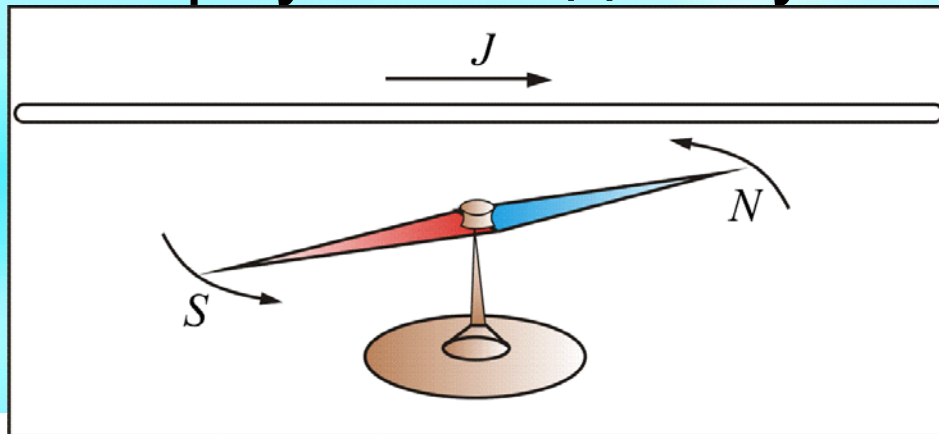


Магнитные взаимодействия

- 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

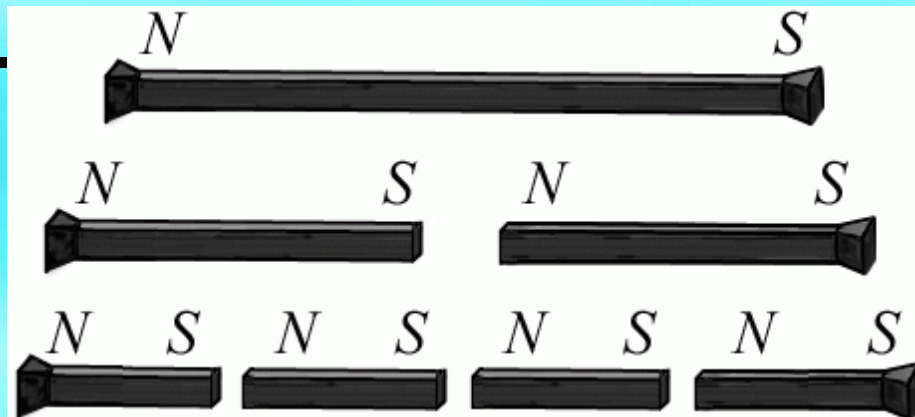
механический крутящий момент $M_{кр}$, пропорциональный синусу угла отклонения α и стремящийся повернуть ее вдоль указанного направления.



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

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

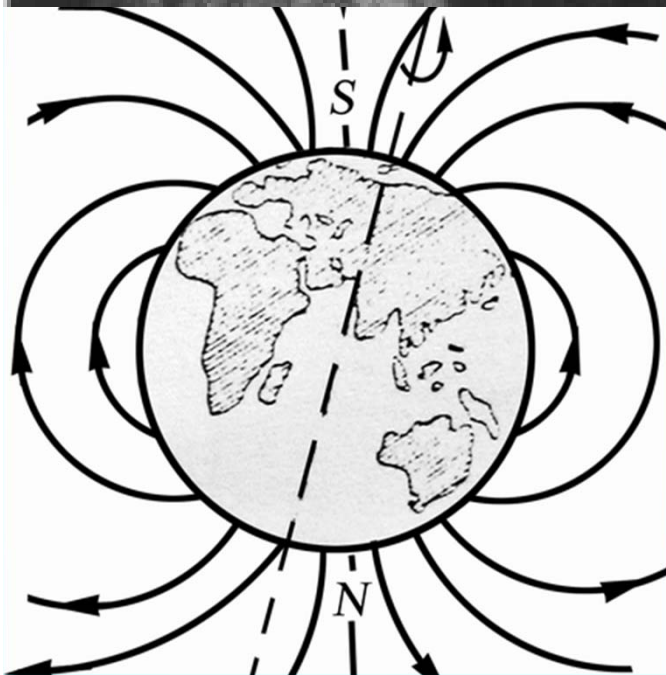
- Отличие постоянных магнитов от Электрических диполей заключается в следующем:
- Электрический диполь всегда состоит из зарядов, равных по величине и противоположных по знаку.
- Постоянный же магнит, будучи разрезан пополам, превращается в два меньших магнита, каждый из которых имеет и северный и южный полюса.





• Подводя итоги сведениям о магнетизме, накопленным к **1600 г.**, **английский ученый-физик Уильям Гильберт** написал труд

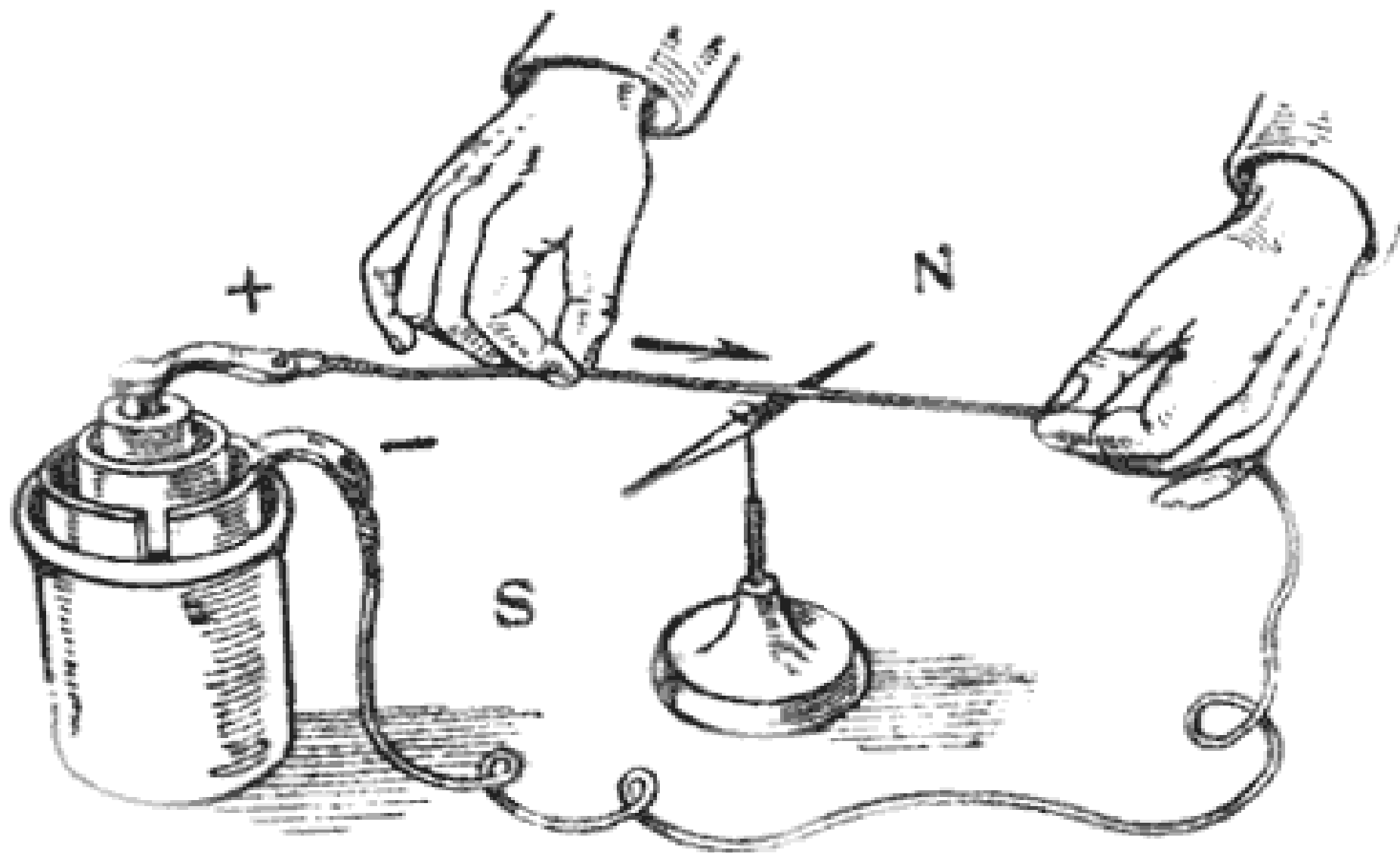
«О магните, магнитных телах и большом магните – Земле»



- 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.***



- В 1820 г. Х. Эрстед открыл магнитное поле электрического тока.
- А. Ампер установил законы магнитного взаимодействия токов.
- Ампер объяснил магнетизм веществ существованием молекулярных токов.



Опыт Эрстеда.

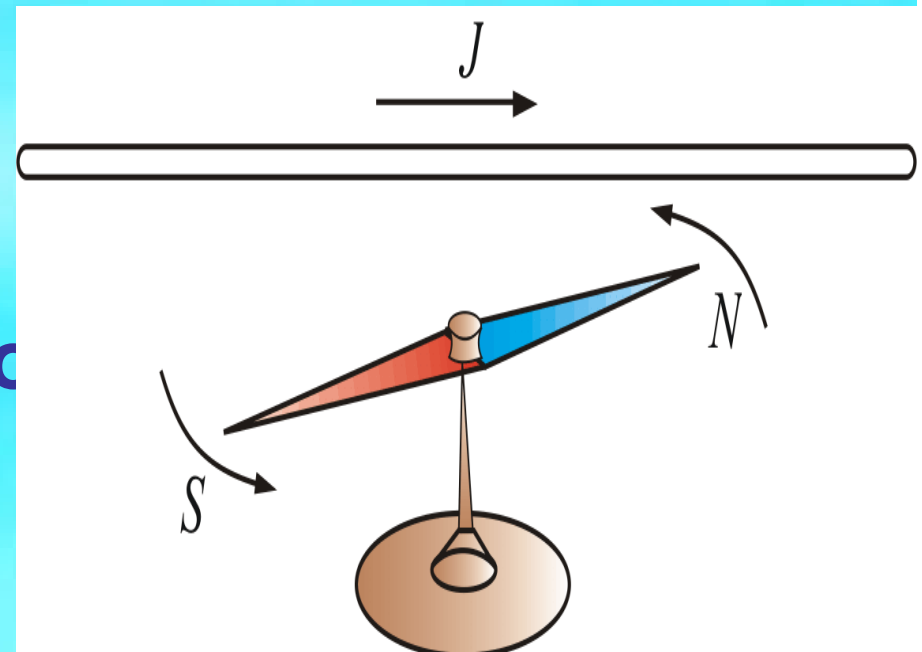


Открытие Эрстеда.

