

Лекция 2.

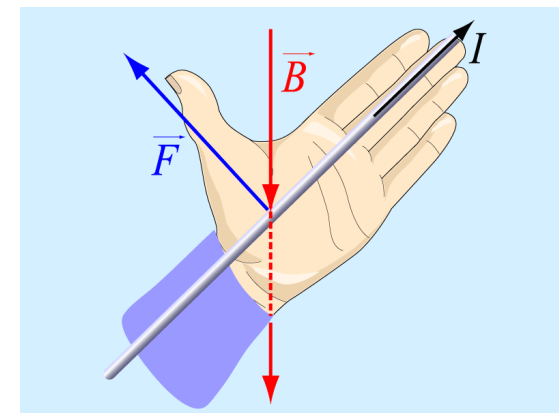
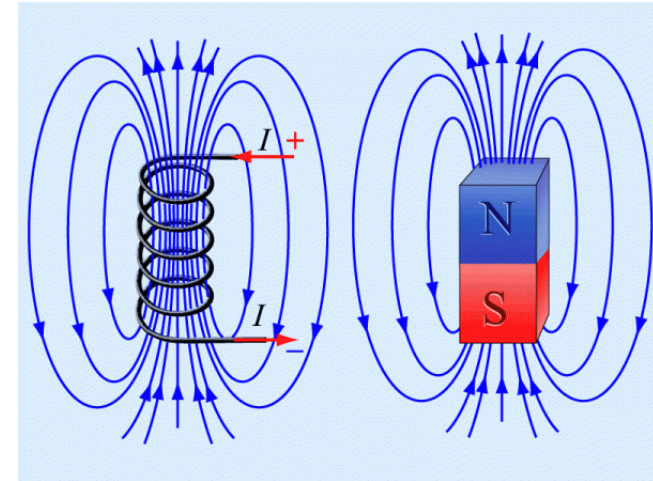
Магнитное поле. Понятия,
законы, характеристики,
единицы измерения.

Т.Б. Шапаева

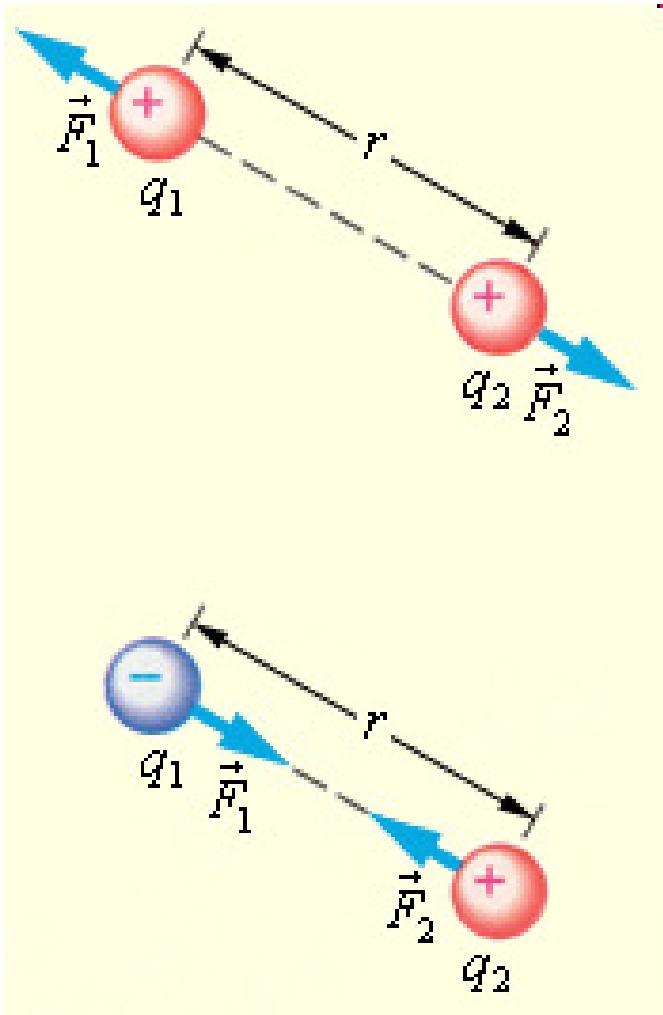
Кафедра магнетизма физического
факультета МГУ им. М.В.Ломоносова

Магнитное поле

1. Исследования Шарля Кулона
2. Опыт Эрстеда
3. Опыт Роуланда
4. Индукция магнитного поля
Принцип суперпозиций
5. Сила Ампера
6. Сила Лоренца
7. Закон Ампера
8. Закон Био-Савара-Лапласа
9. Магнитное поле в веществе
Напряженность магнитного поля
Намагниченность
Магнитная восприимчивость
Магнитная проницаемость



Закон Кулона 1785



Закон о
взаимодействии
точечных
электрических
зарядов.

$$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = F$$

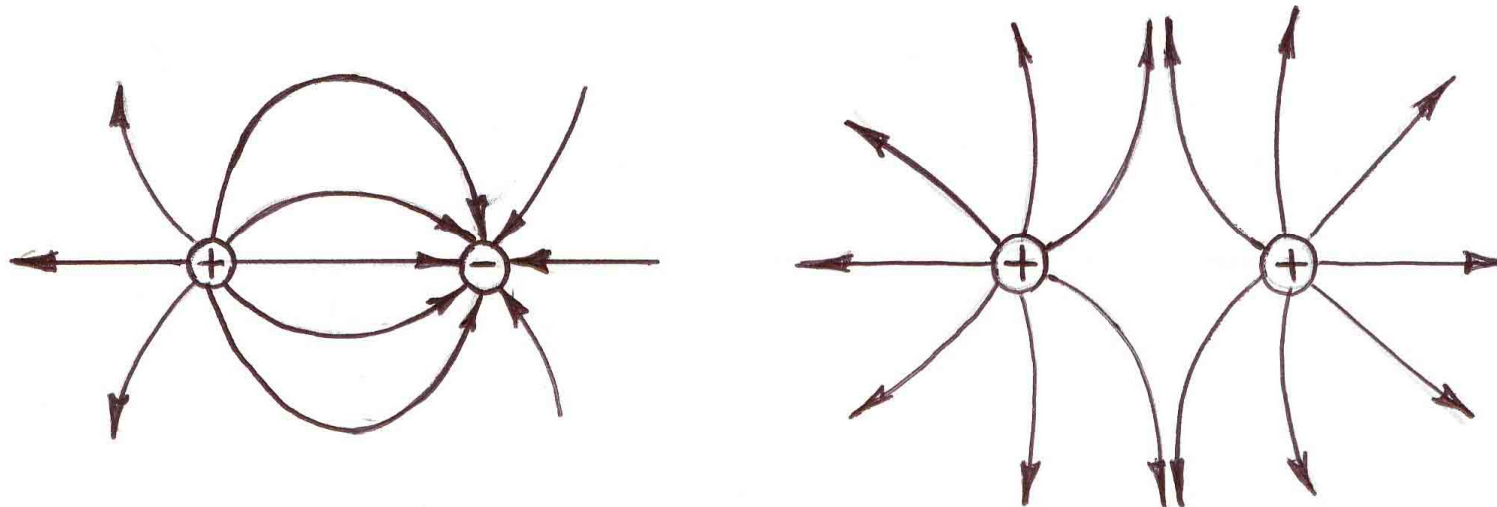
$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$$



