

Электричество и магнетизм

Лекция 1

Покоящиеся электрические заряды создают вокруг себя только электрическое поле.

Движущиеся заряды создают еще одно поле - магнитное.

Для экспериментального изучения магнитных полей пользуются каким-либо воздействием их на пробные тела:

- 1) На магнитную стрелку действует механический момент; максимальное значение этого момента в данном месте поля достигается при определенной ориентировке стрелки.
- 2) На виток проводника с током также действует механический момент, зависящий от размеров витка, силы тока в нем и достигающий максимума при определенной ориентировке плоскости витка в данном месте поля.
- 3) На отрезок прямолинейного проводника с током действует сила, пропорциональная длине проводника, силе тока через него и зависящая от ориентировки проводника в магнитном поле.

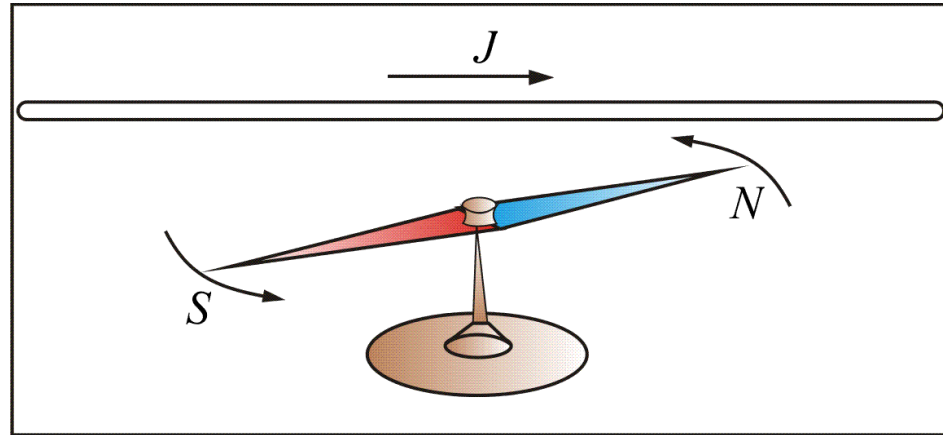
Магнитные взаимодействия

В пространстве, окружающем намагниченные тела, возникает *магнитное поле*.

Помещенная в это поле маленькая *магнитная стрелка* устанавливается в каждой его точке вполне определенным образом, указывая тем самым направление поля.

Тот конец стрелки, который в магнитном поле Земли указывает *на север*, называется *северным*, а противоположный — *южным*.

При отклонении магнитной стрелки от направления магнитного поля, на стрелку действует **механический крутящий момент $M_{кр}$** , пропорциональный синусу угла отклонения α и стремящийся повернуть ее вдоль указанного направления.

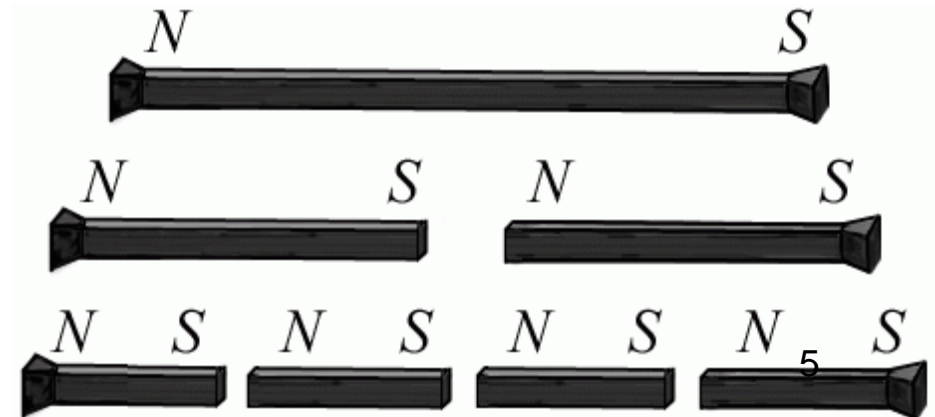


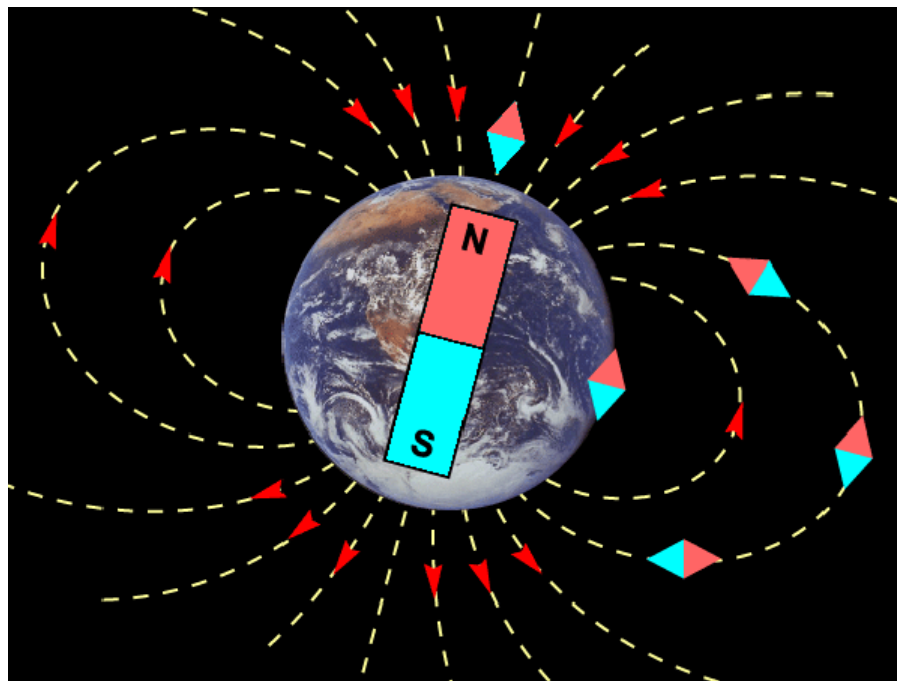
При взаимодействии постоянных магнитов они испытывают **резльтирующий момент сил, но не силу**.

Подобно электрическому диполю, постоянный магнит в однородном поле стремится повернуться по полю, но не перемещаться в нем.

Отличие постоянных магнитов от электрических диполей

- Электрический диполь всегда состоит из зарядов, равных по величине и противоположных по знаку.
- Постоянный же магнит, будучи разрезан пополам, превращается в два меньших магнита, каждый из которых имеет и северный и южный полюса.

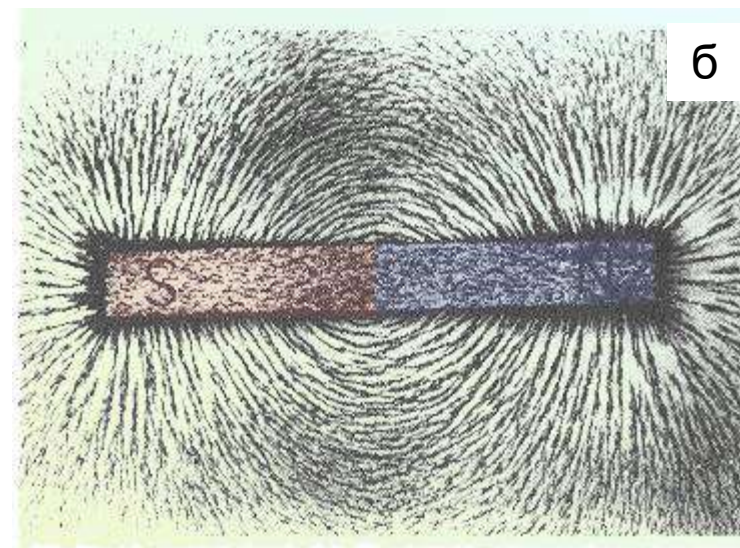
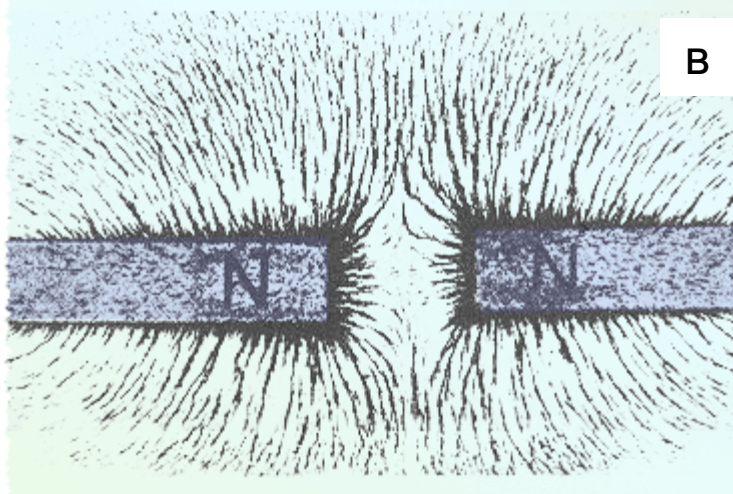
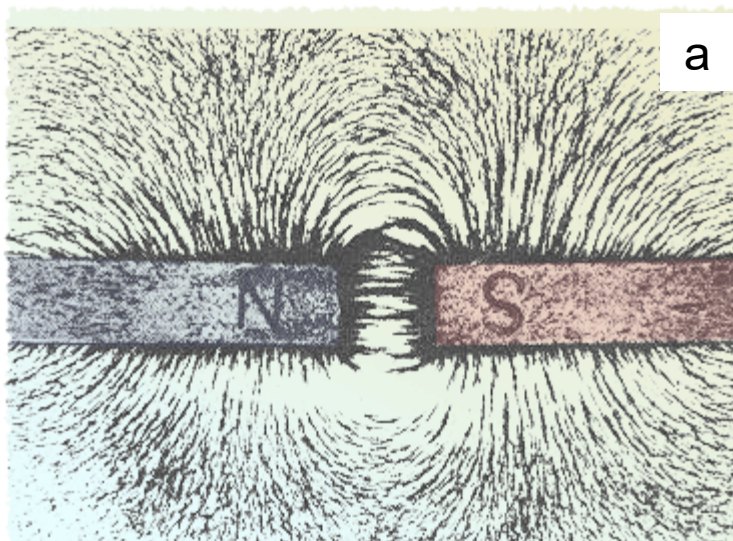




