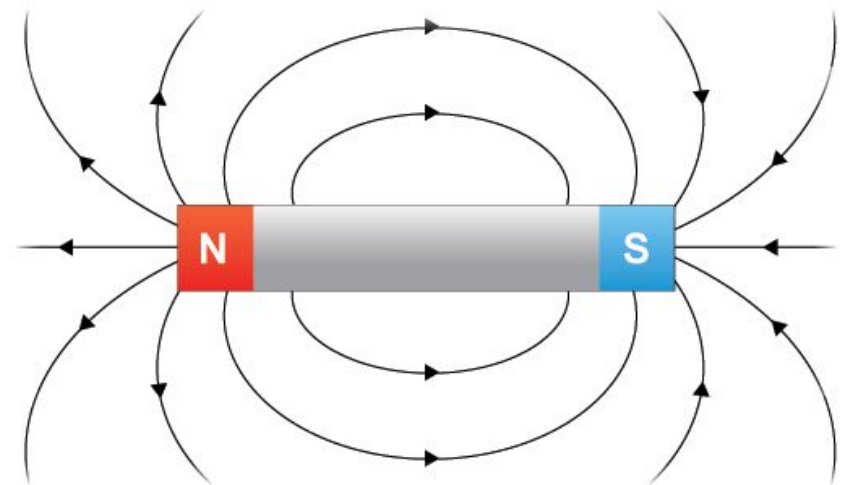
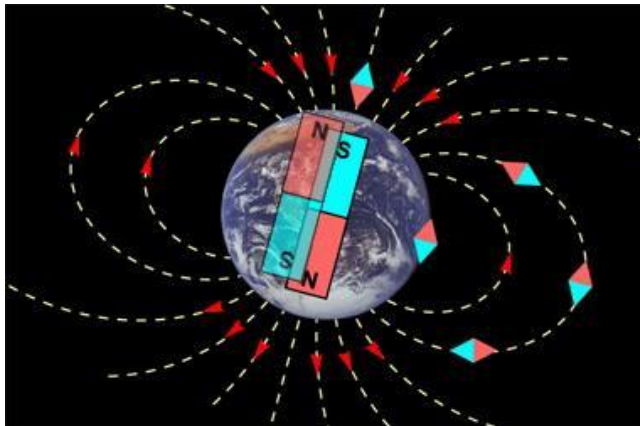


ЛЕКЦИЯ № 9 Магнитное поле и его характеристики

Элементы содержания: Опыт Эрстеда. Механическое взаимодействие токов. Магнитное поле. Магнитная индукция. Линии магнитной индукции. Сила Ампера и сила Лоренца. Вращающий момент, действующий на рамку (виток) с током. Магнитная индукция поля, созданного прямым бесконечно длинным проводником с током, круговым витком с током и соленоидом. Макро- и микротоки. Напряженность магнитного поля и магнитная индукция. Магнитная проницаемость вещества. Пара-, диа- и ферромагнетики. Основные уравнения магнитостатики.

Литература: Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2006. С. 202-220, 234-245.



История важнейших открытий (к началу XIX в.)

VI в. до н.э. – Первые сведения об электричестве и магнетизме. Открытие свойств натертого **янтаря** притягивать легкие предметы, а **магнита** - железные опилки (Фалес Милетский).

XI в. – Переоткрытие арабами свойств ориентации свойств ориентации магнитной иглы (стрелки), **появление компаса** (свойство магнитной иглы ориентироваться в определенном направлении было известно китайцам еще в 2700 г.г. до н.э.). В Европе компас появился в XII в.

1269 г. – Появился первый рукописный трактат по магнетизму (Пьер Пелегрино), где дано **описание свойств магнитного камня**, методов определения полярности магнита, взаимодействия полюсов, намагничивание прикосновением.

1600 г. – Вышел в свет трактат Уильяма Гильберта «О магните, магнитных телах и о большом магните Земли», в котором заложены основы электро- и магнитостатики.

История важнейших открытий (к началу XIX в.)

1750 г. – Бенджамин Франклин, изобрел молниеотвод, сформулировал унитарную теорию электричества, ввел понятия положительного и отрицательного зарядов, установил закон сохранения электрического заряда.

1785 г. – Шарль Кулон установил основной закон электростатики: закон взаимодействия электрических зарядов.

1786 г. – Луиджи Гальвани, исследуя движение мышц лягушки, открыл явление электрического тока.

