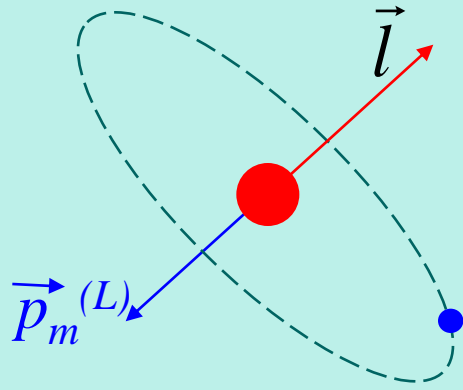


Тема 7. Магнитное поле в веществе

7.1. Понятие о магнитных моментах элементарных частиц



Орбитальный магнитный момент электрона

$$I = \frac{q}{t} = \frac{eN}{t} \quad I = \frac{evt}{t} = \frac{ev}{2\pi r}$$

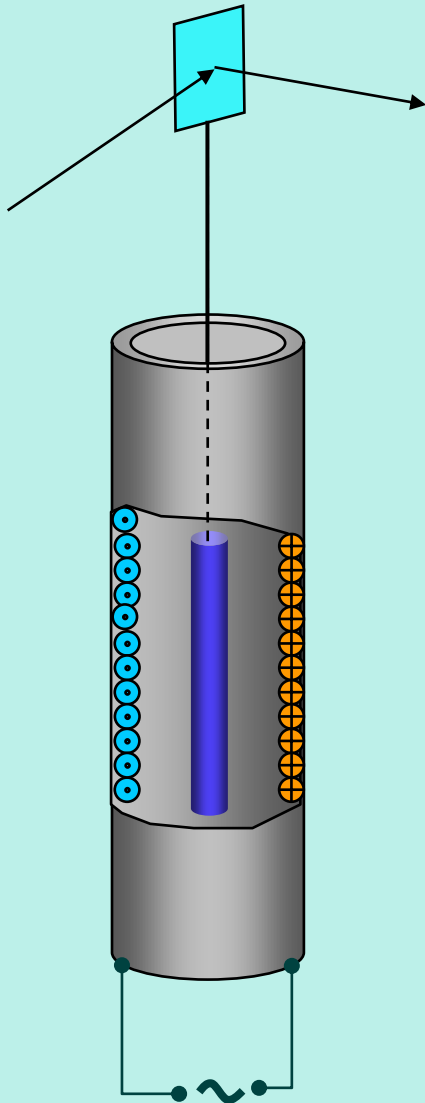
$$p_m = IS = \frac{evr}{2}$$

$$l = mvr$$

$$\frac{p_m}{l} = \frac{e}{2m}$$

Гиромагнитное
отношение

Опыты Эйнштейна и де Гааза с железным стержнем



$$\frac{p_m}{l} = \frac{e}{m}$$

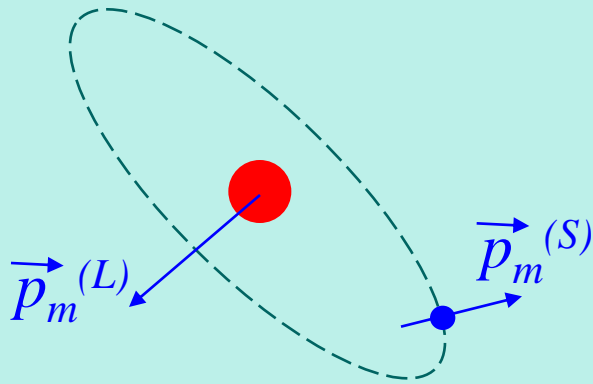
$$s = \frac{\hbar}{2}$$

Спин

$$p_m = \mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$$

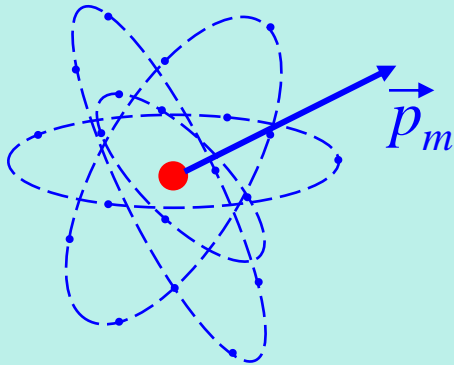
Магнетон
Бора

Магнитный момент атома



$$\vec{p}_m = \vec{p}_m^{(L)} + \vec{p}_m^{(S)}$$

Для многоэлектронного атома и молекулы

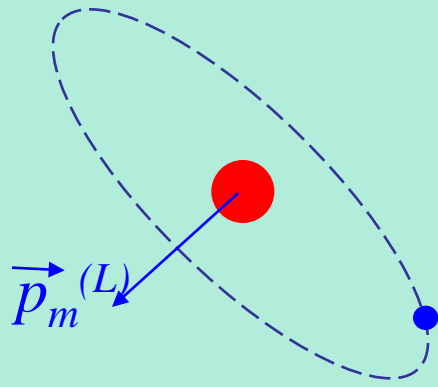


$$\vec{p}_m = \sum_i \vec{p}_{mi}^{(L)} + \sum_i \vec{p}_{mi}^{(S)}$$

(с учетом взаимодействия моментов)