Земля – подобна огромному магниту, с полюсами в верхней и нижней частях планеты и расположенных очень близко к географическим полюсам планеты. Магнитное поле Земли простирается на тысячи километров вокруг планеты и называется эта область – магнитосферой.

Магнитосфера образует своего рода защитный купол, огибающий Землю и защищающий от бомбардировки частицами солнечного ветра, солнечной радиации.





а), б) поле одноименных полюсов
в) поле разноименных полюсов



Подводя итоги сведениям о магнетизме, накопленным к 1600 г., английский ученый-физик **Уильям Гильберт** написал труд «О магните, магнитных телах и большом магните – Земле» «De magnete, magneticisque corporibus etc».

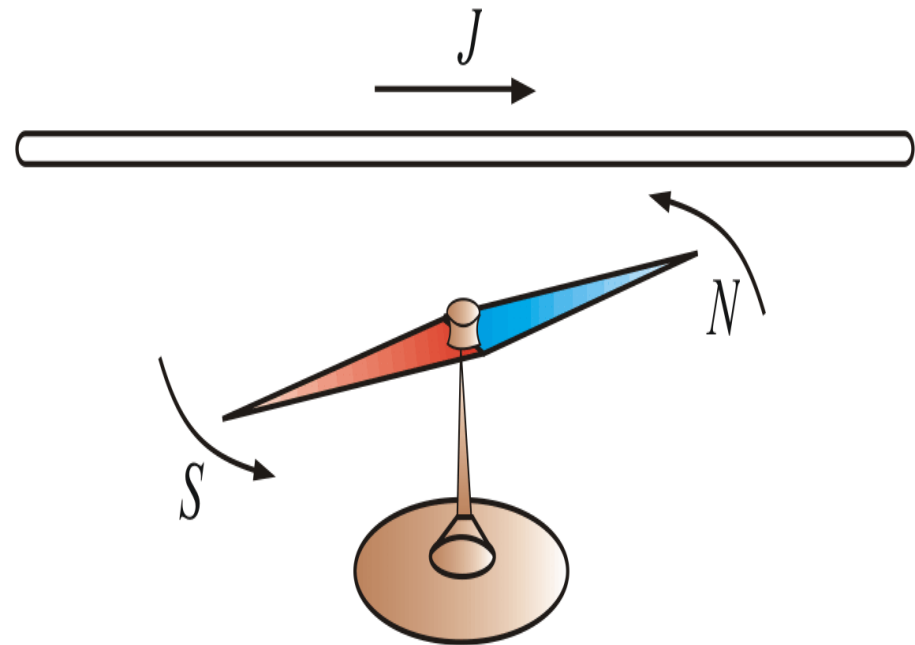
В своих трудах У. Гильберт высказал мнение, что, несмотря на некоторое внешнее сходство, ***природа электрических и магнитных явлений различна.*** Все же, к середине XVIII века, окрепло убеждение о ***наличии тесной связи между электрическими и магнитными явлениями.***

Открытие Эрстеда.

При помещении магнитной стрелки в непосредственной близости от проводника с током он обнаружил, что при протекании по проводнику тока, стрелка отклоняется; после выключения тока стрелка возвращается в исходное положение (см. рис.).

Из описанного опыта

Эрстед делает **вывод**:
вокруг прямолинейного
проводника с током
есть магнитное поле.



Из опыта Эрстеда следует, что магнитное поле имеет направленный характер и должно характеризоваться векторной величиной.

Общий вывод: *вокруг всякого проводника с током есть магнитное поле.*

Но ведь **ток** – это направленное движение зарядов.

Опыты подтверждают: магнитное поле появляется вокруг электронных пучков и вокруг перемещающихся в пространстве заряженных тел.

Вокруг всякого движущегося заряда помимо электрического поля существует еще и магнитное.

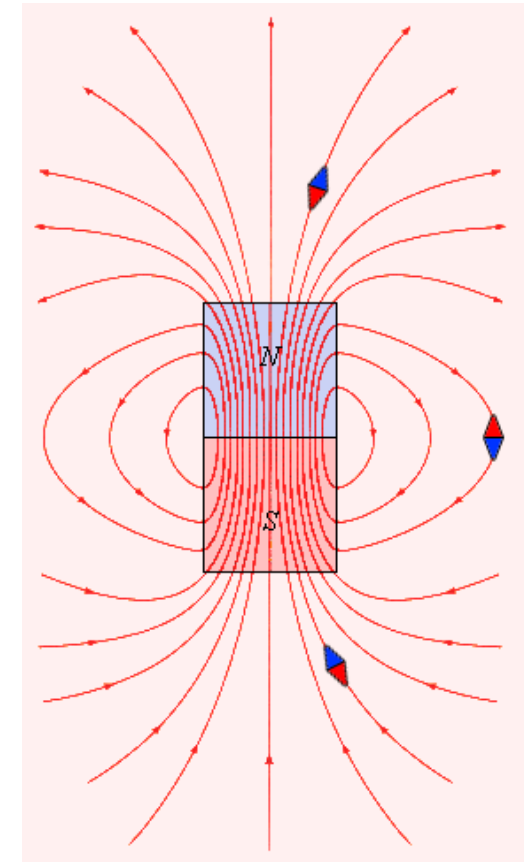
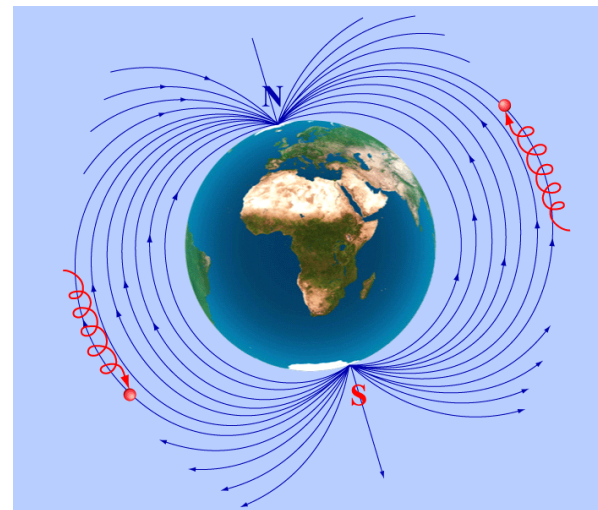
Условились, за направление \vec{B} принимать направление северного конца магнитной стрелки.

Силовые линии выходят из северного полюса, а входят, соответственно, в южный полюс магнита.

Для графического изображения полей удобно пользоваться силовыми линиями (линиями магнитной индукции).

Линиями магнитной индукции называются кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} в этой точке.

