

# Магнитные свойства твердых тел.

*План:*

1. *Диамagnetизм и парамагнетизм*
  - *Классификация магнетиков. (самостоятельно)*
  - *Атомный магнетизм.*
  - *Природа диамagnetизма.*
  - *Парамагнетизм.*
2. *Магнитное упорядочение.*
  - *Метод молекулярного поля.*
  - *Обменное взаимодействие.*
  - *Антиферромагнетизм и ферримагнетизм.*
  - *Спиновые волны*
3. *Магнитный резонанс.*
  - *Классическое рассмотрение.*
  - *Квантовый подход*

# Диамagnetизм и парамагнетизм. Атомный магнетизм

$\mu_{\text{ат}}$      $\mu_l$

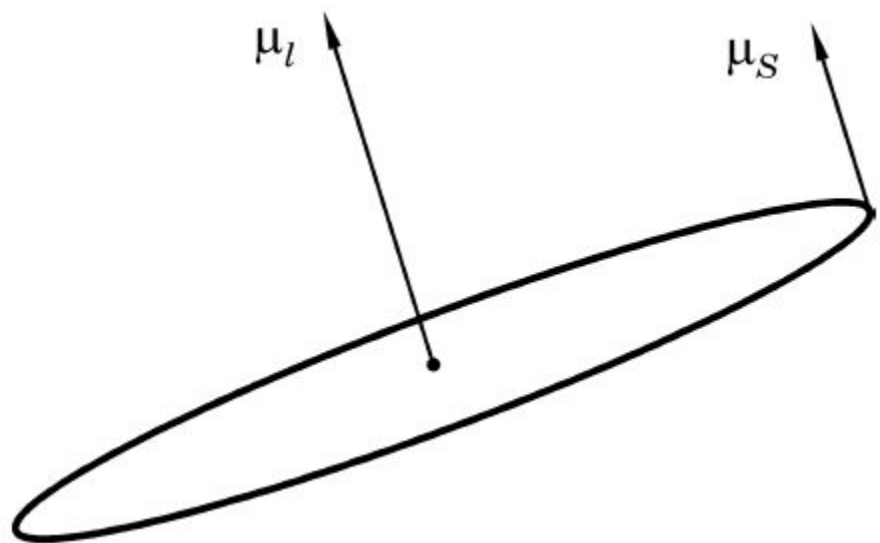
$$\mu_l = -\mu_B \sqrt{l(l+1)}, \quad l = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

$$m_{l_z} = -\mu_B m_l, \quad m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l, \quad (2)$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2 \text{ — магнетон Бора}$$

$$p_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}$$

Схематическое  
изображение орбиталь-  
ного  $\mu_l$  и спинового  $\mu_s$   
магнитных моментов  
одноэлектронного  
атома



*Диамagnetизм и парамагнетизм. Атомный магнетизм*

$$\mu_S = -2\mu_B \sqrt{S(S+1)} \quad (3)$$

$$\mu_{S_z} = -2\mu_B m_S, \quad m_S = S, S-1, \dots, -S \quad (4)$$

$$S = \frac{1}{2}, m_S = +\frac{1}{2} \text{ и } -\frac{1}{2} \quad p_S = \hbar \sqrt{S(S+1)}$$

$$\frac{e}{2m} = g \quad g_S = 2$$

$$\mu_{\text{ат}} = -g \frac{e}{2m} p = -g \mu_B p \quad (5)$$

$$g = 2 \quad g = 1 \quad L = \sum_i l_i \text{ и } S = \sum_i S_i \quad J = |L + S|, \dots, |L - S|$$

$$g = 1 + \frac{[J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)]}{2J(J+1)} \quad (6)$$

# Диамagnetизм и парамагнетизм. Атомный магнетизм

$$\mu_{\text{ат}} = -\mu_{\text{В}}g\sqrt{J(J+1)}, \quad (7)$$

$$\mu_{\text{ат}z} = -\mu_{\text{В}}gm_J, \quad m_J = J, J-1, \dots, -J$$

фактор Ланде

$$(S=0), J=L, g=1$$

$$L=0 \quad (J=S, g=2)$$

$$1 < g < 2$$

$L, S, J$

правило Хунда

$$J \quad |L-S|$$

$$|L+S|$$

$$2S+1L_J$$

Значения квантового числа $L$	0	1	2	3
Обозначение	$S$	$P$	$D$	$F$

$$2S+1$$

# Диамagnetизм и парамагнетизм. Природа диамagnetизма

$$\mu_{\text{ат}} = iS = -\frac{e\omega_0}{2\pi} S \quad (8)$$

$$\Delta\mu_{\text{ат}} = -\frac{eS}{2\pi} \Delta\omega \quad (9)$$

$$F_0 = m\omega_0^2 r \quad \vec{B} \quad F_L = ev_0 B \quad F = m\omega_1^2 r \quad F_0 + F_L$$

