

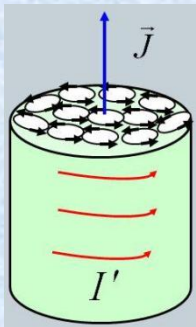
Намагниченность

Под действием внешнего магнитного поля B_0 вещество приобретает внутренний магнитный момент

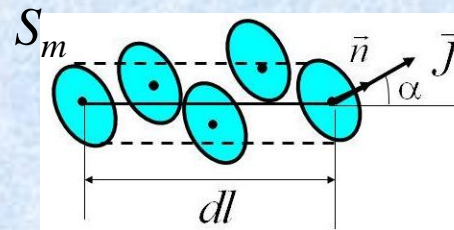
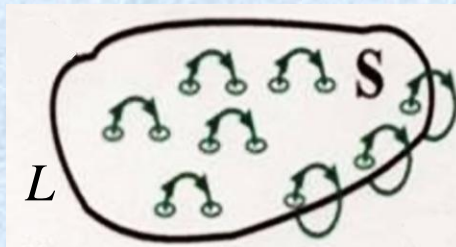
$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

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

Намагниченность $\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{p}_m = n \langle \vec{p}_m \rangle$ [J] = A/м



Токи намагничения



$$dV = S_m \cos \alpha dl$$

$$dI' = I_m n dV = I_m S_m n \cos \alpha dl = \vec{J} \cdot d\vec{l}$$

Напряженность магнитного поля

$$dI' = \vec{J} \cdot d\vec{l} \quad \oint_L \vec{J} \cdot d\vec{l} = I'_\Sigma = \int_S \vec{j}' d\vec{S} \quad \boxed{\text{rot } \vec{J} = \vec{j}'}$$

Циркуляция вектора J определяется суммой токов намагничения

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_\Sigma + I'_\Sigma = \mu_0 \int_S \vec{j} + \vec{j}' d\vec{S} \quad \boxed{\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \vec{j}'}$$

Циркуляция вектора B определяется суммой токов проводимости и токов намагничения

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \right) \cdot d\vec{l} = I_\Sigma = \int_S \vec{j} d\vec{S} \quad \boxed{\text{rot } \vec{H} = \vec{j}}$$

H – напряженность магнитного поля

$$\boxed{[H] = \text{А/м}}$$

Циркуляция вектора H определяется только токами проводимости

Связь B и H

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

χ – магнитная восприимчивость (безразмерная)

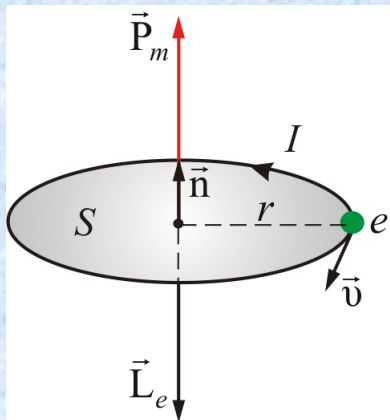
$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

μ – магнитная проницаемость (безразмерная)

В отличие от диэлектриков μ может быть как больше, так и меньше единицы

Диамагнетики ($\mu < 1$)

К диамагнетикам относятся вещества, магнитные моменты атомов или молекул которых в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю (инертные газы, водород, азот, цинк, медь...)



Вращающемуся электрону (орбитальному току) соответствует магнитный момент

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} = evS\vec{n}; \quad p_m = \frac{ev\pi r^2}{2\pi r} = \frac{evr}{2}$$