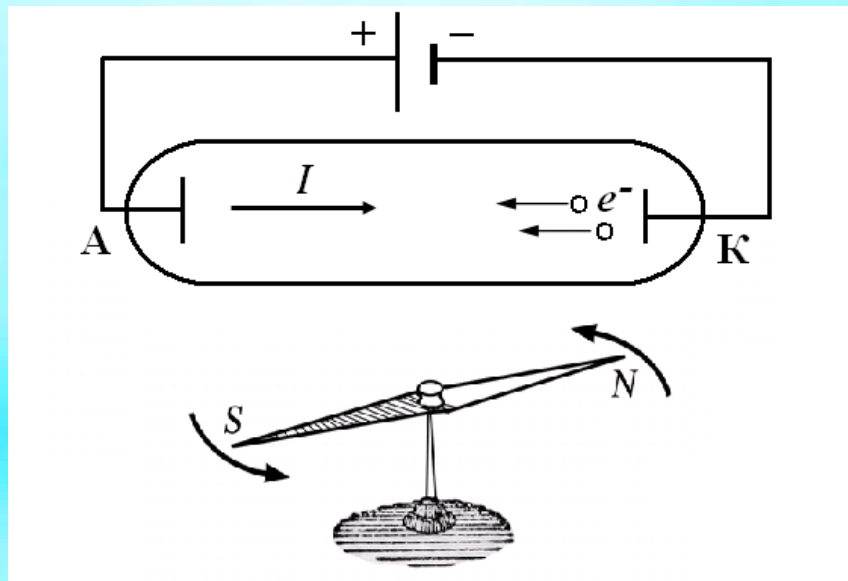
При помещении магнитной стрелки в непосредственной близости от проводника с током он обнаружил, что при протекании по проводнику тока, стрелка отклоняется (стремится расположиться перпендикулярно проводнику с током); после выключения тока стрелка возвращается в исходное положение.

Из описанного опыта

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



Опыт Иоффе (1911)



- Взаимодействие движущихся заряженных частиц (электронов) и магнитной стрелки.

- **Общий вывод:** *вокруг всякого проводника с током есть магнитное поле.*
- **Но 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 образуется еще и магнитное поле.**

Магнитное поле материально. Подобно электрическому полю, оно обладает энергией и, следовательно, массой.

Определение магнитного поля:

Магнитное поле – это материя, связанная с движущимися зарядами и обнаруживающая себя по действию на магнитные стрелки и движущиеся заряды, помещенные в это поле.

ОСНОВНОЕ СВОЙСТВО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Магнитное поле действует на движущиеся заряды, а на неподвижные не действует

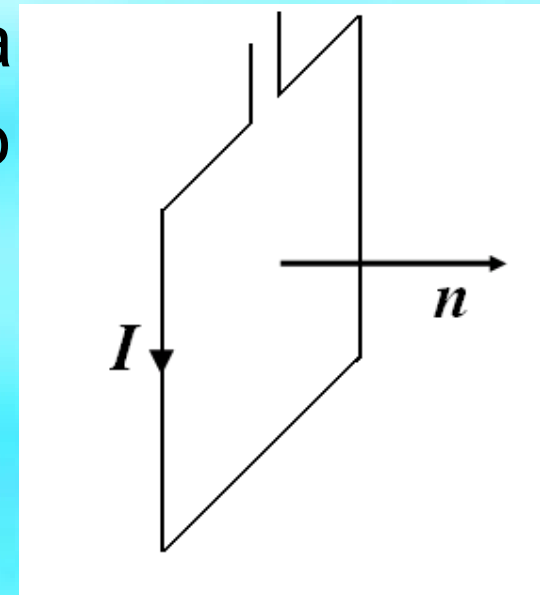
Вектор магнитной индукции – силовая характеристика магнитного поля

- Силовое действие магнитное поле оказывает на:
 - 1) Элемент тока: $F \sim I \cdot dl$. Элемент тока $I \cdot dl$ выделить невозможно.
 - 2) Магнитную стрелку. С помощью магнитной стрелки можно установить ориентационное действие магнитного поля, но численный расчет с её помощью затруднителен.
 - 3) Рамку или контур с током.

Вектор магнитной индукции

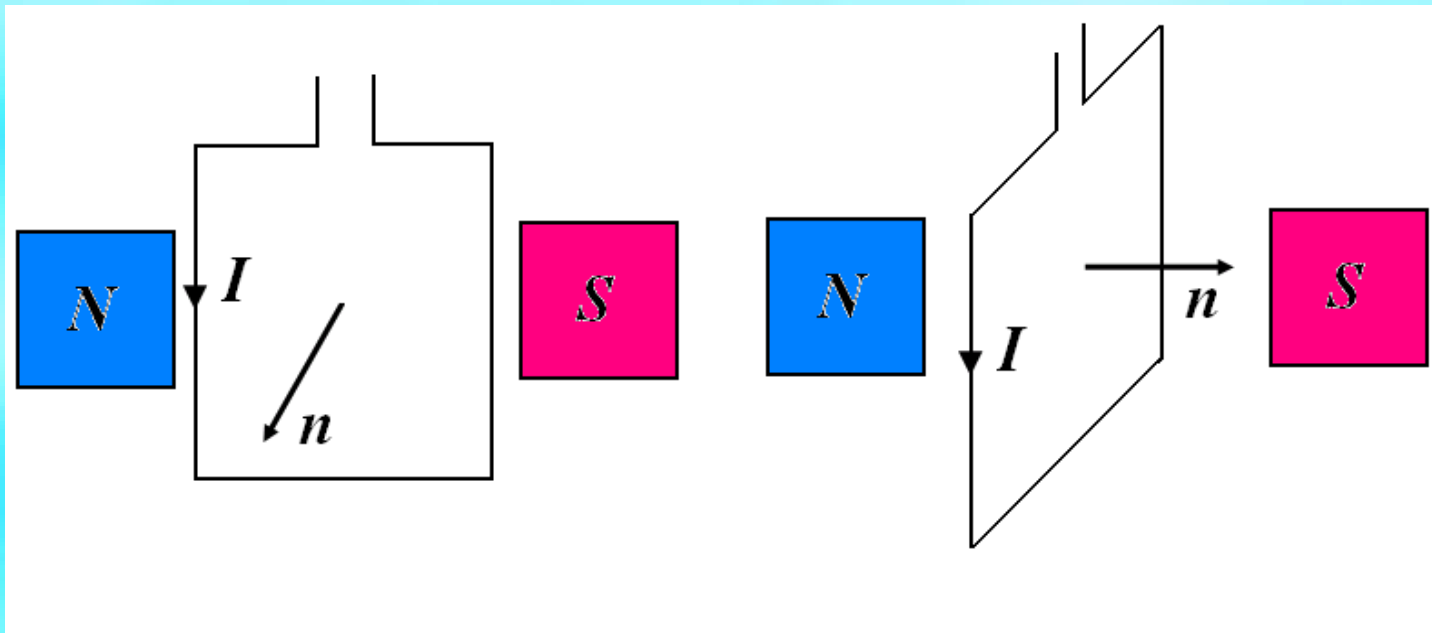
- Ориентация рамки в пространстве определяется направлением положительной нормали, определяемой по правилу правого винта:

Если направление вращения винта совпадает с направлением тока, то поступательное движение винта совпадает с **положительным направлением нормали**.

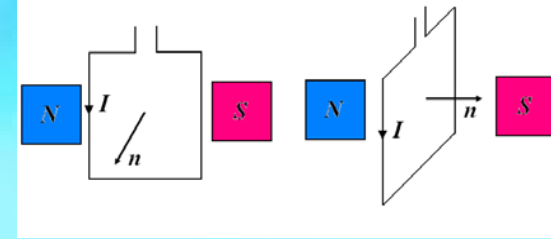


Вектор магнитной индукции

Если по рамке, помещенной во внешнее магнитное поле, пропускается ток, то она поворачивается.



Вектор магнитной индукции



- Максимальный вращающий момент M_{\max} достигается, если угол между начальным и конечным положением рамки равен 90° .

$M_{\max} \sim I$, если $S = \text{const}$ } Максимальный вращающий момент M_{\max} определяется произведением $I \cdot S$.

$M_{\max} \sim S$, если $I = \text{const}$ }

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

Вектор магнитной индукции

Опыт показывает:

- для данной точки пространства отношение M_{\max} к P_m величина постоянная

$$\frac{M_{\max}}{P_m} = \frac{M_{\max}}{IS} = B \quad - \text{ магнитная индукция.}$$

В СИ B измеряется в Теслах: $\left[1\text{Тл} = \frac{1\text{Н} \cdot 1\text{м}}{1\text{А} \cdot 1\text{м}^2} \right]$

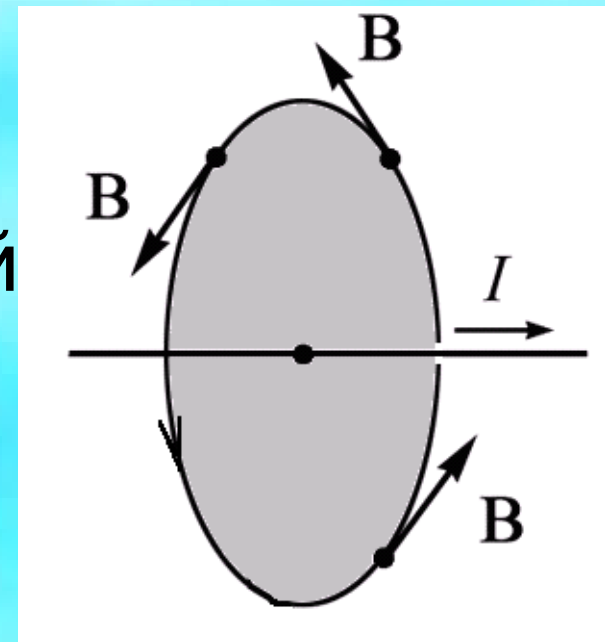
Магнитная индукция B в данной точке однородного магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с единичным магнитным моментом $P_m = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля (вектору B).