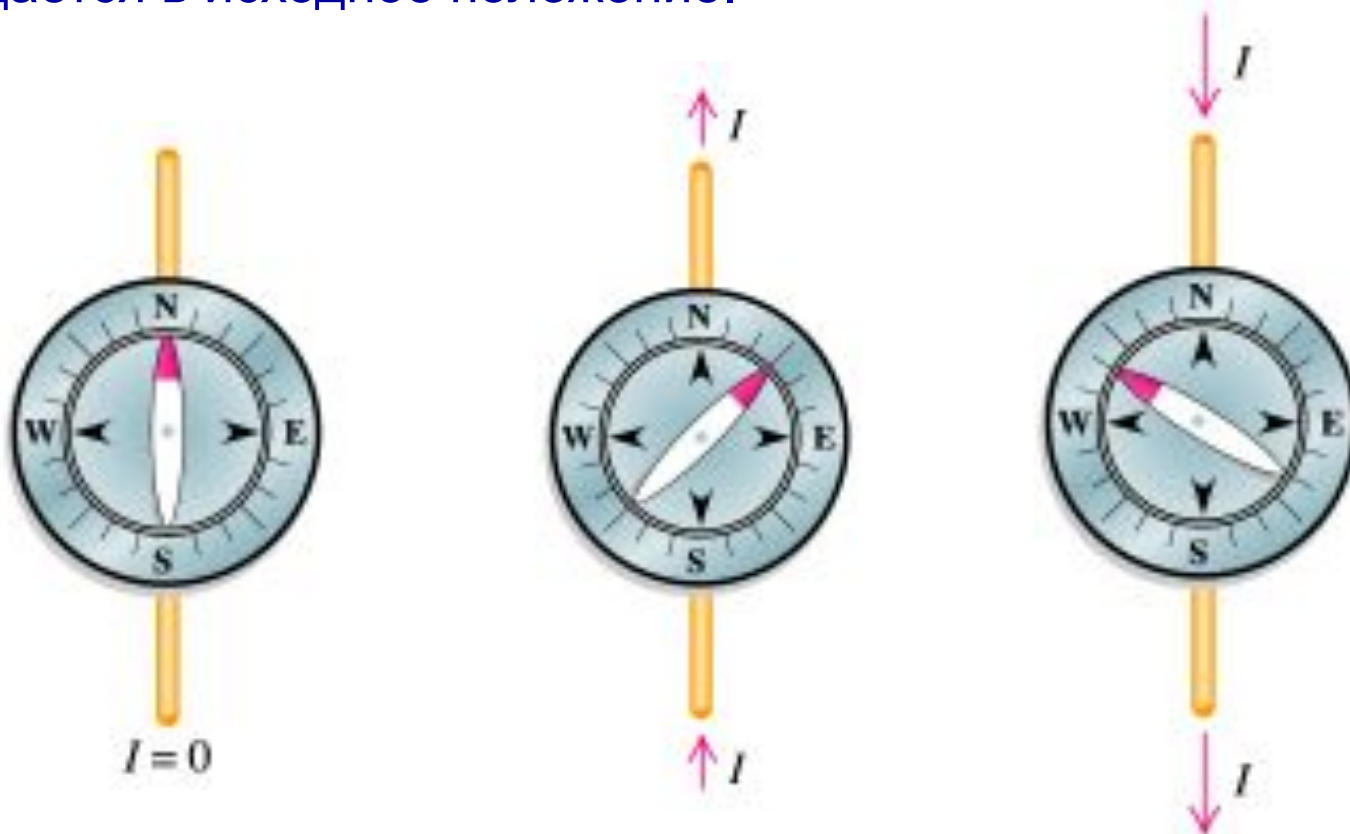
1799 г. – Алессандро Вольта сконструировал первый источник постоянного электрического тока – прототип гальванического элемента.

1800 г. – Антуан Фуркруа открыл тепловое действие тока.

В 1774 г. Американская академия наук предложила вознаграждение тому, кто сможет установить **взаимосвязь между электричеством и магнетизмом.**

Магнитное поле, создаваемое электрическим током

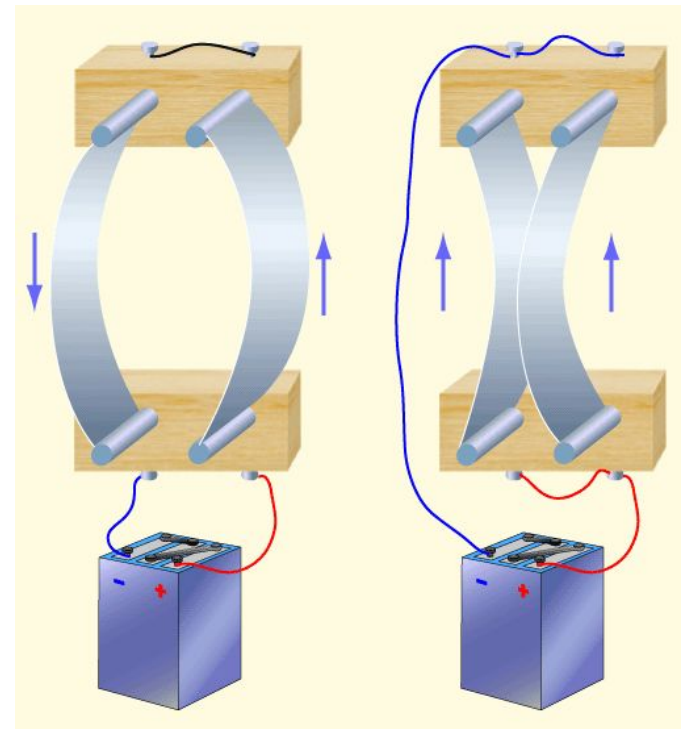
Опыт Эрстеда (Г.Х.Эрстед, 1820 г.): Магнитная стрелка, расположенная вблизи проводника, при пропускании тока поворачивается на некоторый угол. При размыкании цепи стрелка возвращается в исходное положение.



Механическое взаимодействие токов (А.М.Ампер, 1820 г.): проводники, по которым текут токи, притягиваются друг к другу, если токи направлены в одну сторону, и отталкиваются, - если токи текут в противоположные стороны:

$$F = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1I_2}{R} l, \quad (9.1)$$

где μ - магнитная проницаемость среды, в которой находятся проводники; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ - магнитная постоянная; I_1 и I_2 - силы токов, текущих по первому и второму проводнику соответственно; l - длина каждого из проводников; R - расстояние между проводниками.

