

Магнитное поле

Магнитный момент атома.

Ларморовская частота.

Парамагнетики и диамагнетики.

Магнитное поле в веществе.

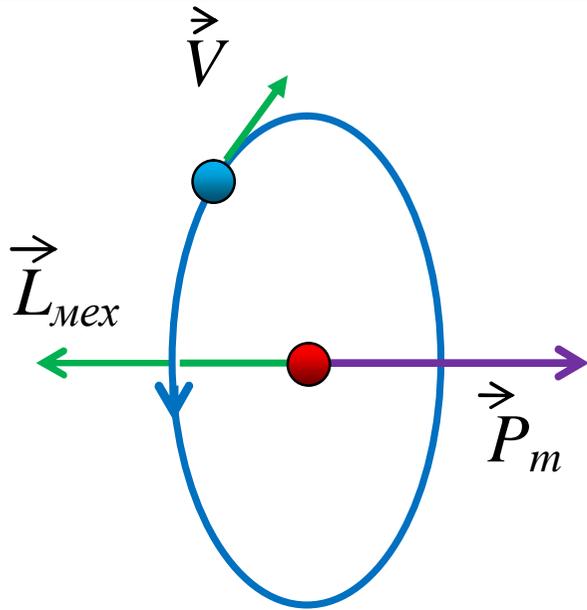
Магнитная проницаемость.

Условия для поля на границе раздела двух магнетиков.

Ферромагнетики.

Гистерезис в ферромагнетиках.

Орбитальный магнитный момент



Электрон, вращающийся в атоме по орбите, эквивалентен витку с током. Орбитальному движению электрона как материальной точке соответствует механический момент импульса. Витку с током - магнитный момент. Он называется орбитальным.

$$P_m = IS$$

$$L_{mex} = J\omega$$

$$I = e/\tau \quad J = mr^2 \quad V = \omega r$$

$$P_m = IS = eVr/2 \quad L_{mex} = mVr \quad \frac{P_m}{L_{mex}} = \frac{e}{2m} \text{ гиромангнитное отношение}$$

Орбитальный механический момент квантуется

$$L_{mex} = n\hbar \quad \hbar = h/2\pi \quad h = 6.626176 \times 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

Спин

Электрон также обладает и собственным (спиновым) механическим L_{mex}^s
и магнитным моментом P_m^s .

Спиновое гиромангнитное отношение

$$\frac{P_m^s}{L_{mex}^s} = \frac{e}{m}$$

Магнитный момент атома

Магнитный момент ядра пренебрежимо мал.

$$P_m^a = \sum_{i=1}^N P_m^{orb} + \sum_{i=1}^N P_m^s$$

Магнетики – вещества, которые во внешнем магнитном поле сами становятся источниками собственного магнитного поля.

Классификация магнетиков:

✓ $P_m^a = 0$ - диамагнетики;

✓ $P_m^a \neq 0$ - парамагнетики.

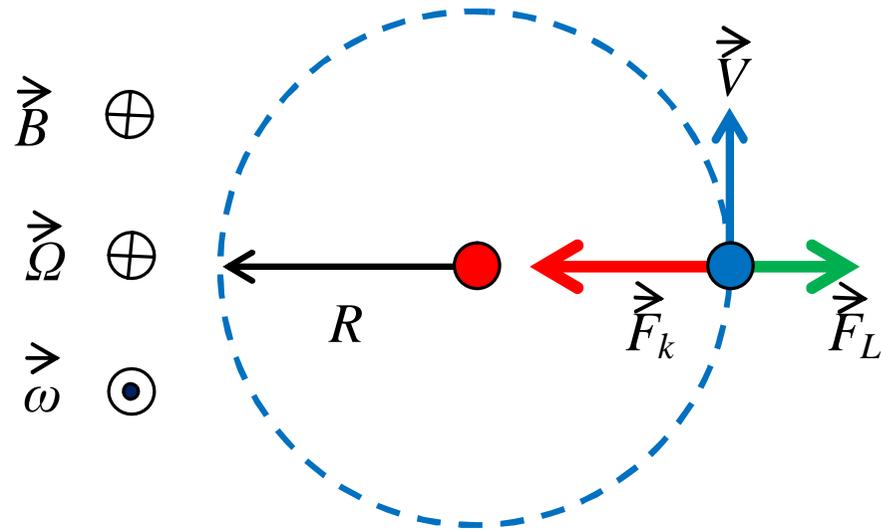
Атом в магнитном поле

В отсутствии магнитного поля кулоновская сила сообщает вращающемуся вокруг ядра электрону нормальное ускорение.