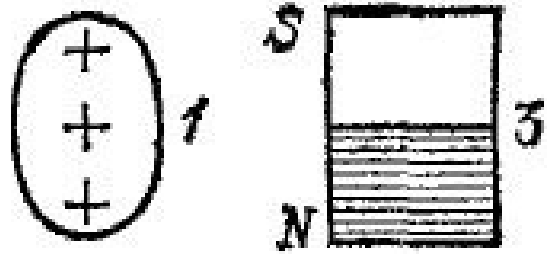
**Шарль Огюстен
де Кулон
(1736 — 1806)**

Силовые линии электрических полей, создаваемых одинаковыми по модулю одноименными и разноименными зарядами

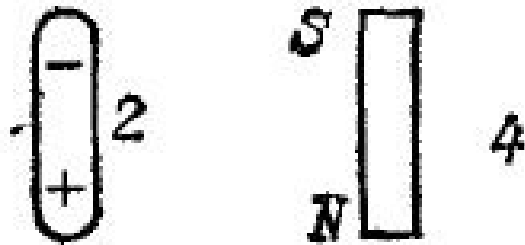


**Касательная в каждой точке к силовой линии
определяет направление вектора E**

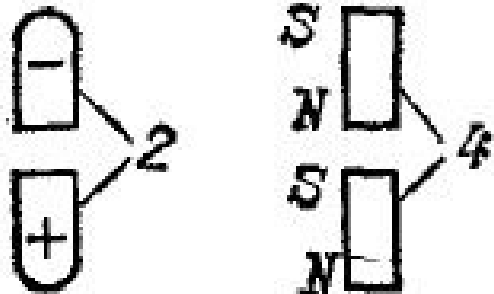
Опыт Кулона (1785 – 1788). Закон о взаимодействии магнитных полюсов.



Сопоставление процесса электризации куска металла путем электростатической индукции (слева) и намагничивания стального бруска под влиянием магнита (справа)

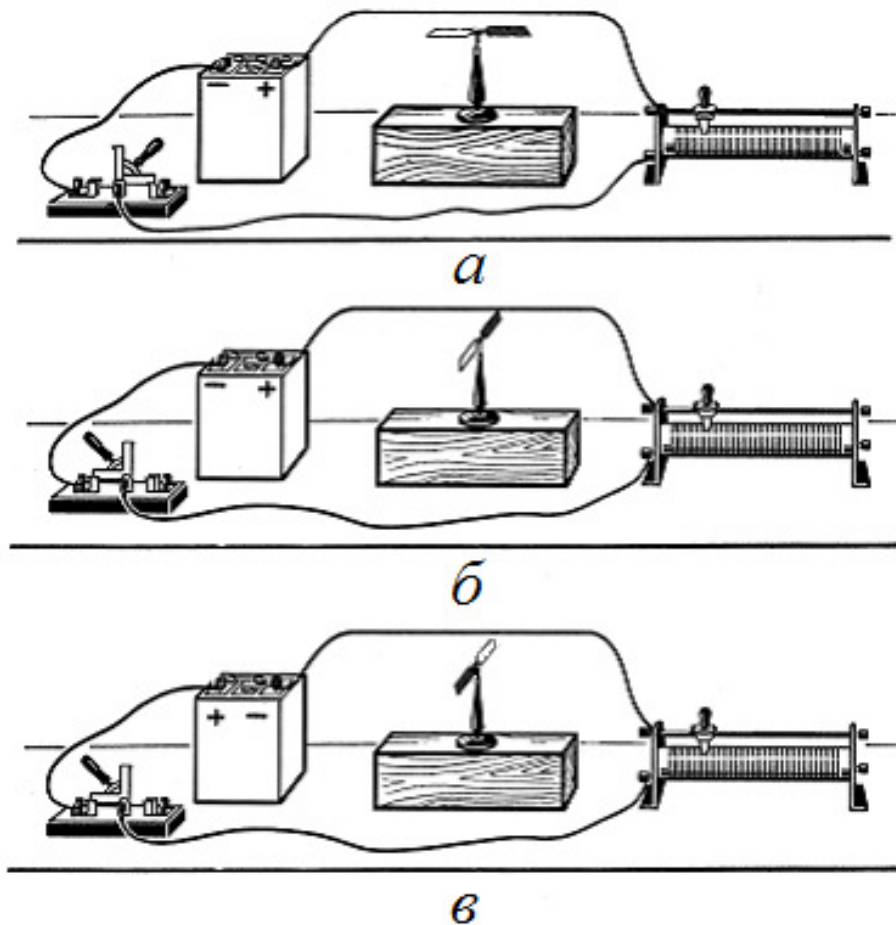


Два одноименных полюса отталкиваются друг от друга, а два разноименных полюса притягиваются друг к другу



Невозможно разделить северный и южный полюса магнита

Опыт Эрстеда (1820)



