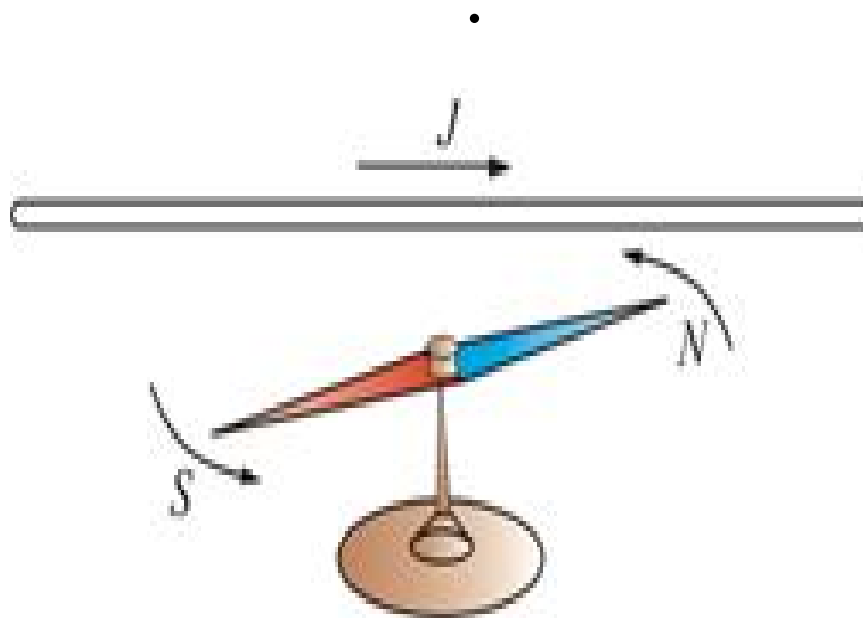


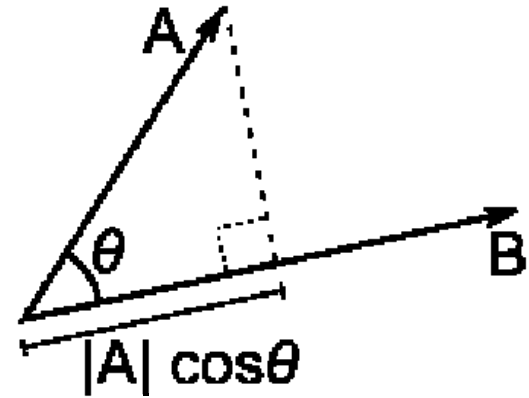
# Магнитное поле. Магнитные свойства веществ. Эффект Холла.



# Произведения векторов

Скалярное произведение векторов:

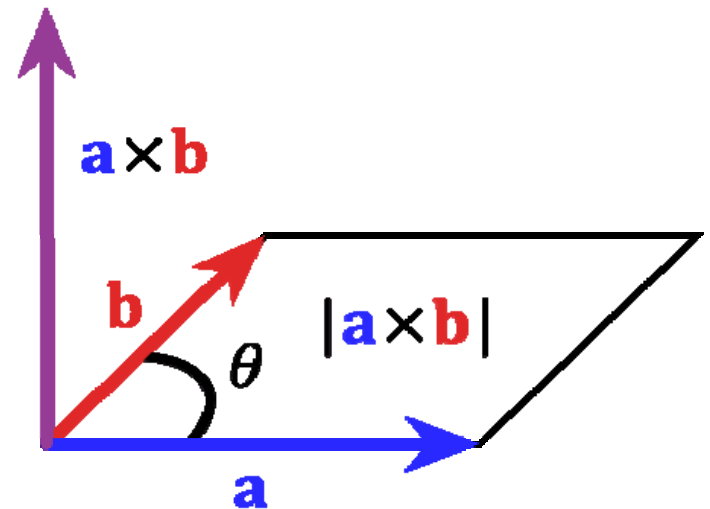
$$|\vec{A} \cdot \vec{B}| = |\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \cdot \cos \theta \quad K = \vec{A} \cdot \vec{B}$$



Векторное произведение векторов:

$$\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$$

$$|\vec{a} \times \vec{b}| = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \sin \theta$$