В магнитном поле на движущийся электрон действует также сила Лоренца.

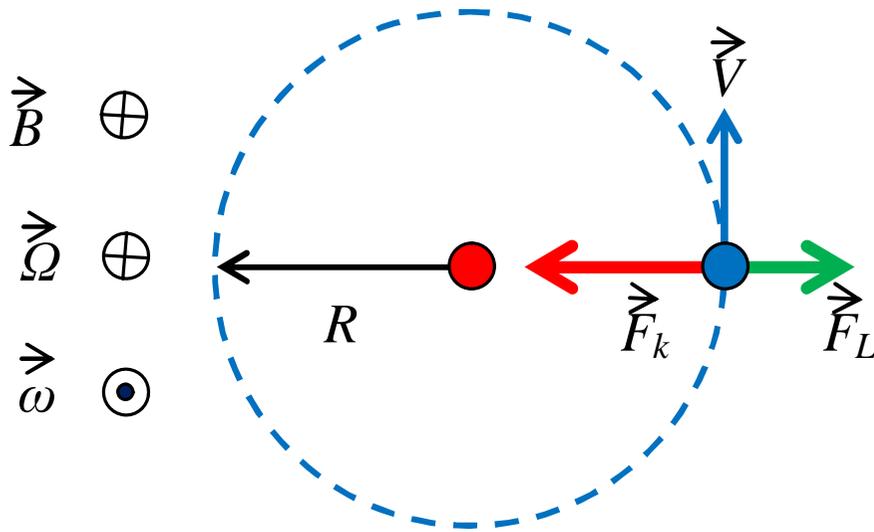
$$V = \omega R$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_k = m \frac{V_0^2}{R} \\ F_k - eVB = m \frac{V^2}{R} \end{array} \right.$$



$$-e\omega RB = mR(\omega^2 - \omega_0^2)$$

Атом в магнитном поле



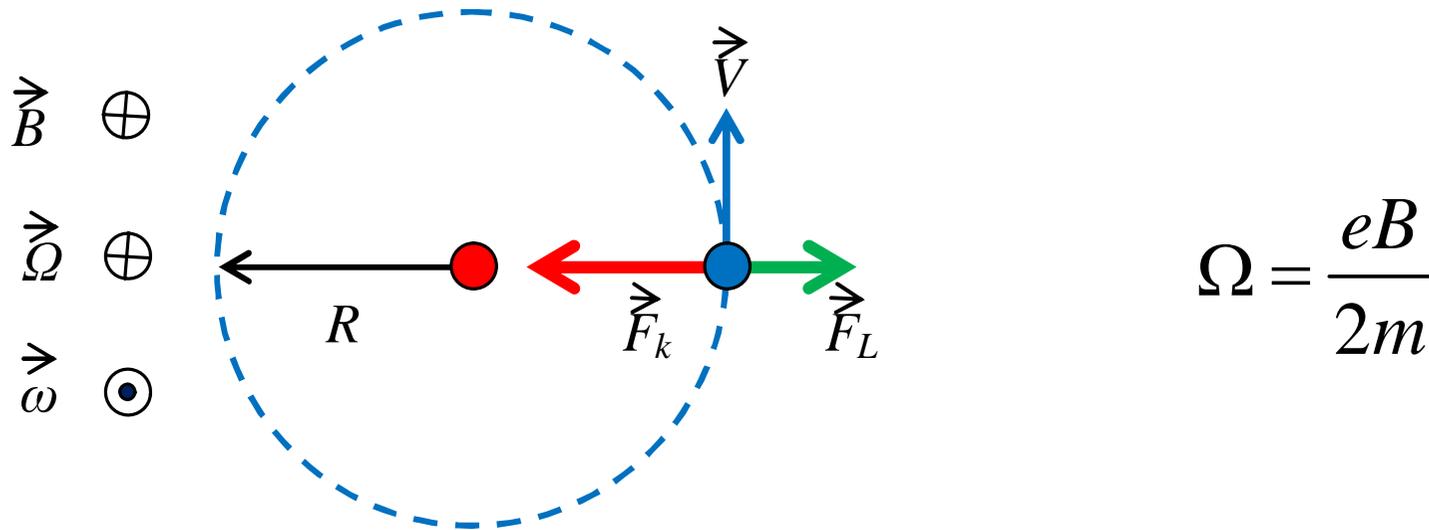
Взаимодействие электрона с ядром значительно превышает воздействие внешнего поля, и поэтому радиус электронной орбиты в магнитном поле измениться не может. Частота изменяется незначительно