Тема 7. Магнитное поле в веществе

- 7.1. Понятие о магнитных моментах элементарных частиц
- 7.2. Напряженность магнитного поля



Т.о.

$$\vec{p}_m \rightarrow \vec{B}'$$

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

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \vec{p}_m$$

намагниченность

I

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I_{\text{макр}} + I_{\text{мол}})$$

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \left(\sum_i I_i + \oint_L \vec{J} d\vec{l} \right)$$

$$\oint_L \underbrace{(\vec{B} - \mu_0 \vec{J})}_{\mu_0 \vec{H}} d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i$$

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

- напряженность
магнитного поля

$$[\text{H}] = \text{A} / \text{M}$$

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

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

χ - магнитная
восприимчивость

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

$$\mu = 1 + \chi$$

- магнитная
проницаемость
вещества

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_i I_i$$

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

$$\mu_{\text{нар}} > 1; \quad \mu_{\text{диа}} < 1$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$$

Стационарные материальные уравнения Максвелла

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho \cdot dV; \quad \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

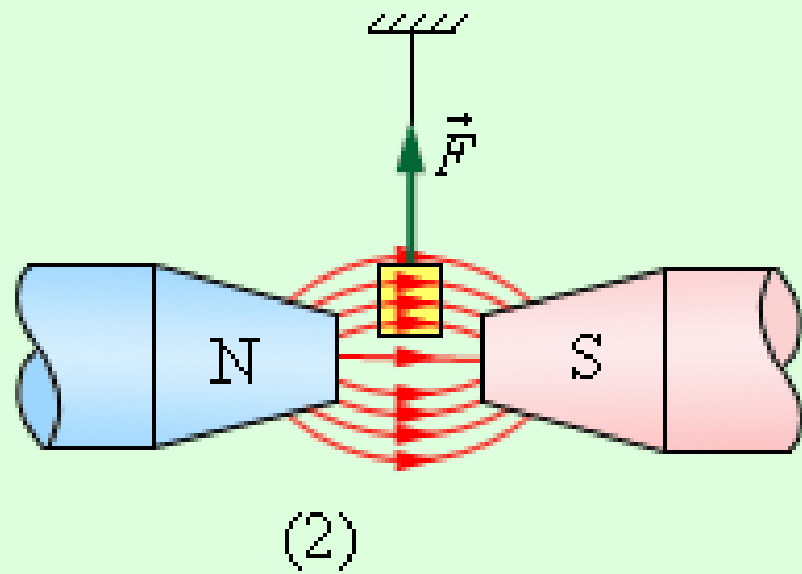
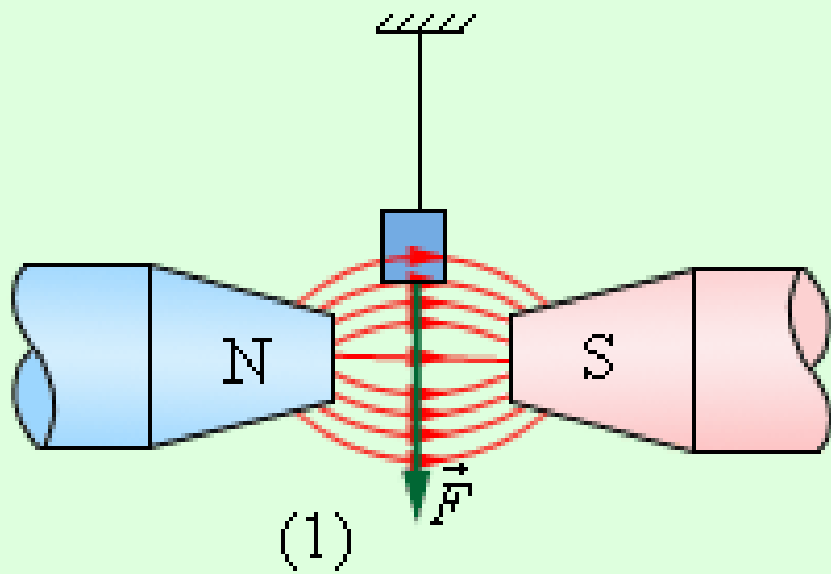
$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}; \quad \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}; \quad \vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Магнетики