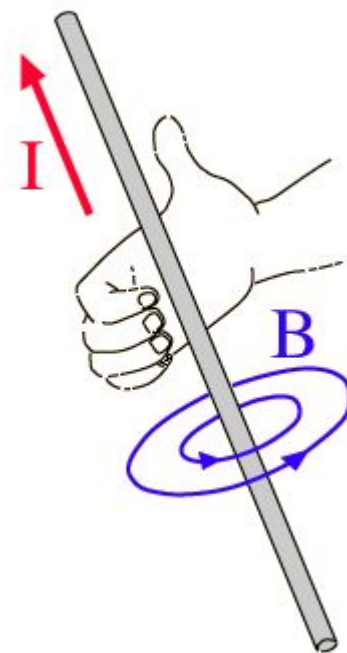
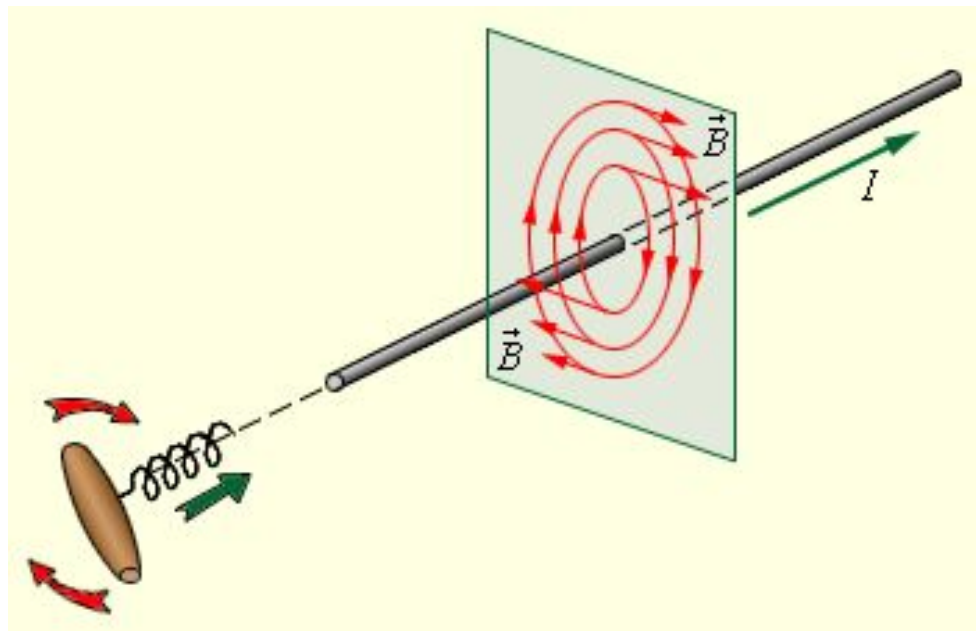


Магнитное поле – особый вид материи, оказывающий силовое воздействие на проводники с током, движущиеся электрические заряды и магнитные материалы.

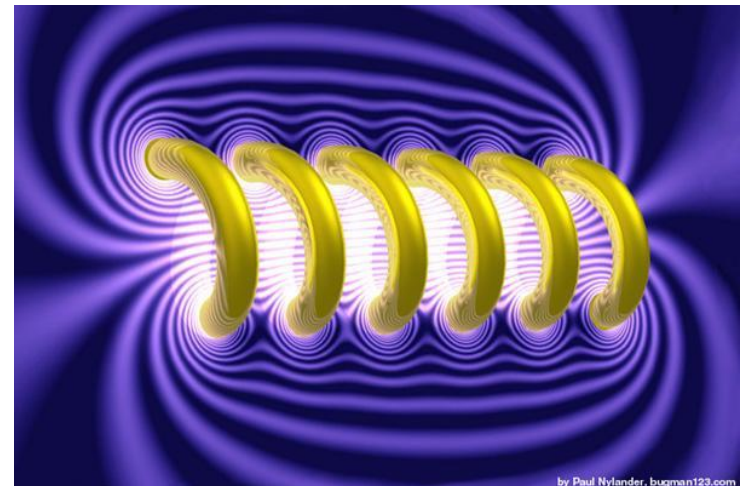
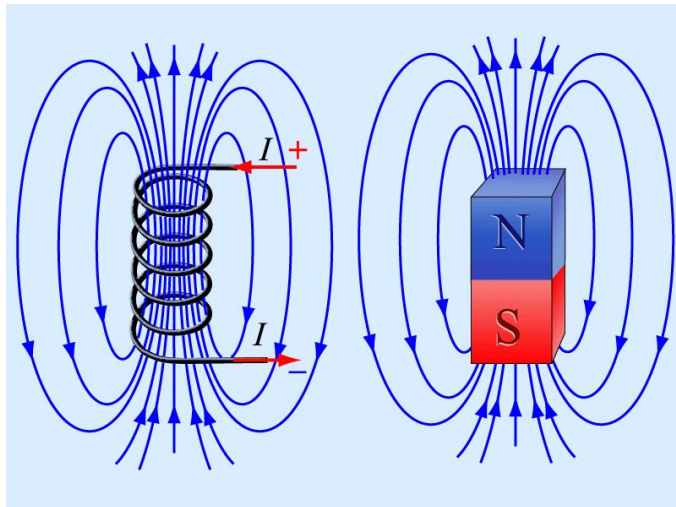
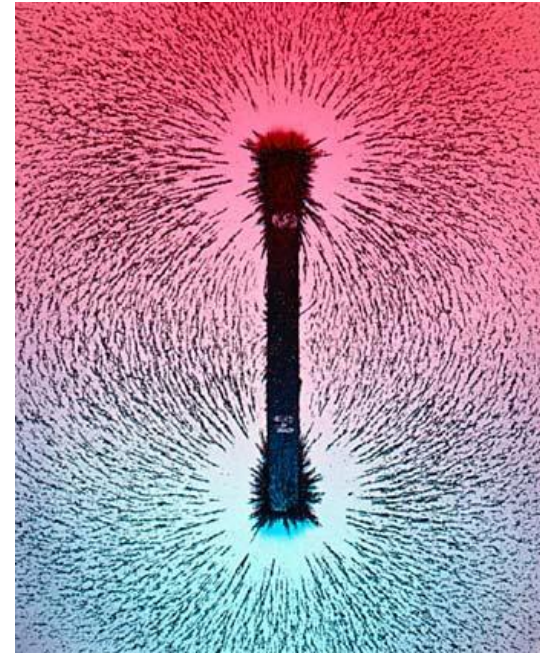
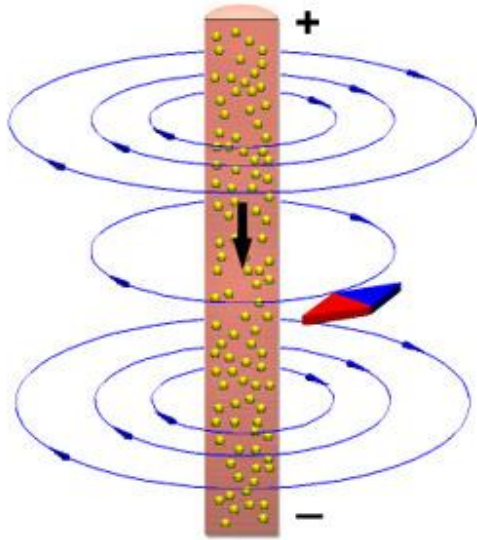
Магнитная индукция (индукция магнитного поля) – силовая характеристика магнитного поля; $[B] = \text{Тл}$.

