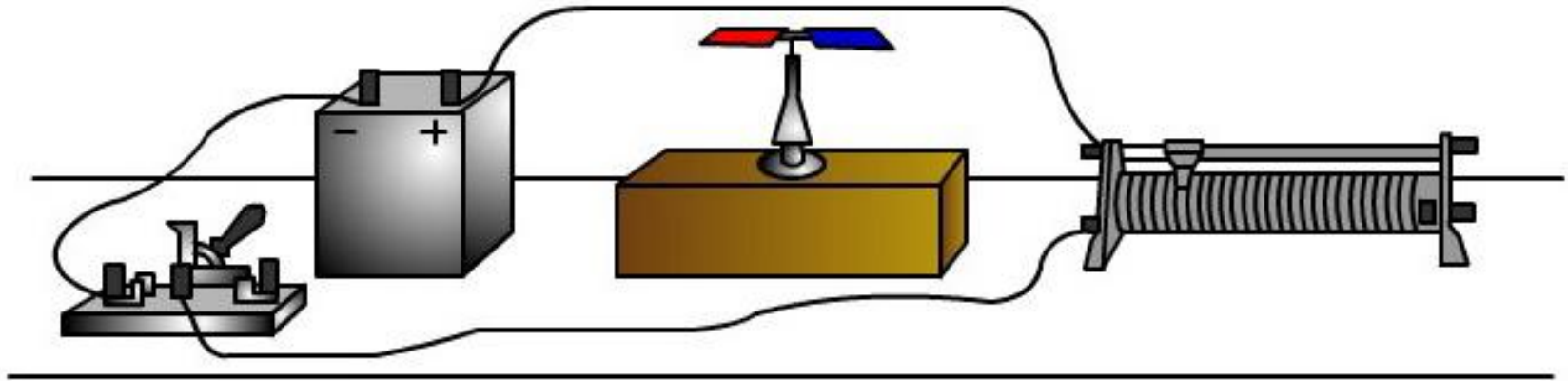
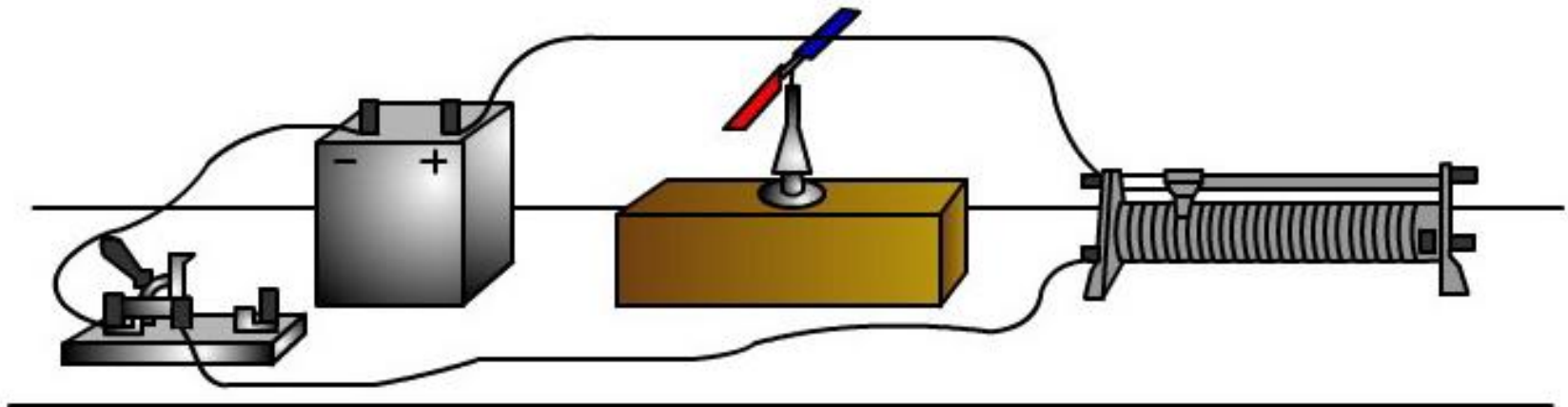


Магнитное поле (экспериментальные свидетельства). Опыт Эрстеда

Ток НЕ течет по проводам



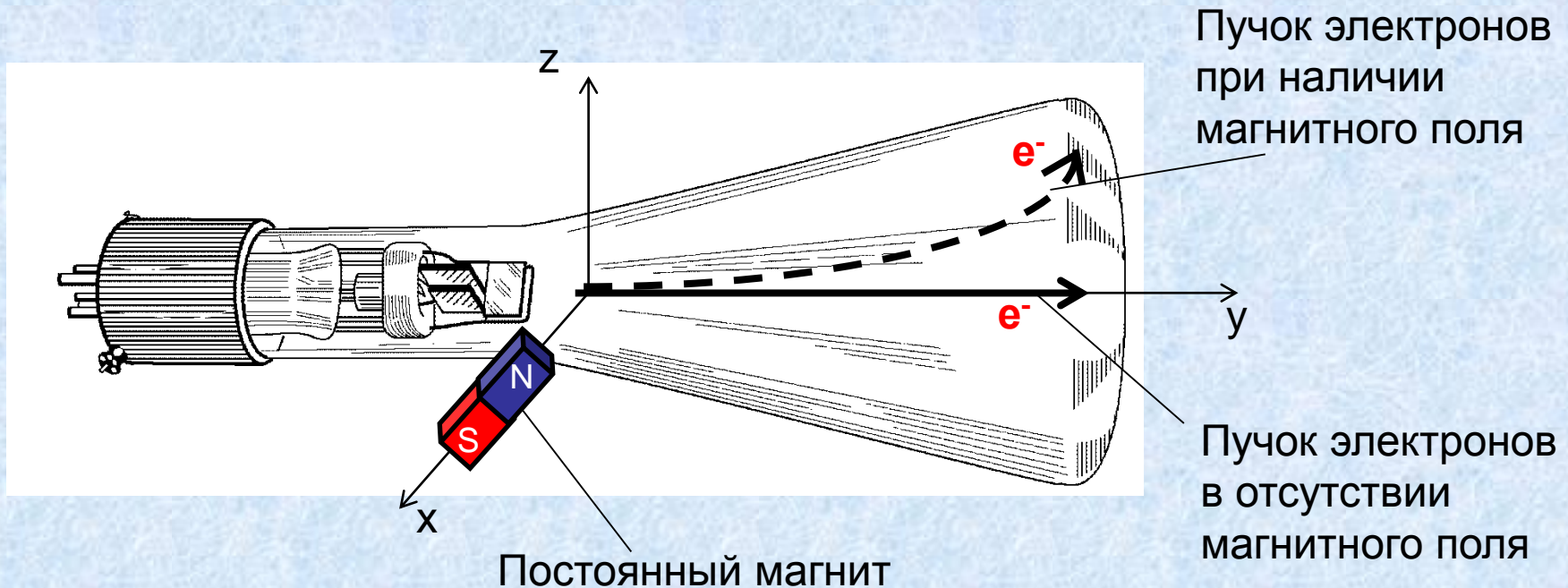
Ток течет по проводам



Магнитное поле

Экспериментальные факты:

1. магнитное поле действует на движущиеся заряды;
2. движущиеся заряды создают магнитное поле.



Магнитное поле

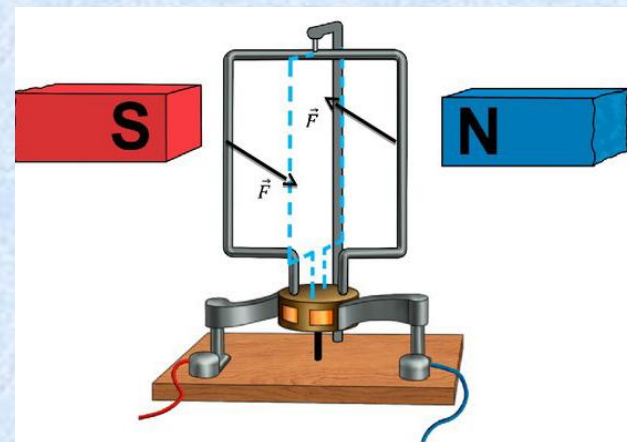
Магнитным полем называют вид материи, посредством которой осуществляется **силовое воздействие** на **движущиеся электрические заряды**, помещенные в поле, и другие тела, обладающие магнитным моментом.

Магнитное поле есть одна из форм проявления электромагнитного поля.

Магнитное поле не действует на покоящиеся заряды.

Рамка с током в магнитном поле

Если по рамке с током, помещенной в магнитное поле пропускать ток, то она поворачивается.



На рамку с током в магнитном поле действует момент силы M , зависящий от ряда факторов, в том числе и от ориентации рамки.