Земля- тоже магнит.
Ее северный магнитный полюс находится около южного географического полюса, а южный магнитный полюс- около северного географического

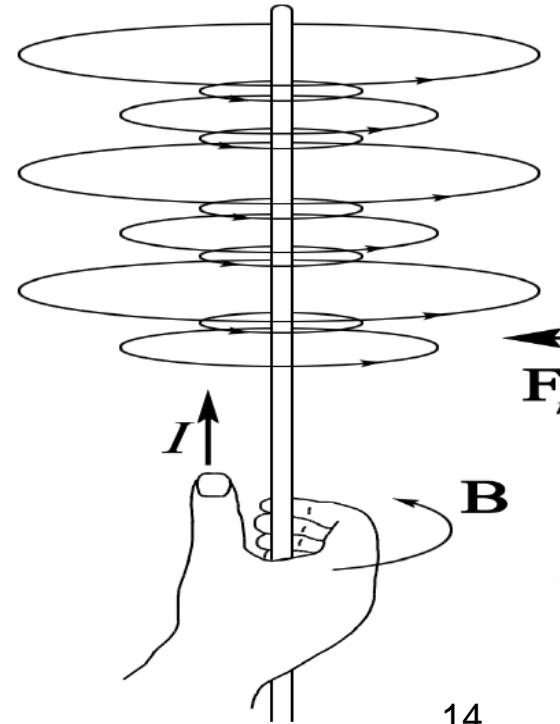
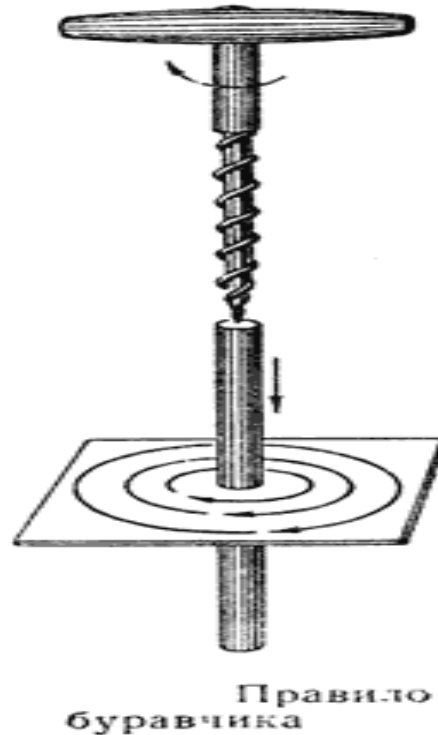
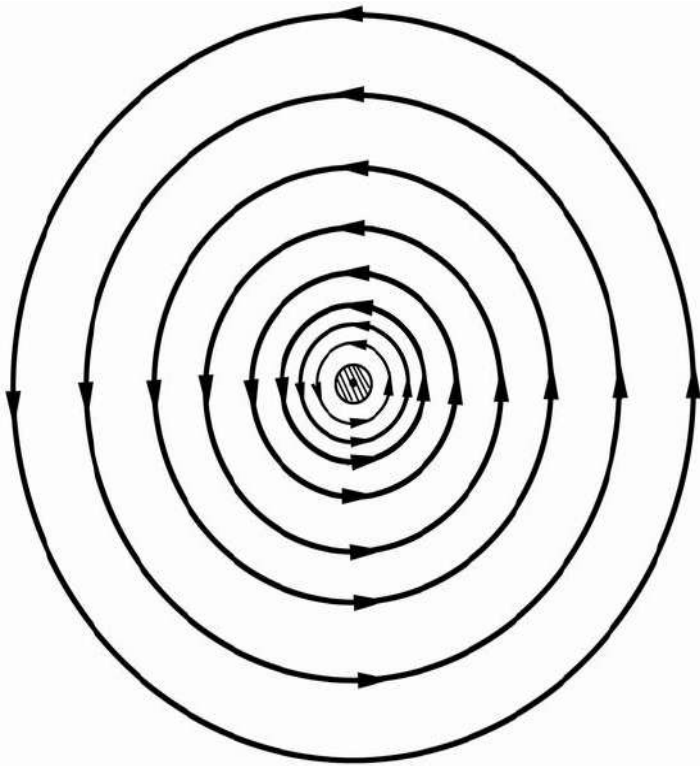


Экспериментально установлено, что для магнитного поля (как и для электрического) справедлив

принцип суперпозиции: поле , порождаемое несколькими движущимися зарядами (токами) равно векторной сумме полей , порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности:

$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i$$

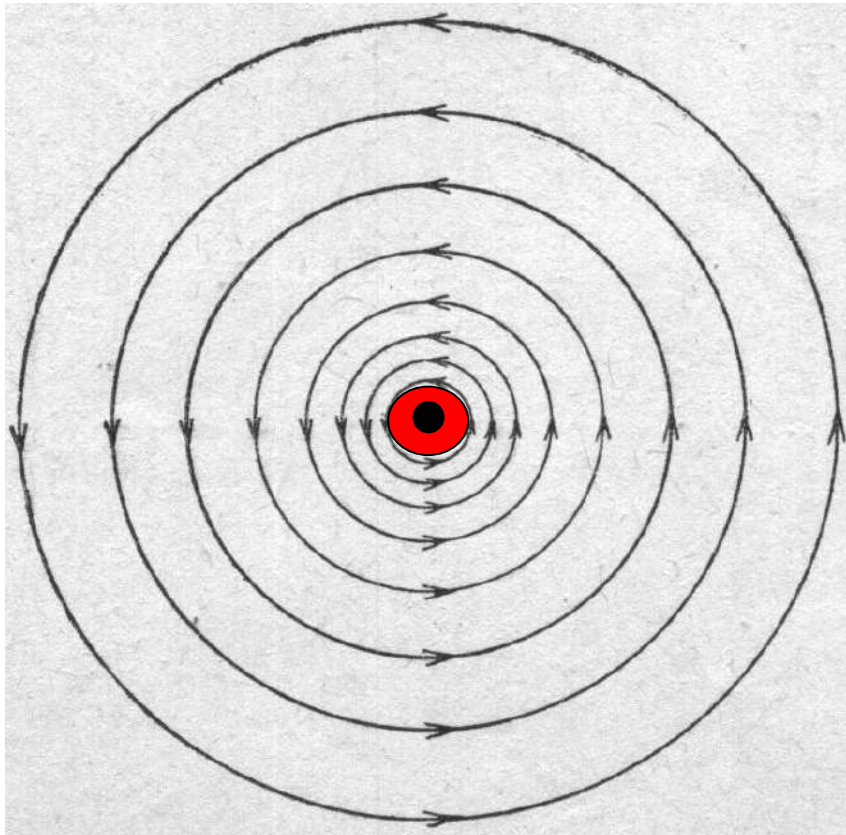
Направление $d\vec{B}$ связано с направлением $d\vec{I}$
*«правилом буравчика»: направление вращения
головки винта дает направление $d\vec{B}$,
поступательное движение винта
соответствует направлению **тока** в элементе.*



Правило буравчика:

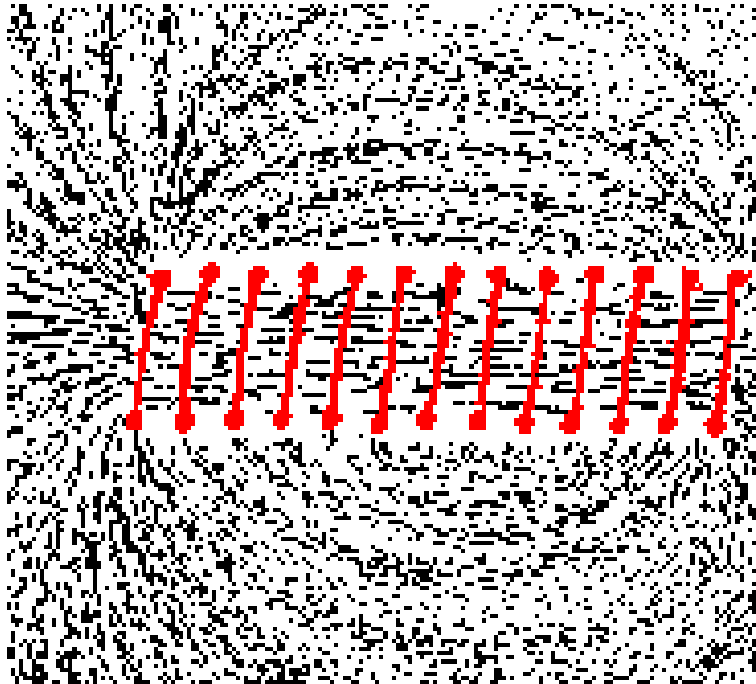


Силовые линии магнитного поля



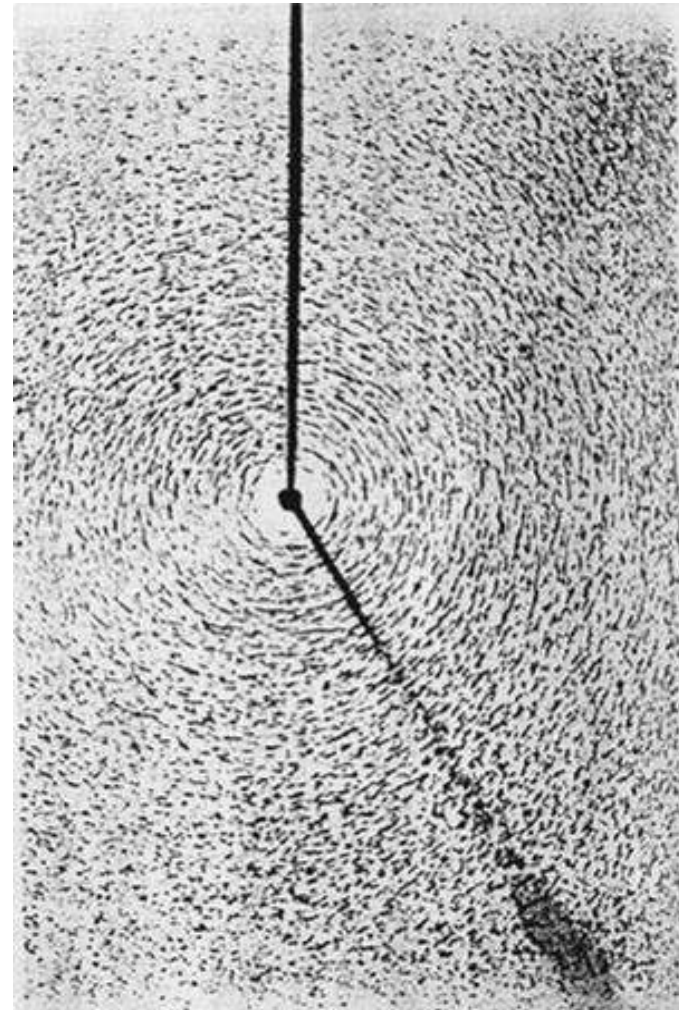
Магнитной силовой линией называют линию, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением напряженности магнитного поля.

Картины магнитных полей



Поле соленоида

Поле прямого проводника



Магнитное поле создается проводниками с током, движущимися электрическими заряженными частицами и телами, а также переменными электрическими полями.

Силовой характеристикой магнитного поля служит вектор магнитной индукции.

Закон Био–Савара–Лапласа

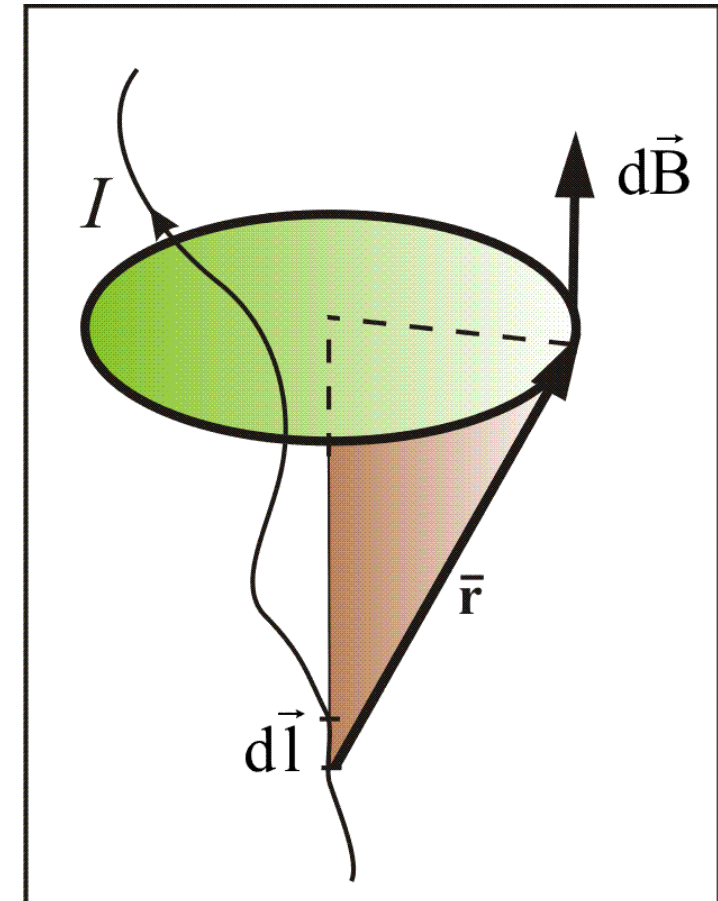
В 1820 г. французские физики Жан Батист **Био** и Феликс **Савар**, провели исследования магнитных полей токов различной формы.

А французский математик Пьер **Лаплас** обобщил эти исследования.

Закон Био–Савара–Лапласа

*Элемент тока длины $d\vec{l}$
создает поле с магнитной индукцией:*

$$d\vec{B} = k \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}.$$



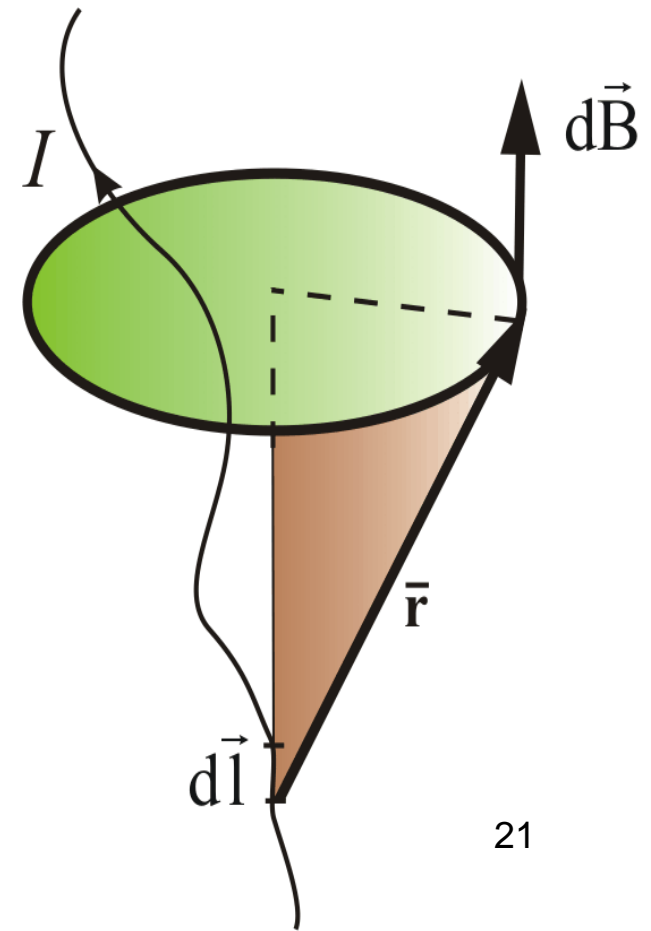
Здесь: I — ток;

$d\vec{l}$ — вектор, совпадающий с элементарным участком тока и направленный в ту сторону, куда течет ток;

\vec{r} — радиус-вектор, проведенный от элемента тока в точку, в которой мы определяем $d\vec{B}$

r — модуль радиус-вектора;