Силовые линии магнитного поля

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

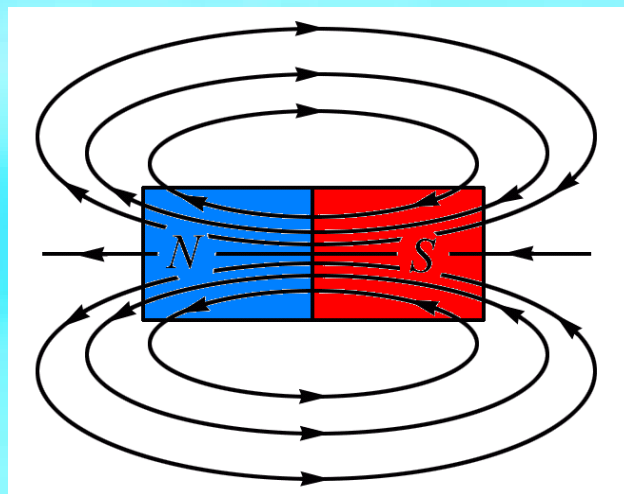
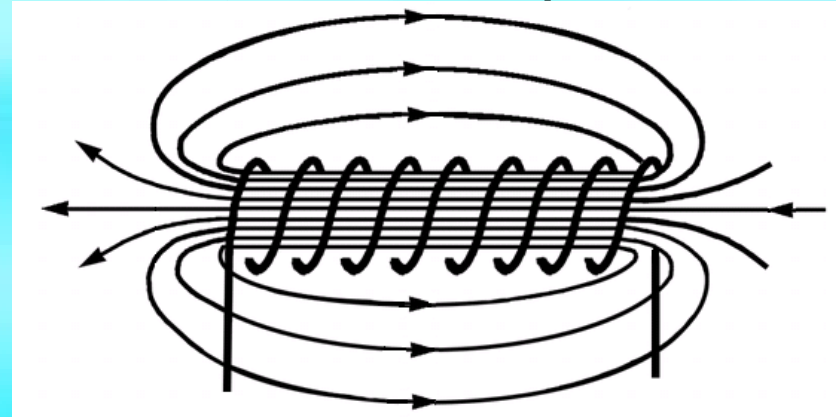
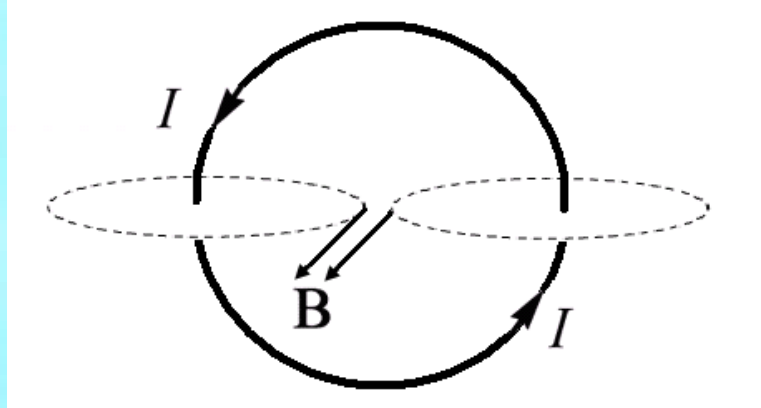
- **Прямой ток.**

Направление силовых линий определяется **правилом правого винта**.



Силловые линии магнитного поля

- Круговой ток.
- Соленоид – система витков, имеющих ось симметрии.
- Постоянный магнит.



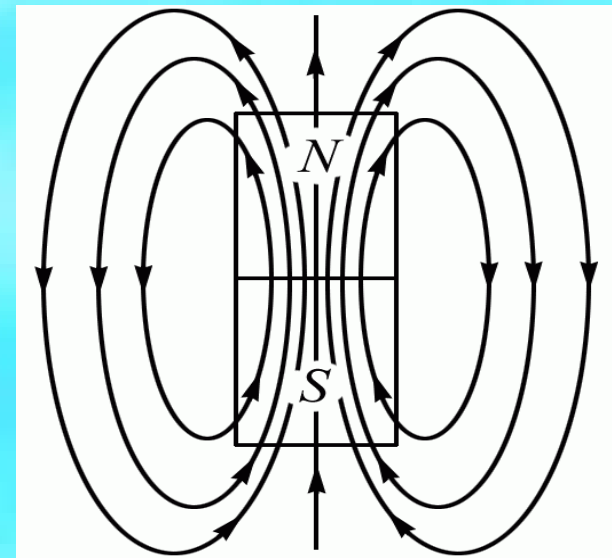
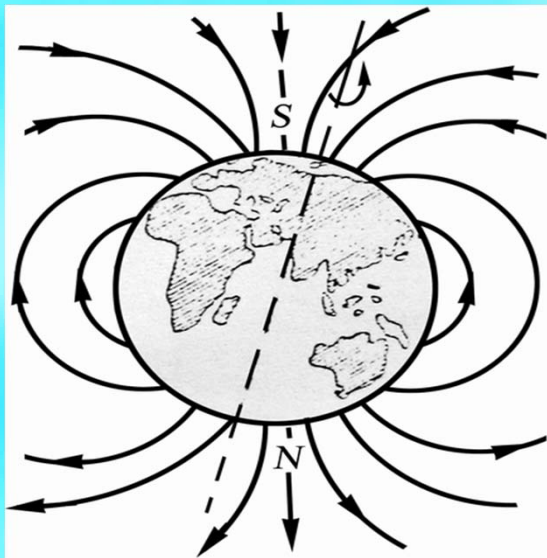
Силовые линии магнитного поля

замкнутые и не пересекаются.

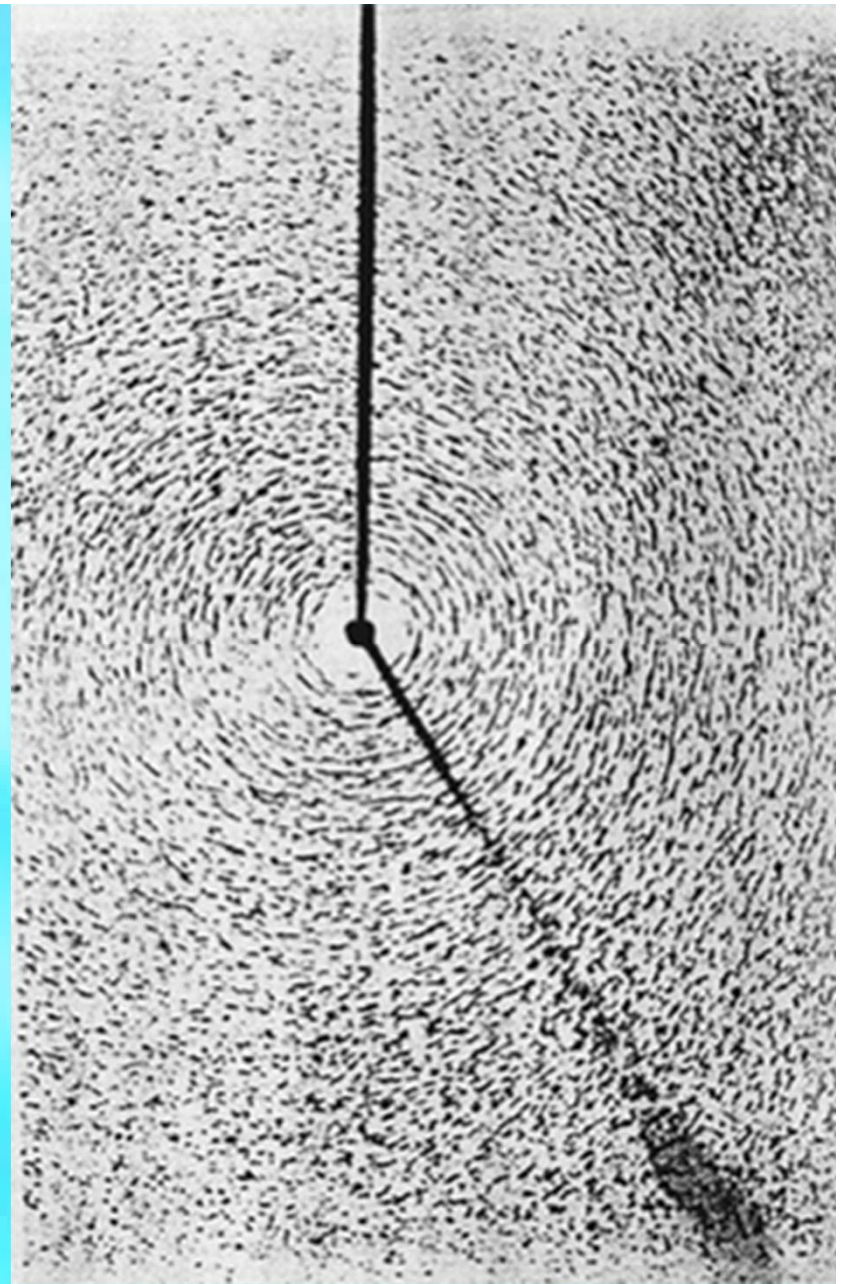
Следовательно, магнитное поле – **вихревое**.

Аналогия между магнитным полем постоянного магнита (полосового) и магнитным полем соленоида позволила Амперу высказать гипотезу о том, что магнитные свойства постоянных магнитов обусловлены существованием в них **микротоков**.

- Условились, за направление \vec{B} принимать направление северного конца магнитной стрелки.
- ***Силовые линии выходят из северного полюса, а входят, соответственно, в южный полюс магнита.***



Конфигурацию силовых линий легко установить с помощью мелких железных опилок которые намагничиваются в исследуемом магнитном поле и ведут себя подобно маленьким магнитным стрелкам (поворачиваются вдоль силовых линий).