$$\omega - \omega_0 = \Delta\omega \ll \omega$$

$$\omega^2 - \omega_0^2 = (\omega - \omega_0)(\omega + \omega_0) \approx 2\Delta\omega\omega$$

$$\Delta\omega = -\frac{eB}{2m}$$

Атом в магнитном поле

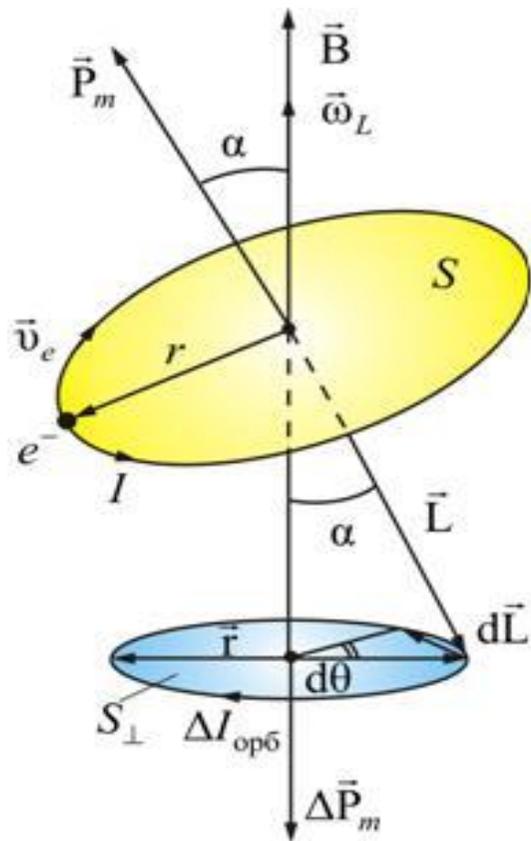


Сила Лоренца направлена против силы Кулона. Взаимодействие электрон – ядро уменьшается, поэтому и частота вращения электрона уменьшается. Следовательно, ларморовская частота направлена по вектору индукции.

Магнитное поле придает дополнительное движение заряженной частице (электрону). Дополнительное движение можно рассматривать как индукционный ток, а по правилу Ленца он направлен против поля его породившего. Это дополнительное движение называется прецессионным.

Атом в магнитном поле

Теорема Лармора: При наличии внешнего постоянного магнитного поля внутреннее движение электронов атома не изменяется, но атом в целом получает дополнительное вращение с угловой скоростью



$$\vec{\Omega} = \frac{e}{2m} \vec{B}$$

Результатом влияния магнитного поля на орбиту электрона в атоме является прецессия орбиты и орбитального магнитного момента электрона с ларморовской угловой скоростью вокруг оси, проходящей через ядро атома параллельно вектору индукции магнитного поля.

Диамagnetики

$$P_m^a = 0$$



Прецессия орбиты электрона приводит к появлению индукционного тока, который создает поле, направленное противоположно внешнему, вызвавшему эту прецессию. Магнитный момент этого тока (прецессионного движения)

$$\Delta P_m^a = I_{\text{орб}} S = \frac{e}{T} S = \frac{e}{2\pi} \omega \pi r^2 = \frac{e^2 r^2}{4m} \vec{B}$$

$$\Delta P_m^a = -\beta H \quad \beta = \frac{e^2 \mu_0}{4m} \sum_{i=1}^N r_i^2$$

