \Big|_0^{\pi} = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$$

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

## Домены

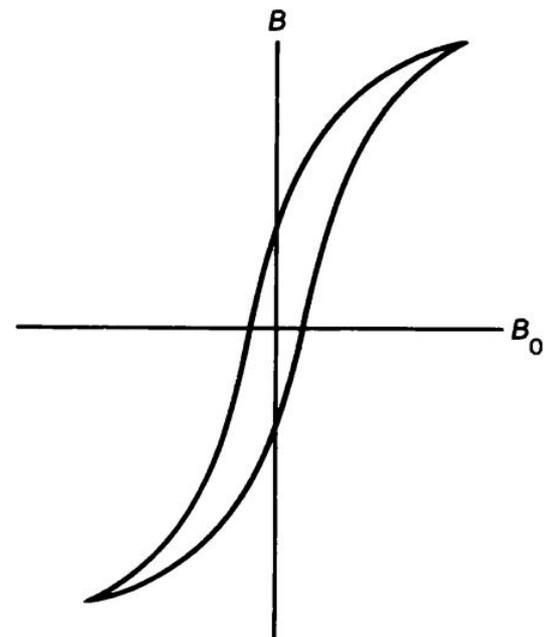
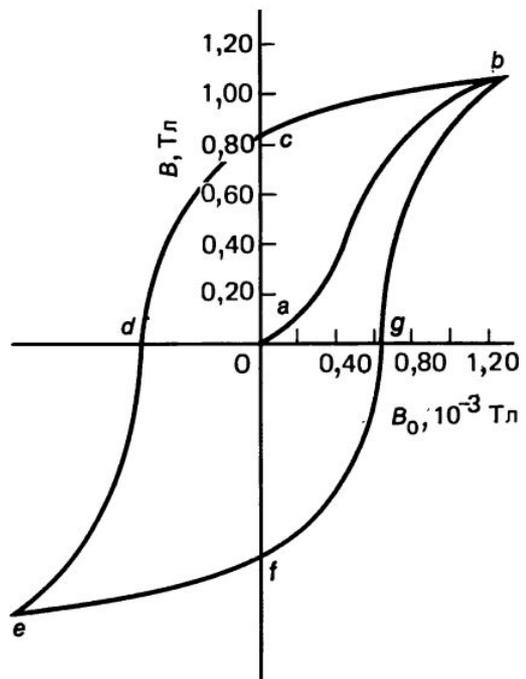


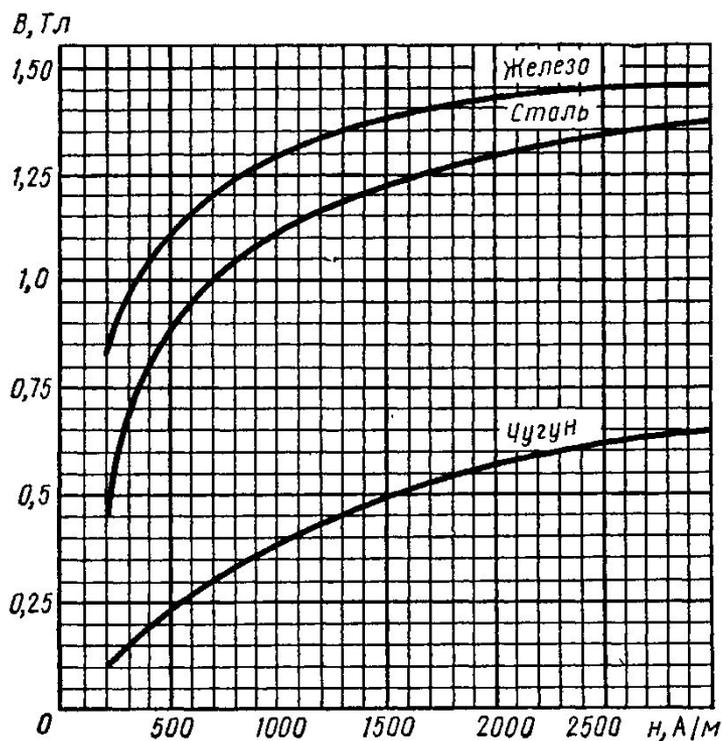
*a*



*б*

## Петли гистерезиса





● Полная энергия релятивистской частицы  
 $E = mc^2 = m_0c^2 + T,$

● Связь полной энергии с импульсом релятивистской частицы  
 $E^2 - p^2c^2 = m_0^2c^4.$

● Связь кинетической энергии с импульсом релятивистской частицы

$$p^2c^2 = T(T + 2m_0c^2).$$

● Магнитный поток  $\Phi$  через плоский контур площадью  $S$ :

а) в случае однородного поля

$$\Phi = BS \cos \alpha; \text{ или } \Phi = B_n S,$$

где  $\alpha$  — угол между вектором нормали  $\mathbf{n}$  к плоскости контура и вектором магнитной индукции  $\mathbf{B}$ ;  $B_n$  — проекция вектора  $\mathbf{B}$  на нормаль  $\mathbf{n}$  ( $B_n = B \cos \alpha$ );

б) в случае неоднородного поля

$$\Phi = \int_S B_n dS,$$

где интегрирование ведется во всей поверхности  $S$ .