# Закон Био-Савара(-Лапласа)

Магнитная индукция, создаваемая движущимся электрическим зарядом, равна:

$$\vec{B} = \frac{q\mu_0}{r^3} (\vec{v} \times \vec{r})$$

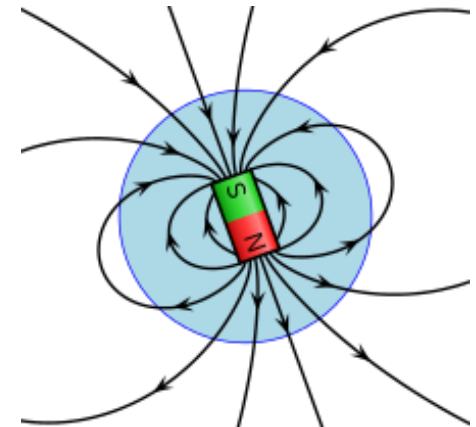
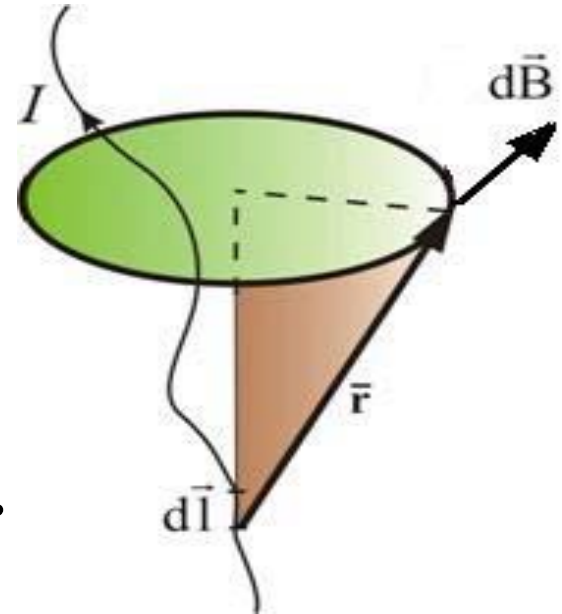
Элемент тока создает поле с индукцией:

$$d\vec{B} = \frac{I\mu_0}{r^3} (d\vec{l} \times \vec{r})$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$  – «магнитная проницаемость вакуума»

А как выглядят те же формулы в системе СГС?

$$\vec{B} = \frac{q}{cr^3} (\vec{v} \times \vec{r}) \quad d\vec{B} = \frac{I}{cr^3} (d\vec{l} \times \vec{r})$$



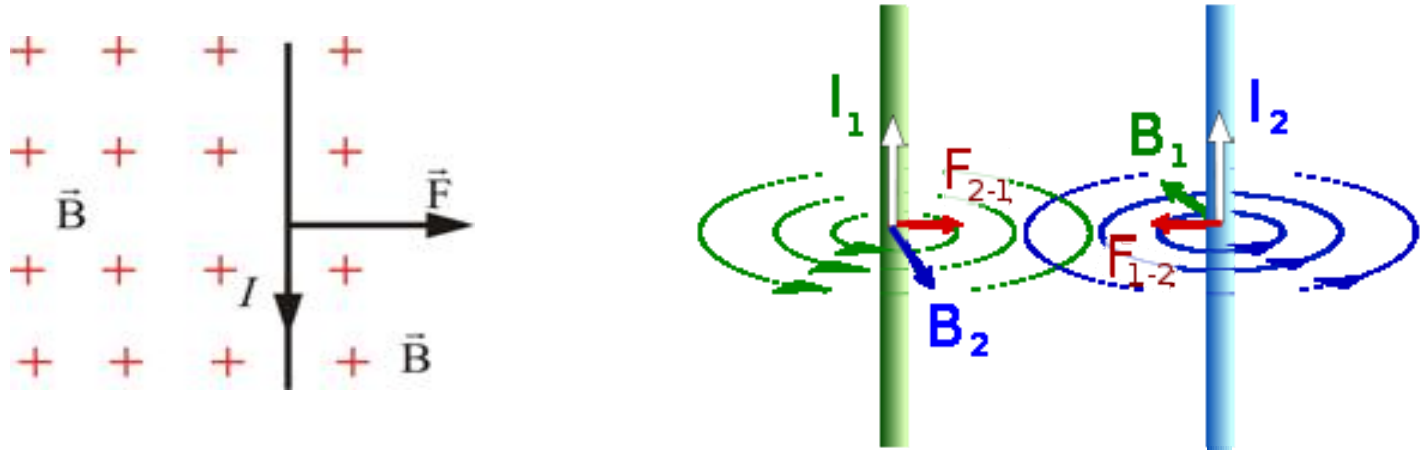
# Сила Ампера (Лоренца)

Сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле, равна:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad \vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Сила, действующая в магнитном поле на элемент тока:

$$d\vec{F} = qnS((\vec{v}d\vec{l}) \times \vec{B}) = I(d\vec{l} \times \vec{B})$$



В гауссовой системе те же формулы имеют вид:

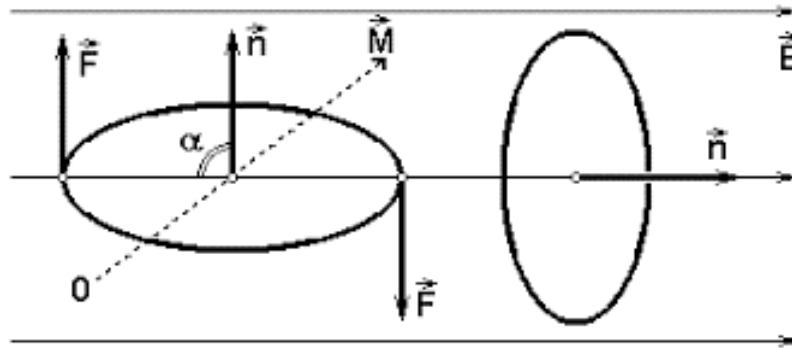
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B}) \quad d\vec{F} = \frac{I}{c}(d\vec{l} \times \vec{B})$$

# Рамка с током в магнитном поле.

## Магнитный поток

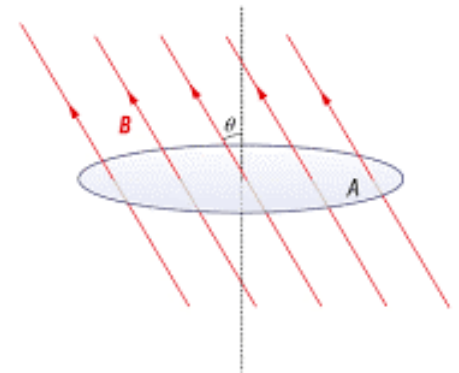
Механический момент сил, действующий на замкнутый контур с электрическим током равен ( $\vec{P} = I \cdot \vec{S}$  – **магнитный момент** контура)

$$\vec{M} = \vec{P} \times \vec{B} \quad \left| \vec{M} \right| = I \cdot S \cdot B \cdot \sin \alpha$$



Магнитный поток, проходящий через рамку с током:

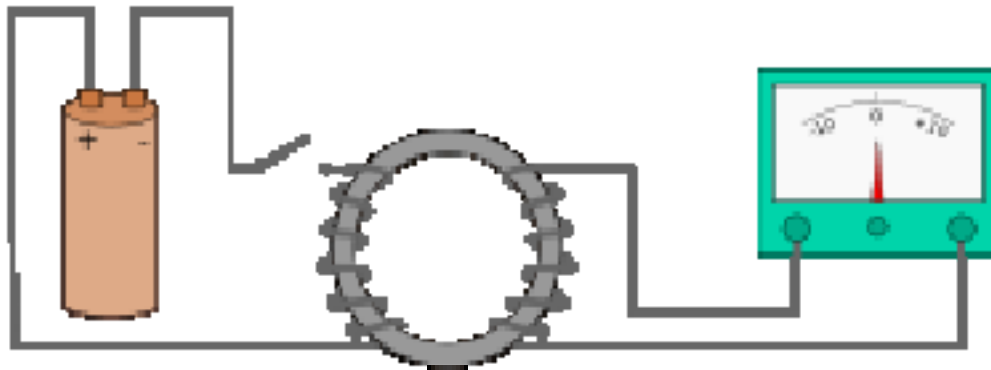
$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = \left| \vec{B} \right| \cdot \left| \vec{S} \right| \cdot \cos \alpha$$