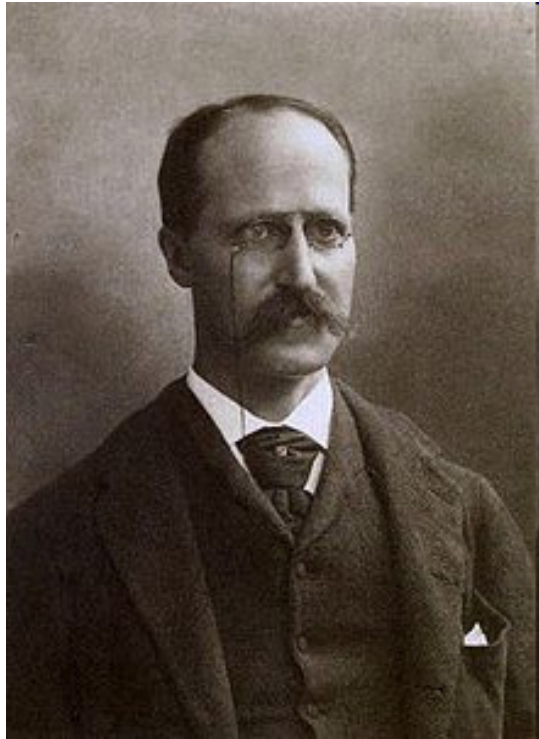
**Ханс Кристиан
Эрстед
(1777 — 1851)**

Магнитная стрелка отклоняется от положения равновесия, если рядом с ней находится проводник с током.

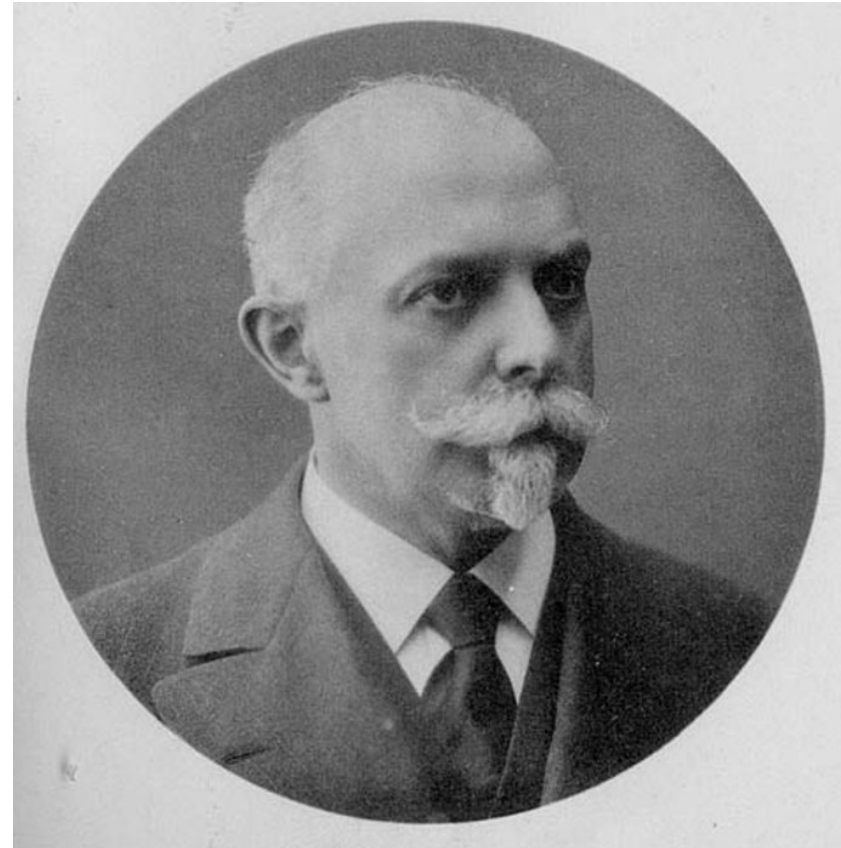
Опыт Эрстеда

Из опыта Эрстеда следует, что магнитное поле имеет направленный характер и должно характеризоваться векторной величиной. Эту величину обозначают **\mathbf{B}** и по историческим причинам она называется **индукцией магнитного поля**, хотя правильнее было называть ее напряженностью.

Опыт Роуланда и Эйхенвальда (1876)

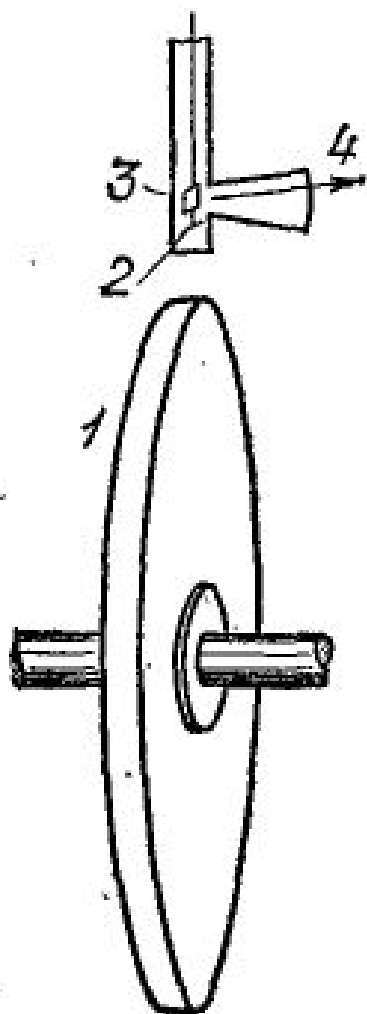


Henry-Augustus Rowland,
1848 — 1901,
американский физик.



Эйхенвальд Александр
Александрович 1863 — 1944,
русский физик.