(рис. 1.3)

Закон Гаусса для магнитного поля в дифференциальной и интегральной форме

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

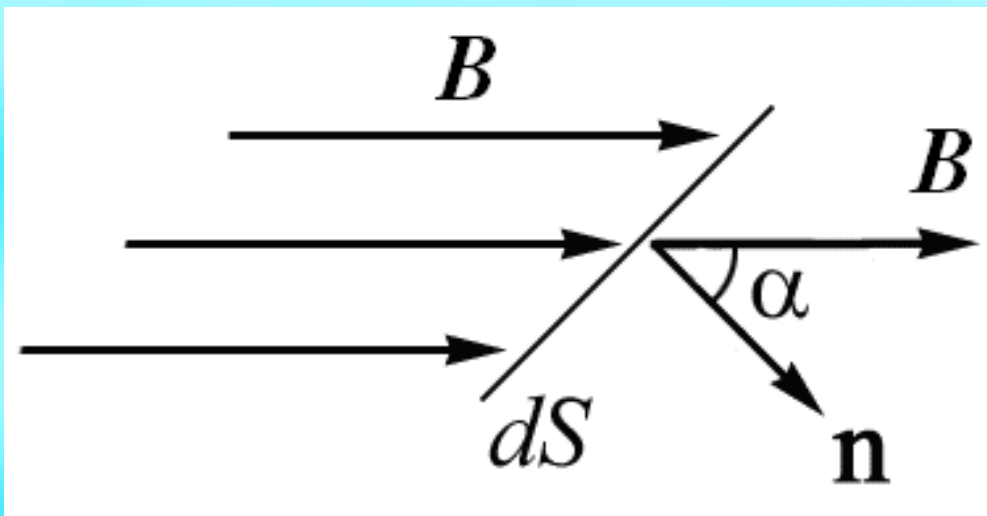
$$\mathit{div}\vec{B} = 0 \quad \text{– закон Гаусса для вектора } \mathbf{B} \text{ в дифференциальной форме.}$$

(Для электрического поля: $\mathit{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$.)

Закон Гаусса для магнитного поля в интегральной форме

Поток вектора \mathbf{B} :

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



В СИ: $[\Phi_B] = \text{вебер (Вб)}$.

Закон Гаусса для магнитного поля в интегральной форме

По теореме Остроградского-Гаусса:

$$\left. \begin{aligned} \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= \int_V \operatorname{div} B dV, \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Поток вектора ***B*** через произвольную замкнутую поверхность равен нулю.

Закон Био–Савара–Лапласа

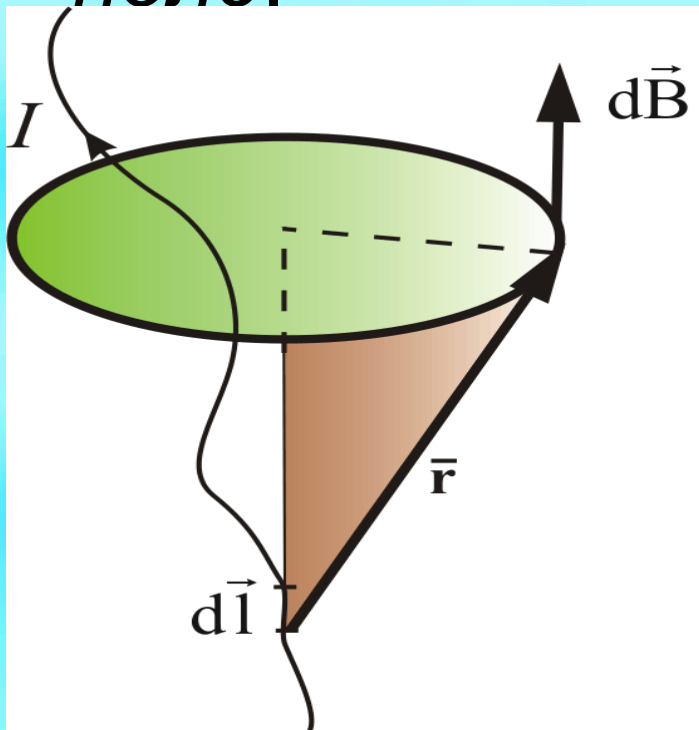
В 1820 г. французские физики Жан Батист **Био** и Феликс **Савар**, провели исследования магнитных полей токов различной формы. А французский математик **Пьер Лаплас** обобщил эти исследования.

Закон Био – Савара – Лапласа

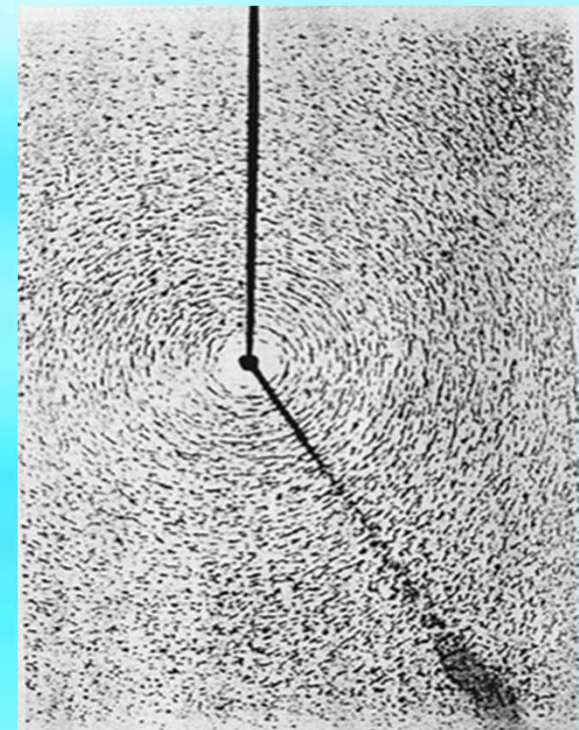
- Био и Савар экспериментально определили, что магнитная индукция зависит от:
 - 1) тока I , протекающего по проводнику,
 - 2) формы и размеров проводника,
 - 3) положения точки относительно проводника,
 - 4) состояния окружающей среды (магнитной проницаемости).

Закон Био – Савара – Лапласа

Вектор магнитной индукции $d\vec{B}$ направлен перпендикулярно плоскости, проходящей через $d\vec{l}$ и точку, в которой вычисляется поле.



если $\vec{a} = [\vec{b}, \vec{c}]$,
то $|\vec{a}| = bc \sin \alpha$



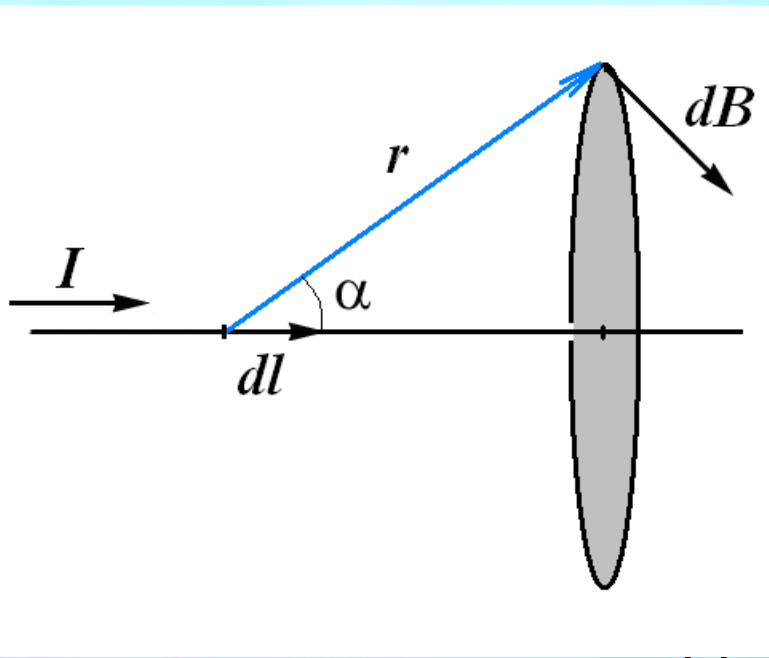
Закон Био – Савара – Лапласа

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i = \int_l d\vec{B}_i$$

где $d\vec{B}_i$ создается каждым участком длиной dl проводника с током I , т.е. элементарным током $I \cdot dl$.

r – радиус-вектор от элементарного точки, в которой ищется поле.

α – угол между элементарным током $I \cdot dl$ и r .