- 1. Диамагнетики $\chi \approx - (10^{-10} \text{ } 10^{-11}) \text{ м}^3/\text{моль}$, $\mu < 1$
- 2. Парамагнетики $\chi \approx (10^{-9} \text{ } 10^{-10}) \text{ м}^3/\text{моль}$, $\mu > 1$
- 3. Ферромагнетики $\chi \approx 1 \text{ м}^3/\text{моль}$, $\mu \approx 10^4$

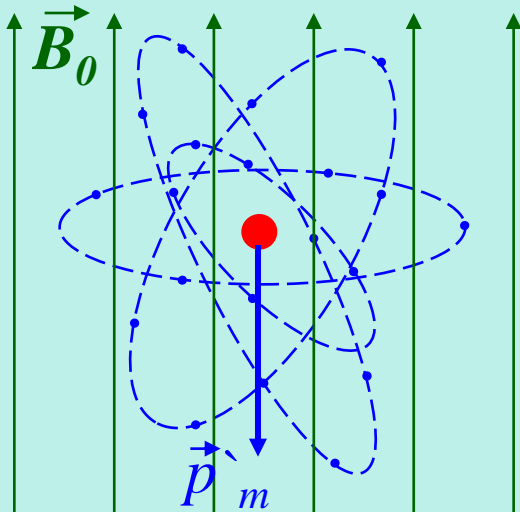
Парамагнетик (1) и диамагнетик (2) в неоднородном магнитном поле