Вращающемуся электрону соответствует орбитальный момент импульса

$$\vec{L} = m_e \vec{r} \times \vec{v}; \quad L = m_e r v$$

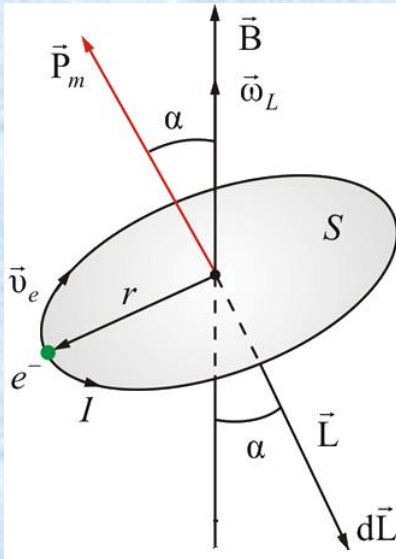
$$p_m = \gamma L$$

$$\gamma = \frac{e}{2m_e} \text{ — гиромагнитное отношение}$$

Вектора механического и магнитного моментов антипараллельны

Электрон в магнитном поле

В магнитном поле на орбитальный ток действует момент сил



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

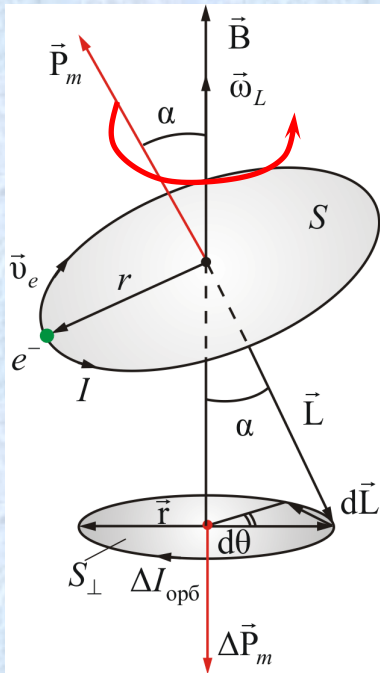
При этом изменяется орбитальный момент импульса электрона

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = [\vec{p}_m \times \vec{B}] = [-\gamma \vec{L} \times \vec{B}]$$

Аналогично изменяется вектор орбитального магнитного момента электрона

$$\frac{d\vec{p}_m}{dt} = [-\gamma \vec{p}_m \times \vec{B}]$$

Электрон в магнитном поле



Орбита электрона прецессирует вокруг направления магнитного поля (ларморовская прецессия) с угловой скоростью

$$\vec{\Omega} = \gamma \vec{B} = \frac{e}{2m_e} \vec{B}$$

Появляется дополнительный орбитальный ток, противоположный току I , создающему поле

$$\Delta I_{\text{орб}} = \frac{e\Omega}{2\pi}$$

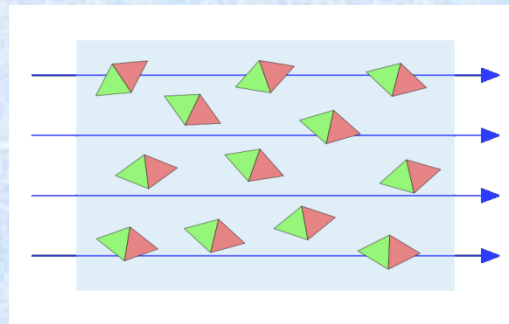
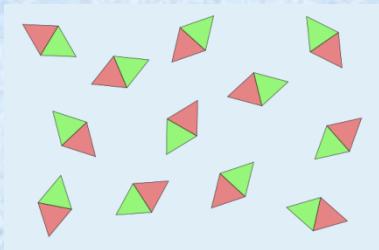
Возникает наведенный орбитальный магнитный момент

$$\Delta \vec{p}_m = -\Delta I_{\text{орб}} \vec{S}_{\perp} = -\frac{e^2 S_{\perp}}{4\pi m_e} \vec{B}$$

Дополнительный момент антипараллелен вектору $B \Rightarrow$ магнитная восприимчивость $\chi < 0$ ($\sim 10^{-5}$), магнитная проницаемость $\mu < 1$

Парамагнетики ($\mu > 1$)

Вещества парамагнетика обладают собственными магнитными моментами, которые под действием внешних полей ориентируются по полю (кислород, алюминий, платина...)

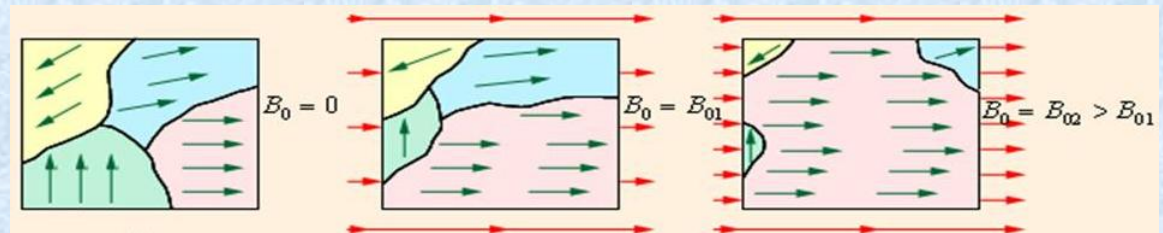


магнитная восприимчивость $\chi > 0$ ($\sim 10^{-5}$),
магнитная проницаемость $\mu > 1$