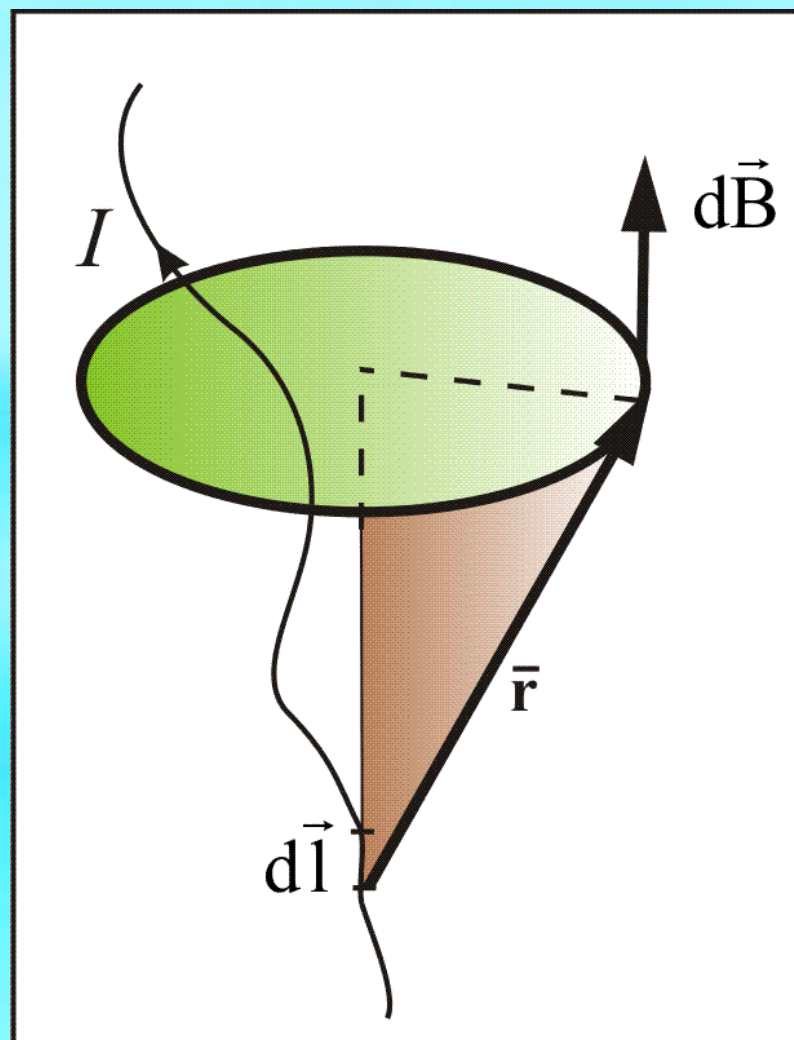
Закон Био–Савара–Лапласа

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

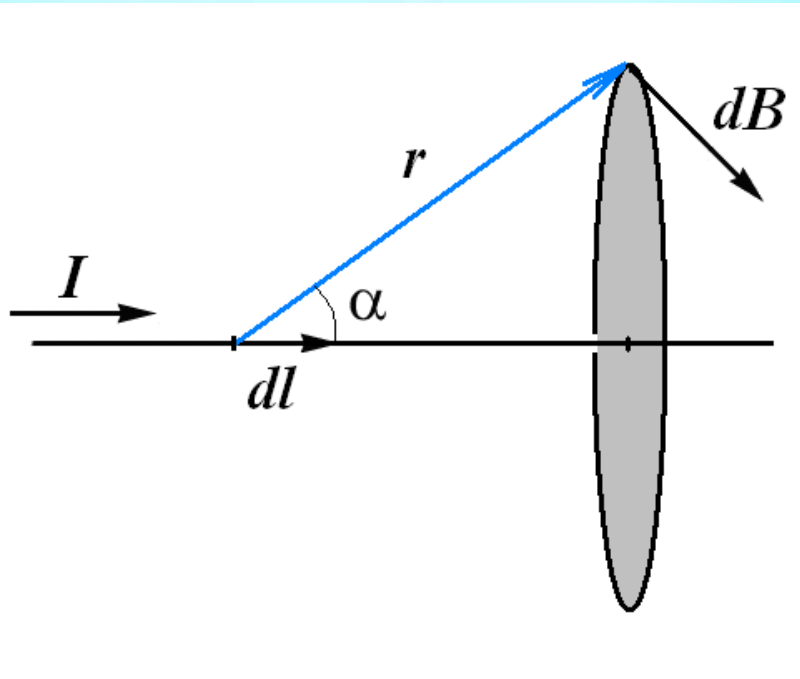
$$dB = k \frac{Idl}{r^2}$$

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

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от системы единиц



Закон Био – Савара – Лапласа



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

где μ_0 – магнитная постоянная.

В скалярном виде:

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

Закон Био – Савара – Лапласа

- Отношение магнитной индукции в среде $B_{\text{среда}}$ к магнитной индукции в вакууме B_0 называется

относительной магнитной проницаемостью среды: $\mu = \frac{B_{\text{среда}}}{B_0}$

Если $\mu < 1$, то среда – диамагнетик,

$\mu > 1$ – парамагнетик,

$\mu \gg 1$ – ферромагнетик.

$\mu\mu_0$ – **абсолютная магнитная проницаемость среды.**

Закон Био – Савара – Лапласа

- Принцип суперпозиции $\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$
- H – вектор напряженности магнитного поля, измеряемая в СИ [А / м] $\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$

(Для электрического поля: $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}$)

Закон Био – Савара – Лапласа для H :

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

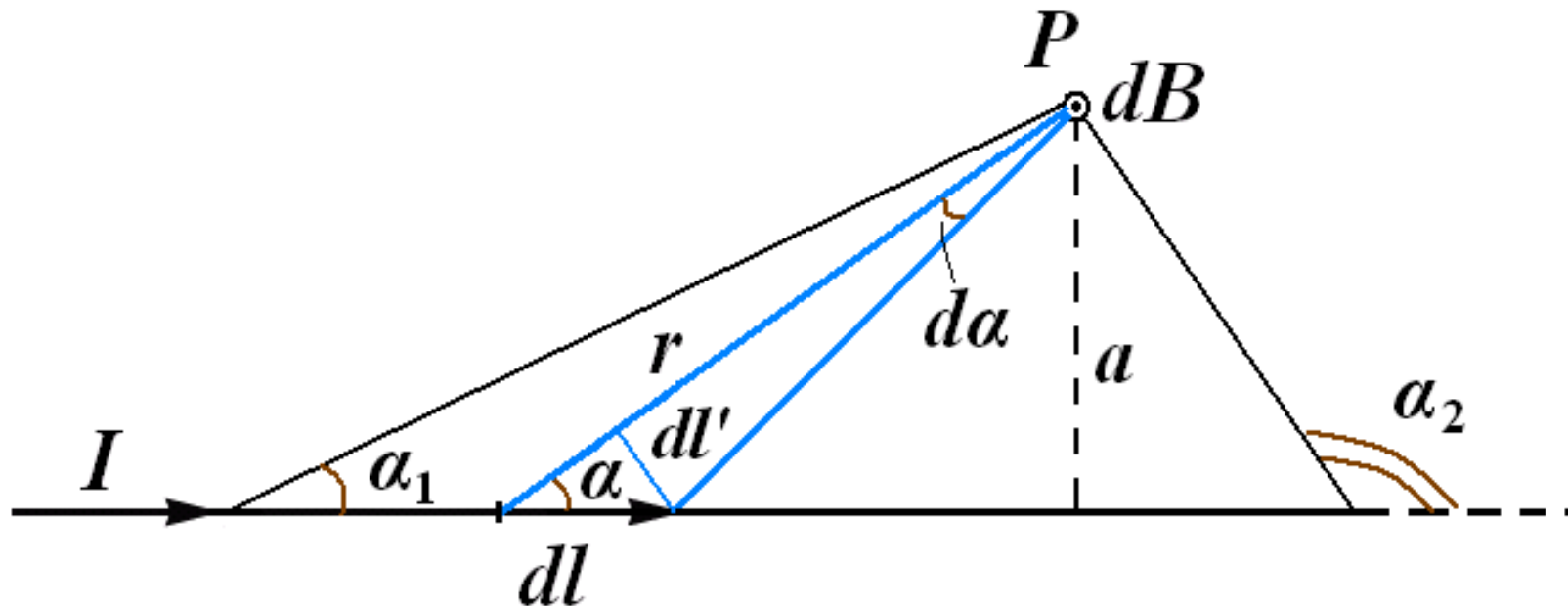
Закон Био–Савара–Лапласа для
вакуума можно записать так:

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

Применение закона Био – Савара – Лапласа для расчета магнитных полей

- Магнитное поле прямолинейного проводника с током.

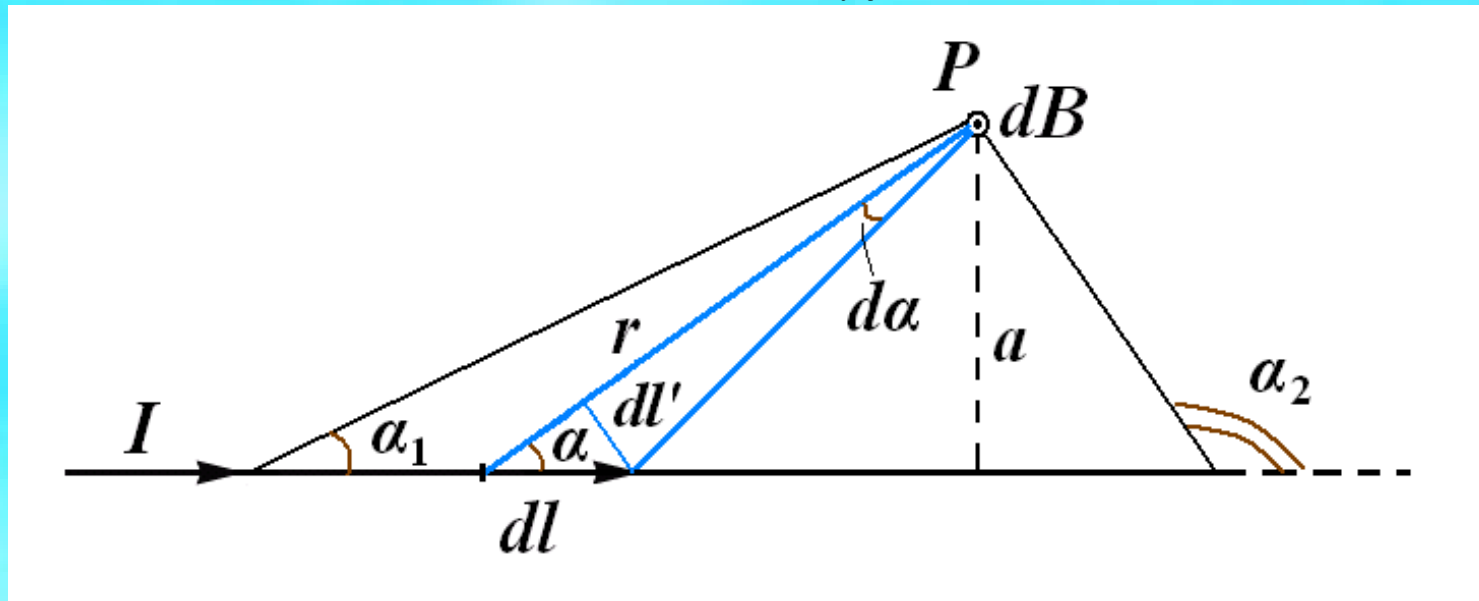
Поле в точке P , расположенной на расстоянии a от проводника конечной длины с током I .



Магнитное поле прямолинейного проводника с током.