Максимальное значение момента силы M_{\max} зависит от магнитного поля, в котором находится контур, и от самого контура: силы тока I , протекающего по нему, и площади контура S , то есть **действие магнитного поля на контур с током определяется величиной:**

$$p_m = IS$$

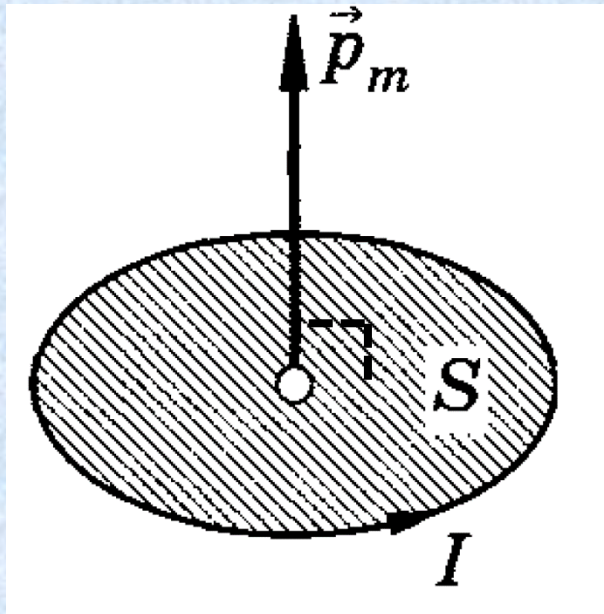
где p_m – магнитный момент рамки с током.

Магнитный момент

Магнитный момент \vec{p}_m – это вектор, направление которого перпендикулярно плоскости контура с током (по правилу «правого винта»), а значение определяется формулой:

$$p_m = IS, \quad [A \cdot m^2]$$

где I – сила тока, протекающего через контур;
 S – площадь контура.



Характеристики магнитного поля

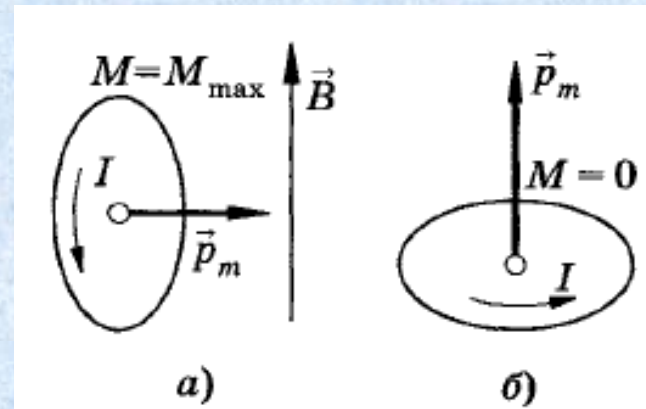
Силовая характеристика магнитного поля – **вектор магнитной индукции \vec{B}**

Магнитная индукция B равна отношению **максимального вращающего момента**, действующего на рамку с током в магнитном поле, к **магнитному моменту этой рамки**:

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

Единицы измерения в системе СИ – Тесла [Тл]

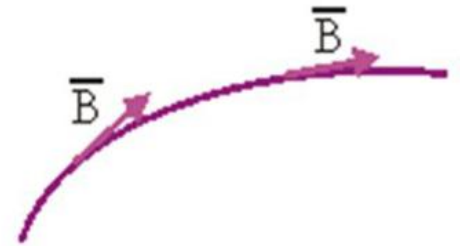
Вектор магнитной индукции \vec{B} совпадает по направлению с вектором магнитного момента \vec{p}_m в положении устойчивого равновесия контура.



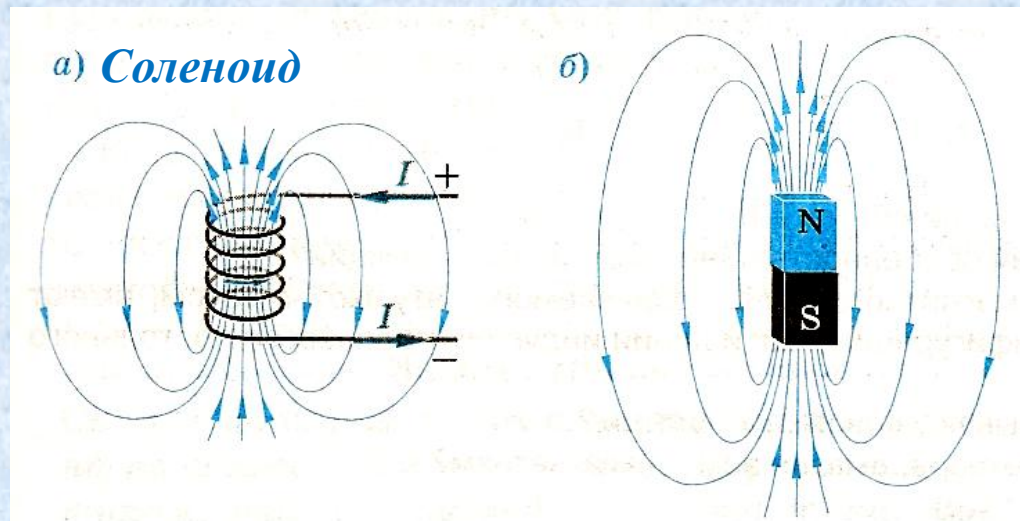
Магнитные силовые линии

Магнитное поле графически изображается с помощью магнитных силовых линий.

Касательные к силовым линиям показывают направление вектора магнитной индукции \vec{B} в соответствующих точках, а густота линий пропорциональна величине B .



Линии магнитной индукции не имеют начала или конца и являются замкнутыми.



Магнитные силовые линии - примеры



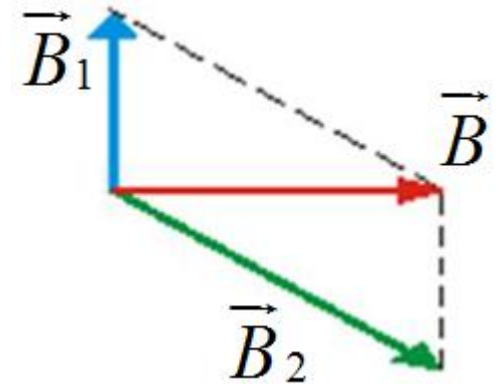
Принцип суперпозиции магнитного полей

Вектор магнитной индукции \vec{B} — аналог вектора напряженности электростатического поля \vec{E} . Эти величины определяют силовые действия этих полей и зависят от свойств среды.

Принцип суперпозиции:

Магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, **равна векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых каждым током или движущимся зарядом.**

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n$$



Закон Био-Савара-Лапласа

Элемент проводника длиной $d\vec{l}$ с током I создает в некоторой точке пространства индукцию поля:

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

где \vec{r} — радиус-вектор, проведенный из элемента $d\vec{l}$ проводника в точку А;

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

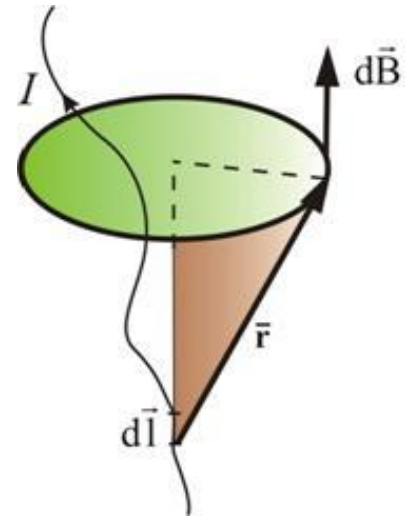
μ - относительная магнитная проницаемость среды.

Направление $d\vec{B}$ перпендикулярно $d\vec{l}$ и \vec{r} , и определяется по правилу правой руки.

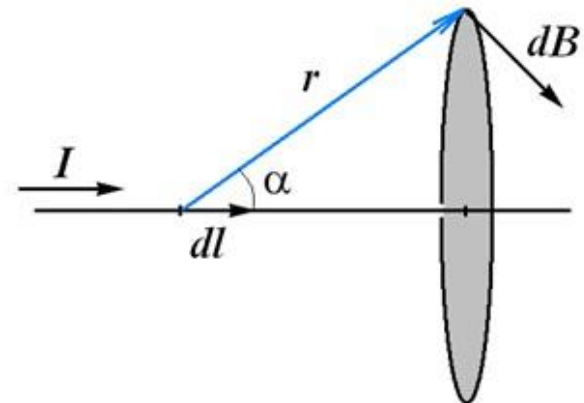
Модуль вектора $d\vec{B}$:

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

где α — угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} .



Направление $d\vec{l}$ совпадает с направлением тока



Пример

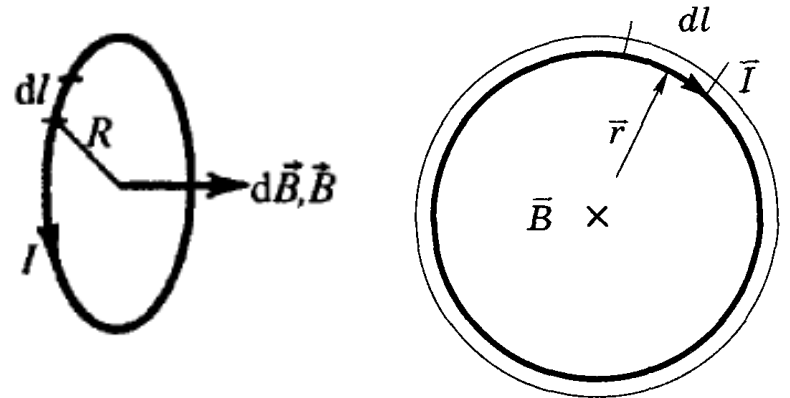
Магнитное поле в центре кругового тока

Из закона Био-Савара-Лапласа:
$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{r^2}$$

Так как для всех точек r одинаково ($r = R$), а $\sin \alpha = 1$ в центре витка ($\alpha = 90^\circ$), то