Линии магнитной индукции - линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} .

Направление линии магнитной индукции задается *правилом правого винта* или правилом буравчика: головка винта (рукоятка буравчика), ввинчиваемого по направлению тока, вращается в направлении линий магнитной индукции.



Линии магнитной индукции или силовые линии магнитного поля всегда **замкнуты**:



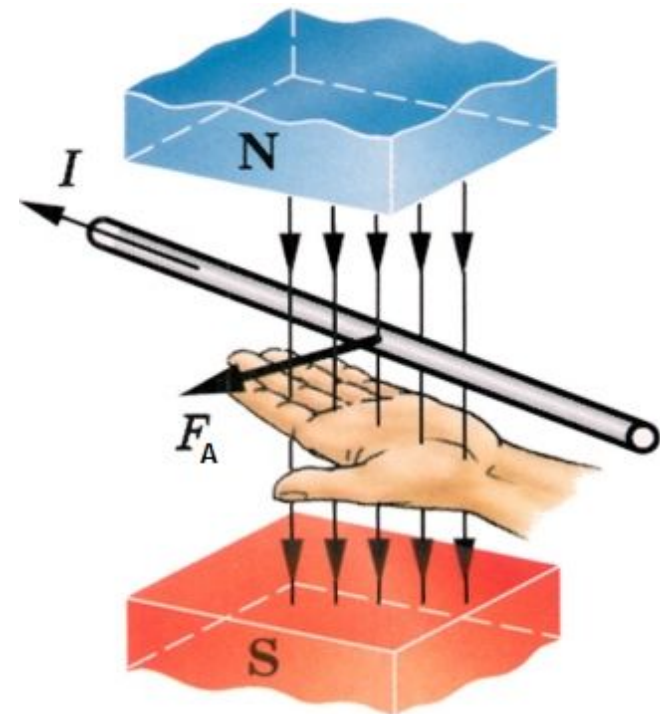
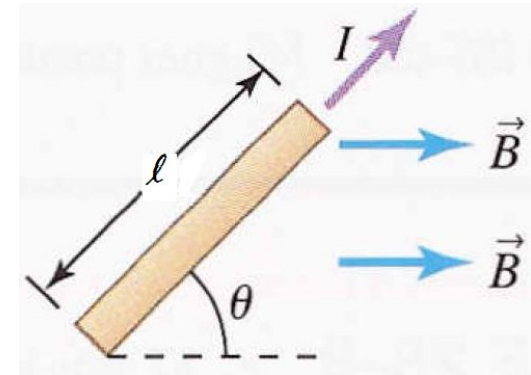
Сила Ампера – сила, действующая со стороны магнитного поля на проводник с током:

$$F_A = IlB \sin \theta \quad .$$

(9.2)

где I - сила тока, текущего по проводнику; l - длина проводника; B - магнитная индукция поля, действующего на проводник; θ - угол между направлением тока в проводнике и направлением вектора магнитного поля.

Направление силы Ампера определяется *правилом левой руки*: четыре пальца левой руки располагают по току так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, тогда отогнутый большой палец укажет направление силы Ампера.

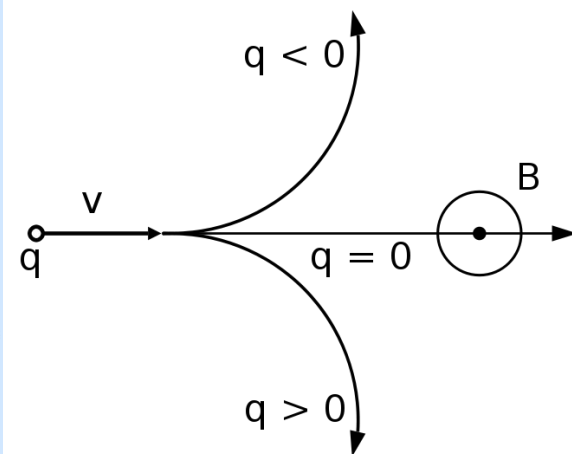
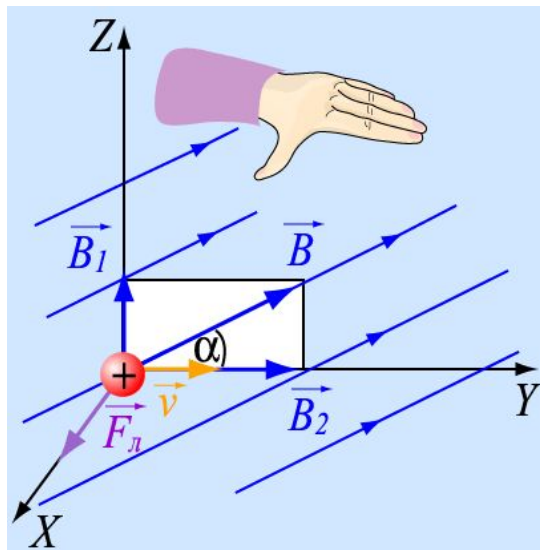
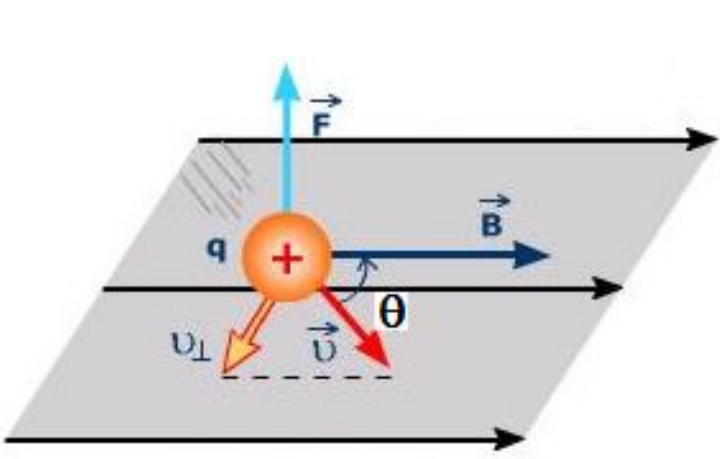