Элементарный ток $I \cdot d\mathbf{l}$ в точке с радиус вектором \mathbf{r} создает магнитное поле в вакууме


$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}. (1)$$



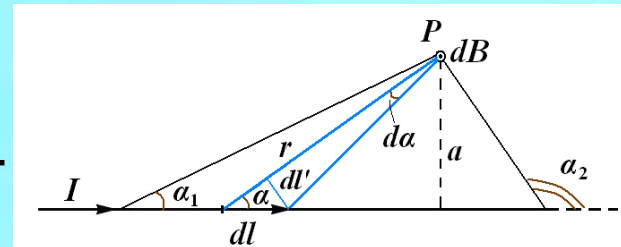
Магнитное поле прямолинейного проводника с током

Все элементарные токи создают в точке P магнитное поле одного направления и величиной

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

Так как $d\alpha$ мал, то $dl' = r d\alpha$; $dl = \frac{rd\alpha}{\sin \alpha}$. $a = r \sin \alpha.$ (3) 

$$dl = \frac{ad\alpha}{\sin^2 \alpha}. (4)$$



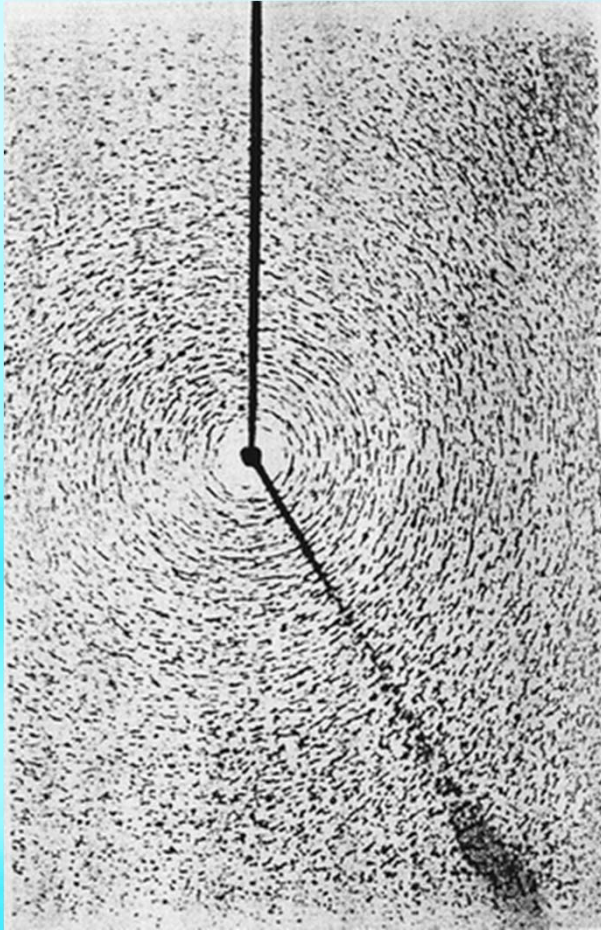
Магнитное поле прямолинейного проводника с током

(3) и (4) \rightarrow (2):

$$dB = \frac{\mu_0 I \frac{a d\alpha}{\sin^2 \alpha} \sin \alpha}{4\pi \frac{a^2}{\sin^2 \alpha}} = \frac{\mu_0 I \sin \alpha d\alpha}{4\pi a}. \quad (5)$$

$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu_0 I \sin \alpha d\alpha}{4\pi a} = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (6)$$

Магнитное поле прямолинейного проводника с током

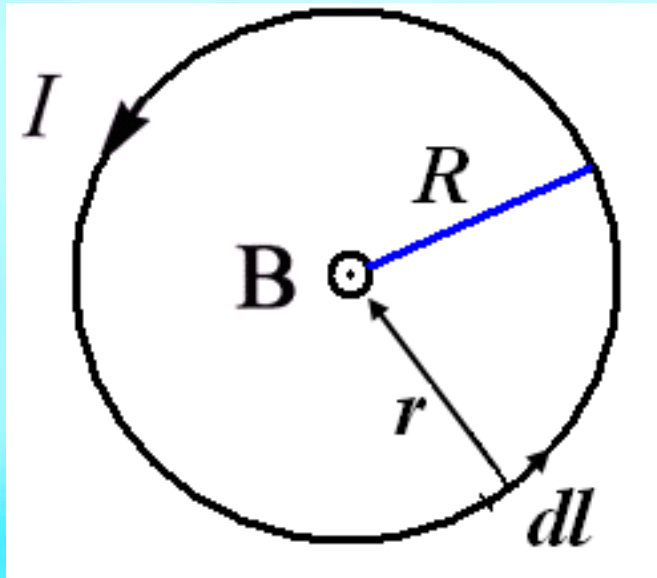


- Если проводник бесконечной длины, тогда $\alpha_1 = 0$,
 $\alpha_2 = 180^\circ$

$$B = \frac{2\mu_0 I}{4\pi a} = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}. \quad (7)$$

Фото железных опилок, рассыпанных вблизи длинного прямолинейного проводника с током; при включении тока железные опилки ведут себя подобно маленьким магнетикам, располагаясь вдоль силовых линий магнитного поля.

Магнитное поле в центре кругового тока



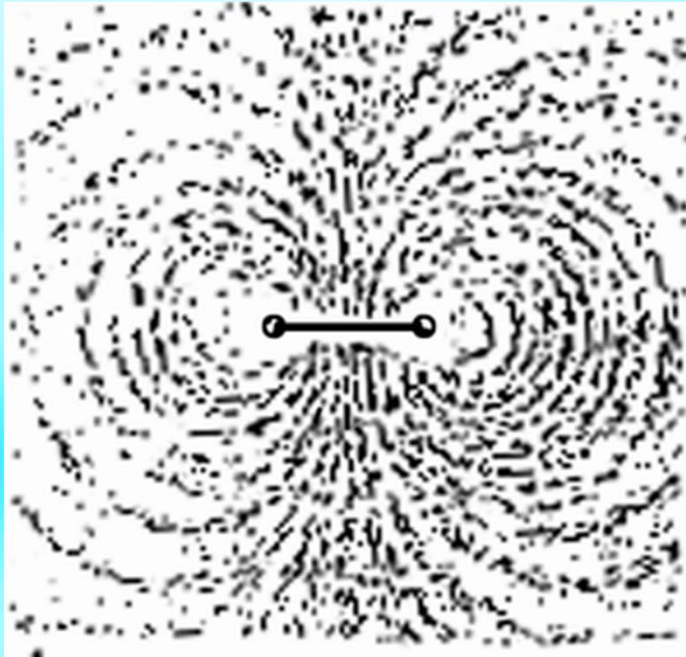
Элементарные токи $I \cdot d\vec{l} \Rightarrow d\vec{B}$
одного направления.

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

$$\left. \begin{aligned} r &= R, \\ \alpha &= 90^\circ. \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

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

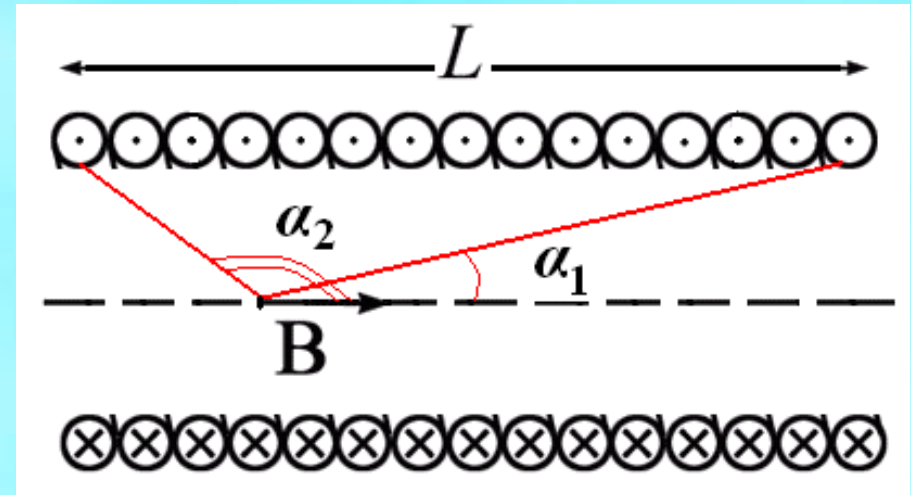
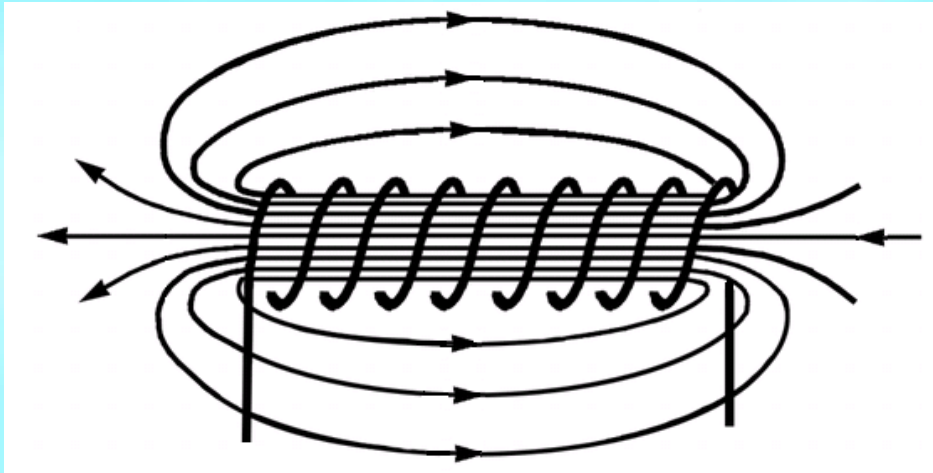
Магнитное поле в центре кругового тока



$$B = \int_l \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \int_0^{2\pi} dl =$$
$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Силовые линии магнитного поля кругового тока – опыт с железными опилками.

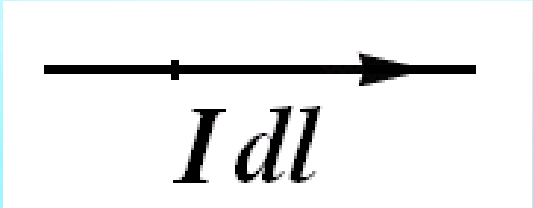
Поле соленоида



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

где $n = N / L$ – число витков на единицу длины соленоида.