Опыт Роуланда (1876)



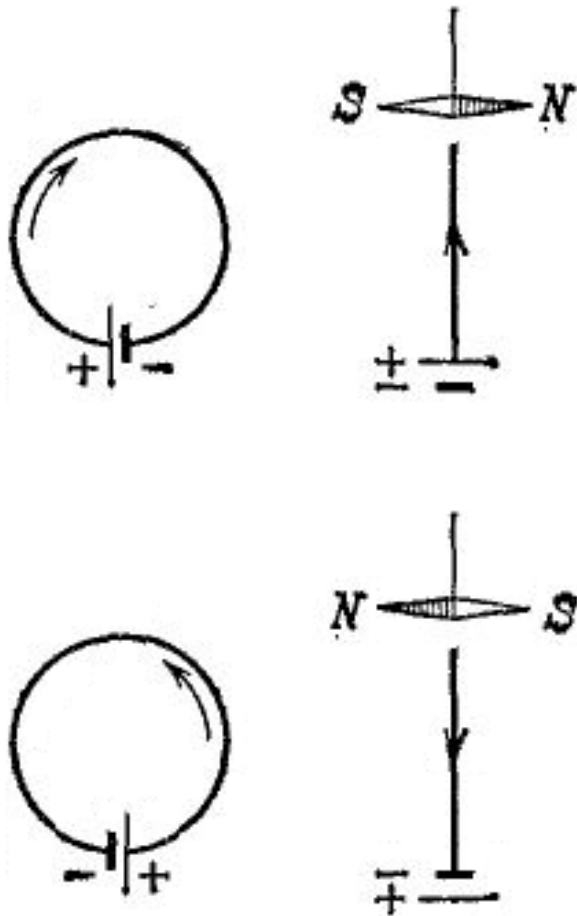
1 – проволочное кольцо или сплошной диск, закрепленный на хорошо изолированной оси. Кольцо (или диск) заряжается и может с большой скоростью вращаться вокруг оси.

2 – магнитная стрелка, защищенная от внешних электрических воздействий металлическим футляром

3 - маленькое зеркальце закреплено на одной нити со стрелкой

4 – окошечко, через которое можно наблюдать за отклонениями стрелки.

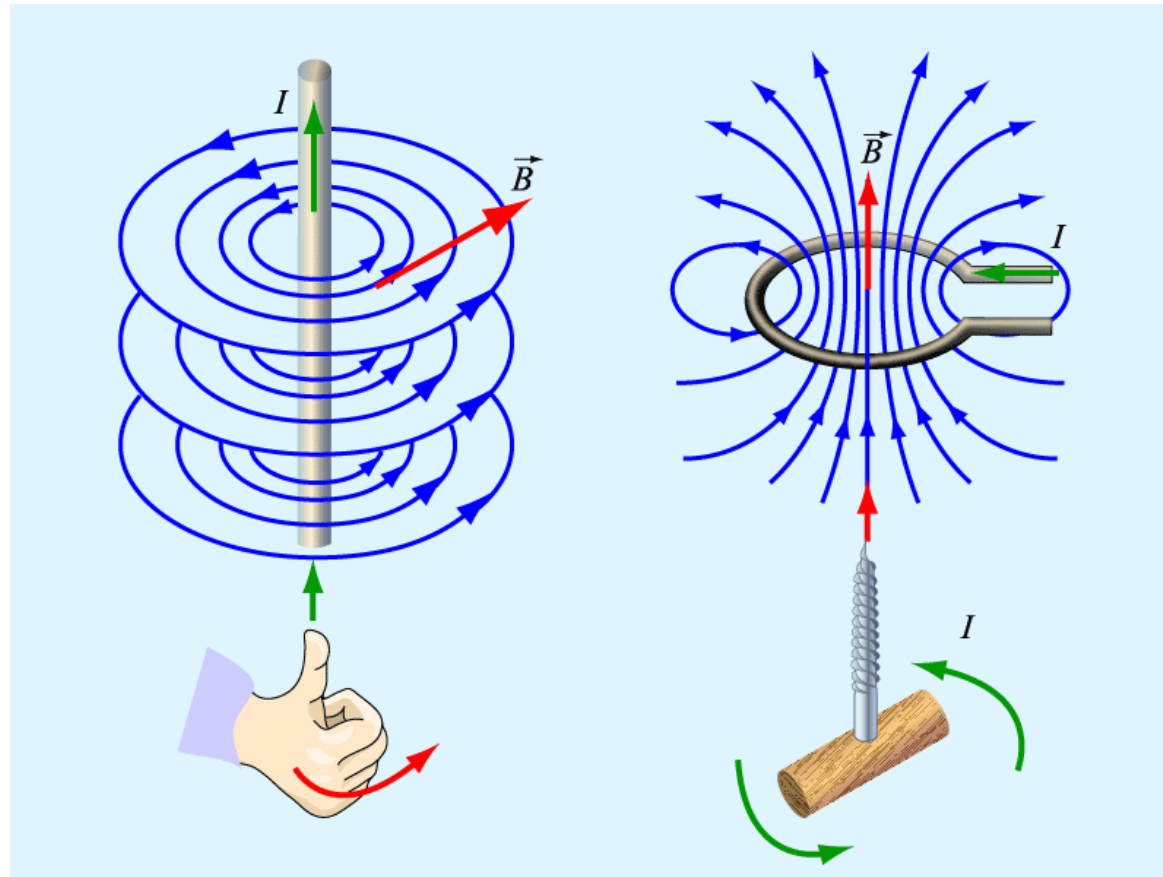
Опыт Роуланда (1876)



Опыт показал, что при вращении диска стрелка отклоняется совершенно так же, как если бы по проволочному кольцу проходил электрический ток соответствующей силы и направления. При изменении направления вращения диска или знака заряда на нем отклонение стрелки также изменяется на обратное.