Тема 7. Магнитное поле в веществе

- 7.2. Напряженность магнитного поля
- 7.3. Диамагнетизм

Диамагнетики



У молекул диамагнетика в отсутствие внешнего магнитного поля $p_m = 0$

В магнитном поле B_0 : $\vec{p}_m \sim -\vec{B}_0$

Магнитная восприимчивость диамагнетика

$$\chi_m = N_A \beta_m < 0$$

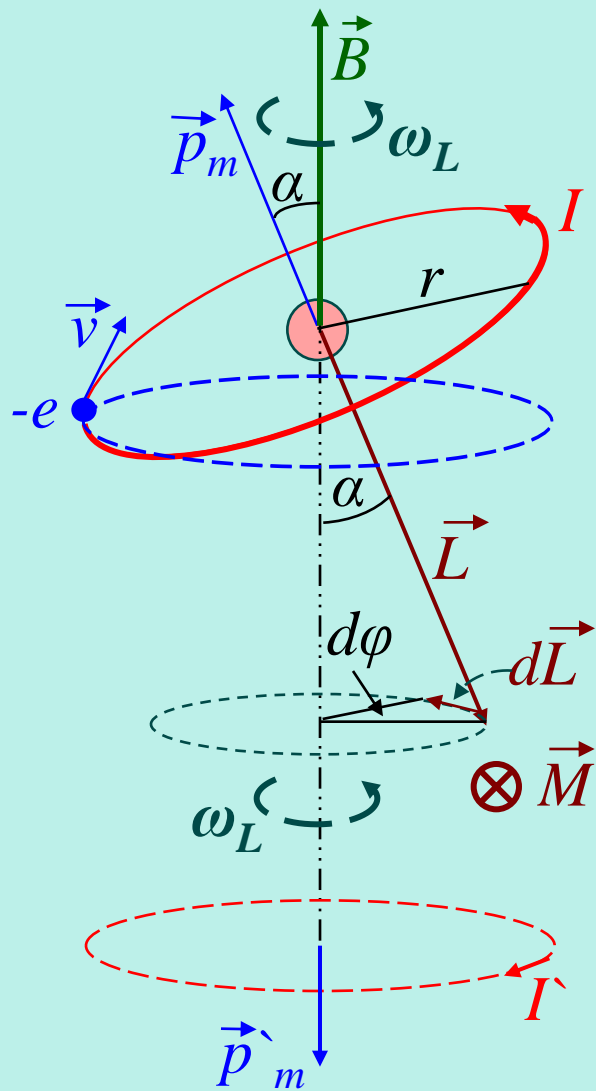
Природа диамагнетизма

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

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

$$\omega_L = \frac{e}{2m} B$$

- ларморова частота



Магнитная восприимчивость диамагнетика

$$\chi = \frac{\mu_0 z e^2 n r^2}{6m}$$

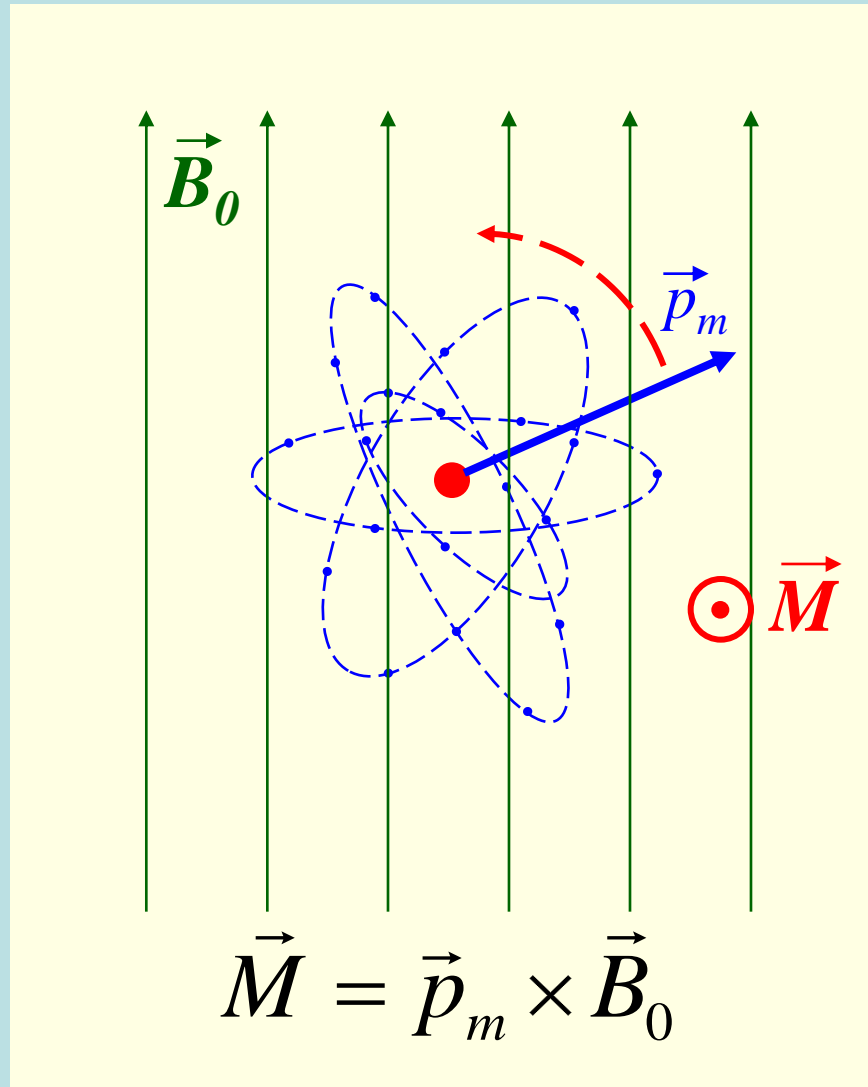
Где z - число электронов в атоме,

n – концентрация атомов

Тема 7. Магнитное поле в веществе

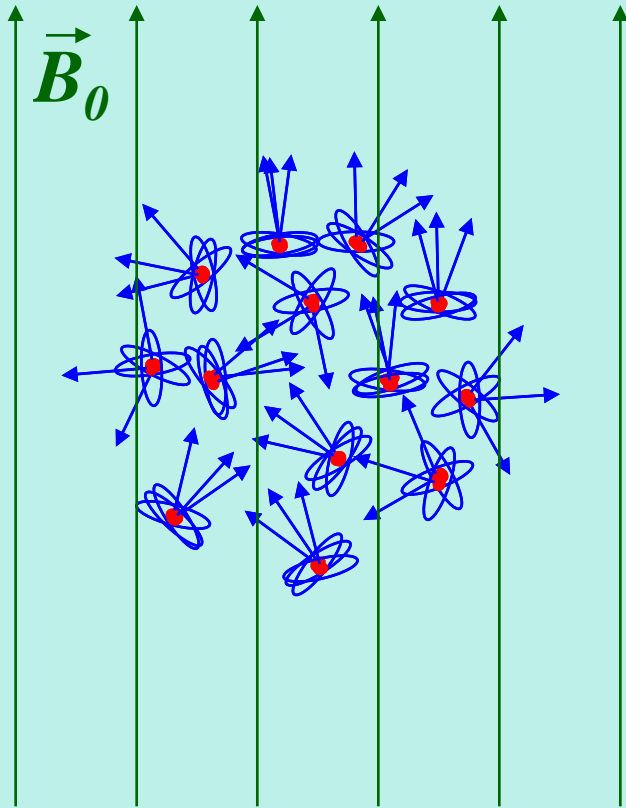
- 7.3. Диамагнетизм
- 7.4. Парамагнетизм