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl}{R^2}$$

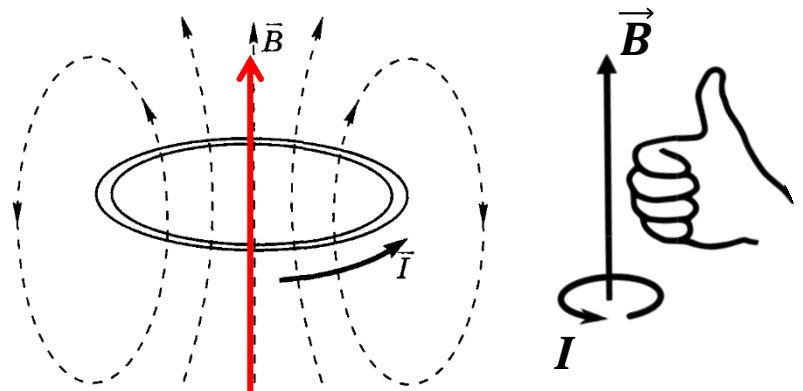
$$B = \int dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot l}{R^2}$$



Учитывая, что длина проводника l — это длина окружности, получаем:

$$l = 2\pi R \Rightarrow B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot 2\pi R}{R^2} \Rightarrow$$

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



Закон Ампера

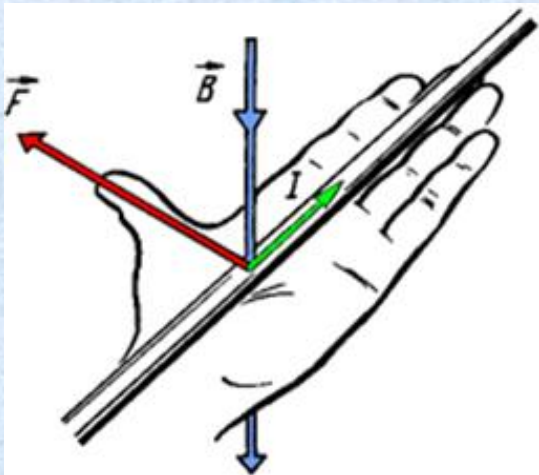
Закон Ампера: сила \vec{F} , с которой магнитное поле действует на элемент прямого проводника длины l с током I , находящегося в магнитном поле с индукцией \vec{B} , равна:

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

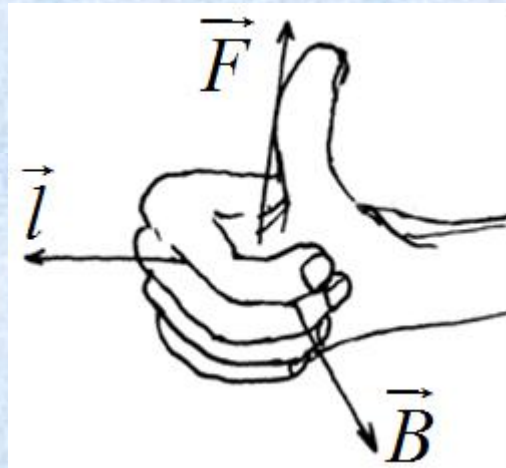
$$|\vec{F}| = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha$$

α - угол между \vec{l} и \vec{B}

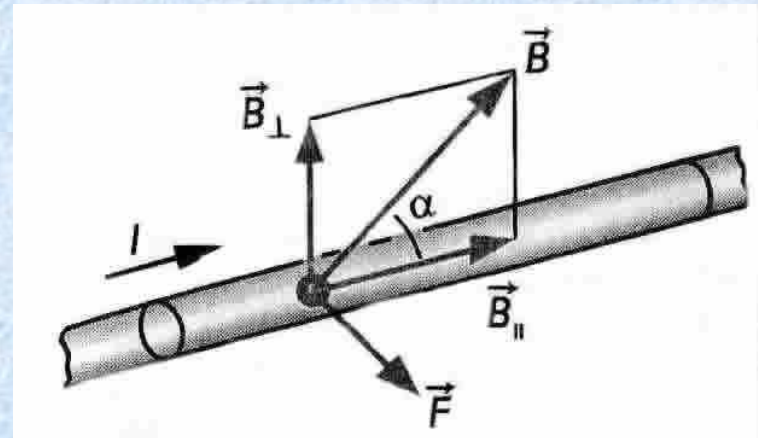
Направление \vec{l} совпадает с направлением тока I .



Левая рука!



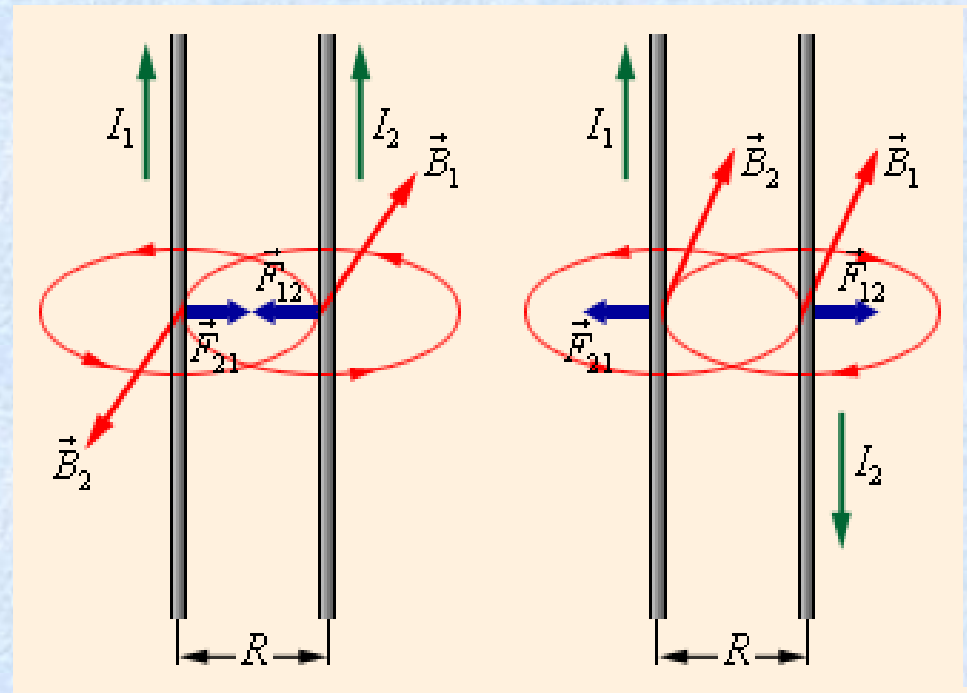
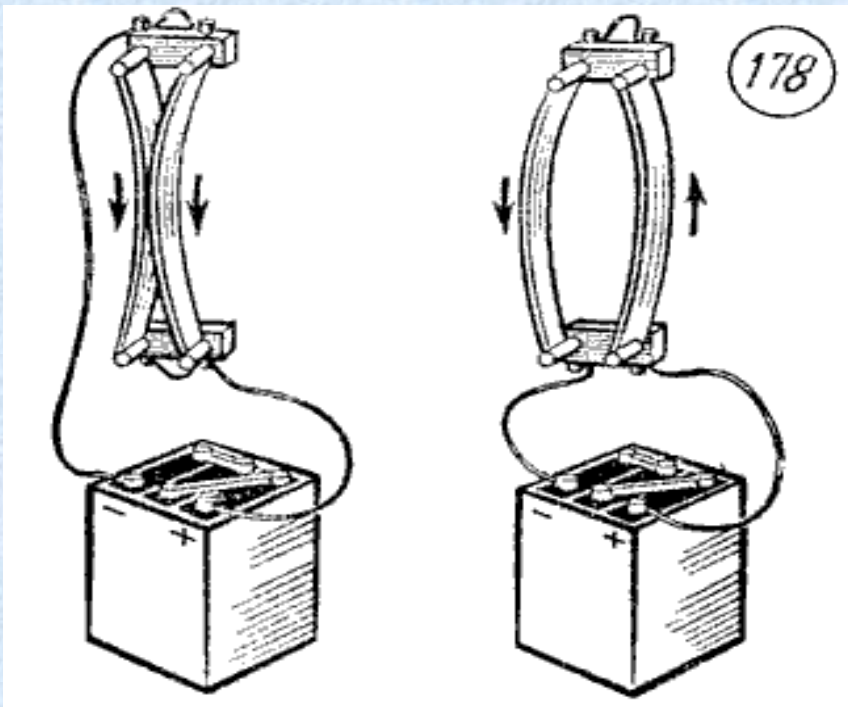
Правая рука!



Взаимодействие параллельных токов

Закон Ампера применяется для определения силы взаимодействия двух токов.

Два параллельных проводника с токами I_1 и I_2 находятся на расстоянии R друг от друга. Направление сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , с которыми поля \vec{B}_1 и \vec{B}_2 действуют на проводники с токами I_2 и I_1 , определяются законом Ампера.