# Электромагнитная индукция

Изменение магнитного потока, пронизывающего контур с током, возбуждает электрический ток в контуре, называемый **индукционным током**. Индукционный ток имеет такое направление, что его магнитное поле компенсирует изменение магнитного потока. Величина э.д.с. электромагнитной индукции равна:

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



# Генерация переменного тока

Электромагнитная индукция в плоском прямоугольном контуре:

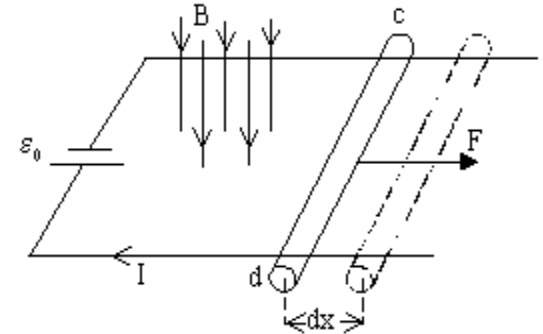
$$+ \quad dA_i = F \cdot dx = B \cdot I \cdot l \cdot dx = I \cdot d\Phi$$

$$dA_R = I^2 \cdot R \cdot dt$$

$$= \quad dA_\varepsilon = \varepsilon \cdot I \cdot dt \Rightarrow \varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} + I \cdot R \Rightarrow$$

$$I = \frac{\varepsilon - \frac{d\Phi}{dt}}{R}$$

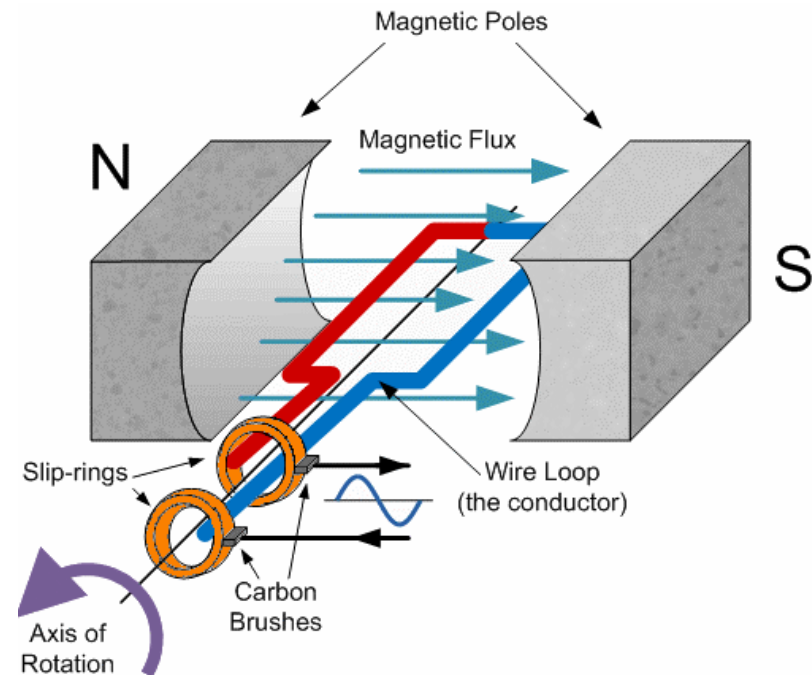
$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$



Вращающаяся рамка в поле постоянного магнита:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \phi = B \cdot S \cdot \cos \omega t$$

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = B \cdot S \cdot \sin \omega t$$

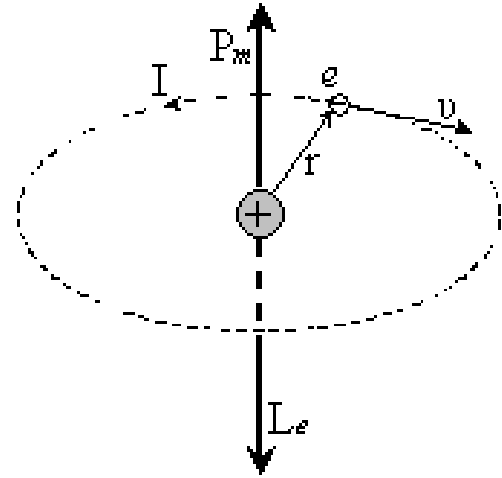


# Магнитное поле в веществе

Каждый электрон создает собственный орбитальный магнитный момент:

$$\vec{P}_m = I \cdot \vec{S}$$

$$I = q_e \cdot f = \frac{q_e \cdot v}{2\pi r} \Rightarrow \vec{P}_m = \frac{q_e \cdot v}{2\pi r} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \vec{n}$$