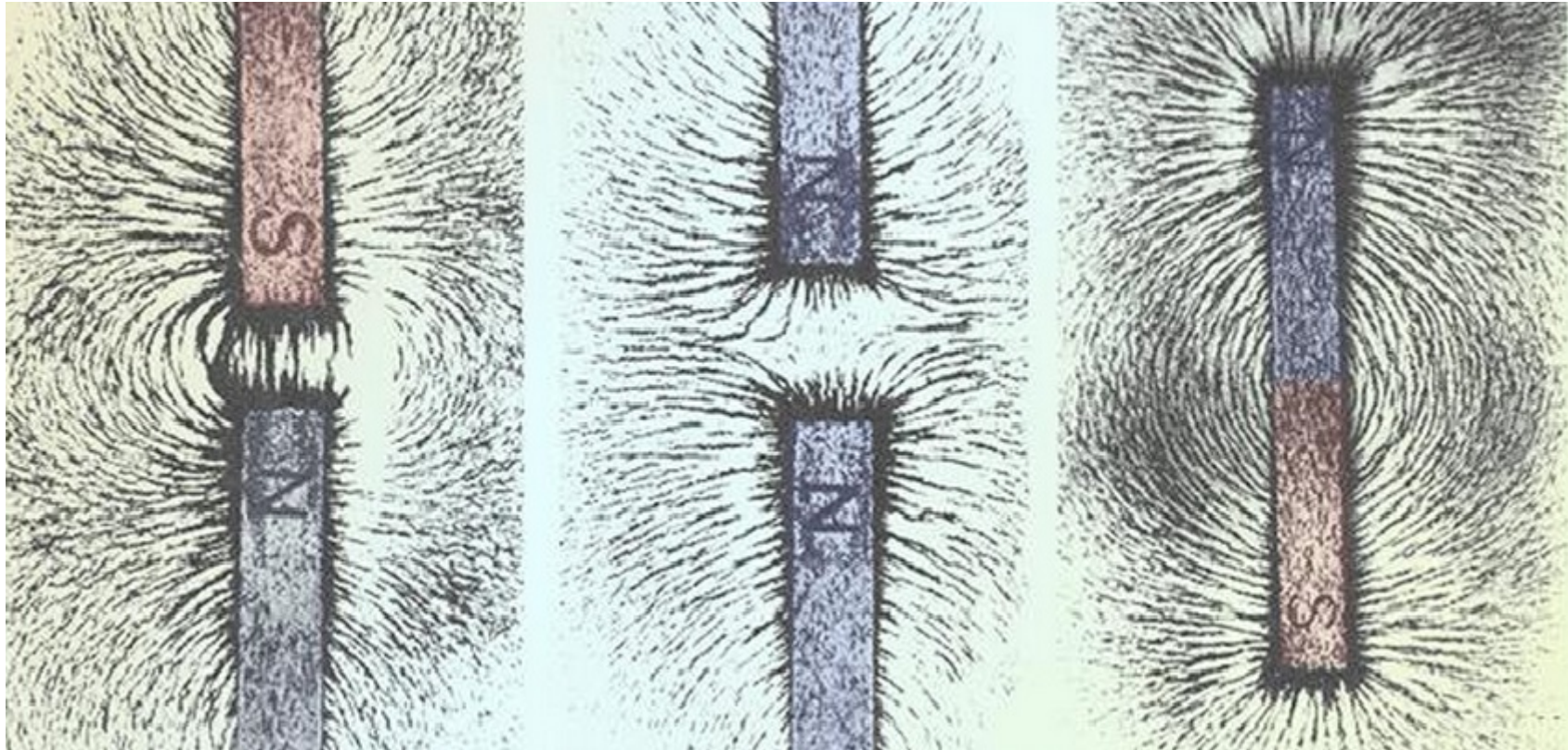
Движущиеся заряды создают вокруг себя магнитное поле такое же, как обычный электрический ток.

Индукция магнитного поля



- ✓ Для магнитного поля справедлив принцип суперпозиций
- ✓ Линии магнитной индукции – замкнутые кривые
- ✓ Направление вектора \vec{B} определяется по правилу правой руки (буравчика)

Индукция магнитного поля



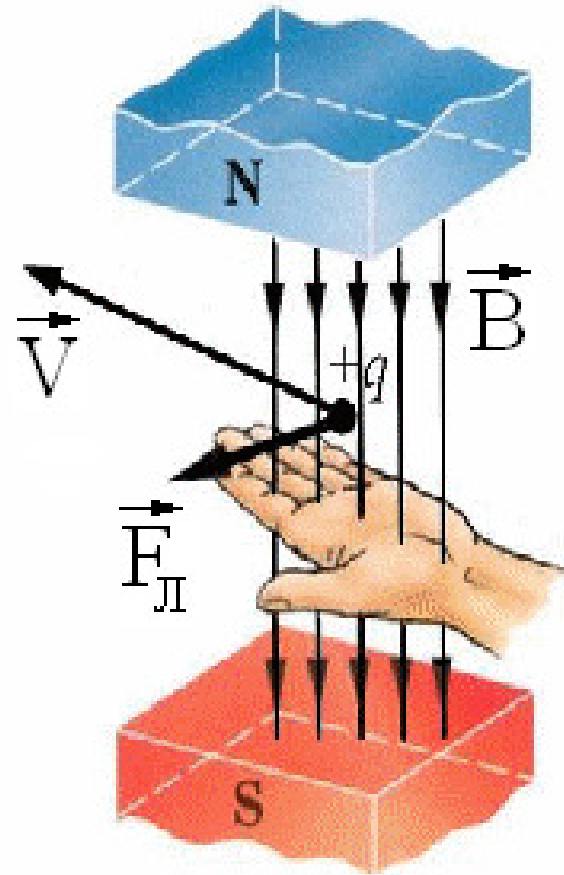
Визуализация поля, создаваемого полюсами магнита.

Индукция магнитного поля – силовая характеристика магнитного поля

Сила Лоренца

Определяет с какой силой F
магнитное поле действует
на заряд q , движущийся со
скоростью V