Молекула парамагнетика во внешнем магнитном поле B_0



У молекул парамагнетика $p_m \neq 0$

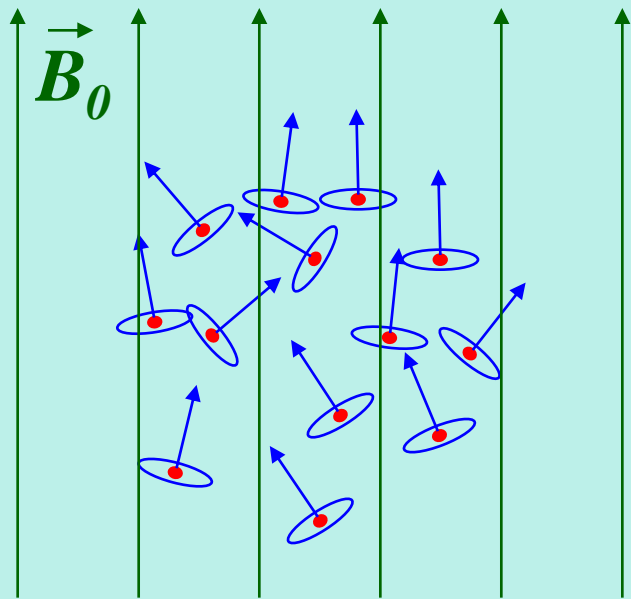
Модель парамагнетика



1. $B_0 = 0;$ $\langle \vec{p}_m \rangle = 0$

2. $B_0 \neq 0;$ $\langle \vec{p}_m \rangle \neq 0$

$$\langle \vec{p}_m \rangle \sim \vec{B}; \quad \vec{J} = \chi \vec{H}$$



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

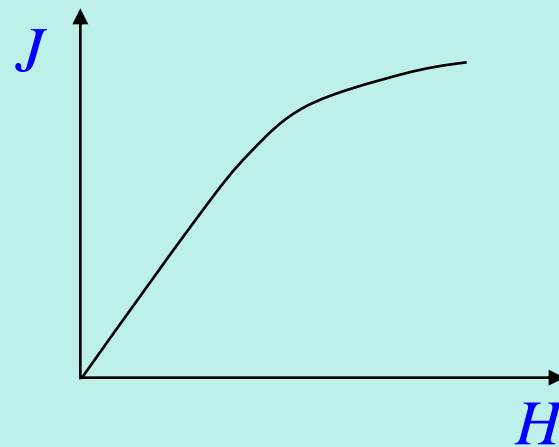


Кюри Пьер
(15.V.1859-19.IV.1906)