● Релятивистский импульс

$$p = m\mathcal{V} = \frac{m_0v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \text{ или } p = m_0c \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

● Релятивистская масса

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \text{ или } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

23.6. Электрон движется в магнитном поле с индукцией  $B = 0,02$  Тл по окружности радиусом  $R = 1$  см. Определить кинетическую энергию  $T$  электрона (в джоулях и электрон-вольтах).

23.16. Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 10$  кА/м. Вычислить период  $T$  вращения электрона.

23.22. В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 100$  мкТл движется электрон по винтовой линии. Определить скорость  $v$  электрона, если шаг  $h$  винтовой линии равен 20 см, а радиус  $R = 5$  см:

23.34. Кинетическая энергия  $T$   $\alpha$ -частицы равна 500 МэВ. Частица движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом  $R = 80$  см. Определить магнитную индукцию  $B$  поля \*.

23.38. Протон, пройдя ускоряющую разность потенциалов  $U = 800$  В, влетает в однородные, скрещенные под прямым углом магнитное ( $B = 50$  мТл) и электрическое поля. Определить напряженность  $E$  электрического поля, если протон движется в скрещенных полях прямолинейно.

\* При решении задач 23.32—23.35 учесть изменение массы частицы от ее скорости.

3.142. Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 0,5$  кВ, движется параллельно прямолинейному длинному проводнику на расстоянии  $r = 1$  см от него. Определить силу, действующую на электрон, если через проводник пропускать ток  $I = 10$  А.  
[  $4,24 \cdot 10^{-16}$  Н ]

**3.159.** По прямому бесконечно длинному проводнику течет ток  $I = 10$  А. Опре-

Рис. 66

делить, пользуясь теоремой о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$ , магнитную индукцию  $B$  в точке, расположенной на расстоянии  $r = 10$  см от проводника. [20 мкТл]

**24.2.** Вычислить циркуляцию вектора индукции вдоль контура, охватывающего токи  $I_1 = 10$  А,  $I_2 = 15$  А, текущие в одном направлении, и ток  $I_3 = 20$  А, текущий в противоположном направлении.

**3.161.** Соленоид длиной  $l = 0,5$  м содержит  $N = 1000$  витков. Определить магнитную индукцию  $B$  поля внутри соленоиды, если сопротивление его обмотки  $R = 120$  Ом, а напряжение на ее концах  $U = 60$  В. [1,26 мТл]

**3.163.** Определить, пользуясь теоремой о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$ , индукцию и напряженность магнитного поля на оси тороида без сердечника, по обмотке которого, содержащей 200 витков, протекает ток в 2 А. Внешний диаметр тороида равен 60 см, внутренний — 40 см. [ $B = 0,32$  мТл,  $H = 255$  А/м]

**3.164.** Определить магнитный поток через площадь поперечного сечения катушки (без сердечника), имеющей на каждом сантиметре длины  $n = 8$  витков. Радиус соленоида  $r = 2$  см, а сила тока в нем  $I = 2$  А. [ $10,1$  мкВб]