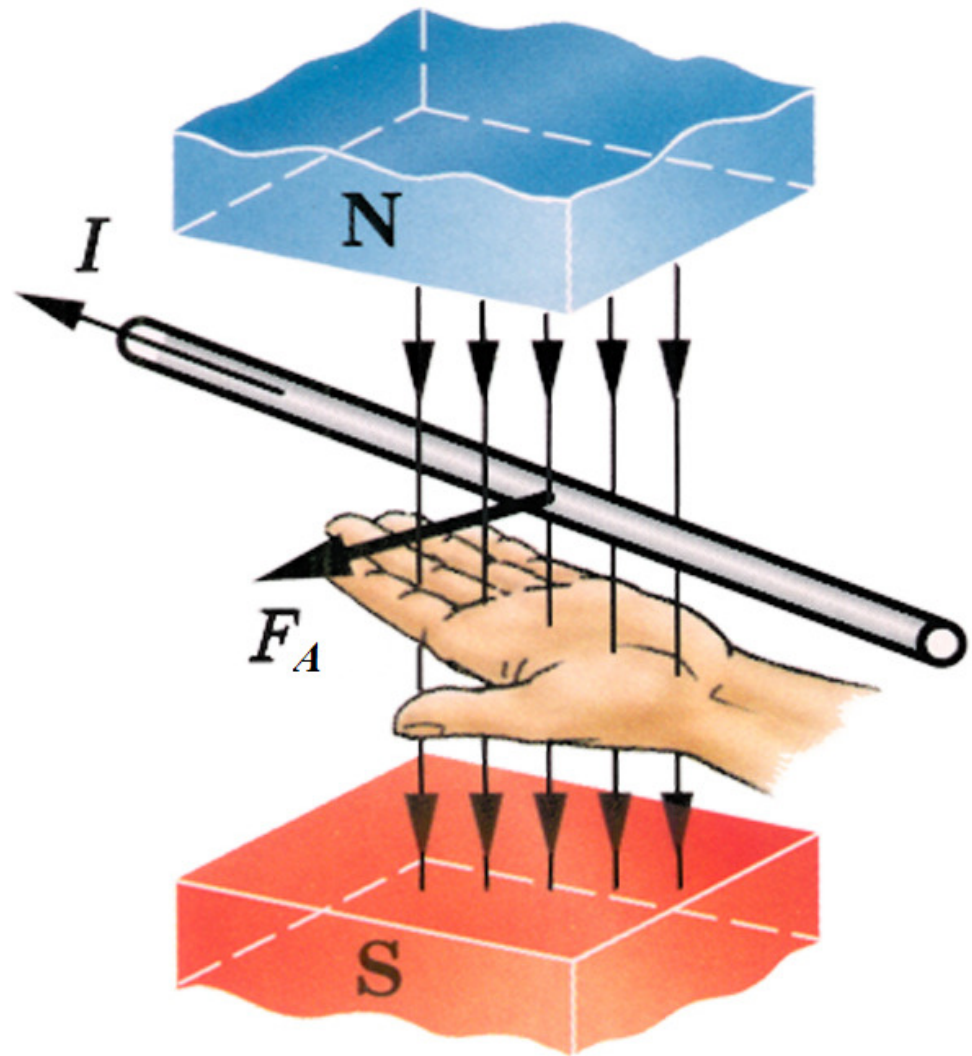
$$\vec{F}_L = q[\vec{V} \cdot \vec{B}]$$



Сила Ампера

Действует на проводник длиной l , по которому течет ток I , находящийся в магнитном поле с индукцией B .