Диамagnetики

Намагниченность - магнитный момент единицы объема

$$M = P_m / V$$

$$M = n \Delta P_m^a = \chi H$$

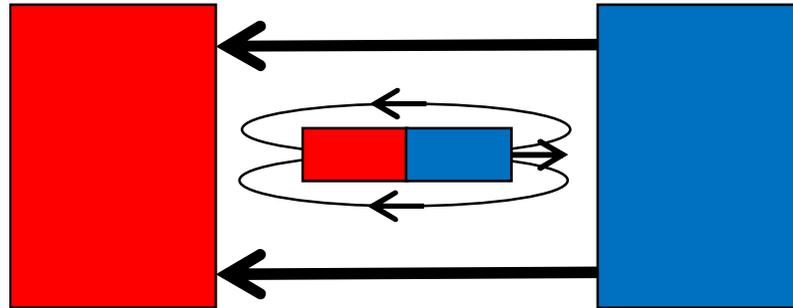
$$\chi = -n\beta < 0$$

магнитная восприимчивость

$$|\chi| \sim 10^{-6}$$

Все вещества обладают диамагнитными свойствами. Магнитные свойства диамагнетика не зависят от температуры.

Диамagnetики

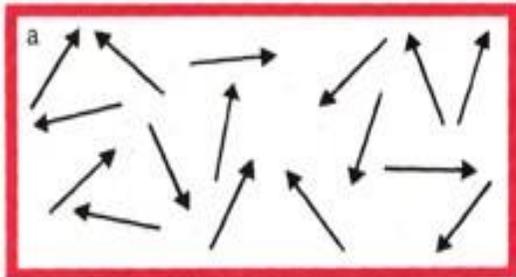


Удлиненный образец диамagnетика в однородном магнитном поле ориентируется перпендикулярно силовым линиям индукции. В неоднородном магнитном поле он вытесняется в область слабого поля. Приставка «диа» в слове диамagnетик по-гречески означает «поперек».

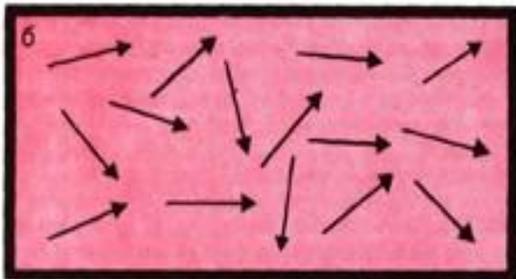
Парамагнетики

$$P_m^a \neq 0$$

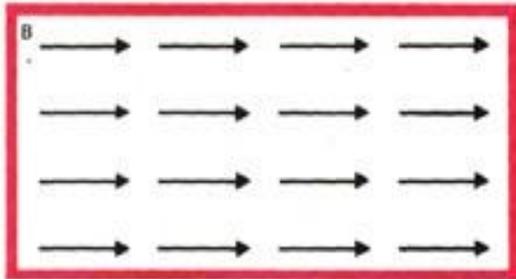
O_2, Li, Na, Al



Атомы парамагнетика имеют собственный, отличный от нуля, магнитный момент. Тепловое движение беспорядочно дезориентирует собственные магнитные моменты атомов парамагнетика, поэтому в отсутствие внешнего магнитного поля парамагнетик не намагничен.



В магнитном поле возникает преимущественная ориентация магнитных моментов атомов. Магнитные моменты ориентируются вдоль линий поля. Тепловое движение нарушает этот процесс.



В сильных полях при низких температурах наступает режим насыщения.

Парамагнетики

$$M = \chi H \quad \chi > 0$$

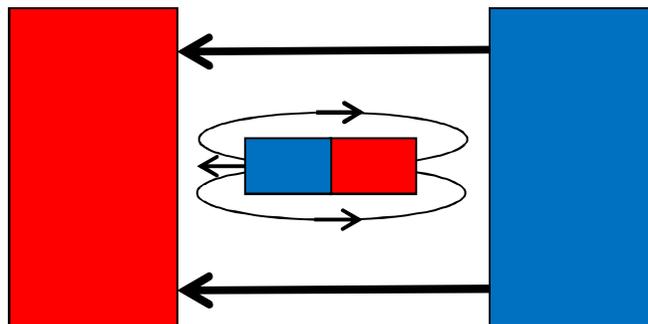
$$\chi = \frac{n\mu_0}{3kT} \left(P_m^a \right)^2 \quad \chi \sim 10^{-5} \div 10^{-3}$$

В сильных полях при низких температурах наступает режим насыщения

$$P_m^a H \gg kT$$

Атомы всех веществ обладают диамагнитными свойствами. Если собственный магнитный момент атомов вещества отличен от нуля, то при помещении такого вещества в магнитное поле в нем будут возникать оба эффекта: и диамагнитный, и парамагнитный. Однако диамагнитный эффект существенно слабее парамагнитного и на его фоне практически незаметен.