Спиновый магнитный момент электрона:

$$P = \frac{q_e \cdot h}{4\pi \cdot m_e} = m_B = 9.27 \cdot 10^{-24} \frac{\text{Джс}}{\text{Тл}}$$

Общий магнитный момент атома равен сумме магнитных моментов всех электронов:

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n \vec{P}_m + \sum_{i=1}^n \vec{P}_{sp}$$

Вектор намагниченности единицы объема вещества равен:

$$\vec{J} = \frac{\sum_{k=1}^N \vec{P}_k}{V}$$



# Магнитная проницаемость

Полное магнитное поле в веществе есть сумма внешнего и внутреннего магнитных полей. **Магнитная проницаемость** и **магнитная восприимчивость** вводятся следующим образом:

$$\vec{B}_{total} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{int} = \mu \vec{B}_0 = \vec{B}_0 \cdot (1 + \chi)$$

В дополнении к магнитной индукции вводят еще вектор **интенсивности магнитного поля**:

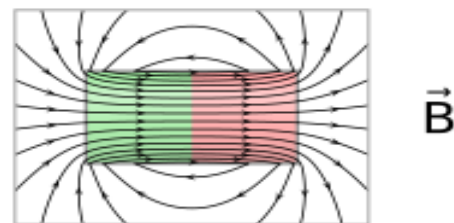
$$\vec{B}_{total} = \mu \mu_0 \vec{H}$$

или поскольку  $\vec{J} = \chi \cdot \vec{H}$ , то

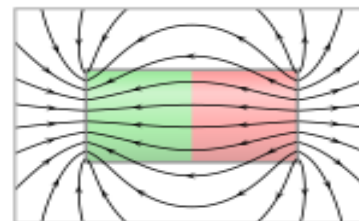
$$\vec{B}_{total} = (1 + \chi) \mu_0 \vec{H} \text{ или } \vec{B}_{total} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}$$

Объемная плотность энергии магнитного поля:

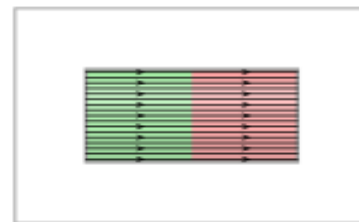
$$w = \frac{\mu \mu_0 H^2}{2}$$



$\vec{B}$



$\vec{H}$

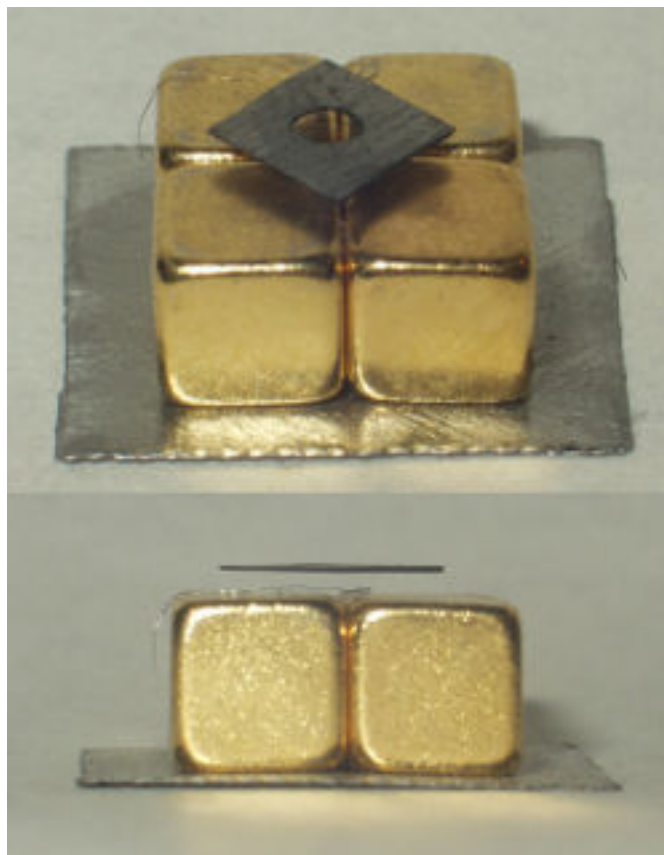


$\vec{J}$

# *Диамagnetики*

Все вещества обладают диамагнитными свойствами (выталкиваются из внешнего магнитного поля), но в диамагнетиках эти свойства не скрываются более сильными эффектами. Au, Ag, Si, Ge, Bi, C, белки, вода – диамагнетики.

$$\chi \approx -(10^{-4} - 10^{-6})$$

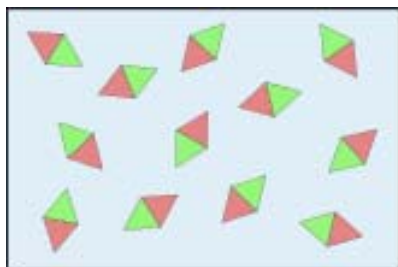


# Парамагнетики

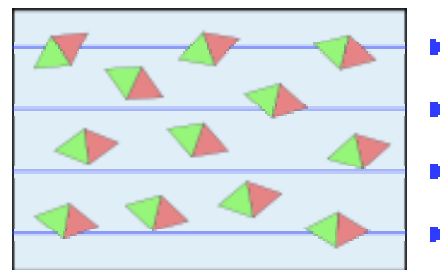
Атомы или молекулы некоторых веществ имеют свой собственный магнитный момент и в отсутствии внешнего поля, но если таковое приложено, стремятся выстроить свой вектор намагниченности в направлении поля (газообразные кислород и азот, воздух, Al, Mo, щелочные металлы)

$$\chi \approx +(10^{-4} - 10^{-6})$$

без поля



во внешнем поле



При температурах выше точки Кюри ферромагнетики переходят в диамагнитное состояние.

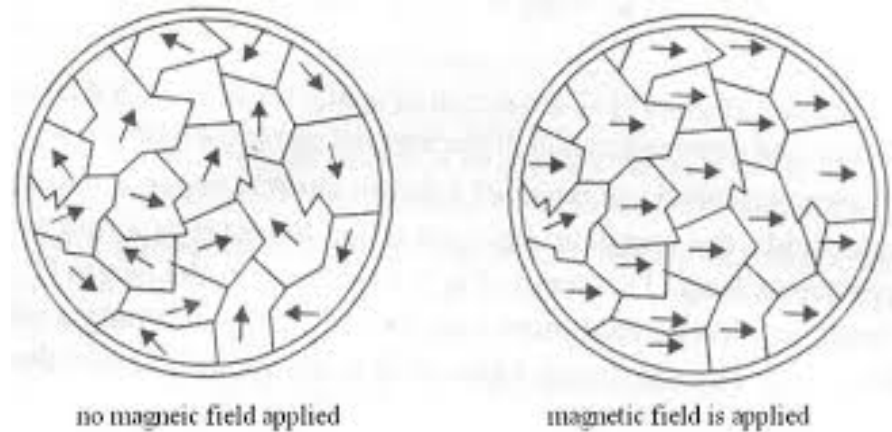
# Ферромагнетики

Восемь металлов (Fe, Ni, Co, Gd, Dy, Ho, Tb, Er) и огромное количество сплавов относятся к ферромагнетикам. Макроскопические участки ферромагнетика имеют нескомпенсированный магнитный момент, вектор которого направлен в одну сторону (домены).