Взаимодействие параллельных токов

По формуле для магнитного поля бесконечного прямого провода:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I}{R}$$

Тогда проводник с током I_1 создает в месте расположения проводника с током I_2 магнитное поле с индукцией:

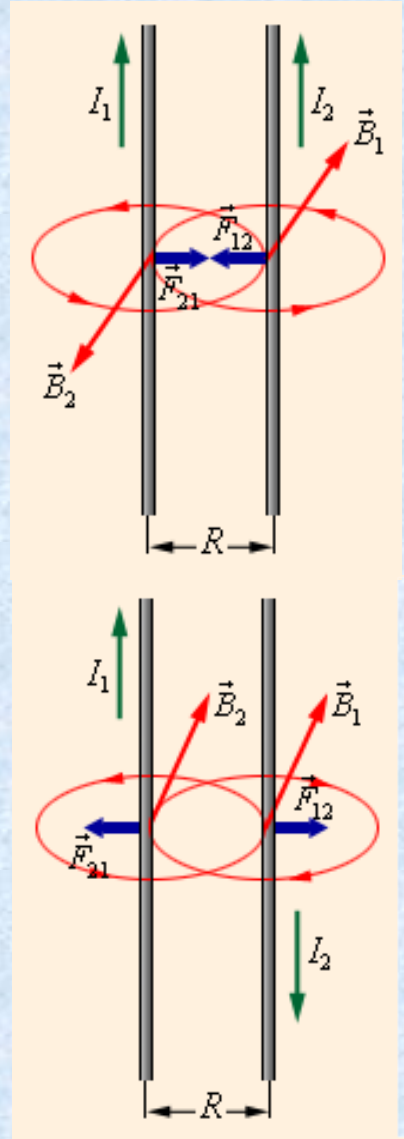
$$B_1 = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \cdot \frac{2I_1}{R}$$

По закону Ампера на проводник с током I_2 будет действовать сила со стороны проводника с током I_1 :

$$F_1 = I_2 \cdot l \cdot B_1 \quad \Rightarrow \quad F_1 = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{R} \cdot l$$

Аналогично для второго проводника:

$$F_2 = I_1 \cdot l \cdot B_2 = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{R} \cdot l = F_1$$



Проводники с токами *одинакового* направления *притягиваются*, с токами *разного* направления — *отталкиваются*.

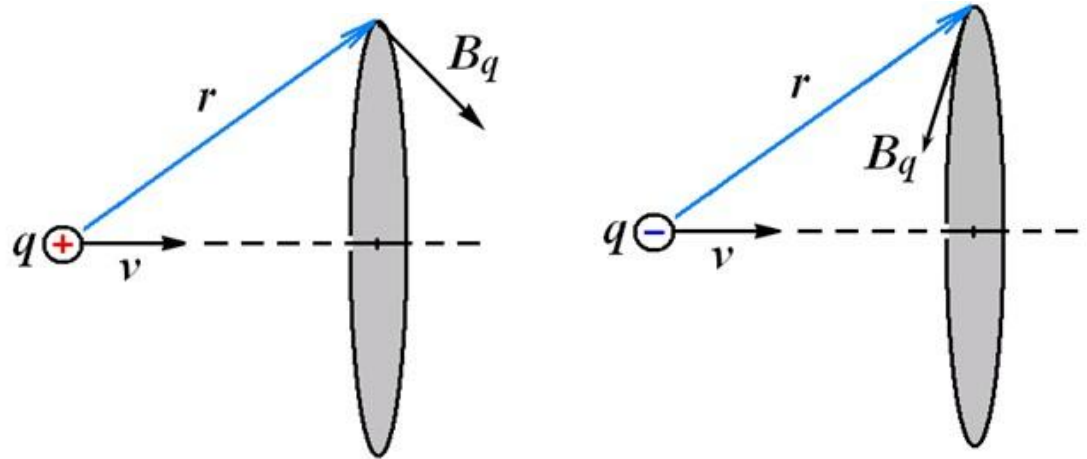
Магнитное поле свободно движущегося заряда

Проводник с током создает вокруг себя магнитное поле. Электрический ток — это упорядоченное движение электрических зарядов. **Магнитное поле \vec{B} точечного заряда q , свободно движущегося с постоянной нерелятивистской скоростью v ($v \ll c$):**

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{q[\vec{v}, \vec{r}]}{r^3}, \quad B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{qv}{r^2} \sin \alpha$$

где \vec{r} — радиус-вектор, проведенный из заряда q к точке наблюдения,

α — угол между \vec{r} и \vec{v} .



Поле, создаваемое отрицательным зарядом, имеет противоположное направление.

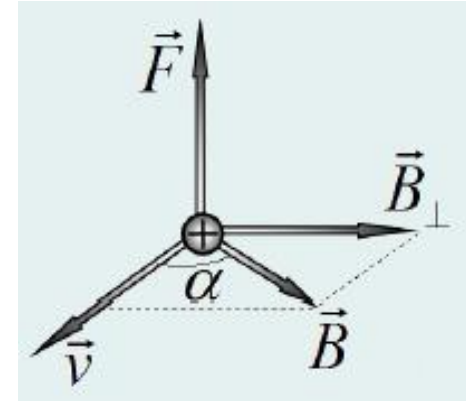
Сила Лоренца

Так же как и на проводник с током, магнитное поле действует и на отдельный заряд, движущийся в магнитном поле.

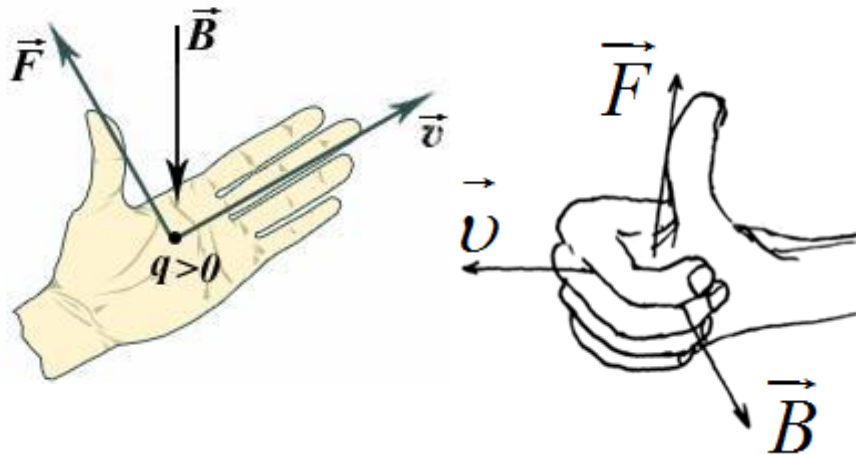
Сила, действующая на электрический заряд q , движущийся в магнитном поле \vec{B} со скоростью \vec{v} , называется **силой Лоренца**:

$$\vec{F} = q [\vec{v}, \vec{B}] \quad F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

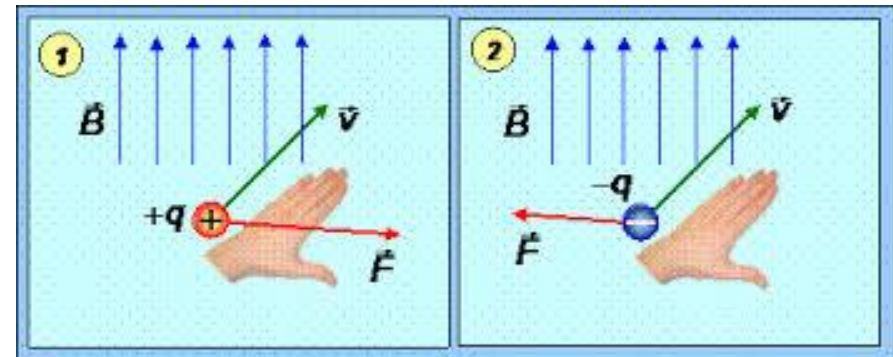
где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .



Для положительного заряда:



Для зарядов обоих знаков:



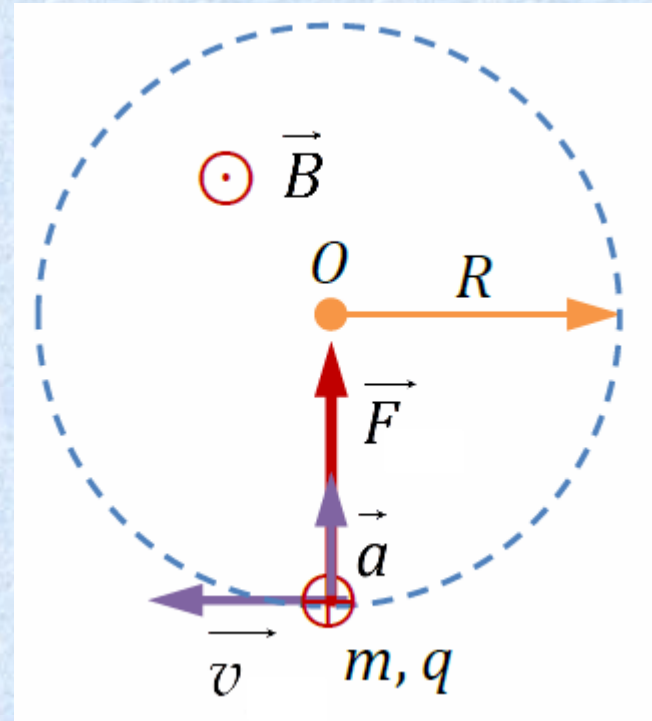
Движение заряженных частиц в однородном магнитном поле

Пусть в однородное магнитное поле *перпендикулярно вектору индукции* \vec{B} влетает со скоростью v положительно заряженная частица. На нее действует сила Лоренца $\vec{F}_л$, которая вызовет центростремительное ускорение $\vec{a}_ц$, и, по второму закону Ньютона:

$$ma_{ц} = F_{л} \quad \Rightarrow \quad \frac{mv^2}{R} = qvB$$

где q и m — заряд и масса частицы, R — радиус траектории, по которой она будет двигаться.