Сила Лоренца – сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся электрический заряд :

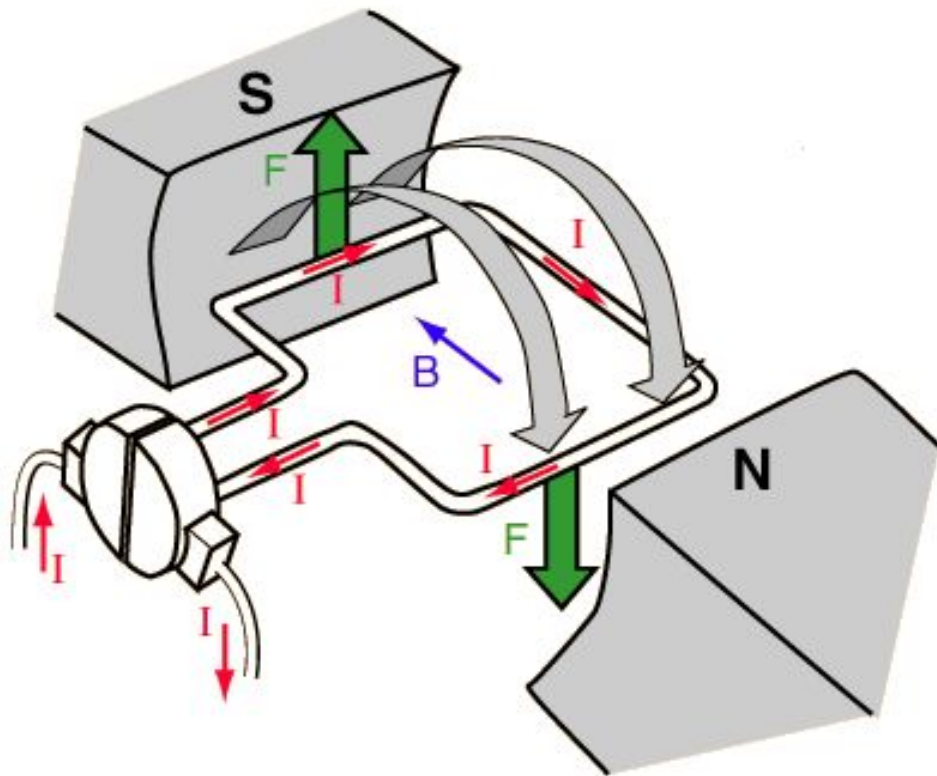
$$F_L = qvB \sin \theta \quad . \quad (9.3)$$

где v - скорость заряда; B - магнитная индукция поля, действующего на движущийся заряд; θ - угол между направлением вектора скорости заряда и направлением вектора магнитного поля.

Направление силы Лоренца для положительных зарядов определяется правилом левой руки, а для отрицательных зарядов – правилом правой руки. При этом четыре пальца руки располагают по направлению движения заряда.



Вращающий момент, действующий на рамку (виток) с током



Магнитный дипольный момент рамки (витка) с током:

$$\vec{m} = IS\vec{n} \quad , \quad (9.4)$$

где S – площадь рамки (витка).



Вращающий момент, действующий на рамку (виток) с током, рассчитывается по формуле

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B} \quad . \quad (9.5)$$

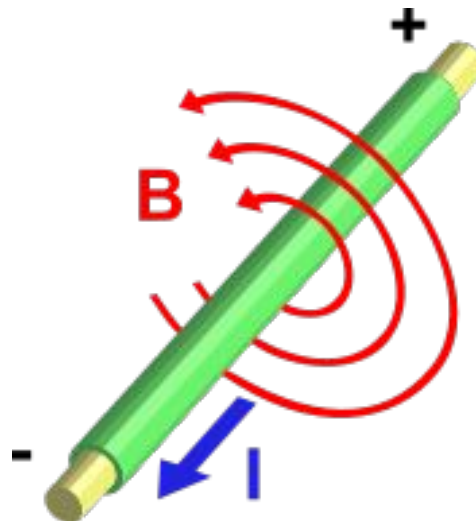
Из формулы (9.2) $\Rightarrow F_{A, \max} = IlB \Rightarrow B = \frac{F_{A, \max}}{Il}$. (9.6)

Магнитная индукция – векторная величина, численно равная максимальной силе, действующей со стороны магнитного поля на единичный элемент тока .