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



Единицы измерения магнитной ИНДУКЦИИ

СИ

$$F_A = I \cdot l \cdot B$$

если $\vec{l} \perp \vec{B}$

$$B = \frac{F_A}{I \cdot l}$$

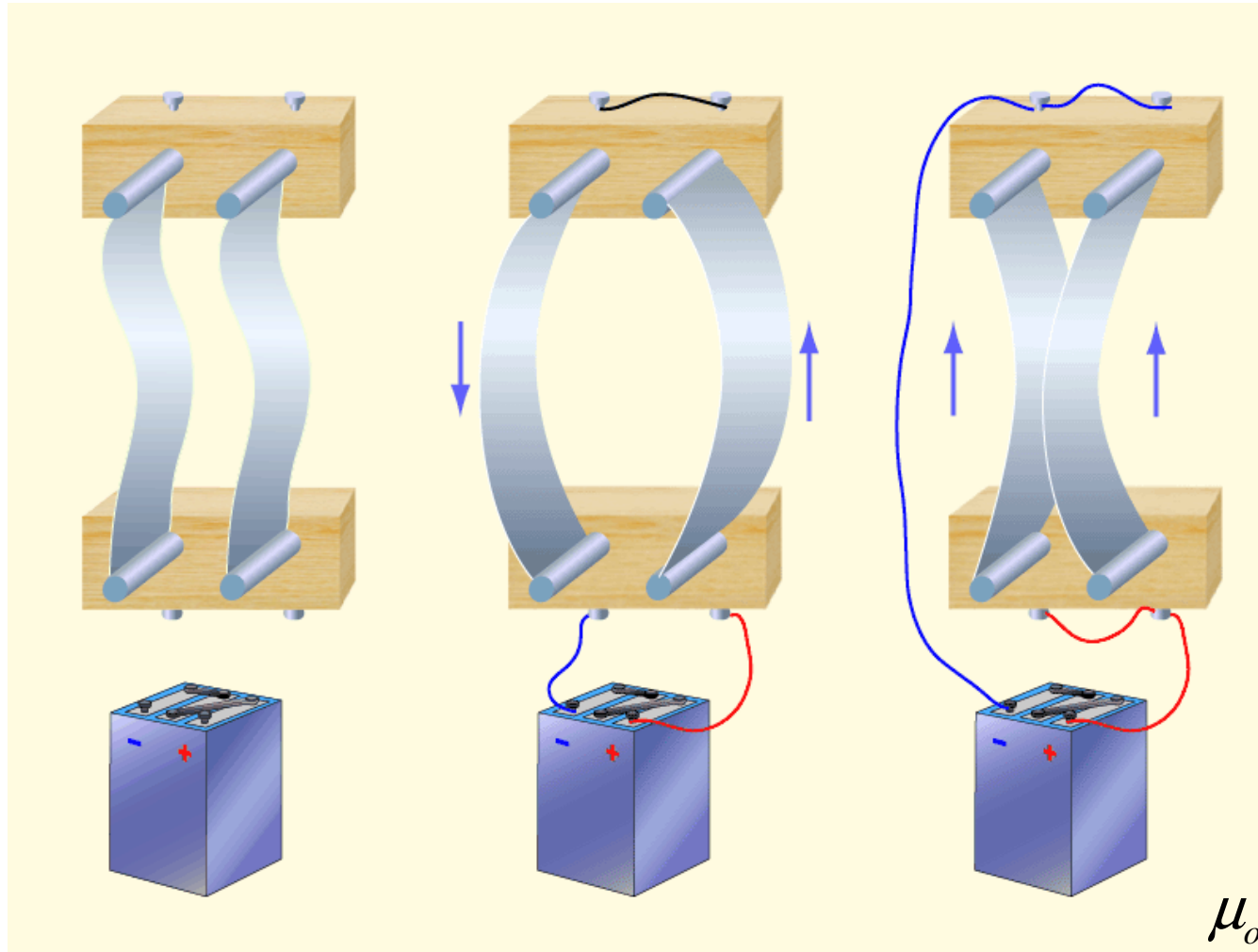
$$Tл = \frac{H}{A \cdot м}$$

СГС

$$1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$$

Объект	СИ (Тесла)	СГС (Гаусс)
Наименьшая величина в магнитоэкранируемой комнате	10^{-14}	10^{-10}
Межзвездное пространство	10^{-10}	10^{-06}
Магнитное поле Земли	$5 \cdot 10^{-05}$	0,5
Небольшой магнит (феррит)	0,01	100
Магнитное поле солнечного пятна	0,15	1500
Небольшой магнит (Nd-Fe-B)	0,2	2000
Большой электромагнит	1,5	15 000
Сильный лабораторный магнит	10	100 000

Закон Ампера (1820)



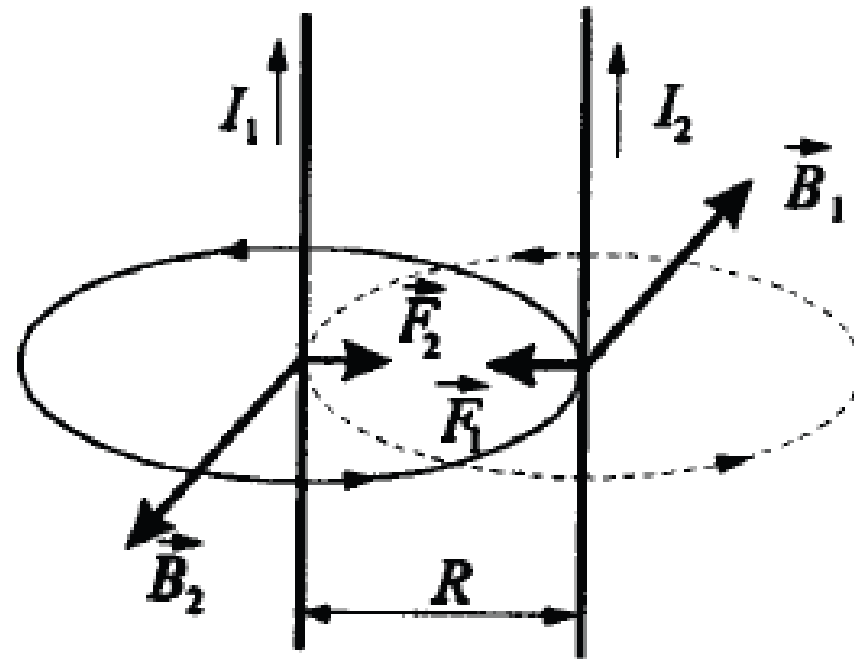
Два проводника, по которым течет ток в одном направлении, притягиваются, а если ток в них течет в противоположных направлениях — отталкиваются.

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

$$\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$$

μ_0 — магнитная постоянная

Закон Ампера (правило левой руки)



Закон Био-Савара-Лапласа (1820)



Жан-Батист Био́
(1774 — 1862) —
знаменитый
французский ученый,
член Парижской
Академии наук

Феликс Савар
(1791 — 1841) —
французский
физик.

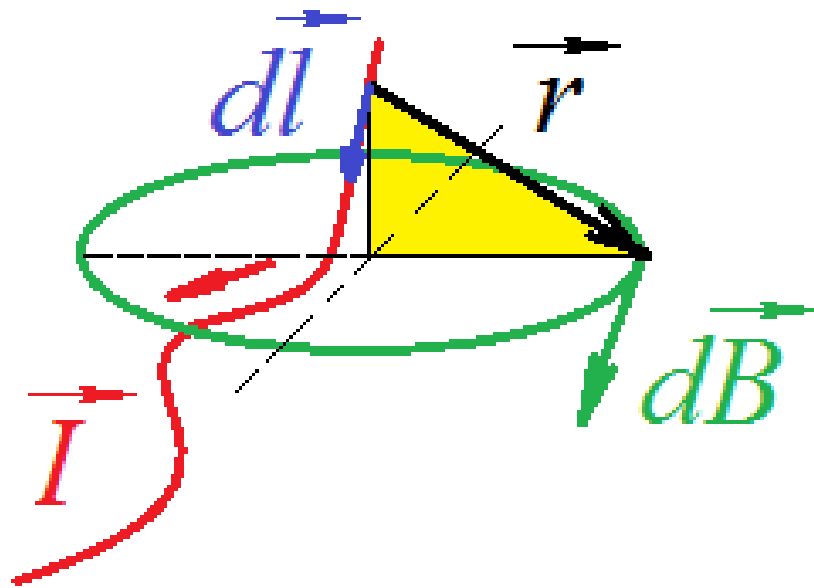


Пьер-Симон, маркиз де Лаплас (1749 — 1827) —
французский математик,
физик и астроном, один
из создателей теории
вероятностей.

Закон Био-Савара-Лапласа

В 1820 г. ученые **Био** и **Савар** исследовали магнитные поля, создаваемые тонкими проводниками различной формы. **Лаплас** проанализировал полученные экспериментальные данные и получил выражение, позволяющее вычислить магнитное поле любого тока, как суперпозицию маленьких элементов тока.