$$R = \frac{mv}{qB}$$



Период вращения:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{(q/m)B}$$

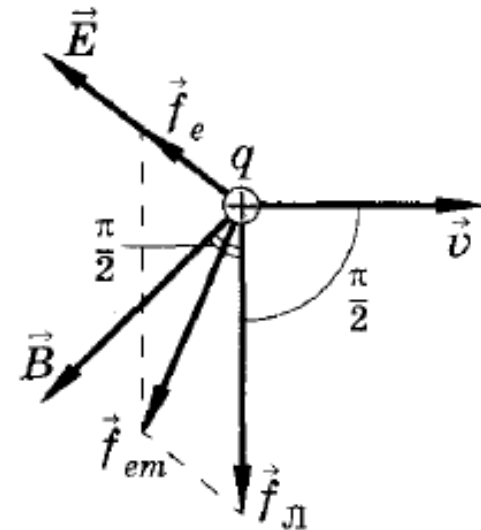
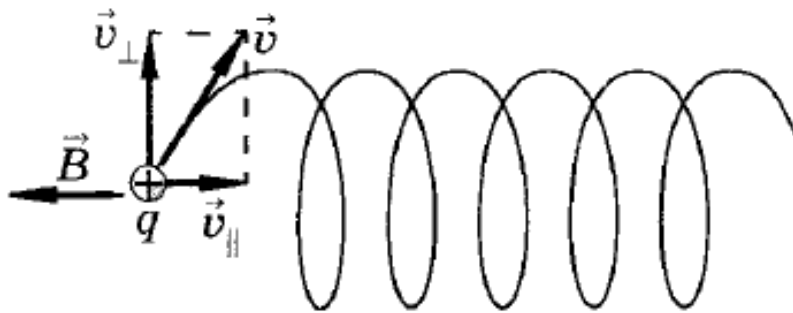
**Радиус траектории остается постоянным, а сама траектория
есть окружность.**

Движение заряженных частиц в магнитном и электрическом полях

Если действуют электрическое поле с напряженностью \vec{E} и магнитное поле с магнитной индукцией \vec{B} , то результирующая сила равна

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{магн}} + \vec{F}_{\text{эл}} = q \left[\vec{v}, \vec{B} \right] + q \vec{E}$$

Траекторией движения в магнитном поле при произвольном направлении скорости частицы или в электромагнитном поле будет **винтовая линия**.



Магнитные свойства вещества

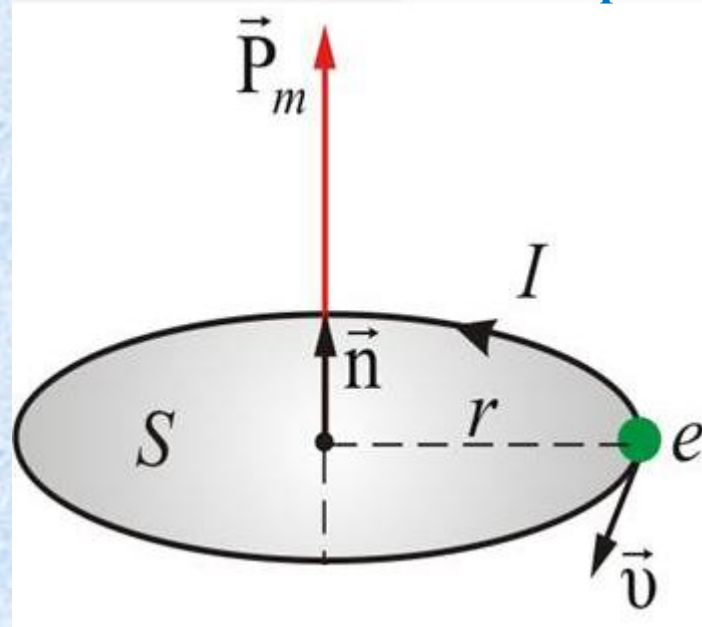
Находясь в магнитном поле, вещества сами становятся источниками такого поля. В этом смысле **все вещества являются магнетиками**.

Так как макроскопические различия магнетиков обусловлены их строением, то целесообразно рассмотреть магнитные характеристики электронов, ядер, атомов и молекул, а также поведение этих частиц в магнитном поле.

Будем считать, что электрон в атоме равномерно вращается вокруг ядра со скоростью \vec{v} по круговой орбите радиусом r .

Такое движение аналогично круговому току и характеризуется магнитным моментом \vec{p}_m .

Магнитный момент электрона



Магнитные свойства вещества

Сила тока I , соответствующего движению электрона, который движется со скоростью v , по окружности радиуса r равна:

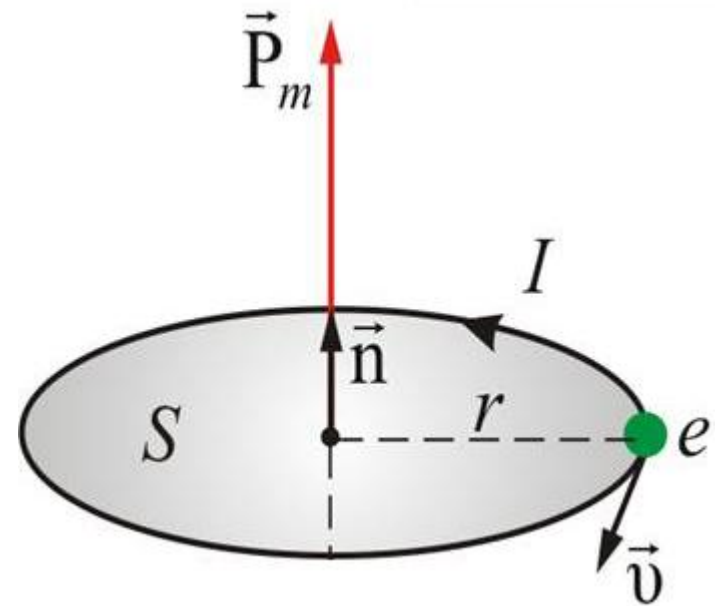
$$I = \frac{q}{t} = \frac{e \cdot v}{2\pi r}$$

где e — заряд электрона.

Отсюда **орбитальный магнитный момент электрона:**

$$p_m = IS = \frac{ev}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{evr}{2}$$

Ядра, атомы и молекулы также имеют магнитный момент.



Магнитные свойства вещества

Магнитное поле воздействует на ориентацию частиц вещества, имеющих магнитные моменты, в результате чего вещество **намагничивается** (*приобретает макроскопический магнитный момент*).

Степень намагничивания вещества характеризуется **намагниченностью** \vec{J} .

Среднее значение вектора намагниченности \vec{J} равно отношению суммарного магнитного момента $\sum \vec{p}_m$ всех частиц, расположенных в объеме магнетика, к его объему V :

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_m}{V}$$

Намагниченность является средним магнитным моментом единицы объема магнетика.

Единицей намагниченности служит ампер на метр (А/м).

Магнетики



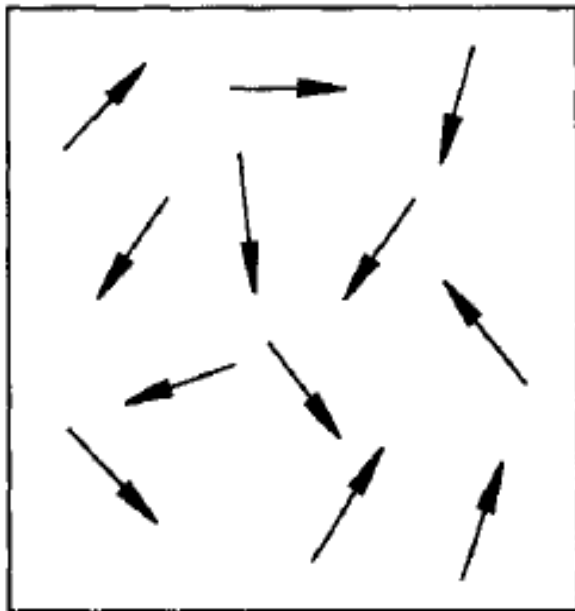
Парамагнетики

Молекулы парамагнетиков имеют отличные от нуля магнитные моменты.

$$\vec{p}_m \neq 0$$

В отсутствие магнитного поля магнитные моменты расположены хаотически и **намагниченность равна нулю**:

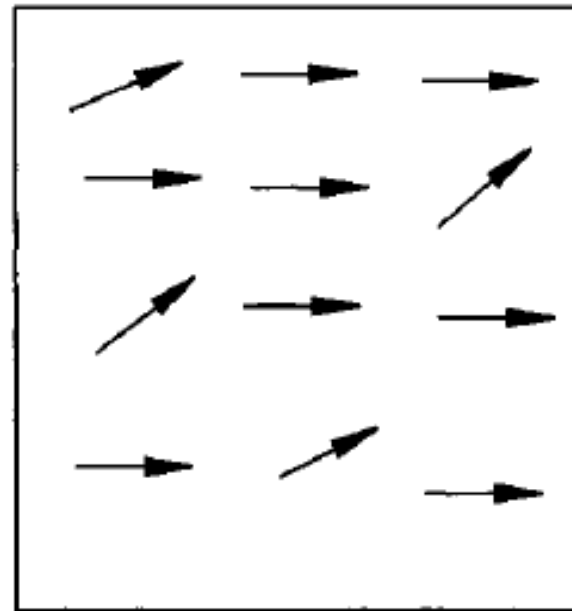
$$B = 0, \\ J = 0$$



а)

В магнитном поле магнитные моменты ориентируются предпочтительно по полю и **намагниченность не равна нулю**:

$$\vec{B} \quad \vec{J} \neq 0$$
Two horizontal arrows pointing to the right. The top arrow is labeled with a vector B with a bar over it, and the bottom arrow is labeled with a vector J with a bar over it.