Магнитная индукция поля, созданного прямым бесконечно длинным проводником с током:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r} . \quad (9.7)$$

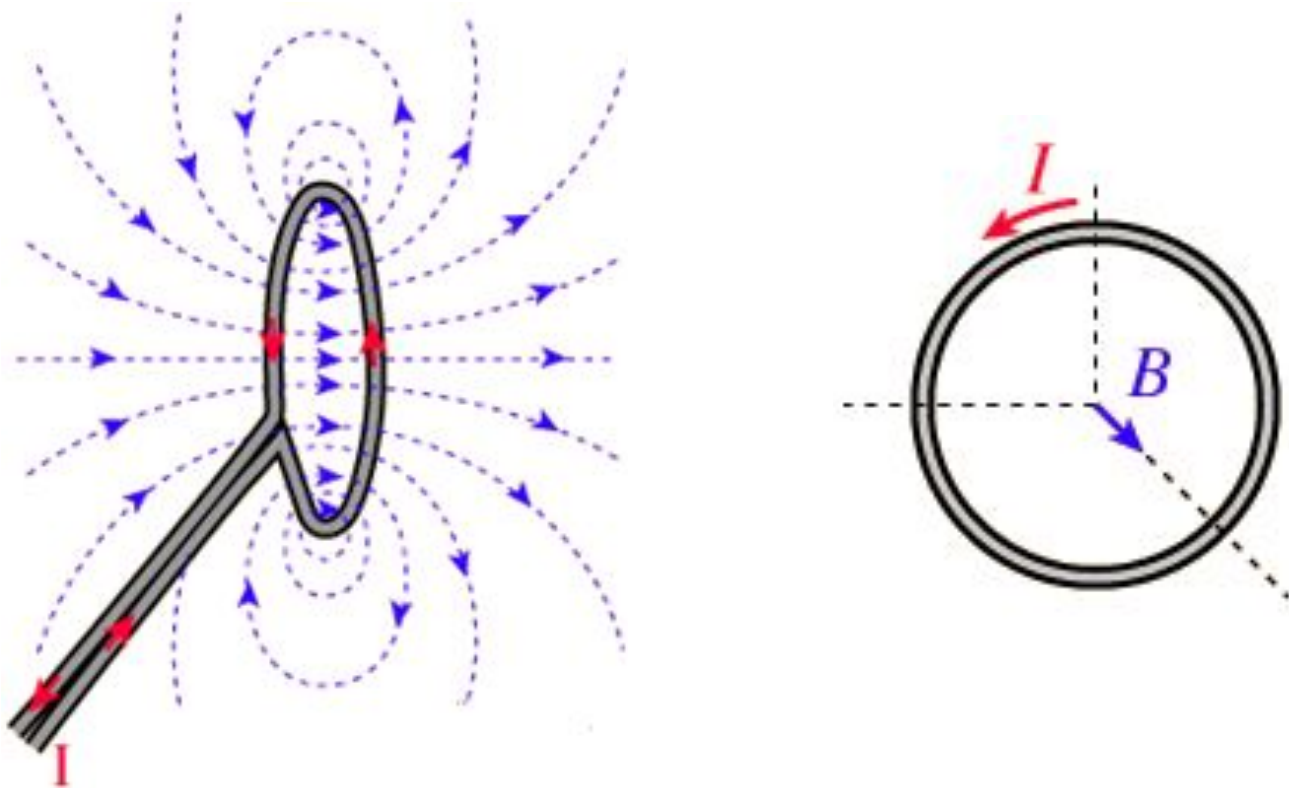
где μ - магнитная проницаемость среды, в которой находится проводник; I - сила тока, текущего по проводнику; r - расстояние от проводника до данной точки поля.



Магнитная индукция поля, созданного круговым витком с током в его центре:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2r} \quad . \quad (9.8)$$

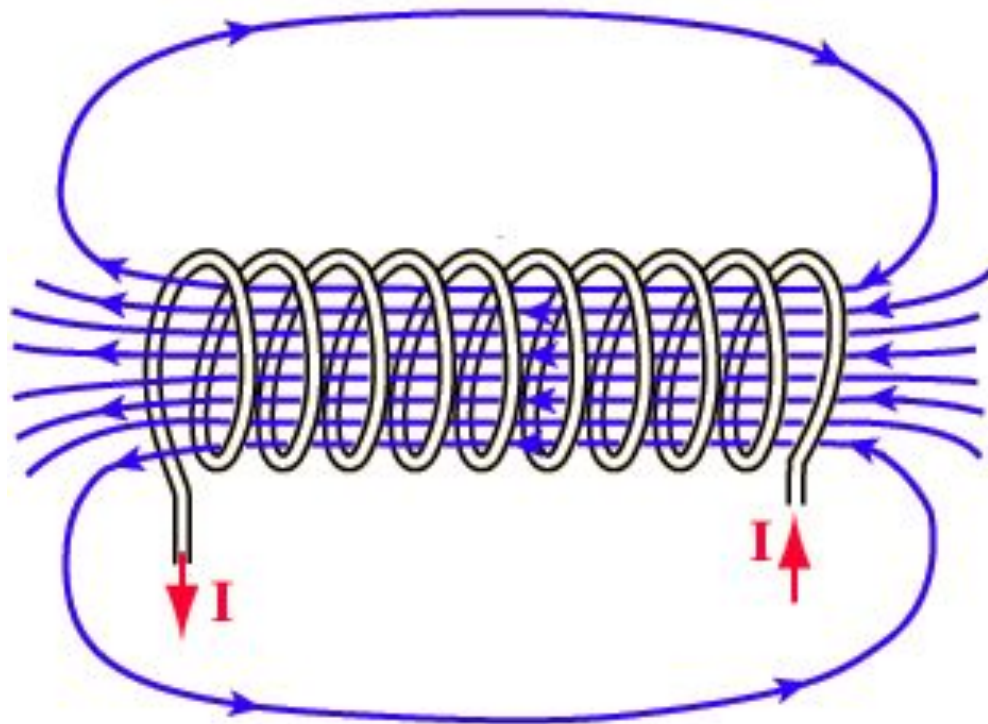
где μ - магнитная проницаемость среды, в которой находится виток;
 I - сила тока, текущего по витку; r - радиус витка.



Магнитная индукция поля, созданного соленоидом (катушки с током):

$$B = \frac{\mu\mu_0 NI}{l} \quad . \quad (9.9)$$

где μ - магнитная проницаемость среды внутри соленоида;
 N - число витков соленоида; I - сила тока, текущего по соленоиду;
 l - длина соленоида.



Магнитное поле в веществе

Макротоки – это токи, текущие в проводниках.

Микротоки – это токи, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах.

Магнитная индукция B – это характеристика результирующего магнитного поля, создаваемого как макротоками, так и микротоками.