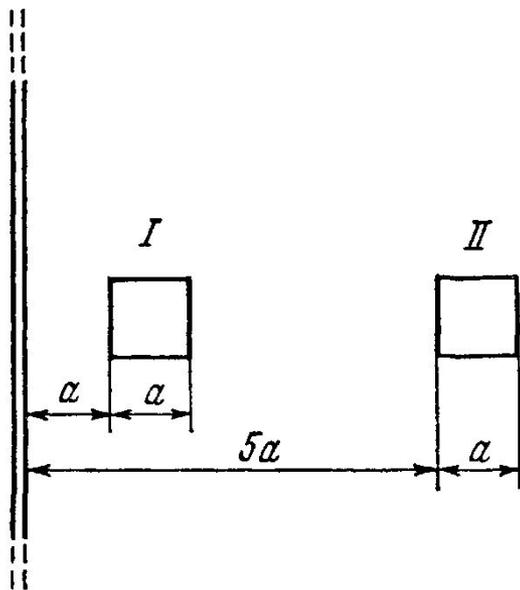
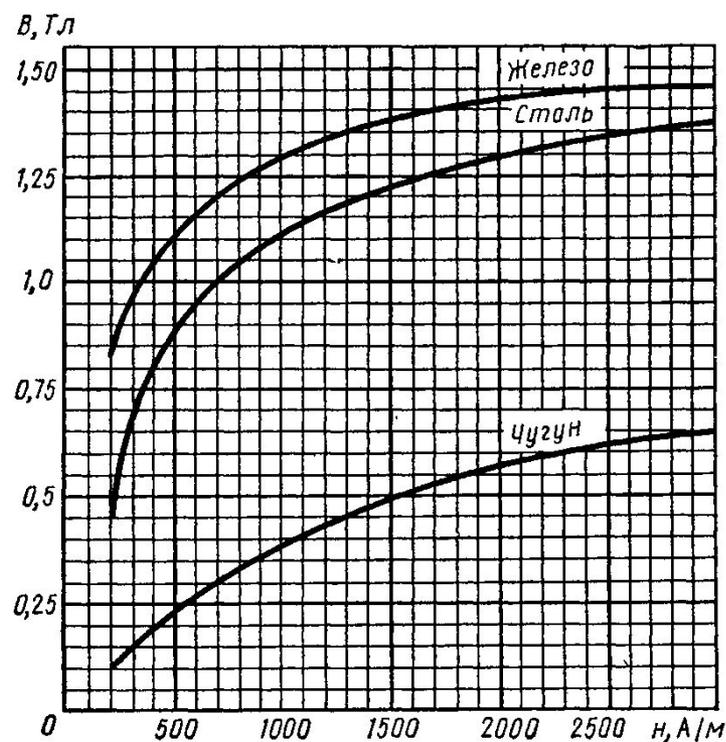


Рис. 24.5



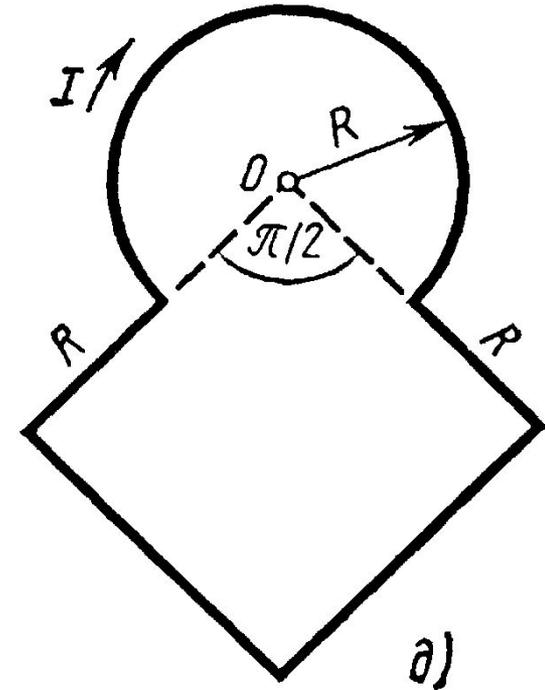
**24.10.** Определить, во сколько раз отличаются магнитные потоки, пронизывающие рамку при двух ее положениях относительно прямого проводника с током, представленных на рис. 24.5.



**24.14.** На железное кольцо намотано в один слой  $N=500$  витков провода. Средний диаметр  $d$  кольца равен 25 см. Определить магнитную индукцию  $B$  в железе и магнитную проницаемость  $\mu$  железа \*, если сила тока  $I$  в обмотке: 1) 0,5 А; 2) 2,5 А.

## Проверочная работа по теме М1

21.32. По плоскому контуру из тонкого провода течет ток  $I = 100$  А. Определить магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого этим током в точке  $O$ , в случаях  $a—e$ , изображенных на рис. 21.16. Радиус  $R$  изогнутой части контура равен 20 см



## Проверочная работа по теме М2

Рис. 21.16

22.18. Электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите некоторого радиуса. Найти отношение магнитного момента  $p_m$  эквивалентного кругового тока к моменту импульса  $L$  орбитального движения электрона. Заряд электрона и его массу считать известными. Указать направления векторов  $p_m$  и  $L$ .

## Домашнее задание 1

- **Ч. 23.3 ||| 23.17 ||| 23.23 ||| 23.35 ||| 23.39**

## Домашнее задание 2

- **Т. 3.160**
- **Ч. 24.1 ||| 24.3 ||| 24.4 ||| 24.6 ||| 24.15**