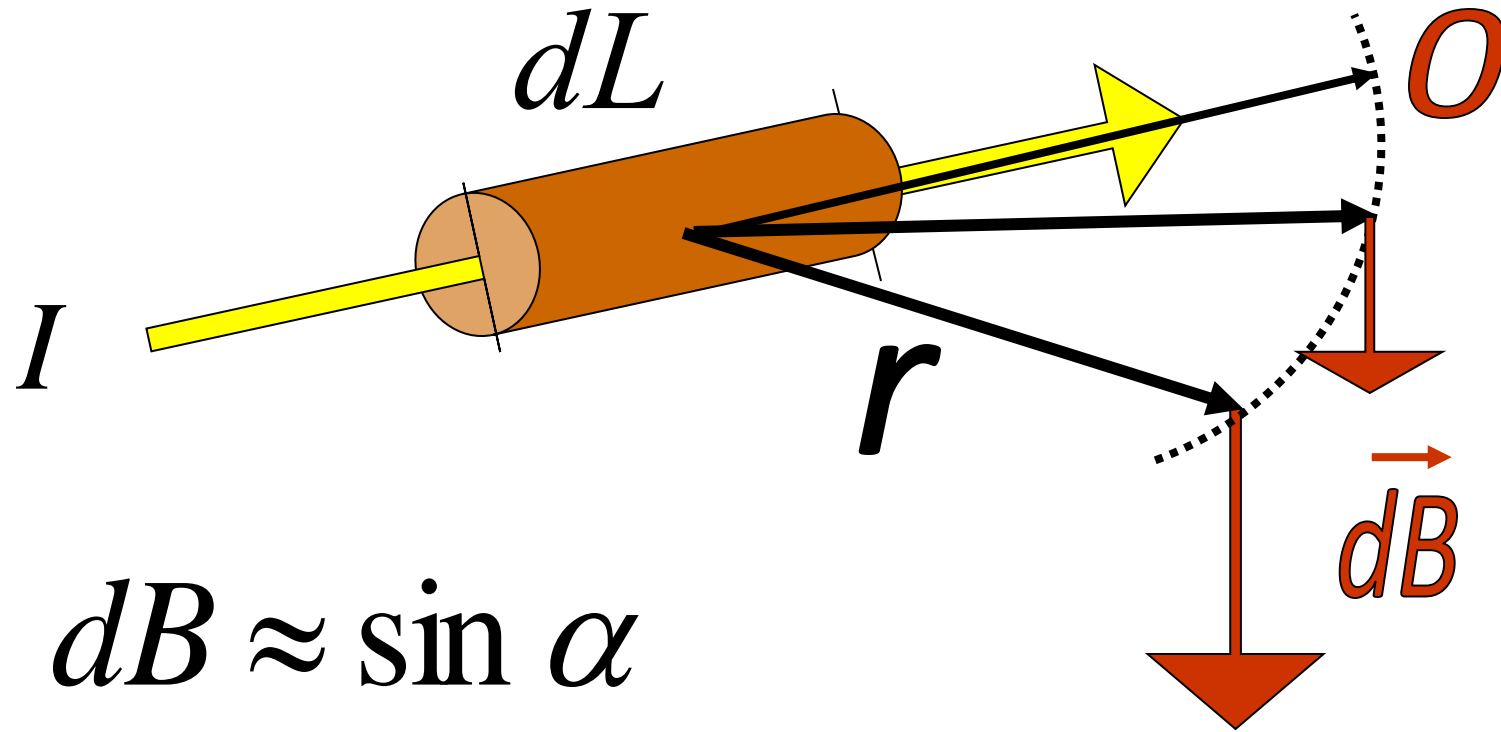
k — коэффициент пропорциональности, зависящий от системы единиц.



Закон Био–Савара–Лапласа для **вакуума** можно записать так:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная.



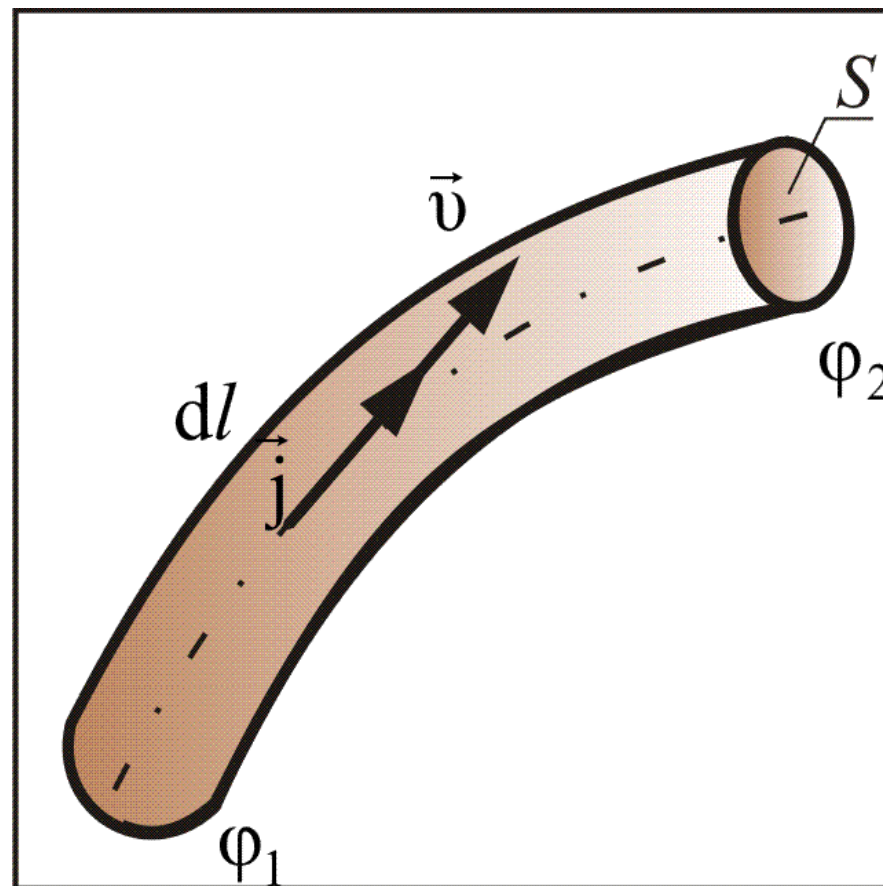
$$\sin 90^\circ = 1, \quad \sin 30^\circ = 0,5$$

$$\sin 0^\circ = 0$$

Магнитное поле движущегося заряда

Электрический ток –
упорядоченное
движение зарядов, а
магнитное поле
порождается
движущимися зарядами.

Под свободным
движением заряда
понимается его движение
с постоянной скоростью



Индукция магнитного поля, создаваемого одним зарядом, движущимся со скоростью \vec{v} :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{q[\vec{v}, \vec{r}]}{r^3}.$$

В скалярной форме *индукция магнитного поля одного заряда* в вакууме определяется по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{q v \sin(\vec{v}, \vec{r})}{r^2}.$$

Эта формула справедлива при скоростях заряженных частиц

$$v \ll c$$

Закон Ампера

На прямолинейный участок длиной dl проводника с током I , находящийся в магнитном поле, действует сила, равная

$$d\vec{F} = I \cdot [d\vec{l}, \vec{B}]$$

или

$$F = I \cdot L \cdot B \cdot \sin \alpha$$

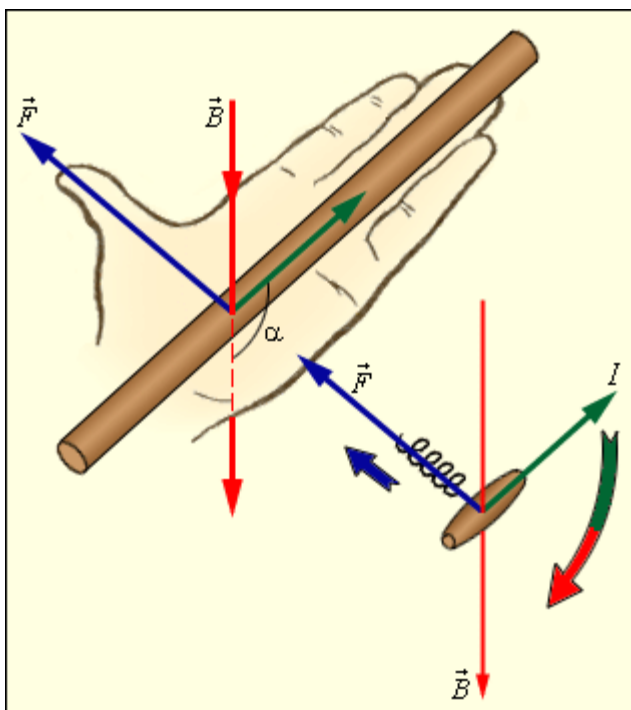
I - сила тока в проводнике;

B - модуль вектора индукции магнитного поля;

L - длина проводника, находящегося в магнитном поле;

α - угол между вектором магнитного поля и направлением тока в проводнике.

Силу, действующую на проводник с током в магнитном поле, называют силой Ампера.