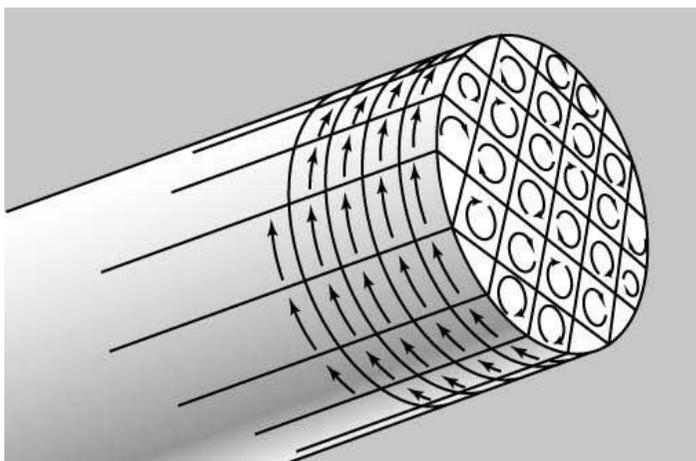
Парамагнетики



Удлиненный образец парамагнетика в однородном магнитном поле ориентируется вдоль силовых линий индукции. В неоднородном магнитном поле он втягивается в область сильного поля. Приставка «пара» в слове парамагнетик по-гречески означает «вдоль».

Магнитное поле в магнетиках

Магнетики – вещества, которые во внешнем магнитном поле сами становятся источниками собственного магнитного поля.

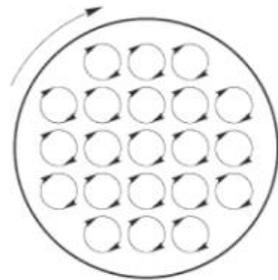
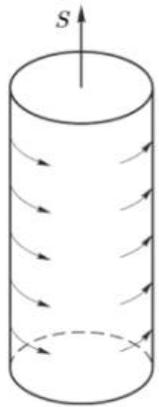


Диамагнетики и парамагнетики относятся к классу слабомагнитных веществ.

Атомные токи внутри магнетика полностью компенсируют друг друга. Остается лишь амперовский ток на его поверхности.

Амперовский ток - ток в обмотке соленоида.

Магнитное поле в магнетиках



$$M = \frac{P_m}{V} = \frac{ISN}{Sl} = \frac{ISnl}{Sl} = In$$

$$\left. \begin{array}{l} B_a = \mu_0 nI \\ M = \chi H \end{array} \right\} B_a = \mu_0 \chi H$$