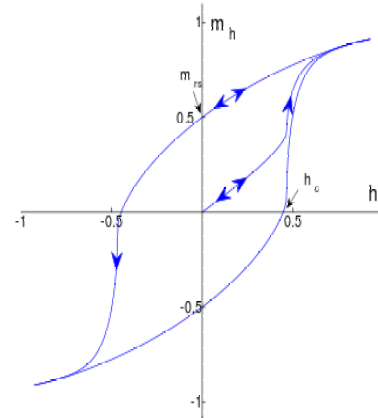
$$\chi \approx +(10^3 - 10^4)$$

**Законе Кюри** для ферромагнетиков

$$\chi = \frac{c}{T}$$

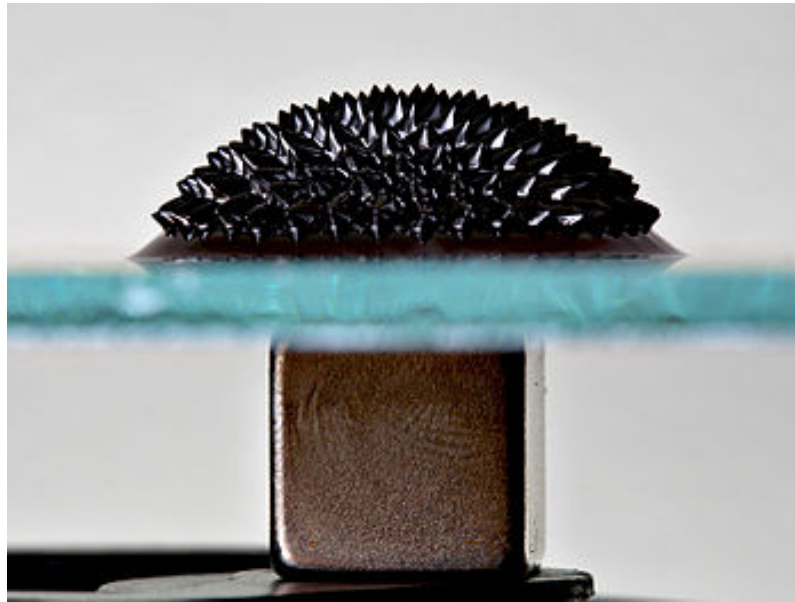


Ферромагнетикам присущ гистерезис ( $h_c$  – **коэрцитивная сила**,  $m_{rs}$  – **остаточная намагниченность**)



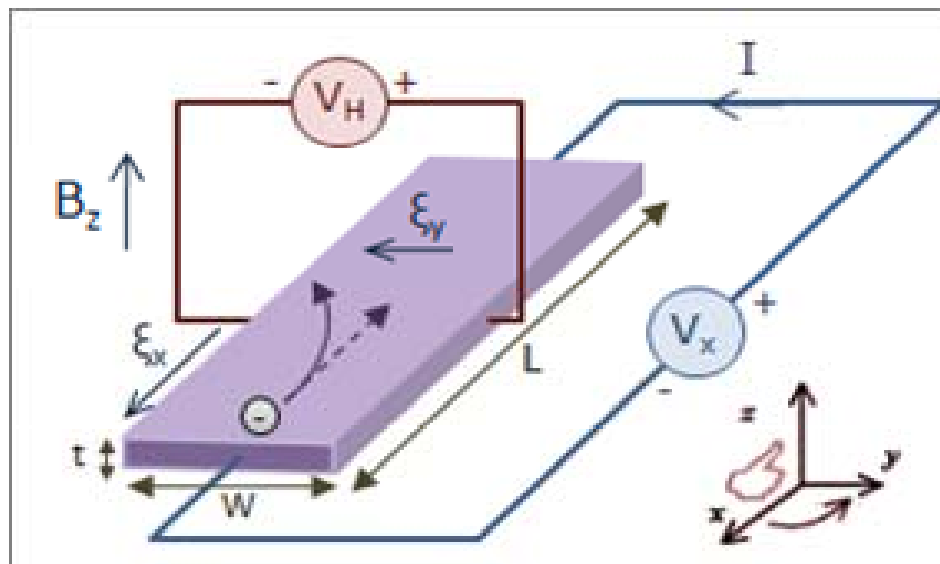
# *Ферромагнитные жидкости*

Ферромагнитные жидкости – это коллоидные растворы наночастиц ферромагнетика в воде или органическом растворителе. По своим магнитным свойствам это парамагнетики.



# Эффект Холла в полупроводниках

Поскольку полупроводник можно рассматривать содержащим носители заряда противоположного знака, магнитное поле способно «разделять» эти заряды. В результате генерируется э.д.с. Холла.



$$V_h = R \cdot B_z \cdot I$$