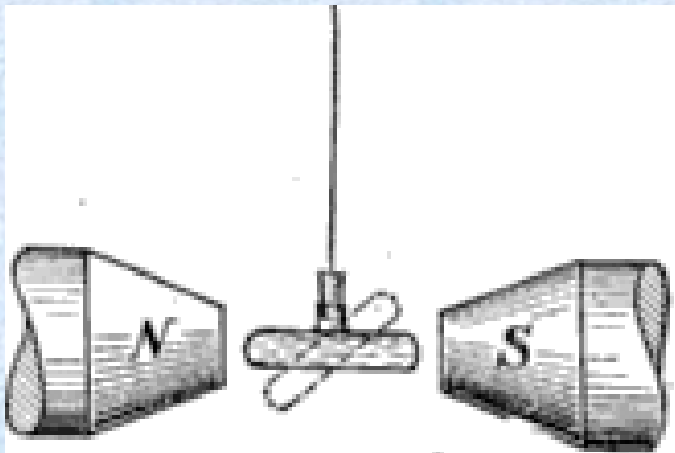


б)

Парамагнетики

Если стержень из парамагнетика подвесить в вакууме в однородном магнитном поле, то в положении равновесия он установится вдоль линий магнитной индукции (рис. вид сверху), что соответствует ориентации \mathbf{J} по направлению \mathbf{B} .

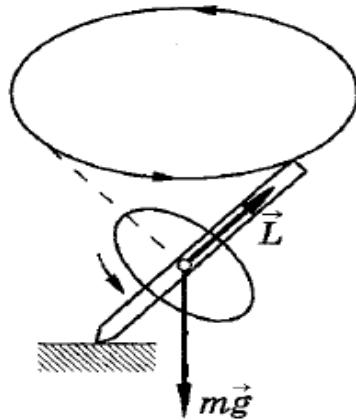
Магнитное поле, созданное парамагнетиком, усиливает, хотя и незначительно, **внешнее магнитное поле**, поэтому индукция \mathbf{B} результирующего поля больше магнитной индукции \mathbf{B}_0 поля вне парамагнетика ($\mathbf{B} > \mathbf{B}_0$).



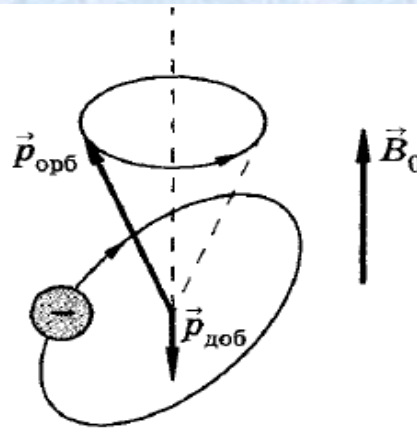
Магнитная
проницаемость:

$$\mu = \frac{B}{B_0} \geq 1$$

Диамagnetики



Прецессия волчка



Прецессия электронной орбиты

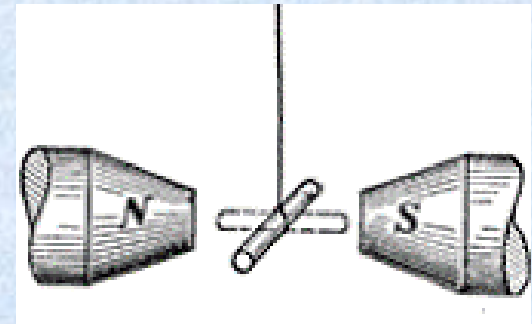
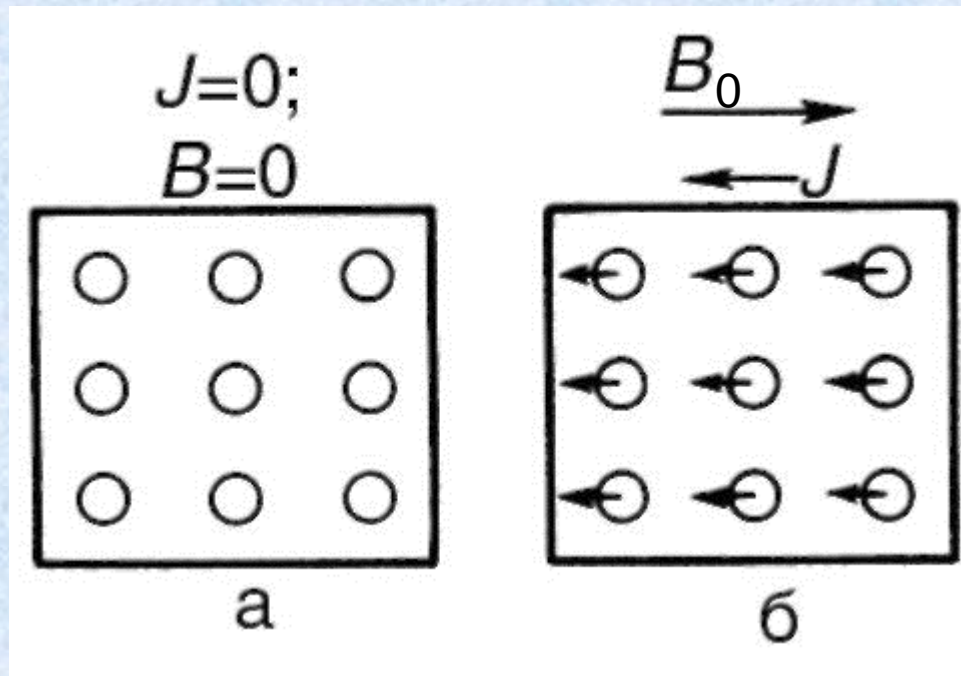
Электрон, вращающийся по орбите, характеризуется орбитальным магнитным моментом $\vec{p}_{\text{орб}}$.

Поэтому на него, как на контур с током, со стороны магнитного поля действует момент силы. Таким образом, создаются условия для возникновения **прецессии электронной орбиты**.

Это приводит к появлению **добавочного магнитного момента электрона** $\vec{p}_{\text{доб}}$, направленного противоположно индукции \vec{B}_0 внешнего магнитного поля, что **ослабляет поле**. Так возникает **диамagnetизм**.

Диамagnetизм присущ всем веществам, но парамагнетиках диамagnetизм перекрывается более сильным парамагнетизмом. Если магнитный момент молекул равен нулю, то диамagnetизм преобладает над парамагнетизмом; вещества, состоящие из таких молекул, относят к **диамagnetикам**.

Диамагнетики



Магнитная
проницаемость:

$$\mu = \frac{B}{B_0} < 1$$

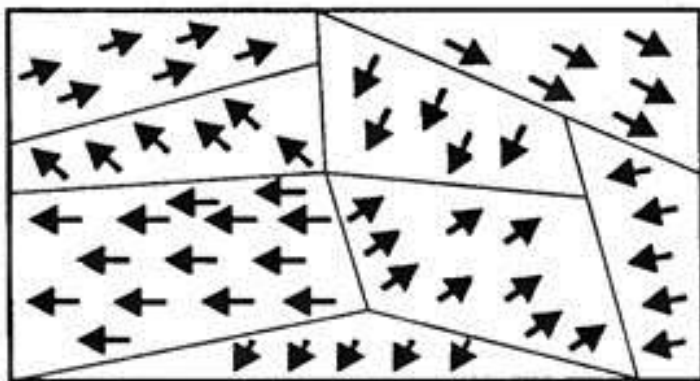
Магнитное поле, созданное диамагнетиком, ослабляет внешнее магнитное поле, поэтому индукция B результирующего поля меньше магнитной индукции B_0 поля вне парамагнетика ($B < B_0$).

Ферромагнетики

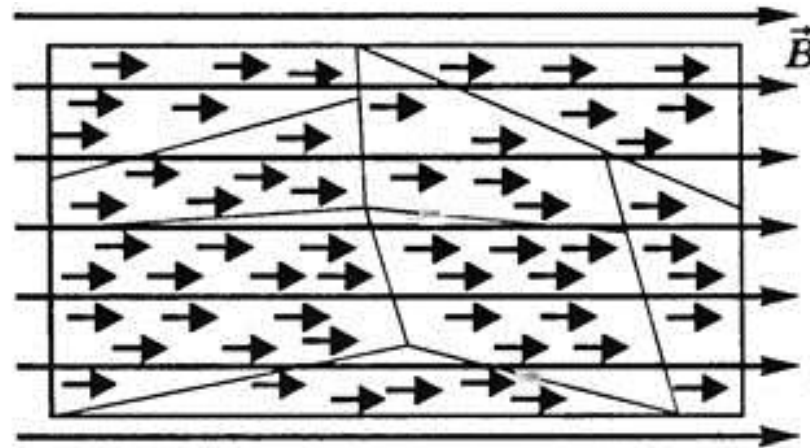
Ферромагнетики, подобно парамагнетикам, создают **намагниченность**, направленную **по индукции поля**; их магнитная проницаемость много больше единицы ($\mu \gg 1$, $B \gg B_0$). Ферромагнетики имеют доменную структуру.