Магнитное поле движущегося заряда



The diagram shows a horizontal black line with an arrow pointing to the right. Below the line, the text $I dl$ is written in a black serif font.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3} = \frac{\mu_0 [I d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}. (1)$$

$dN = ndV$ – число заряженных частиц в элементе тока $I \cdot dl$,

где n – концентрация частиц.

$$\left. \begin{array}{l} I = jS, \\ j = qnv. \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} Id\vec{l} = qnvSd\vec{l} = qn\vec{v}Sdl = \\ = q\vec{v}ndV = q\vec{v}dN. (2) \end{array}$$

Магнитное поле движущегося заряда

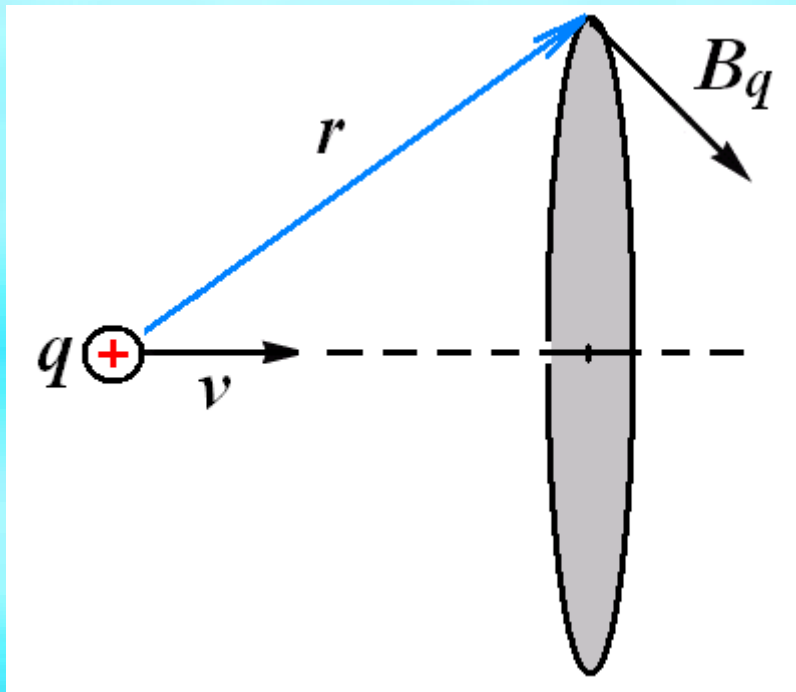
$$(2) \rightarrow (1): \quad d\vec{B} = \frac{\mu_0 q dN [\vec{v}, \vec{r}]}{4\pi r^3} -$$

поле, созданное dN частицами.

Поле, созданное одной движущейся частицей:

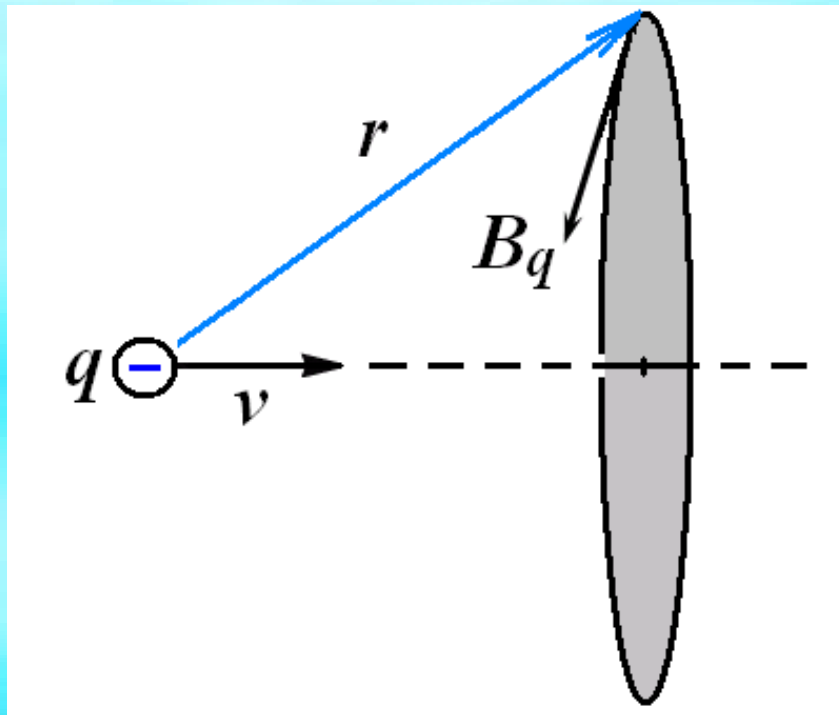
$$B_q = \frac{d\vec{B}_N}{dN} = \frac{\mu_0 q [\vec{v}, \vec{r}]}{4\pi r^3}.$$

Магнитное поле движущегося заряда



- Направление силовых линий магнитного поля, создаваемого движущимся положительным зарядом, определяется правилом правого винта.

Магнитное поле движущегося заряда

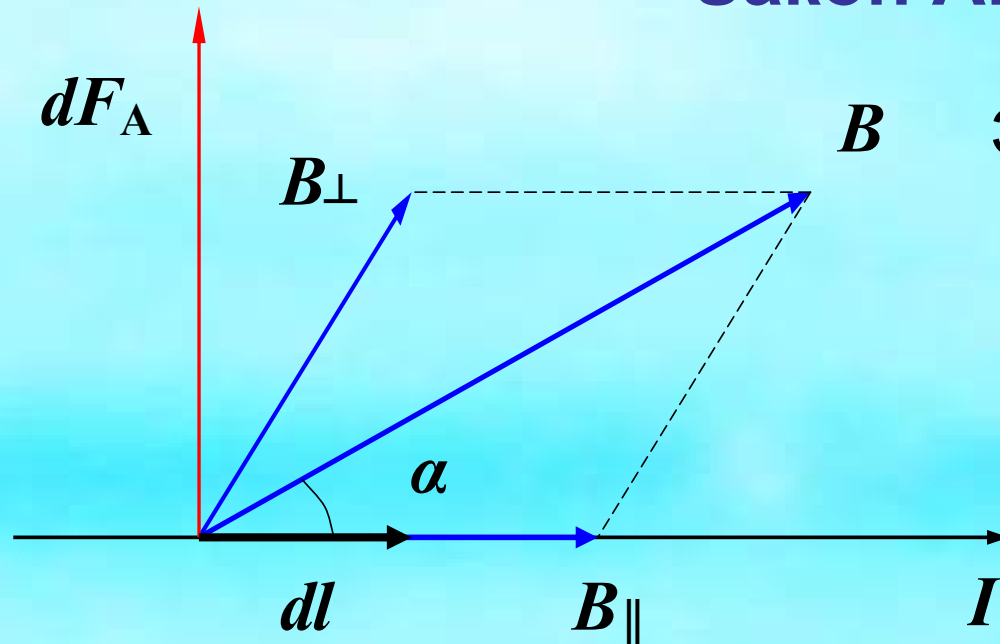


- Поле, создаваемое движущимся отрицательным зарядом, имеет противоположное направление.

Действие магнитного поля на проводники и контур с током

Закон Ампера

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

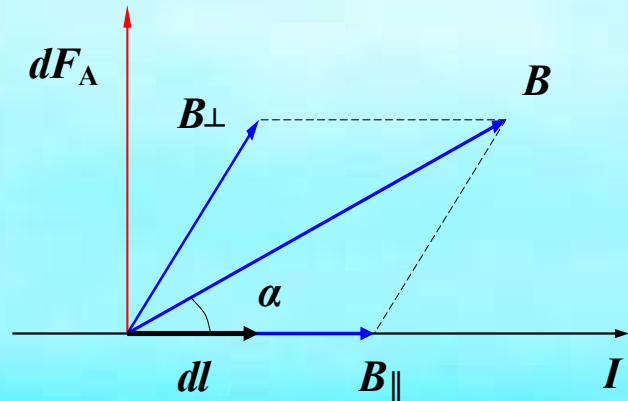


α – угол между вектором B и вектором dl , направление которого совпадает с направлением тока I .

Элементарная сила dF , действующая на малый элемент длины dl проводника с током, находящийся в магнитном поле индукцией B , прямо пропорциональна силе тока I в проводнике и векторному произведению

$$[d\vec{l}, \vec{B}]$$

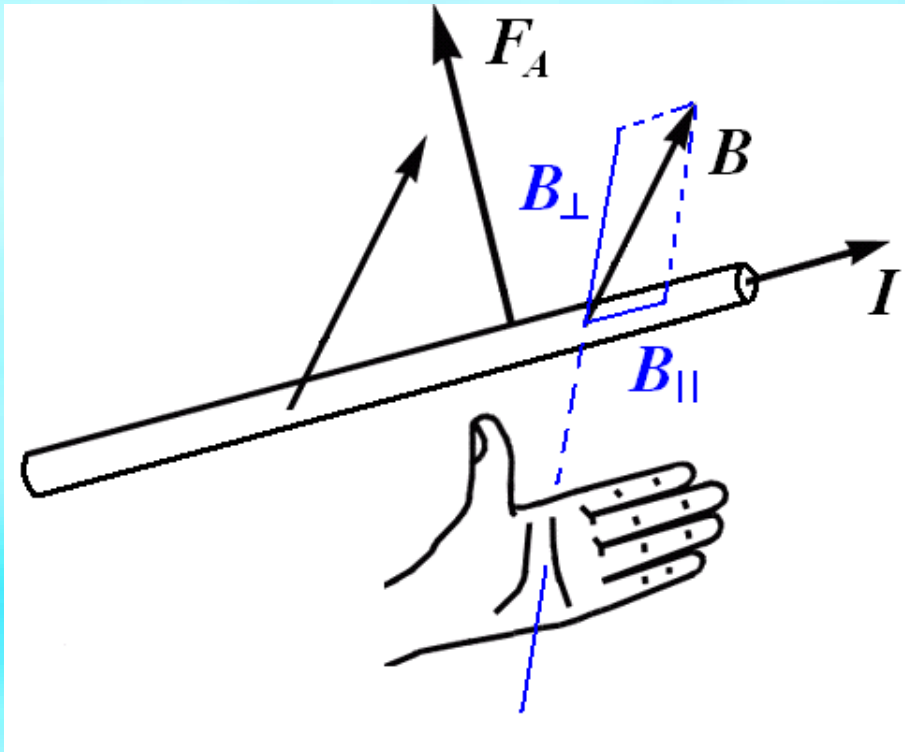
Закон Ампера



Сила Ампера,
действующая в
магнитном поле на
проводник с током
конечной длины:

$$\vec{F}_A = \int_l I [d\vec{l}, \vec{B}], \quad F_A = IBl \sin \alpha,$$

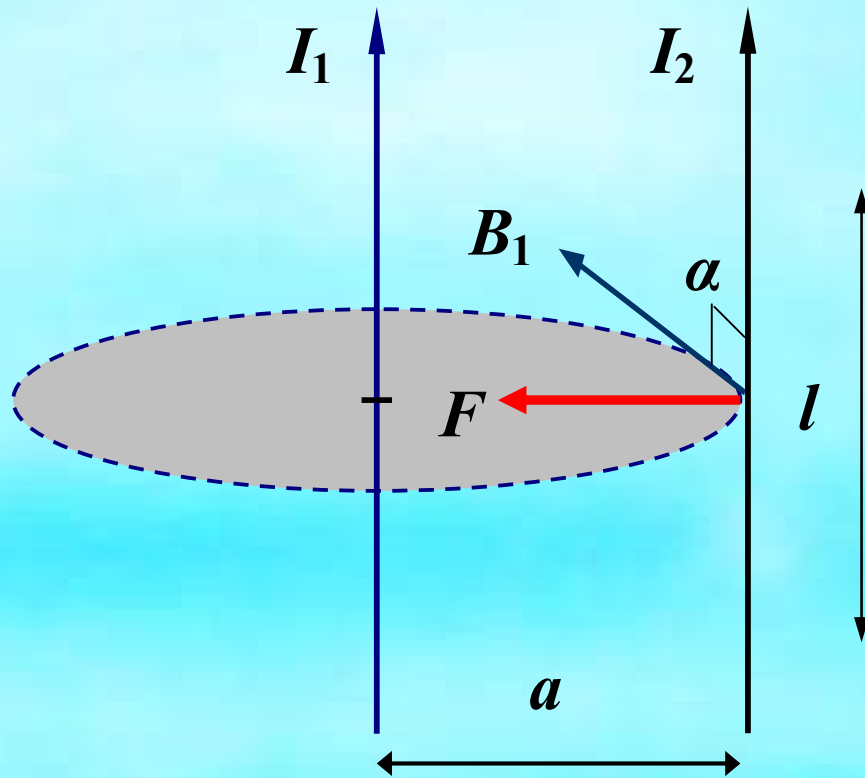
Закон Ампера



Направление силы Ампера определяется **правилом левой руки**

если ладонь левой руки расположить таким образом, что B_{\perp} входит в ладонь, четыре выпрямленных пальца направлены по току, то большой палец, отогнутый на 90° , указывает направление F_A .

Взаимодействие параллельных токов.



Поле бесконечного проводника:

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0}{4\pi a} 2I_1.$$

$$\alpha = 90^\circ,$$

$$F = I_2 B_1 l$$

$$F = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{a} \cdot l,$$

$$I_1 = I_2 = I, \quad \mu = 1.$$

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I^2}{a} l$$

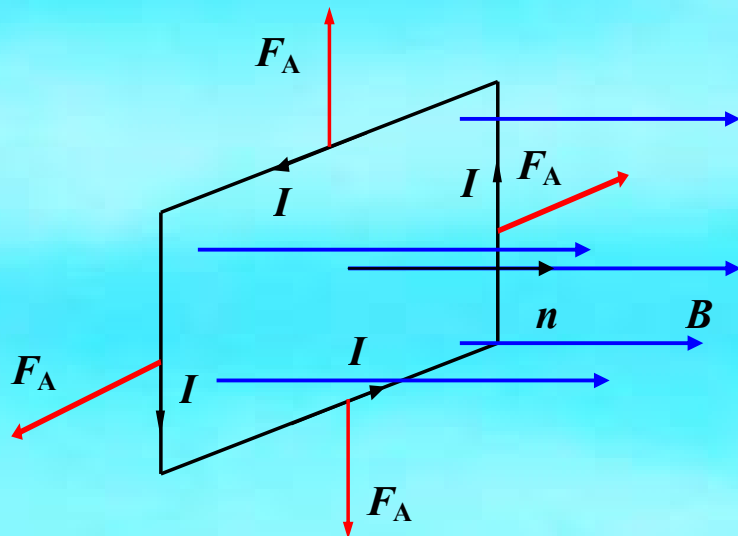
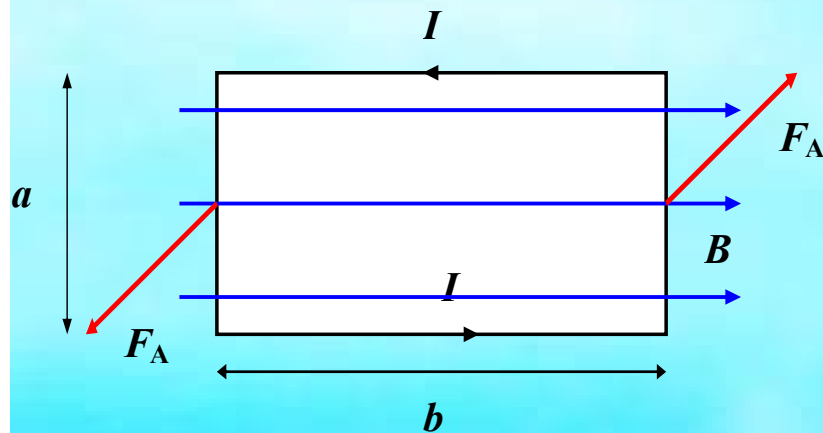
Основная электрическая единица СИ –Ампер

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I^2}{a} l$$

- **1 Ампер** (А) – это сила такого постоянного тока, при прохождении которого по двум прямолинейным бесконечно длинным проводникам, находящимся в вакууме на расстоянии 1 метр друг от друга, сила их взаимодействия составляет $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Действие магнитного поля на контур с током

- Прямолинейный контур в магнитном поле



Вектор магнитной индукции B находится в плоскости контура

$$F_A = I a B \sin \alpha,$$

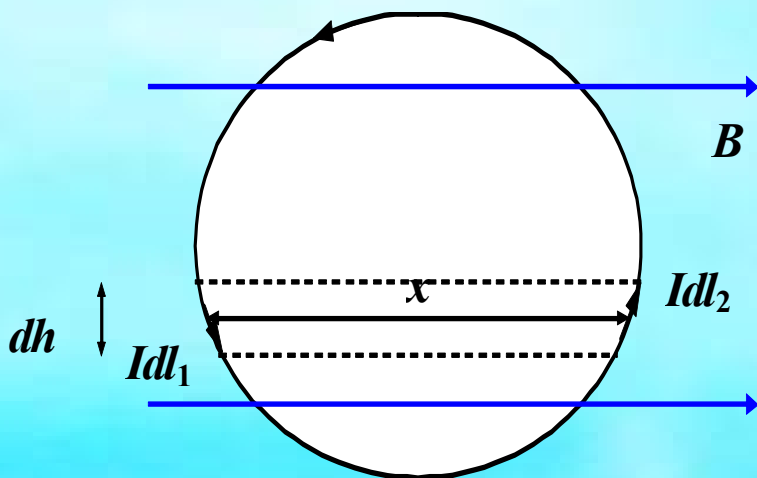
$$\alpha = 90^\circ.$$

$$M = F_A \cdot b = I a b B = I S B = p_m B.$$

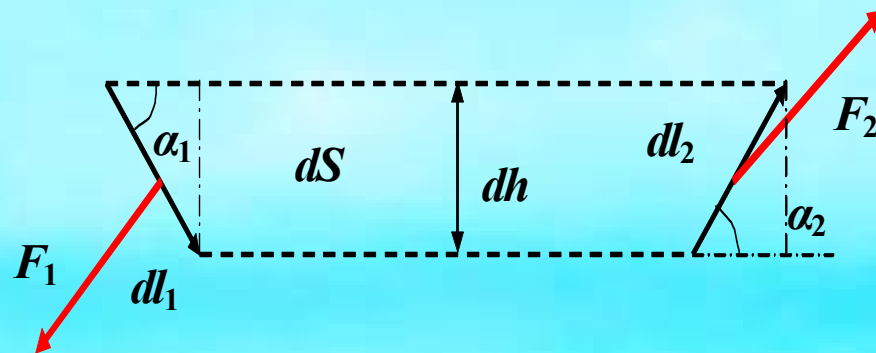
$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$$

Контур поворачивается таким образом, что его положительная нормаль n совпадает с вектором B

- Контур произвольной формы



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



$$d\vec{F}_1 = I [d\vec{l}_1, \vec{B}],$$

$$dF_1 = Idl_1 B \sin \alpha_1 = IBdh.$$

$$d\vec{F}_2 = I [d\vec{l}_2, \vec{B}],$$

$$dF_2 = Idl_2 B \sin \alpha_2 = IBdh.$$

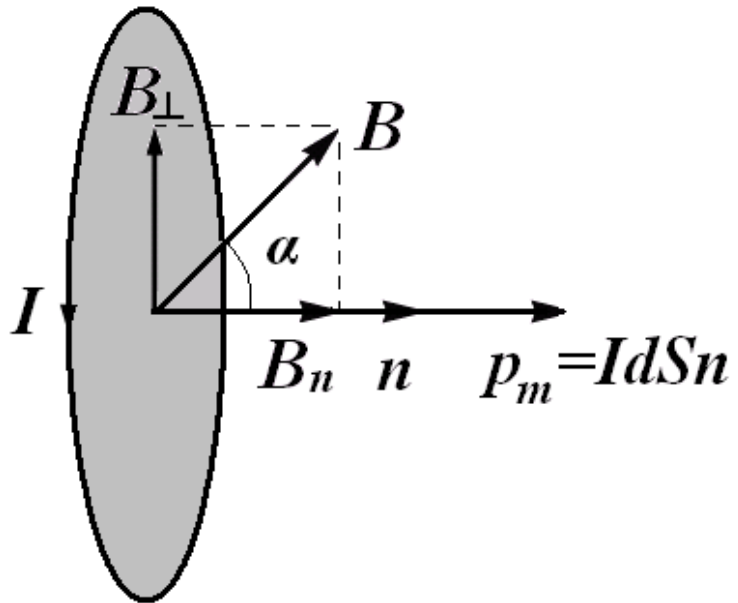
- Контур произвольной формы

На элемент контура действует пара сил:

$$dM = dF \cdot x = IBdh \cdot x = IBdS,$$

$$M = \int_S IBdS = p_m B, \quad \vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}].$$

- Между нормалью \vec{n} к контуру и вектором \vec{B} угол α ($\angle \vec{B}, \vec{n} = \alpha$)



Вектор \vec{B} разложим на два вектора

- B_n :

$$\angle \vec{B}_n, \vec{n} = 0 \Rightarrow \vec{M}_n = [\vec{p}_m, \vec{B}_n] = 0.$$

- B_{\perp} :

$$B_{\perp} = B \sin \alpha, \quad M_{\perp} = p_m B \sin \alpha.$$

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$$