Ферромагнетики ($\mu \gg 1$)

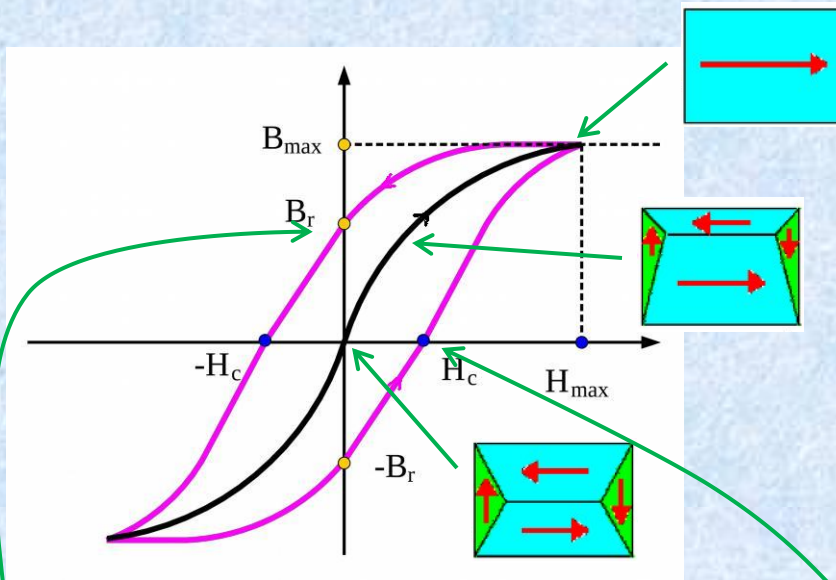
Ферромагнетик — такое вещество, которое (при температуре ниже точки Кюри) способно обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля (железо, кобальт, никель...)

Доменная структура:
кристалл разбит на
области со спонтанной
намагниченностью



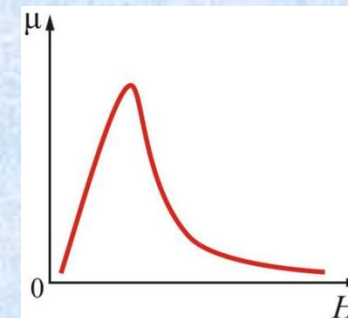
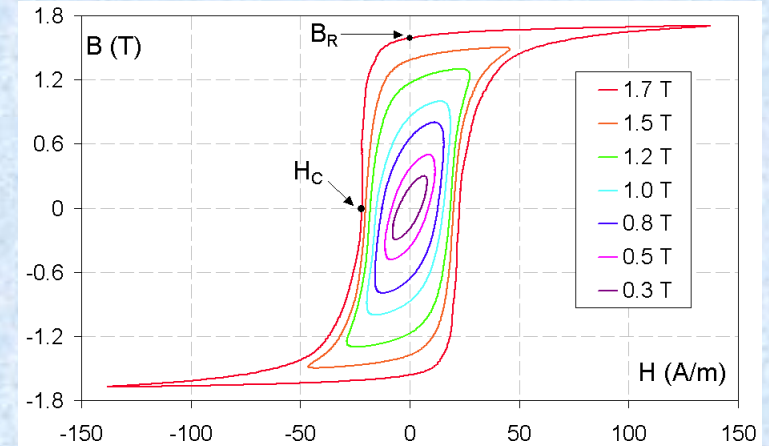
Ферромагнетики. Гистерезис

Связь между B и H неоднозначная, намагниченность зависит от предыстории, после снятия поля сохраняется остаточная намагниченность