Ферромагнитные свойства присущи не отдельным атомам или молекулам, а лишь некоторым веществам, находящимся в кристаллическом состоянии. Намагниченность ферромагнетиков зависит не только от магнитной индукции внешнего магнитного поля, но и от их предыдущего состояния.

Ферромагнитные свойства вещества сохраняются лишь ниже определенной **температуры**, называемой **точкой Кюри**.

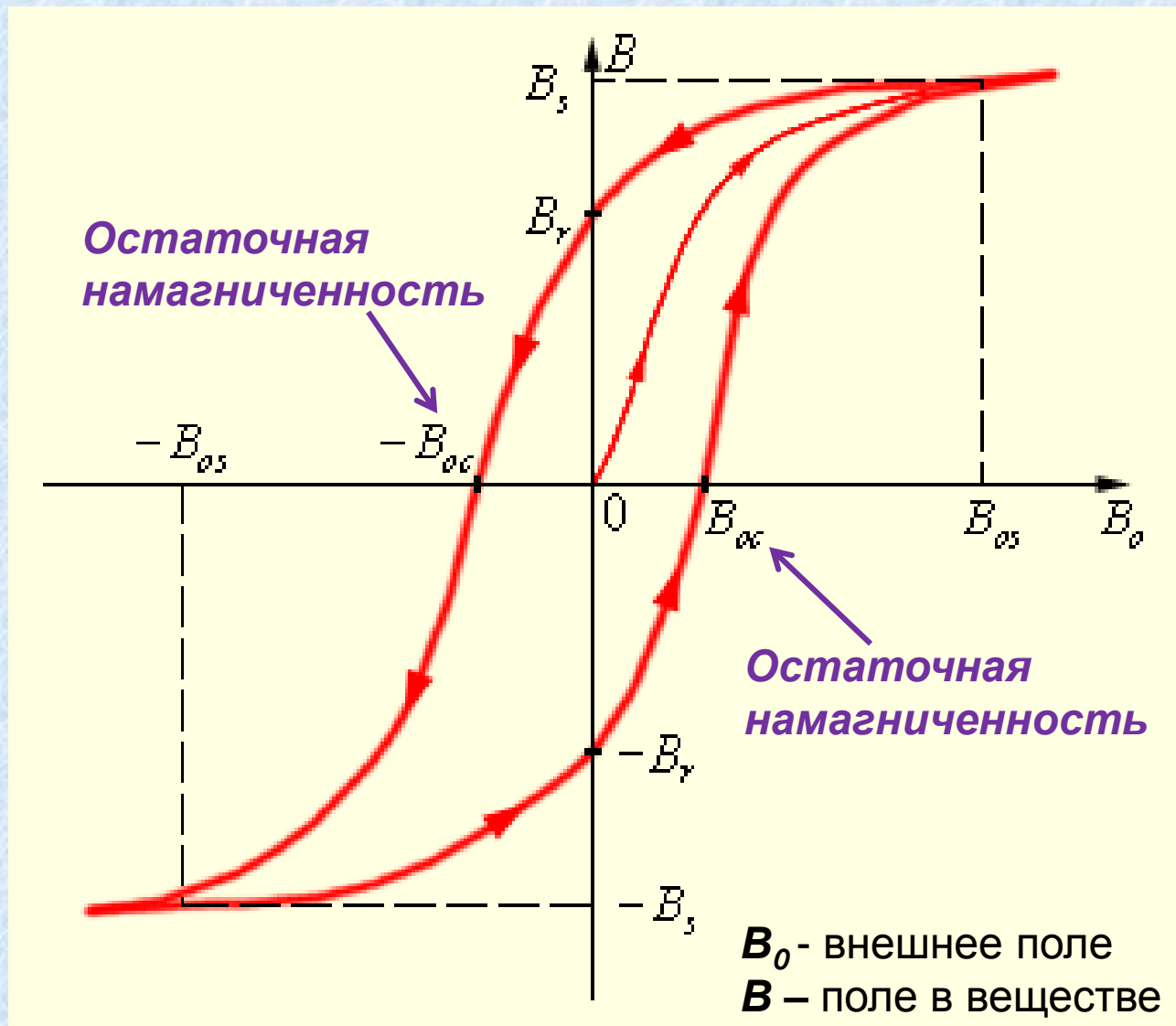


$B_0 = 0$



$B_0 \neq 0$

Ферромагнетики. Кривая намагничивания (Гистерезис)



Ферромагнетики. Применение в медицине

Применения в медицине:

- **исправление грудной клетки у детей (Ю. Ф. Исаков, Э. А. Степанов и др.),**
- **магнитные заглушки для предотвращения выделений из искусственного наружного свища ободочной кишки (В. Д. Федоров и др.),**
- **удаление ферромагнитных пылинок и опилок из глаза.**

Магнитные свойства биотканей

Ткани организма в значительной степени диамагнитны. Однако в организме имеются и парамагнитные вещества (например, свободные радикалы).

На действие магнитного поля реагируют все клеточные органеллы, особенно митохондрии. К магнитному влиянию чувствительны нервная ткань, сердечно-сосудистая система, система крови и др.

Магнетизм биологических объектов, т. е. их магнитные свойства и магнитные поля, создаваемые ими, получили название **биомагнетизма.**

Объект	Мозг	Мышца	Сердце	Земля	Терапевтические устройства
Индукция магнитного поля, мТл	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	$5 \cdot 10^{-2}$	1–100

Магнитодиагностика

В основе магнитодиагностики лежит регистрация собственных магнитных полей биотканей, возникающих в результате протекающих в них физиологических процессов.

Регистрация временной зависимости индукции магнитного поля сердца (биотоков сердца) – **магнитокардиография** (диагностический метод).

Магнитокардиография в отличие от электрокардиографии **является бесконтактным методом.**



Магнитное поле оказывает воздействие на биологические системы, которые в нем находятся. Это воздействие изучает раздел биофизики, называемый **магнитобиологией.**

В настоящее время физическая природа воздействия магнитного поля на биологические объекты еще не установлена!!!

Электромагнитная индукция

Явление электромагнитной индукции:

В замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток, получивший название **индукционного**.

Открытие явления электромагнитной индукции:

- 1) показало **взаимосвязь** между **электрическим** и **магнитным** полем;
- 2) предложило способ получения электрического тока с помощью магнитного поля.

Магнитный поток

Для *однородного* магнитного поля **магнитный поток Φ** равен:

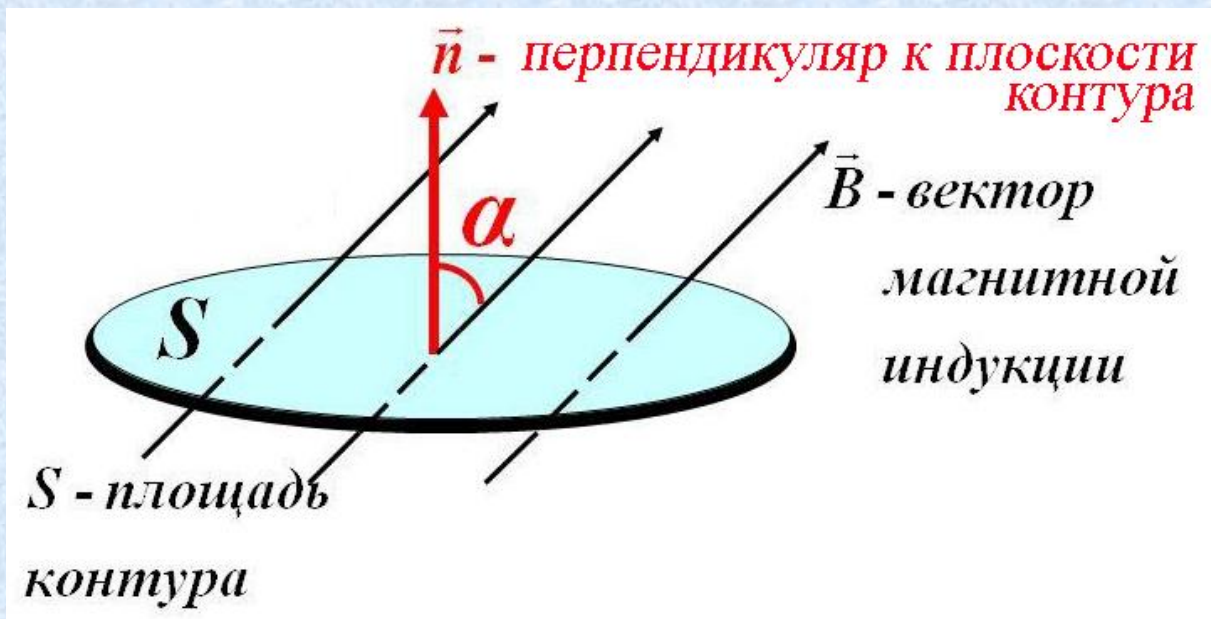
$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

где B – индукция магнитного поля;

S – площадь плоской поверхности;

α – угол между вектором магнитной индукции \vec{B} и перпендикуляром к поверхности.

Единицы измерения магнитного потока – Вебер [Вб].