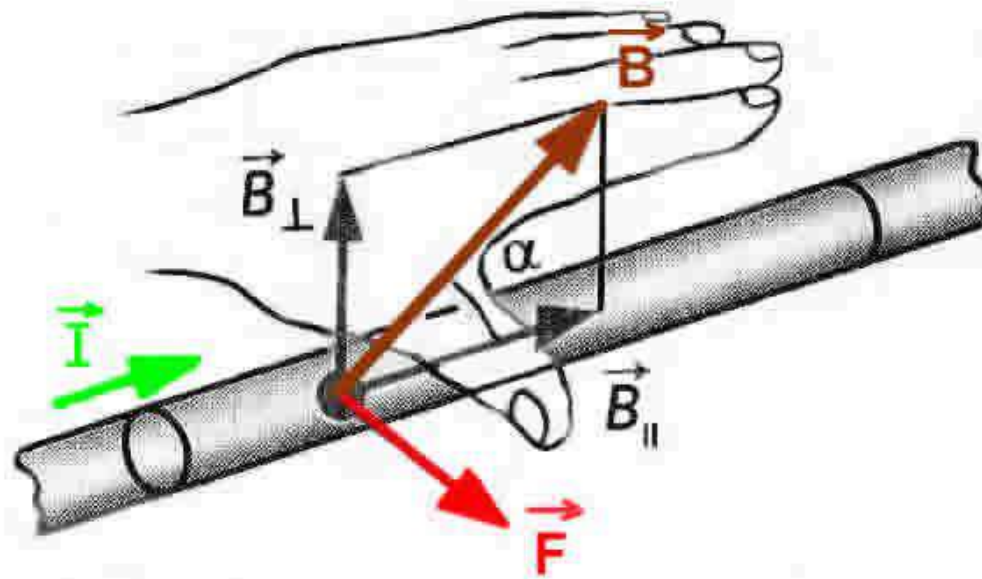


Максимальная сила Ампера равна:

$$F = I \cdot L \cdot B$$

Ей соответствует $\alpha = 90^\circ$.

Направление силы Ампера определяется по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная составляющая вектора магнитной индукции \vec{B} входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока, то отогнутый на 90 градусов большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника с током, то есть силы Ампера.



Физический смысл магнитной индукции:

Вектор магнитной индукции показывает, какая сила действует на проводник, в котором течет ток силой 1 ампер, если длина проводника равна 1 метру

$$T_l = H / (A * m)$$

Сила Лоренца

Зная закон Ампера, можно получить выражение для силы, с которой магнитное поле действует на движущийся заряд.

Пусть n – число упорядоченно движущихся электронов в единице объема проводника

v - скорость движущихся электронов

S – площадь сечения проводника

$$n \cdot \Delta V = N$$


Тогда $I = n \cdot e \cdot v \cdot S = j \cdot S$,

а элемент тока $I \cdot dl = j \cdot S = n \cdot e \cdot v \cdot S \cdot dl = N \cdot e \cdot v$

N - число упорядоченно движущихся электронов в объеме участка тока.

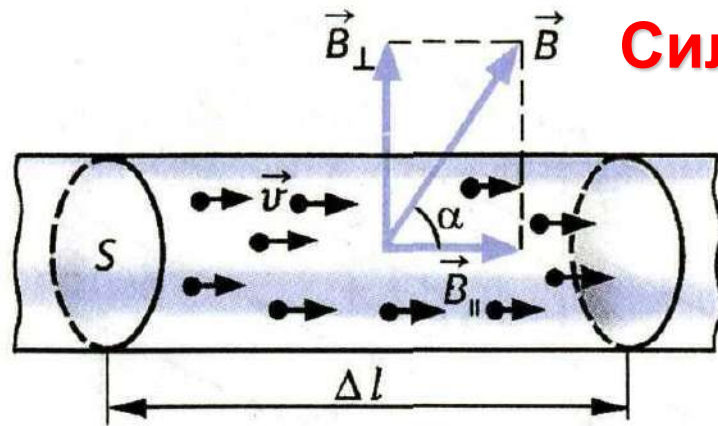
На 1 заряд действует сила

$$\frac{dF}{N} = \frac{1}{N} (I \cdot dl \cdot B \cdot \sin \alpha) = \frac{B \cdot N \cdot e \cdot v \cdot \sin \alpha}{N} = e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

или в векторной записи

$$\vec{F} = e \cdot [\vec{v} \times \vec{B}]$$

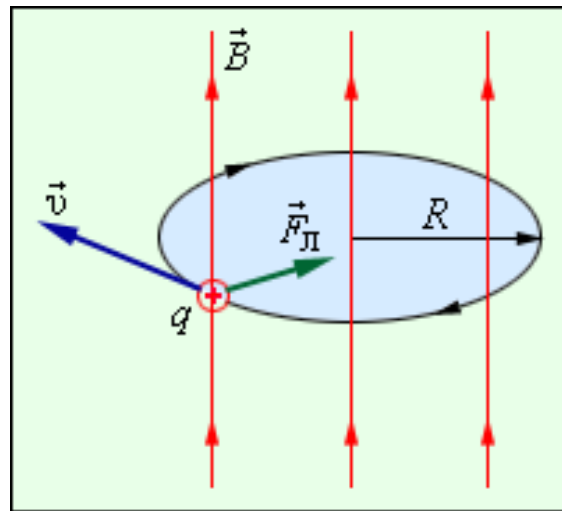
Сила Лоренца



Сила Лоренца

Направление силы Лоренца зависит от знака заряда и перпендикулярна к плоскости, в которой лежат вектора \vec{v} и \vec{B}

Обратите внимание, что сила Лоренца перпендикулярна скорости и поэтому она не совершает работы, не изменяет модуль скорости заряда и его кинетической энергии. Но направление скорости изменяется непрерывно



Направление силы Лоренца определяется с помощью того же правила левой руки, что и направление силы Ампера: если левую руку расположить так, чтобы составляющая магнитной индукции B , перпендикулярная скорости заряда, входила в ладонь, а четыре пальца были направлены **по движению положительного заряда** (против движения отрицательного), то отогнутый на 90 градусов большой палец покажет направление действующей на заряд силы Лоренца F_L .

Если имеются одновременно электрическое и магнитное поля, то на заряд действует сила


$$\vec{F} = q\vec{E} + q \cdot [\vec{V} \cdot \vec{B}]$$

Пусть два одноименных точечных заряда q_1 и q_2 движутся вдоль параллельных прямых со скоростью $V \ll c$. Сравним силы, действующие на заряды со стороны электрического $F_{эл}$ и магнитного $F_{магн}$ полей.

$$F_{эл1} = F_{эл2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$F_{магн}$ действующая на заряд q_1

$$F_{магн} = q_1 \cdot V \cdot B_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{q_1 q_2 V^2}{r^2}$$


$$B_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{q [\vec{V} \cdot \vec{r}]}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{q_2 V}{r^2}$$

Отношение магнитной силы к электрической будет:

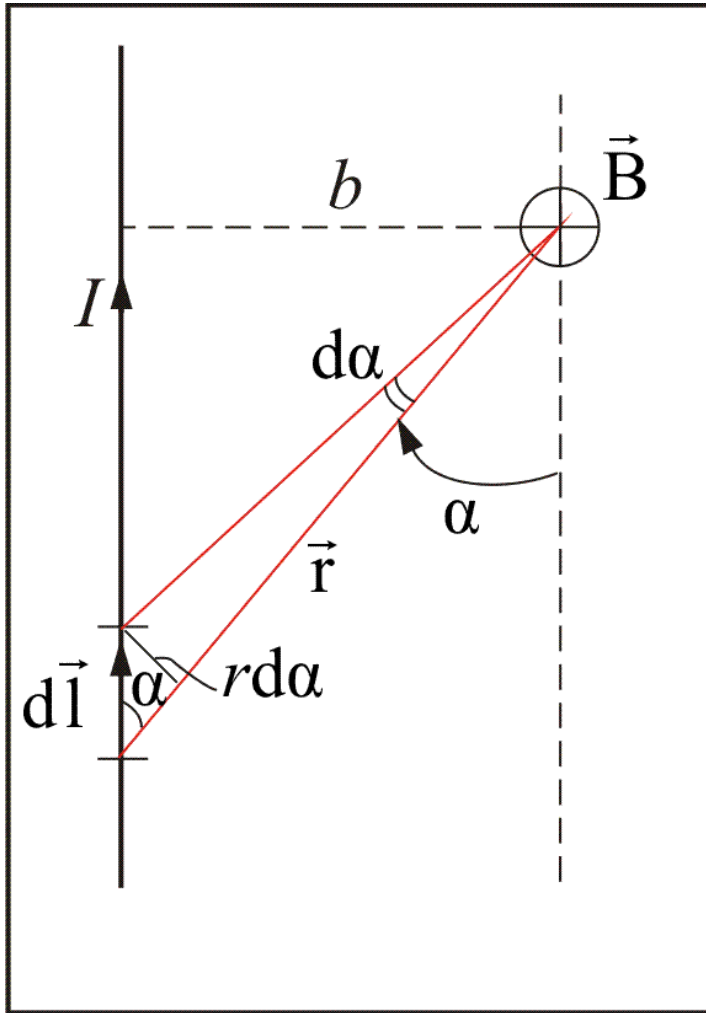
$$\frac{F_m}{F_\varepsilon} = \frac{\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1 q_2 V^2}{r^2}}{\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}} = \varepsilon_0 \mu_0 V^2 = \frac{V^2}{C^2}$$