Напряженность магнитного поля H – это характеристика магнитного поля, создаваемого только макротоками, $[H]=A/m$.

В однородном и изотропном веществе

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} = \mu\vec{B}_0, \quad (9.10)$$

где B_0 – магнитная индукция внешнего поля, т.е. поля, образуемого проводниками с током в вакууме.

$$\mu = B/B_0 - \quad (9.11)$$

магнитная проницаемость вещества – величина, показывающая во сколько раз индукция магнитного поля в веществе больше магнитной индукции внешнего поля .

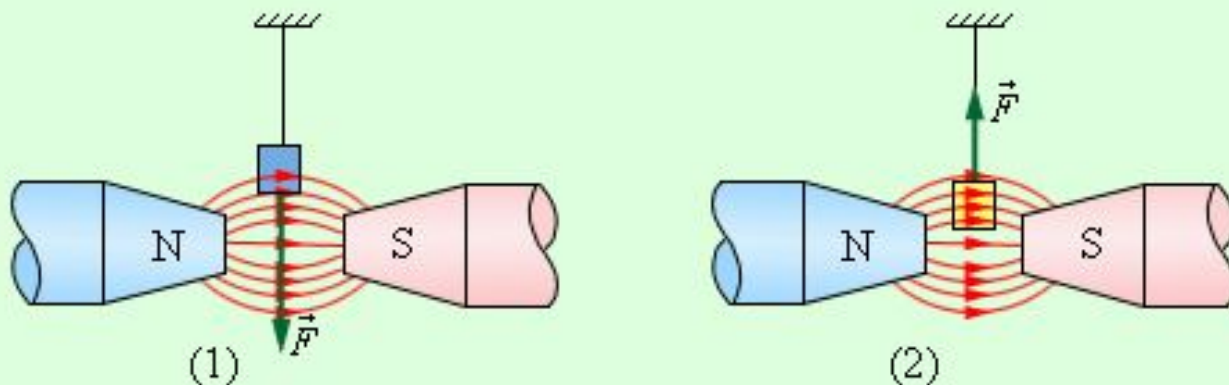
$\mu < 1$ – диамагнетики (Ag, Cu, N₂, ...)

Диамагнетиками называются вещества, при внесении которых во внешнее магнитное поле они создают собственное поле, направленное против внешнего поля и ослабляющее его.

$\mu > 1$ – парамагнетики (Al, Pt, O₂, ...)

Парамагнетиками называются вещества, при внесении которых во внешнее магнитное поле они создают собственное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его.

Образцы из пара- и диамагнетика, помещенные в неоднородное магнитное поле, ведут себя по-разному – парамагнетики втягиваются в область сильного поля, диамагнетики – выталкиваются.



Диамагнетики

Cu: $\mu = 0,9999912$

Парамагнетики

Al: $\mu = 1,000023$

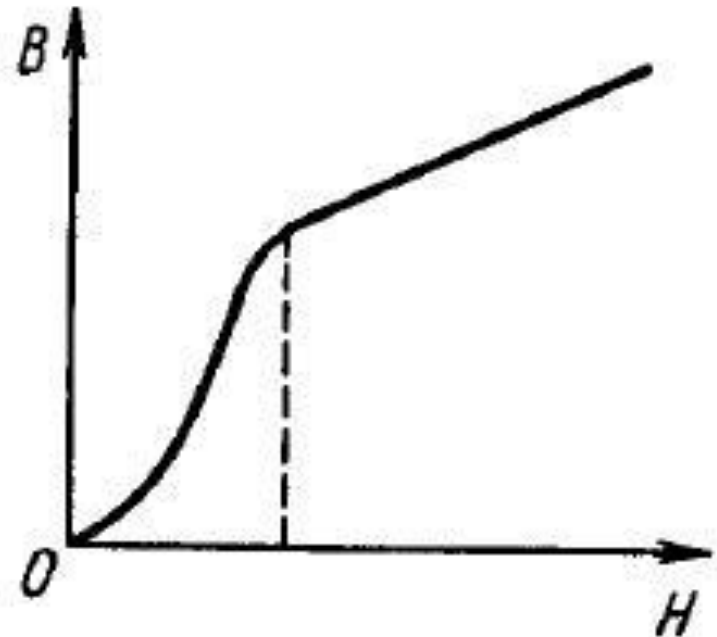
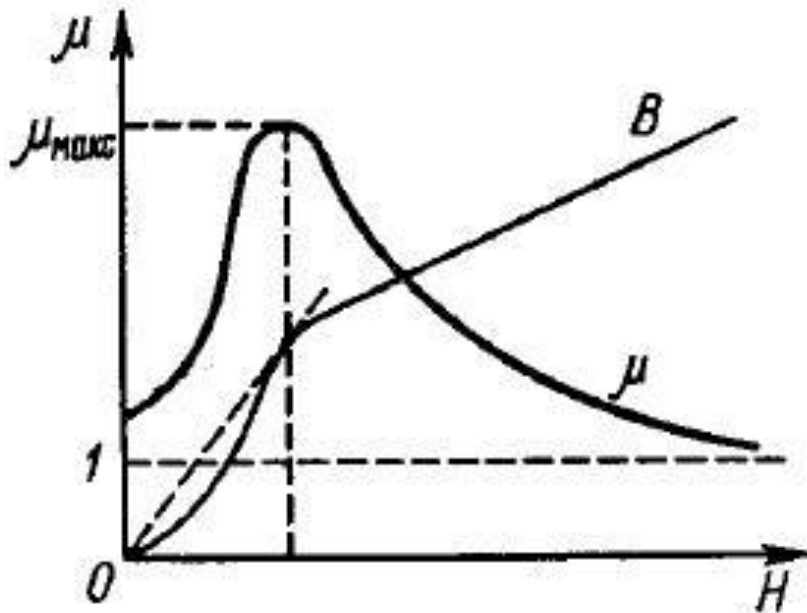
$\mu \gg 1$ – ферромагнетики (Fe, Co, Ni, «редкие земли»)

Fe: $\mu_{\max} = 5000$.