Для парамагнетика $\chi_m > 0$

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad \text{- закон Кюри}$$

C — константа Кюри

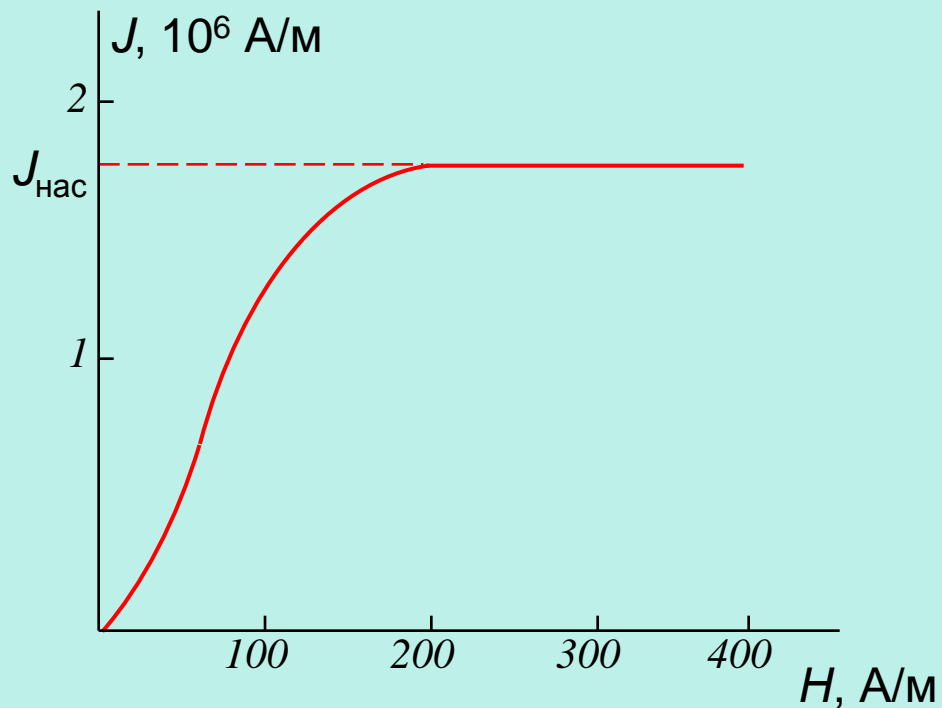


Тема 7. Магнитное поле в веществе

- 7.4. Парамагнетизм
- 7.5. Ферромагнетизм

Ферромагнетики

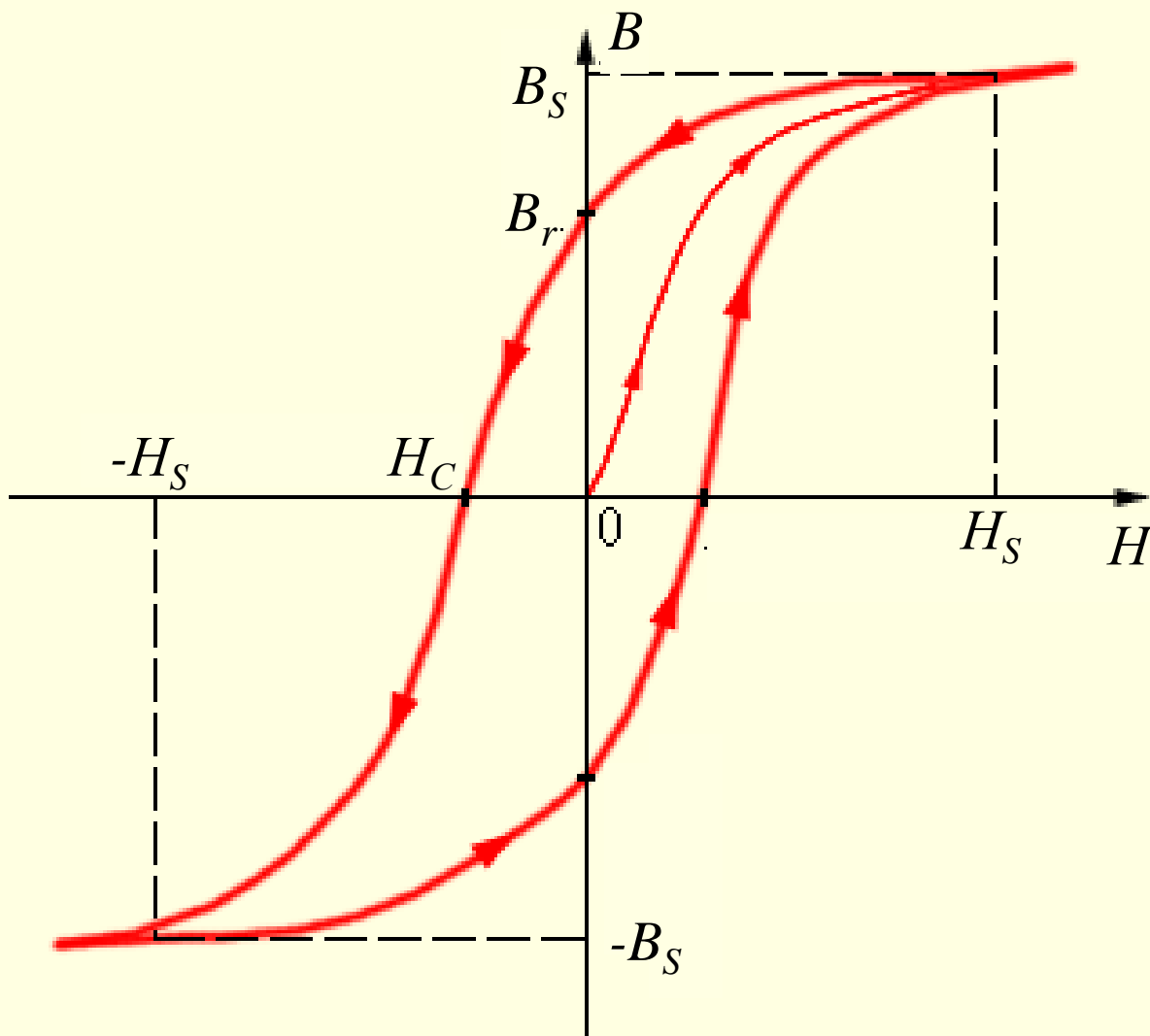
Fe, Ni, Co, Gd + сплавы, соединения;
сплавы и соединения Mn, Cr



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

$$\chi = \chi(H)$$

Петля гистерезиса ферромагнетика



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

Остаточная индукция:

$$B_r = \mu_0 \underset{\substack{\uparrow \\ \text{остаточная} \\ \text{намагниченность}}}{J_r}$$