то есть магнитная сила слабее кулоновской силы на множитель, пропорциональный V^2/C^2

Таким образом, магнитное взаимодействие между движущимися зарядами является релятивистским эффектом (как следствие закона Кулона). Магнетизм исчез бы, если бы скорость света приблизилась к бесконечности. Он отсутствует у неподвижных зарядов ($V=0$).

Электрическое и магнитное поля неразрывно связаны друг с другом, и образуют единое электромагнитное поле.

Магнитное поле прямого тока.



Пусть точка, в которой определяется магнитное поле, находится на расстоянии b от провода.

Все вектора $d\vec{B}$ в данной точке имеют одинаковое направление (за чертеж). Поэтому сложение векторов можно заменить сложением их модулей.

Из рисунка видно, что:

$$r = \frac{b}{\sin \alpha}; \quad dl = \frac{rd\alpha}{\sin \alpha} = \frac{bd\alpha}{\sin^2 \alpha}.$$

Подставив найденные значения r и dl в закон Био–Савара–Лапласа, получим:

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

Для **конечного проводника** угол α изменяется от α_1 до α_2 .
Тогда:

$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{b} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi b} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$

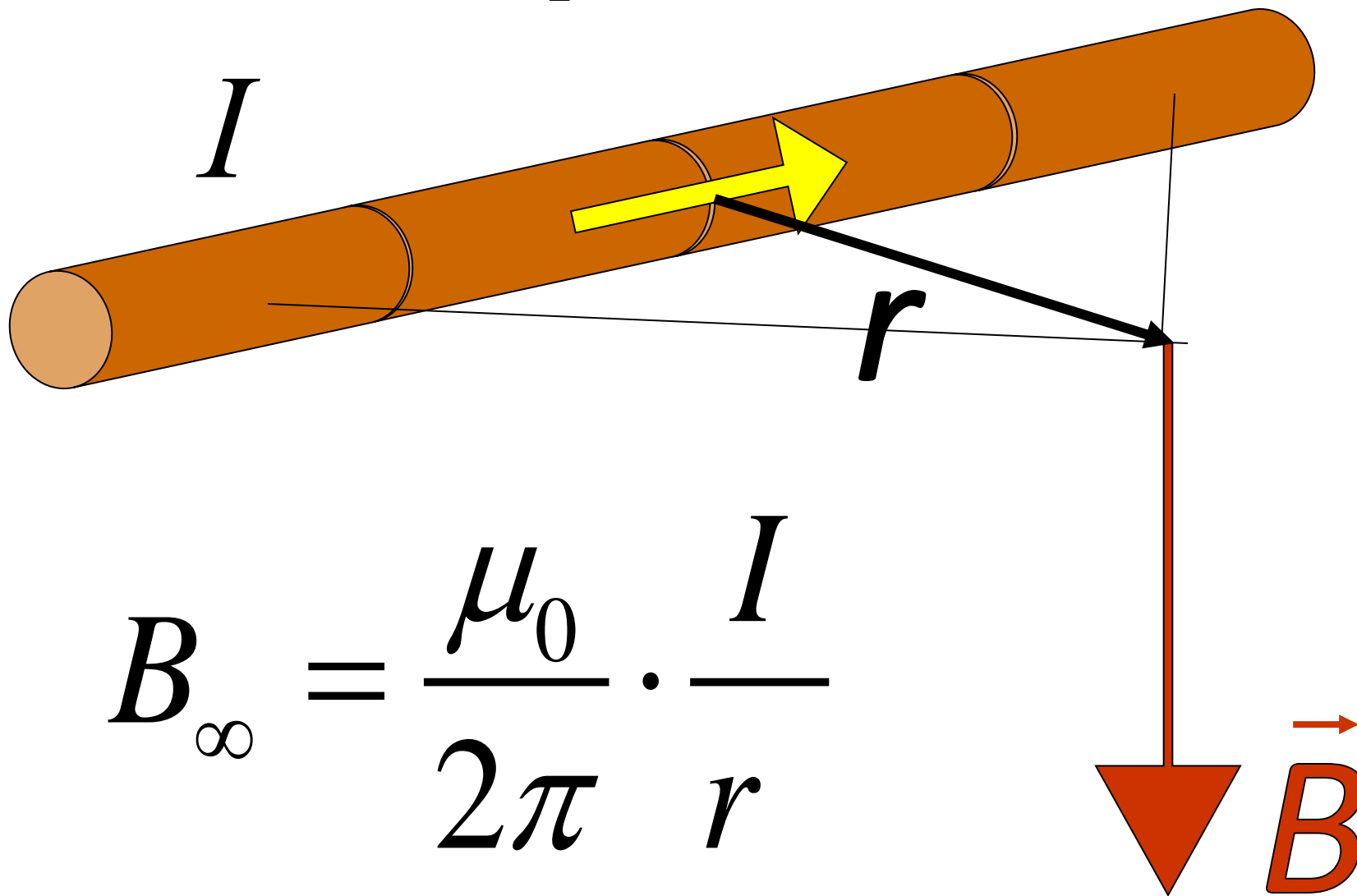
Для **бесконечно длинного проводника** $\alpha_1 = 0$, ⁼¹
а $\alpha_2 = \pi$, тогда: ⁼⁻¹