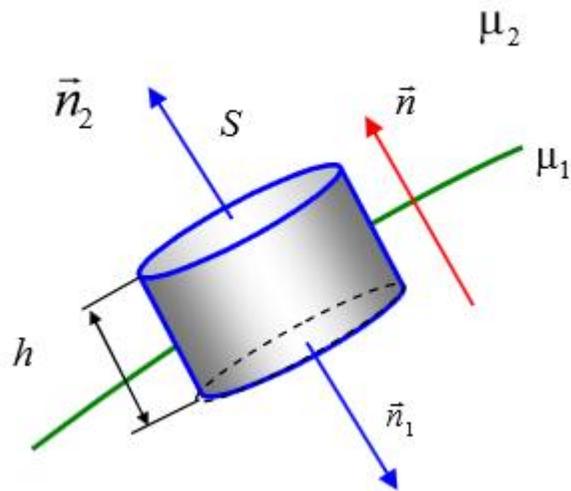
$$B_0 = \mu_0 H$$

$$B = B_0 + B_a$$

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

$$\mu = 1 + \chi$$

Условия на границе раздела двух магнетиков



$$\oint B_n dS = 0 \quad h \rightarrow 0$$

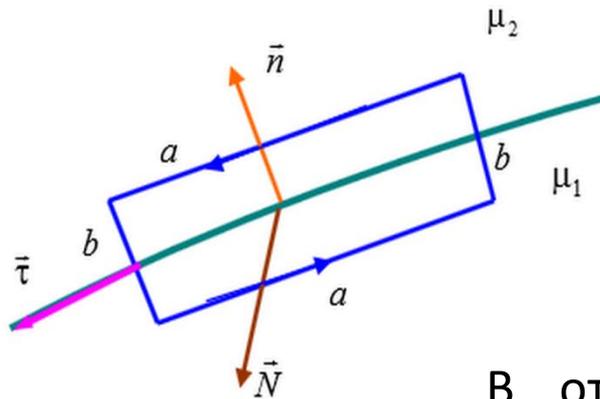
$$B_{1n} - B_{2n} = 0 \quad B_{1n} = B_{2n}$$

Нормальные составляющие вектора индукции непрерывны на границе раздела двух магнетиков.

$$B = \mu\mu_0 H \quad \mu_1 H_{1n} = \mu_2 H_{2n}$$

Нормальные составляющие вектора напряженности терпят разрыв на границе двух магнетиков.

Условия на границе раздела двух магнетиков



$$\oint H_l dl = 0$$

$$b \rightarrow 0$$

$$H_{1\tau} - H_{2\tau} = 0$$

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

В отсутствие токов на границе тангенциальные составляющие вектора напряженности на границе раздела двух магнетиков непрерывны.

$$B = \mu\mu_0 H$$

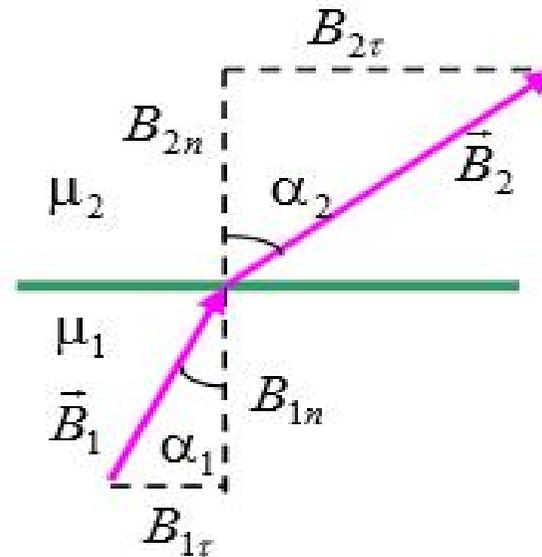
$$\mu_2 B_{1\tau} = \mu_1 B_{2\tau}$$

В отсутствие токов на границе тангенциальные составляющие вектора индукции терпят разрыв на границе двух магнетиков.

Условия на границе раздела двух магнетиков

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

$$\mu_2 B_{1\tau} = \mu_1 B_{2\tau}$$



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

$$\mu_1 H_{1n} = \mu_2 H_{2n}$$

$$\mu_2 \operatorname{tg} \alpha_1 = \mu_1 \operatorname{tg} \alpha_2$$

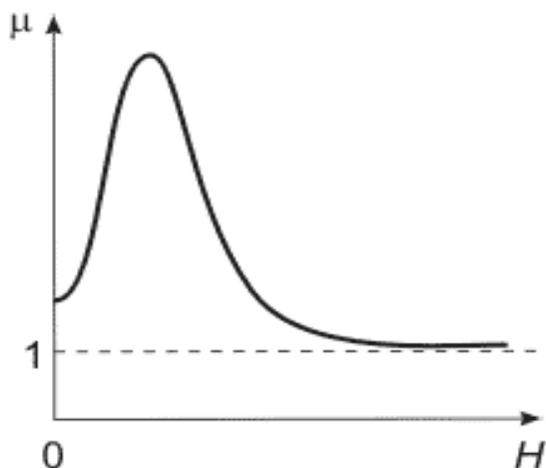
Ферромагнетики

Ферромагнетик — вещество, которое способно обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля.

Собственное поле ферромагнетика может существенно (в тысячу раз) превышать вызвавшее его внешнее поле. Чаще всего это вещество в кристаллическом состоянии. Типичные представители: *Fe*, *Ni*, *Co* и их сплавы.