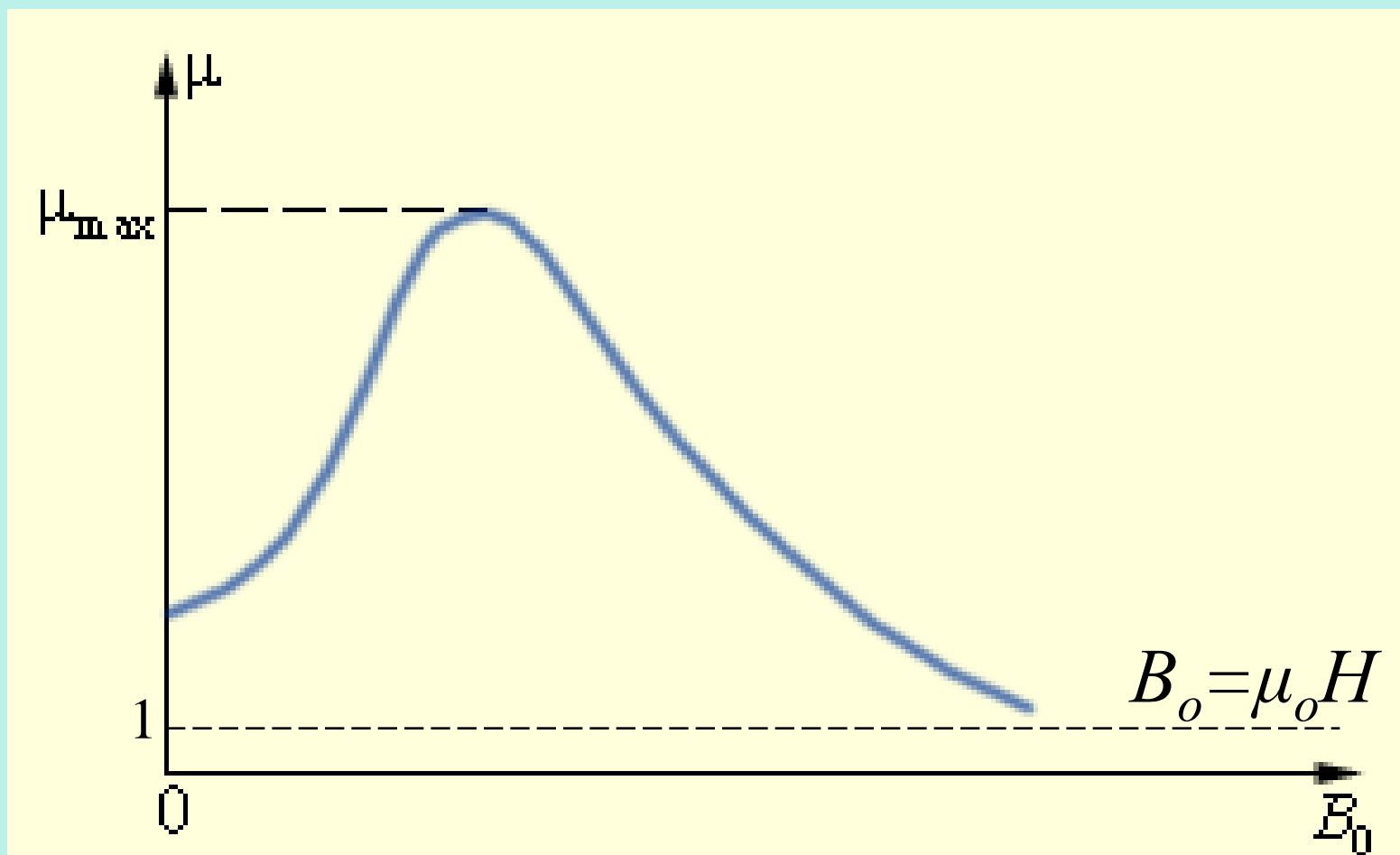
H_c - коэрцитивная сила

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

$$\mu = \mu(H)$$

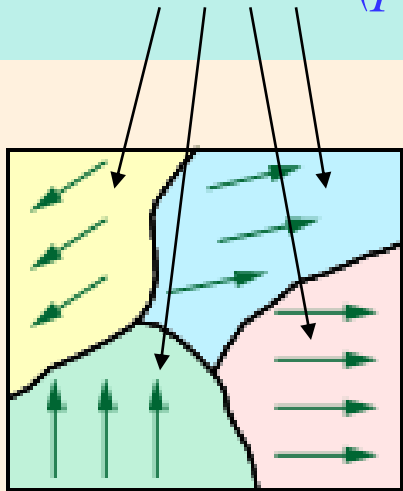
Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от индукции внешнего магнитного поля

$$\mu = 1 + \chi \quad \mu = \mu(H)$$



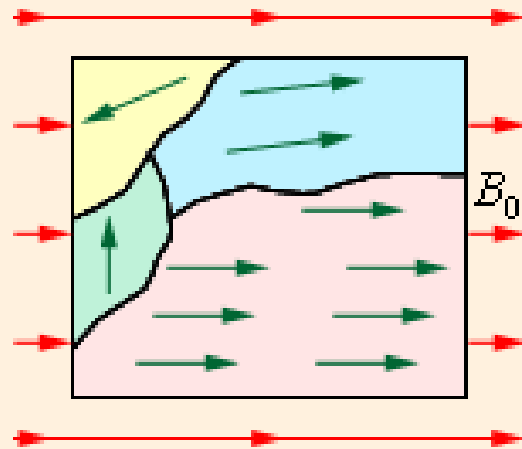
Намагничивание ферромагнитного образца

домены (размеры $\sim 1 - 10$ мкм)