или

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

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{b}.$$

Поле прямого тока

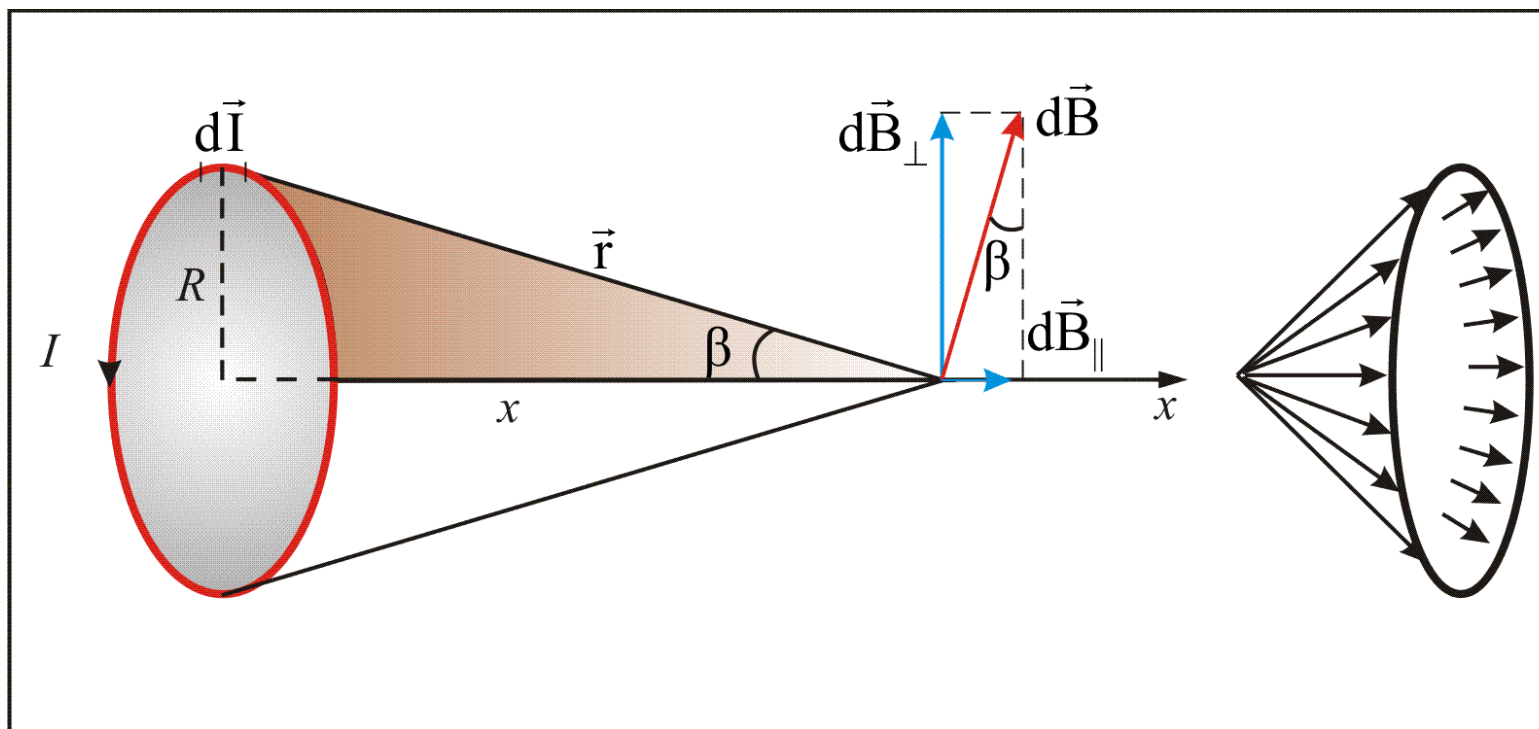


Магнитное поле кругового тока

Рассмотрим поле, создаваемое током I , текущим по тонкому проводу, имеющему форму окружности радиуса R .

$$dB_{\parallel} = dB \sin \beta$$

$$\sin \beta = \frac{R}{r}$$



$$\sin \beta = \frac{R}{r}$$

$$dB_{||} = dB \sin \beta$$

т.к. угол между $d\vec{l}$ и \vec{r} α — прямой, то $\sin \alpha = 1$,

тогда получим:

$$dB_{||} = dB \frac{R}{r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \frac{R}{r}.$$

Подставив $r = \sqrt{R^2 + x^2}$
и, проинтегрировав по всему контуру $l = 2\pi R$
получим выражение для нахождения *магнитной
индукции кругового тока*:

$$B = \int_0^{2\pi R} dB_{\parallel} = \frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}}.$$

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

При $x = 0$, получим *магнитную индукцию в центре
кругового тока*:

Заметим, что в числителе

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

$$I\pi R^2 = IS = P_m$$

— магнитный момент контура. Тогда, на большом

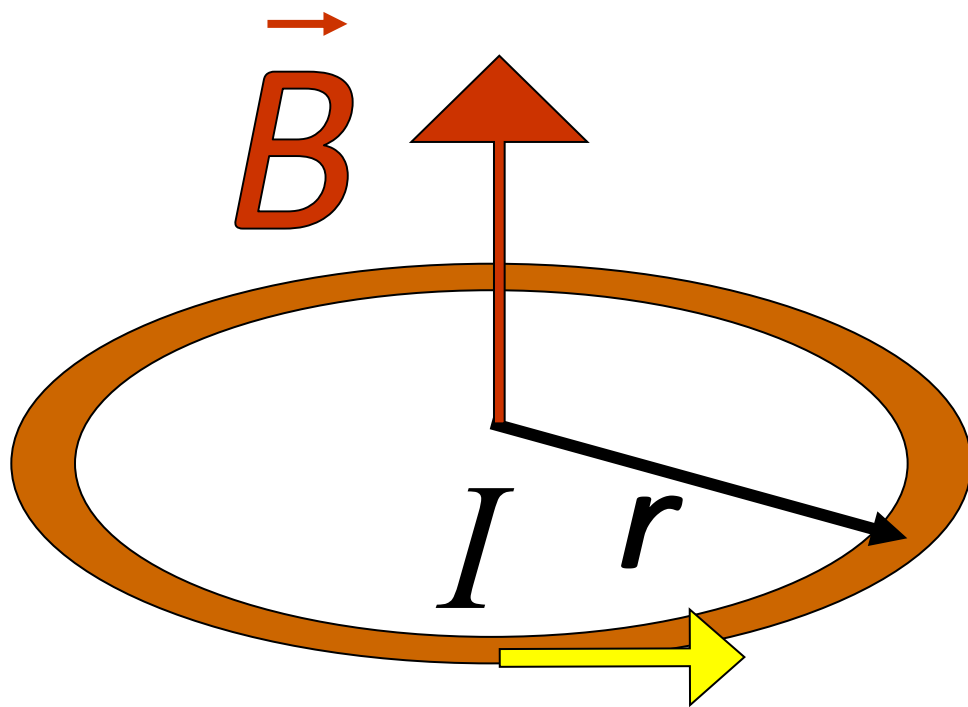
расстоянии от контура, при $R \ll x$,

магнитную индукцию можно рассчитать по

формуле:

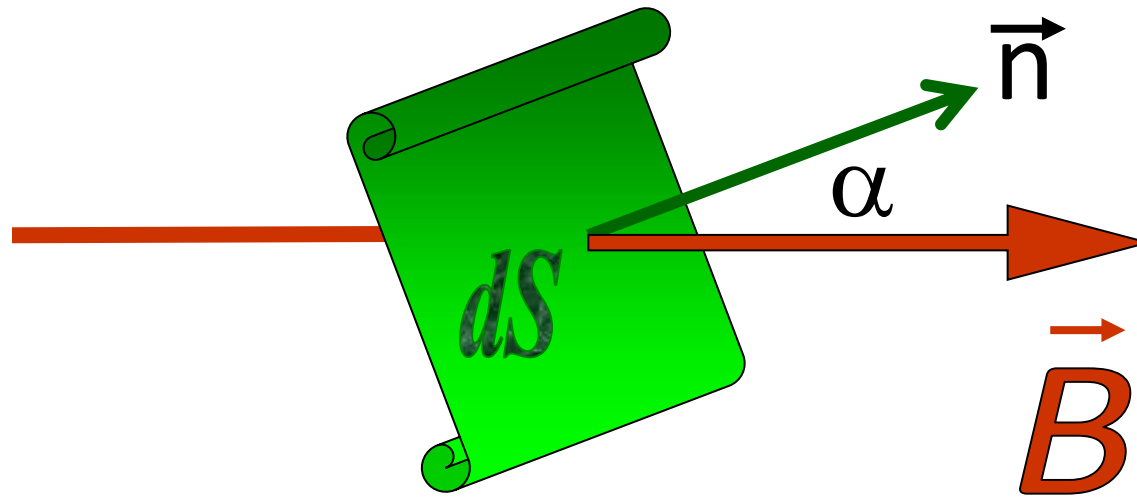
$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2P_m}{x^3}.$$

Поле кругового тока



$$B_o = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I}{r}$$

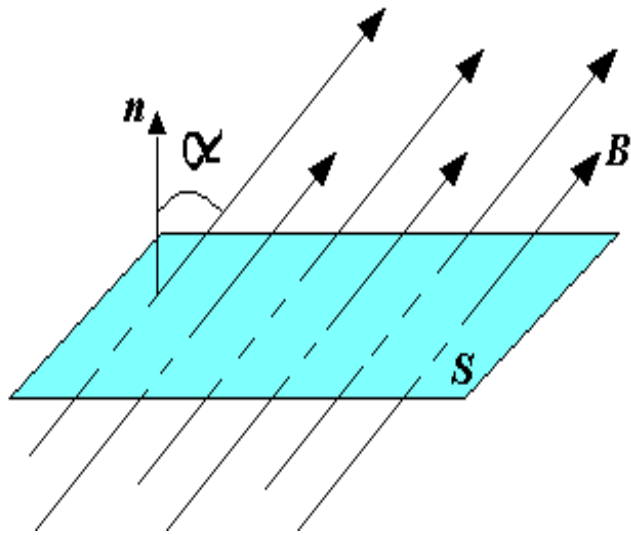
Определение потока вектора магнитной индукции



$$d\Phi = B dS \cos \alpha$$

Магнитный поток

(поток вектора магнитной индукции)



- Магнитным потоком или потоком вектора магнитной индукции сквозь площадку S называют величину:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B_n S \text{ [Вб]}$$

α — Угол между направлением нормали к площадке S и направлением вектора магнитной индукции B

Магнитный поток — скалярная величина.

Полный поток вектора магнитной индукции: $\Phi = \int_S B_n dS$