Закон Био-Савара-Лапласа



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

Принцип суперпозиций

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}$$

Закон Био-Савара-Лапласа

Для прямого провода

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \sin \varphi}{r^2}$$

$$B = \int_l dB = \int_l \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \sin \varphi}{r^2}$$

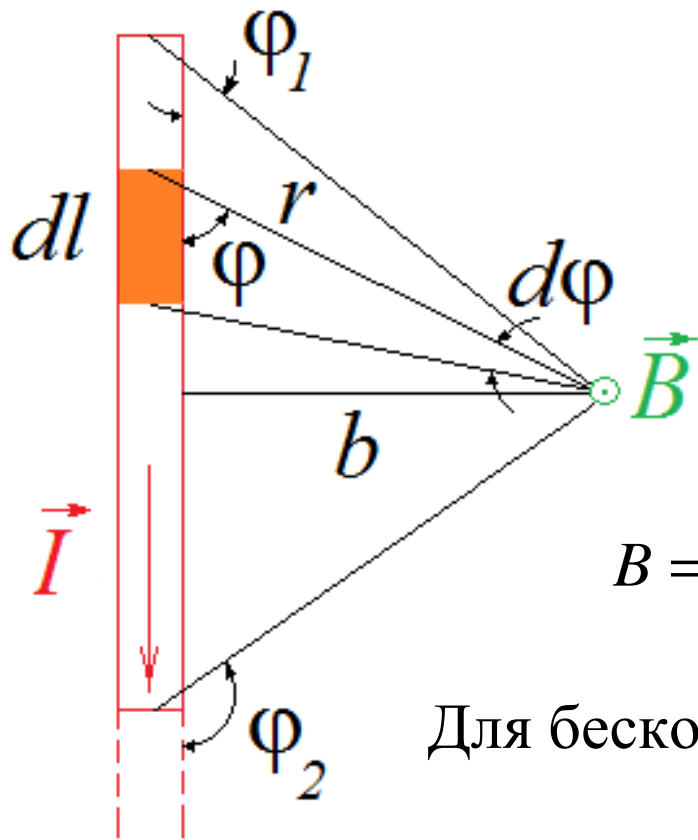
Так как $b = \frac{r}{\sin \varphi}$, а $dl = \frac{r \cdot d\varphi}{\sin \varphi}$

то

$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi b} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi \cdot d\varphi = \frac{\mu_o I}{4\pi b} (\overset{1}{\cos \varphi_1} - \overset{-1}{\cos \varphi_2})$$

Для бесконечно длинного проводника ($\varphi_1=0$; $\varphi_2=\pi$)

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



Закон Био-Савара-Лапласа

Поле прямого провода на расстоянии b от него

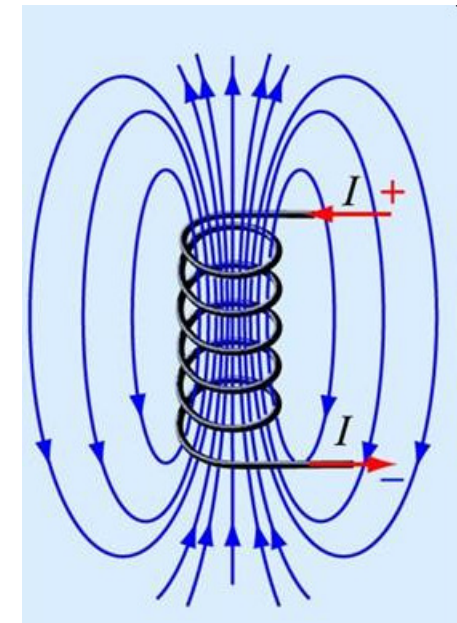
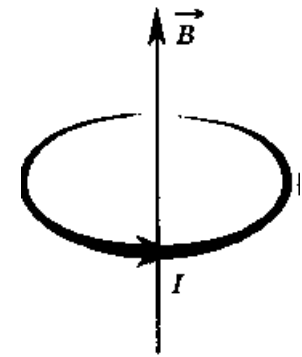
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi b}$$

Поле в центре витка с током радиуса R

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

Поле на оси катушки длиной l , содержащей N витков

$$B = \frac{\mu_0 IN}{l}$$



Магнитное поле в веществе. Напряженность магнитного поля

В СИ

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$$\left[\frac{A}{m} \right]$$

$$1 \text{ Э} = 80 \frac{A}{m}$$

В СГС

$$\vec{H} = \vec{B} - 4\pi\vec{M}$$

[Эрстед]

	Напряженность поля	Индукция поля
Электрическое поле	E	D
Магнитное поле	H	B

Магнитное поле в веществе. Намагниченность и магнитная восприимчивость

Намагниченность связывают не с магнитной индукцией, а с напряженностью поля

В каждой точке магнетика (и в СИ и в СГС)

$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

χ – магнитная восприимчивость вещества.
Безразмерная величина, может быть тензором

Магнитное поле в веществе. Магнитная проницаемость

В СИ

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi \vec{H}$$

$$\vec{H} + \chi \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} (1 + \chi)$$

$$\mu = 1 + \chi$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

μ – относительная
магнитная
проницаемость,
безразмерная
величина, может быть
тензором

Магнитное поле в веществе. Магнитная проницаемость

В системе СГС

$$\vec{H} = \vec{B} - 4\pi\vec{M} = \vec{B} - 4\pi\chi\vec{H}$$

$$\vec{H} + 4\pi\chi\vec{H} = \vec{B}$$

$$\vec{B} = \vec{H}(1 + 4\pi\chi)$$

$$\mu = 1 + 4\pi\chi$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H}$$

Величина μ в
системе СГС
совпадает с μ в
системе СИ,

НО

$$\chi_{СИ} = 4\pi\chi_{СГС}$$

Магнитная восприимчивость (СГС)

	Вещество	$\chi, 10^{-6}$
Диамагнетики	Азот	-12
	Водород	-4
	Вода	-13
Парамагнетики	Вольфрам	6,8
	Алюминий	2,2
	Литий	1,4
	Магний	1,2
	Натрий	0,72
Ферромагнетики	Железо, Кобальт	Никель, $\sim 10^4 - 10^5$

Магнитное поле

1. Исследования Шарля Кулона
2. Опыт Эрстеда
3. Опыт Роуланда
4. Индукция магнитного поля **B**
Принцип суперпозиций
5. Сила Ампера
6. Сила Лоренца
7. Закон Ампера
8. Закон Био-Савара-Лапласа
9. Магнитное поле в веществе
Напряженность магнитного поля **H**
Намагниченность **M**
Магнитная восприимчивость χ
Магнитная проницаемость μ