При повышении температуры до критической, ее называют температурой (точкой) Кюри, ферромагнитные свойства исчезают. Точка Кюри для железа 780C^0 .

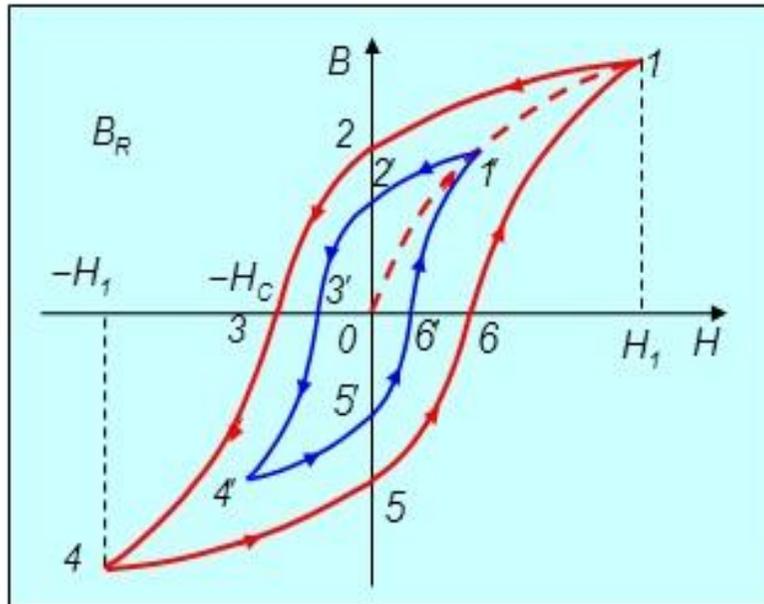
Магнитная проницаемость ферромагнетиков положительна и достигает значений $\mu=10^2\div 10^6$. Магнитная проницаемость железа достигает 5000.



Магнитная проницаемость ферромагнетиков в отличие от диа и парамагнетиков не является константой.

Кривая намагничивания ферромагнетика

Зависимость $B = B(H)$ неоднозначна.



Гистерезис (запаздывание) — свойство систем, отклик которых на воздействие зависит от их текущего состояния.

Магнитный гистерезис — зависимости намагниченности ферромагнетика не только от приложенного внешнего магнитного поля, но и от предыстории данного образца.

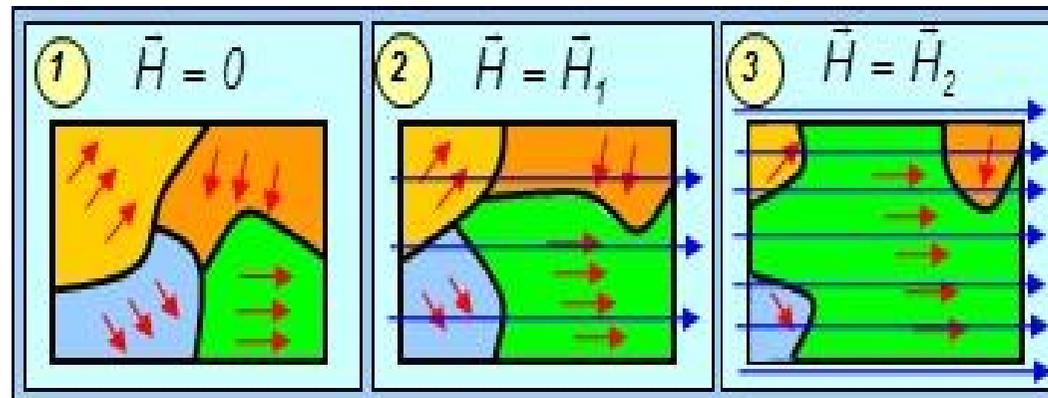
В точке 1 достигается магнитное насыщение. Отрезок 0-2 определяет остаточную магнитную индукцию, а отрезок 0-3 - коэрцитивную силу, характеризующую способность образца противостоять размагничиванию. Вначале процесс намагничивания носит обратимый характер, затем - необратимый. Площадь петли гистерезиса есть энергия тепловых потерь при намагничивании. Железо – петля узкая, сталь – широкая.