Супермаллой (79%Ni , 16%Fe, 5%Mo): $\mu_{\max} = 900000!!!$

Свойства ферромагнетиков

- 1) Магнитная проницаемость зависит от внешнего магнитного поля (Александр Столетов, 1872 г.).

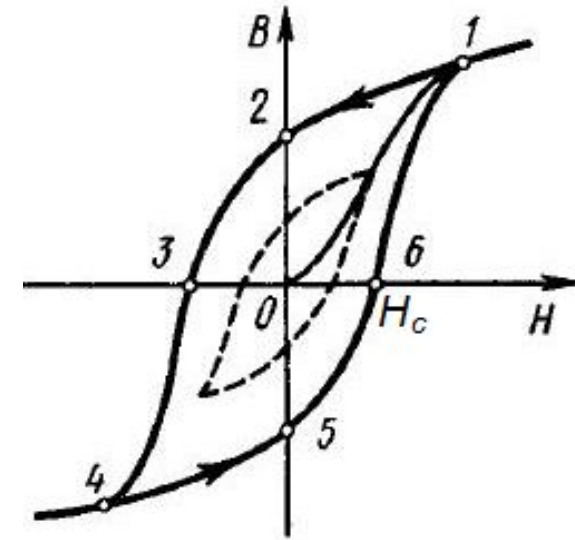


Точка насыщения – это такая напряженность магнитного поля, при которой магнитная проницаемость ферромагнетика практически не отличается от единицы.

Свойства ферромагнетиков

2) **Магнитный гистерезис** (Эмиль Варбург, 1880 г.)

- явление, которое состоит в том, что зависимость магнитной индукции ферромагнетика от напряженности магнитного поля не является однозначной, а определяется предысторией ферромагнетика.



Коэрцитивная сила – это такая напряженность магнитного поля, при которой ферромагнетик, первоначально намагниченный до насыщения, размагничивается.

Магнито-мягкие материалы – ферромагнетики, у которых небольшая коэрцитивная сила (применение: сердечники трансформаторов, электромоторов, генераторов тока).

Магнито-жесткие материалы – ферромагнетики, у которых большая коэрцитивная сила (применение: постоянные магниты).

Свойства ферромагнетиков

3) **Наличие точки Кюри** (Пьер Кюри, 1895 г.)

Точка Кюри – это такая температура, при которой ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние.

Материал	Железо (Fe)	Кобальт (Co)	Никель (Ni)	Гадолиний (Gd)	Диспрозий (Dy)
Температура Кюри, К	1043	1388	627	293	85

4) **Магнитострикция** (Джеймс Джоуль, 1842 г.) – изменение формы и размеров ферромагнетика при его намагничивании.

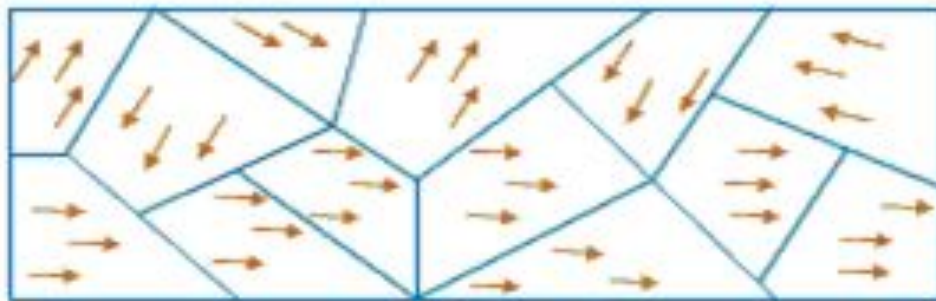
Природа ферромагнетизма

Гипотеза Вейса (Пьер Вейс, 1907 г.) – ферромагнетик ниже точки Кюри состоит из **доменов** – малых областей ($\sim 10^{-5} \dots 10^{-4}$ м) самопроизвольно намагниченных до насыщения.

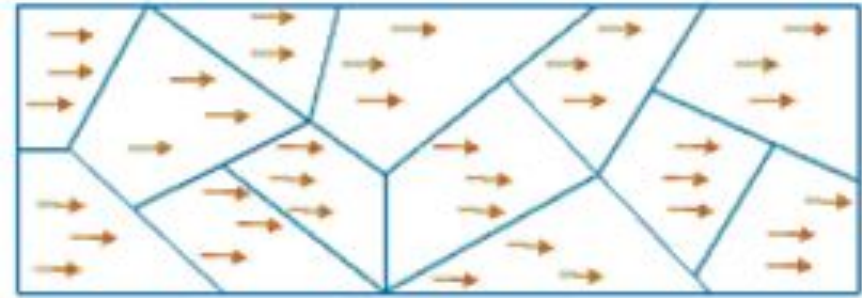
В отсутствие магнитного поля домены ориентированы хаотически (рисунок «а»).

При включении магнитного поля размеры доменов, направленных вдоль поля, увеличиваются, направленных против поля – уменьшаются.

При увеличении поля начинается поворот доменов как целого в направлении поля. В сильных полях домены ориентированы вдоль поля (рисунок «b»), т.е. наступает насыщение.



(a)



(b)

Основные уравнения магнитостатики

Электростатика	Магнитостатика
<p>Закон Гаусса</p> $\oint \vec{D} \cdot d\vec{S} = q_{\Sigma}$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (9.12)$
<p>Теорема о циркуляции вектора напряженности электростатического поля</p> $\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0$	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{r} = I_{\Sigma} \quad (9.13)$

Уравнение (9.12) называют **законом Гаусса для магнитного поля**, из которого следует, что в природе отсутствуют магнитные заряды, а линии магнитной индукции являются замкнутыми .

Уравнение (9.13) называют **законом Ампера (или законом полного тока)**: циркуляция напряженности магнитного поля вдоль произвольного контура равна результирующей силе тока, пересекающего охваченную контуром поверхность.