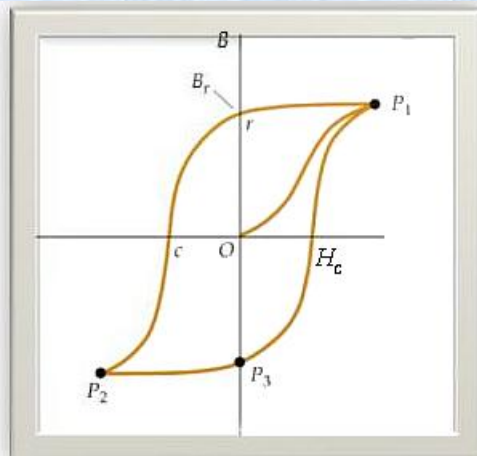


Остаточная индукция

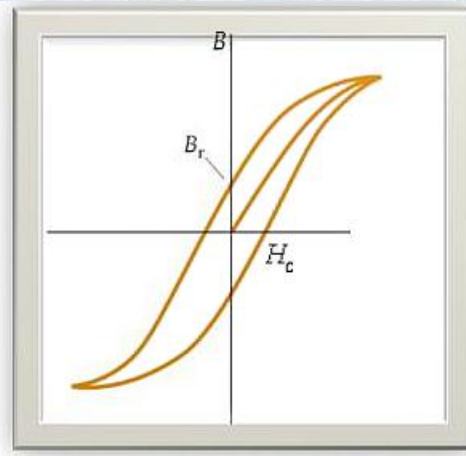
Коэрцитивная сила



Ферромагнетики

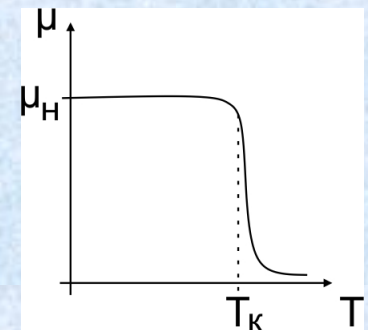


Жесткие ферромагнетики
 $H_c \sim 10^5$ А/м
Применяются для
постоянных магнитов



Мягкие ферромагнетики
 $H_c < \sim 100$ А/м
Применяются для сердечников
трансформаторов

Точка Кюри: температура, выше которой пропадают ферромагнитные свойства, фазовый переход второго рода (для железа 770°C)



Магнетики

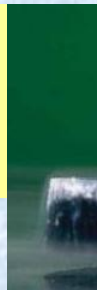
Диамагнетики

Атомы не обладают собственным магнитным моментом

μ немного меньше единицы

Выталкиваются из магнитного поля

Сверхпроводники – идеальные диамагнетики ($\mu = 0$)



Парамагнетики

Атомы обладают собственным магнитным моментом

μ немного больше единицы

Втягиваются в магнитное поле

Ферромагнетики

Имеется дальний порядок магнитных моментов атомов

μ много больше единицы ($10^4 - 10^5$)

Гистерезис

При температуре выше точки Кюри превращаются в парамагнетики



Электро – магнитные аналогии

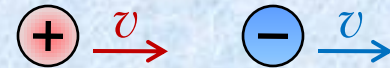
Электричество

Магнетизм

Источники

Заряды

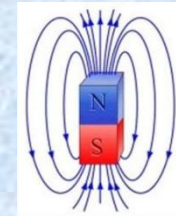
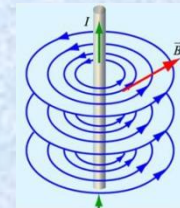
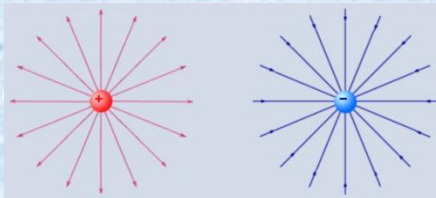
Токи



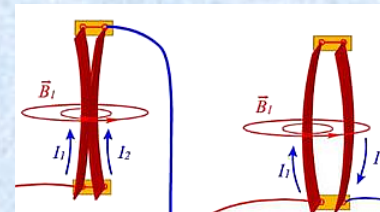
Тип поля

Потенциальный

Соленоидальный



Взаимодействие



Электро – магнитные аналогии

Электричество

Магнетизм

Силовая характеристика поля

Напряженность E .

Источниками являются как сторонние, так и связанные заряды

Индукция B .

Порождается токами проводимости и токами намагничения

Дополнительная характеристика поля

Индукция D .

Источниками являются только сторонние заряды

Напряженность H .

Порождается только токами проводимости

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E} = \vec{P} + \epsilon_0\vec{E}$$

$$\epsilon > 1$$

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

$$\mu < > 1$$

Граничные условия

Электричество



$$E_{1\tau} = E_{2\tau}$$

$$D_{1n} = D_{2n}$$

(если на границе нет
сторонних зарядов)

Магнетизм



$$H_{1\tau} = H_{2\tau}$$

(если на границе нет
токов проводимости)

$$B_{1n} = B_{2n}$$