Закон Фарадея

Возникновение индукционного тока указывает на наличие в цепи электродвижущей силы (ЭДС). Эта ЭДС называется **электродвижущей силой электромагнитной индукции**

Закон Фарадея:

ЭДС электромагнитной индукции в контуре ε_i численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока (производной от потока по времени) сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

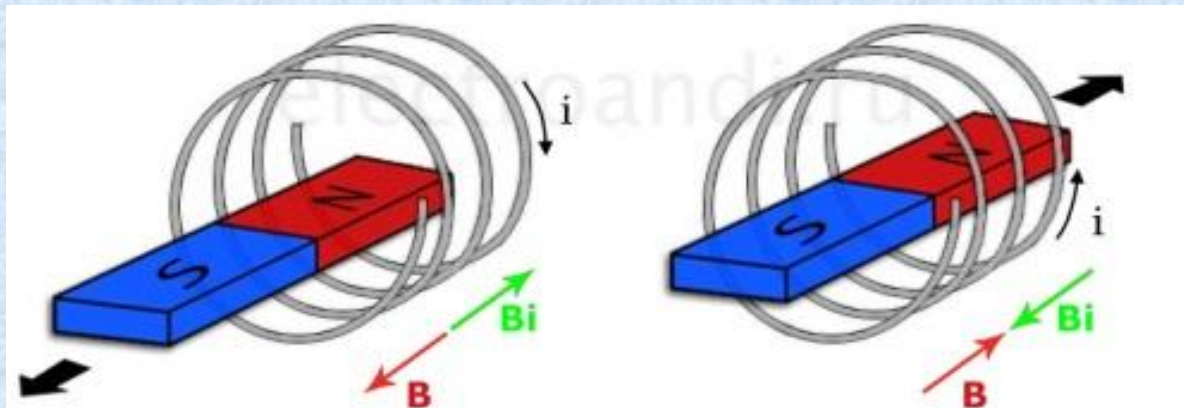
ЭДС электромагнитной индукции выражается в вольтах [В].

Правило Ленца

Направление индукционного тока определяется по **правилу Ленца**

Правило Ленца:

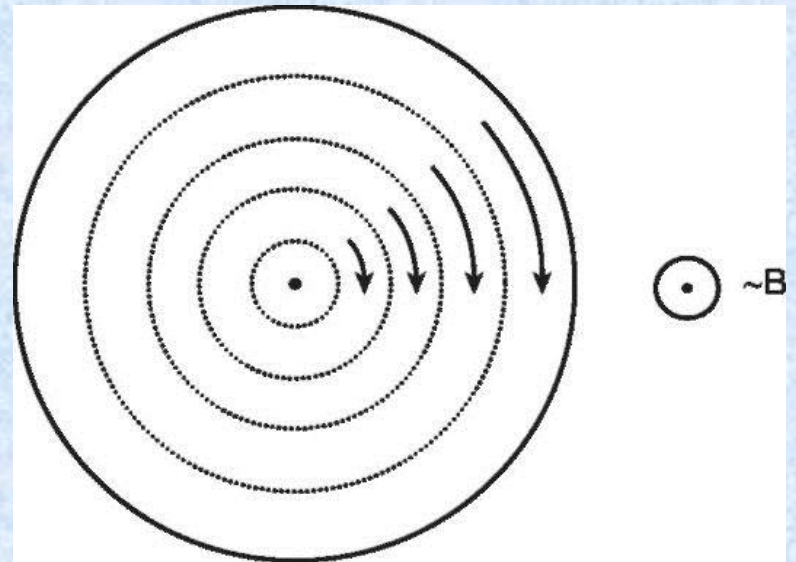
При всяком изменении магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на замкнутый проводящий контур, в последнем возникает **индукционный ток** такого направления, что его магнитное поле **противодействует изменению магнитного потока.**



Токи Фуко

Индукционный ток возникает не только в линейных проводниках, но и в массивных сплошных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле. Эти токи замкнуты в толще проводника и называются **вихревыми** или **токами Фуко**, протекание которых сопровождается **выделением теплоты**.

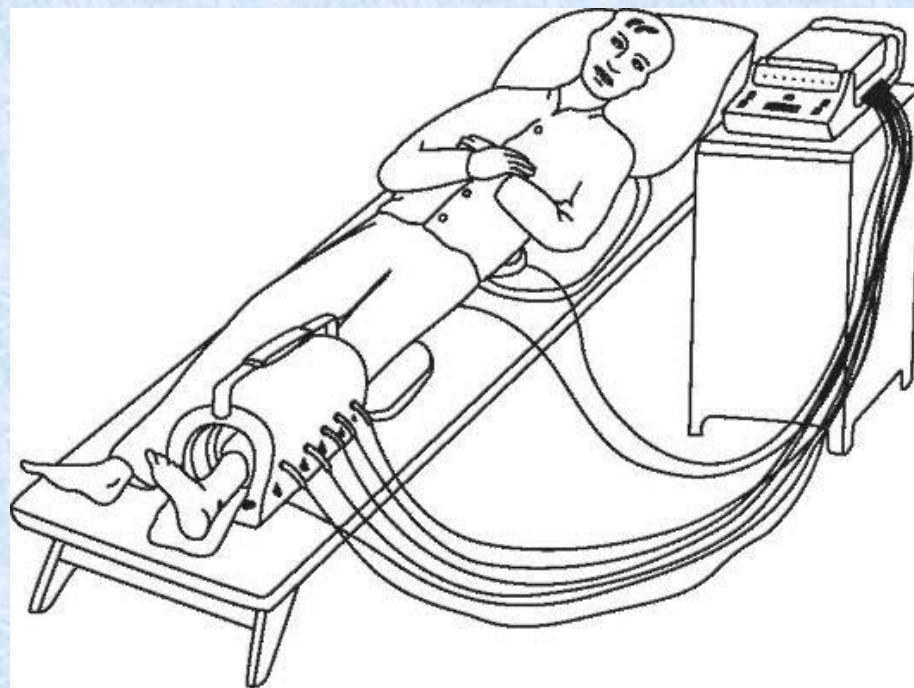
Пример: Проводящий диск можно рассматривать как «набор» вложенных друг в друга замкнутых контуров. При изменении магнитного поля меняется и магнитный поток. Поэтому в каждом контуре индуцируется ток, изображенный стрелкой. Совокупность всех таких токов называют **токами Фуко**.



Токи Фуко. Применение в медицине

Импульсная магнитотерапия - лечебное применение импульсного магнитного поля при невысокой частоте следования импульсов (0,125-1000 имп/с).

Здесь используются **нетепловые эффекты**. Токи Фуко значительной плотности способны вызвать возбуждение волокон периферических нервов и ритмические сокращения миофибрилл скелетной мускулатуры, гладких мышц сосудов и внутренних органов. **Вихревые токи низкой частоты** способны блокировать афферентную импульсацию из болевого очага (**купирование болевого синдрома**).



Расположение индуктора при низкочастотной магнитотерапии нижней конечности

Токи Фуко. Применение в медицине

Высокочастотная магнитотерапия - лечебное применение магнитной составляющей гармонического электромагнитного поля высокой частоты (от 10 МГц) (устаревшее название этого метода - **индуктотермия**).

В результате явления электромагнитной индукции в проводящих тканях образуются **вихревые токи Фуко**, нагревающие объект.

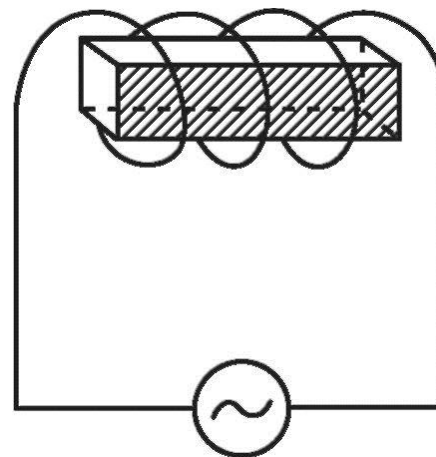
Количество теплоты Q , выделяющейся за единицу времени в единице объема проводника, определяется формулой:

$$Q = \frac{kv^2 B^2}{\rho}$$

k - коэффициент
 v - частота ЭМ поля
 B - индукция магн. поля
 ρ - удельное сопротивление ткани

Основное тепловое воздействие оказывается на ткани с малым удельным сопротивлением. Поэтому сильнее нагреваются ткани, богатые сосудами, например мышцы. В меньшей степени нагреваются такие ткани, как жир.

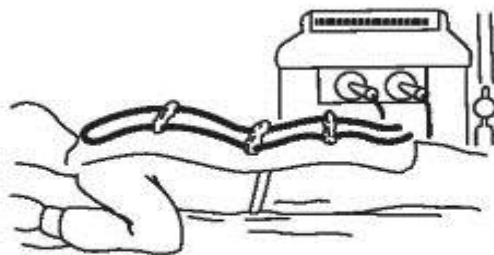
Для формирования переменного магнитного поля используют **индукторы-соленоиды**:



Токи Фуко. Применение в медицине

Высокочастотная магнитотерапия - лечебное применение магнитной составляющей гармонического электромагнитного поля высокой частоты.

Для проведения физиотерапевтических процедур используют переменные магнитные поля с частотой 10-15 МГц. При этом используют **кабельные индукторы различной формы** : а - плоская продольная петля (чаще на спине); б - плоская круглая спираль (на туловище); в - цилиндрическая спираль (на конечностях).



а
плоская продольная петля



б
плоская круглая спираль



в
Цилиндрическая спираль