Доменная структура ферромагнетика

Свойства ферромагнетиков обусловлены их доменной структурой. Домен – макроскопическая, имеющая размеры 10^{-3} – 10^{-4} см, область спонтанной намагниченности. Магнитные моменты молекул или атомов домена направлены в одну сторону. Фактически домен намагничен до насыщения. Магнитные моменты различных доменов распределены по направлениям изотропно, поэтому в отсутствие поля результирующая намагниченность образца ферромагнетика равна нулю.

Доменная структура ферромагнетика

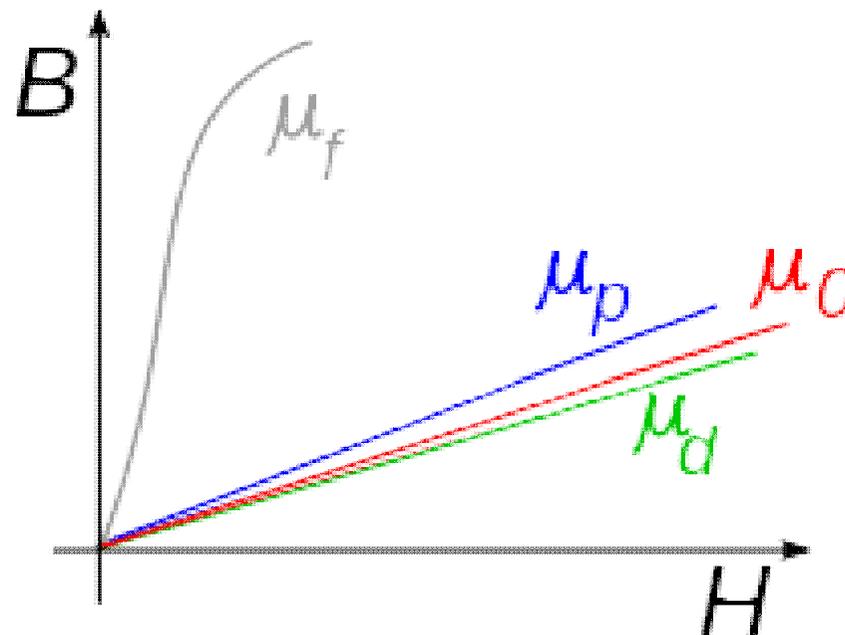
Во внешнем магнитном поле происходит увеличение объема «правильно» ориентированных относительно внешнего поля доменов за счет доменов с «неправильной» ориентацией. С увеличением поля происходит переориентация магнитных моментов в пределах всего домена. В слабых полях рост доменов носит обратимый характер, в более сильных полях процесс упорядочивания доменной структуры становится необратимым. В очень сильном поле все домены имеют одинаковую ориентацию, наступает магнитное насыщение ферромагнетика.



Намагничивание ферромагнетика во внешнем поле:

1 — $H = 0$; 2 — $H = H_1$; 3 — $H = H_2$, $H_2 > H_1$

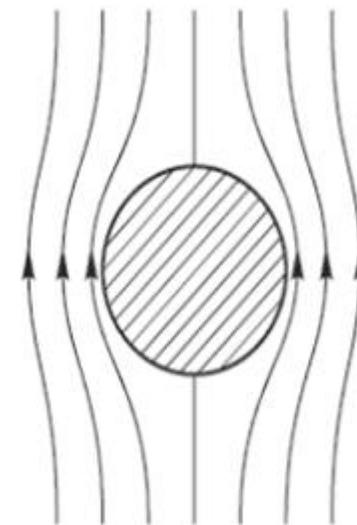
Магнетики в поле



Вакуум – μ_0 , диамагнетики – μ_d , парамагнетики – μ_p , ферромагнетики – μ_f .

Магнитное поле в сверхпроводниках

В сверхпроводнике, помещенном во внешнее магнитное поле, возникает поверхностный стационарный электрический ток, собственное магнитное поле которого противоположно приложенному полю. Индукция результирующего поля в толще образца равна нулю. Магнитное поле вытесняется из объема сверхпроводящего тела. Этот результат называется эффект Мейснера. Сверхпроводник можно рассматривать как идеальный диамагнетик.



Для заданной температуры повышение поля приводит к разрушению сверхпроводимости. Поле, при котором это происходит, называется критическим.