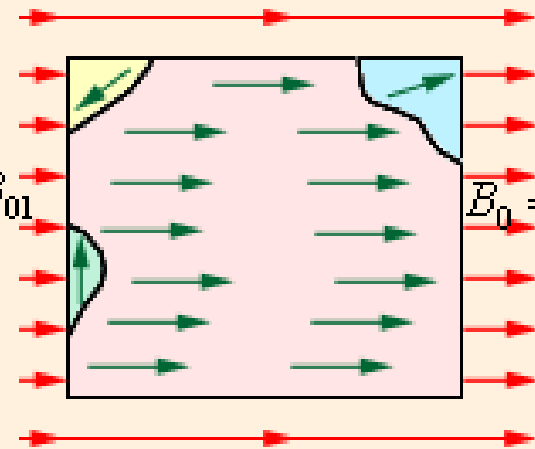
(1)

$$B_0 = 0$$



(2)

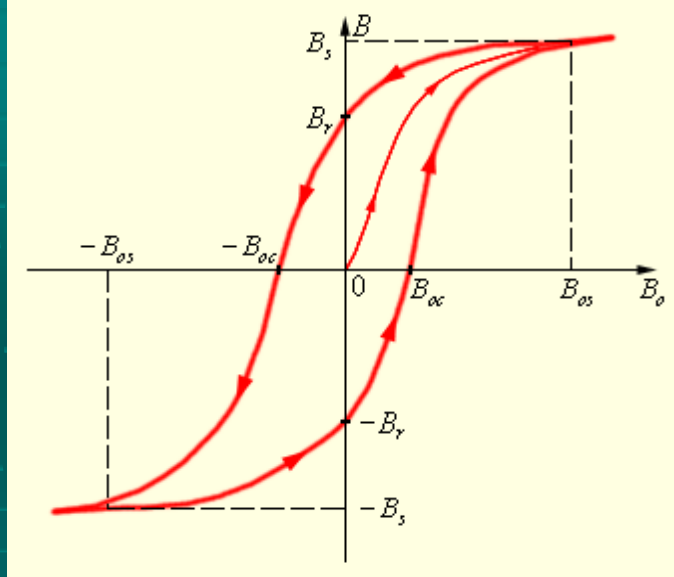
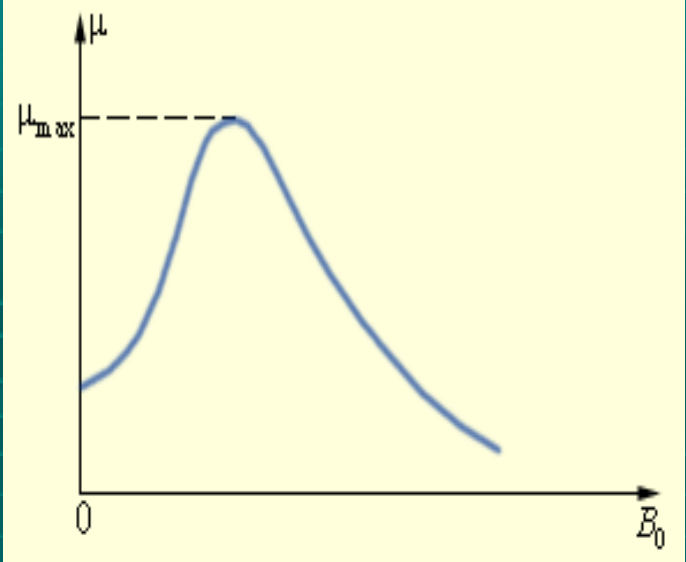
$$B_0 = B_{01}$$



(3)

$$B_0 = B_{02} > B_{01}$$

Точка Кюри: $T_C^{(Fe)} = 768$ °C; $T_C^{(Ni)} = 365$ °C



Материал	Состав	μ_{max}	B_r , Тл	H_c , А/м
Железо	99,9% Fe	5 000	-	80
Супермаллой	79% Ni, 5% Мо, 16% Fe	800 000	-	0,3
Алнико	10% Al, 19% Ni, 18% Со, 53% Fe	-	0,9	52 000