$$m\omega_1^2 r = m\omega_0^2 r + ev_0 B$$

$$m(\omega_1^2 - \omega_0^2) r = mr(\omega_1 - \omega_0)(\omega_1 + \omega_0) = ev_0 B \quad (10)$$

$$mr(\omega_1 - \omega_0)(\omega_1 + \omega_0) \approx mr\Delta\omega 2\omega_0 = ev_0 B = e\omega_0 r B \quad (11)$$

$$\Delta\omega = \frac{eB}{2m} \quad (12)$$

Величина  $\Delta\omega$  получила название частоты Лармора

# Диамagnetизм и парамагнетизм. Природа диамagnetизма

$$\Delta\mu_{\text{ат}} = -\frac{e^2 S}{4\pi m} B \quad (13)$$

$$\Delta\mu_{\text{ат}} = -\frac{Ze^2 \pi \langle \rho^2 \rangle}{4\pi m} B = -\frac{Ze^2 \langle \rho^2 \rangle}{4m} B \quad (14)$$

$$\langle \rho^2 \rangle = \frac{2}{3} \langle r^2 \rangle$$

$$\Delta\mu_{\text{ат}} = -\frac{Ze^2 \langle r^2 \rangle}{6m} B \quad (15)$$

$$M = N \Delta\mu_{\text{ат}} = -\frac{NZe^2 \langle r^2 \rangle}{6m} B \quad (16)$$

$$\chi = \frac{\mu_0 M}{B} = -\frac{N\mu_0 Ze^2 \langle r^2 \rangle}{6m} \quad (17)$$

# Диамagnetизм и парамагнетизм. Парамагнетизм

$$\chi = \frac{C_1}{T} \quad (18)$$

$$(\chi^{-1} = C_1^{-1}T) \quad \mu_{\text{ат}}$$

$$E = -\vec{\mu}_{\text{ат}} \cdot \vec{B} = -\mu_{\text{ат}} B \cos \theta = -\mu_0 \mu_{\text{ат}} H \cos \theta. \quad (19)$$

$$\vec{\mu}_{\text{ат}} \text{ и } H \quad : \theta = 0 \quad dN \quad \theta \text{ и } \theta + d\theta$$

$$dN = 2\pi \sin \theta d\theta \cdot f(E) \quad (20) \quad f(E) = A \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

$$N \equiv \int dN = 2\pi A \int_0^\pi \sin \theta \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) d\theta \quad (21)$$

$$\langle \mu_{\text{ат}} \cos \theta \rangle = \mu_{\text{ат}} \left( \text{cth} \beta - \frac{1}{\beta} \right) = \mu_{\text{ат}} L(\beta) \quad (22)$$

$L(\beta)$  — функция Ланжевена

## Диамagnetизм и парамагнетизм. Парамагнетизм

$$\beta = \frac{\mu_{\text{ат}} B}{kT} \quad M = N \langle \mu_{\text{ат}} \cos \theta \rangle = N \mu_{\text{ат}} L(\beta) \quad (23)$$

$$\beta \ll 1 \text{ (область высоких температур)} \quad L(\beta) \approx \frac{\beta}{3}$$

$$M = \frac{N \mu_{\text{ат}}^2}{3kT} B \quad (24)$$

$$\chi = \frac{\mu_0 M}{B} = \frac{N \mu_0 \mu_{\text{ат}}^2}{3kT} \quad (25)$$

$$C_1 = \frac{N \mu_0 \mu_{\text{ат}}^2}{3k} \quad (26)$$

$$\beta \gg 1 \quad M \rightarrow M_S = N \mu_{\text{ат}} \quad (27)$$

$$\mu_{JH} = m_J g m_B$$

$m_J$  может иметь  $2J + 1$  значение:  $J, J - 1, \dots, -J$



## Диамagnetизм и парамагнетизм. Парамагнетизм

$$\langle \mu_{JH} \rangle = g\mu_B J B_J \left( \frac{Jg\mu_B}{kT} B \right) = g\mu_B J B_J(\beta) \quad (28)$$

$$\beta = \frac{Jg\mu_B B}{kT} \quad (29)$$

$$B_J(\beta) = \frac{2J+1}{2J} \operatorname{cth} \frac{2J+1}{2J} \beta - \frac{1}{2J} \operatorname{cth} \frac{\beta}{2J} \quad (30)$$

Функция  $B_J(\beta)$  — обобщенная функция Ланжевена

$$M = NgJ\mu_B B_J(\beta) \quad (31)$$

$$L=0, J=S=\pm\frac{1}{2} \quad M = Ng\mu_B \frac{1}{2} \operatorname{th} \left( \frac{g\mu_B B}{2kT} \right) \quad (32)$$

$$\beta \ll 1 \quad \chi = \frac{N\mu_0\mu_B^2 g^2 J(J+1)}{3kT} \quad (33)$$

$$C_1 = \frac{N\mu_0\mu^2}{3k} \quad \mu^2 = \mu_B^2 g^2 J(J+1)$$

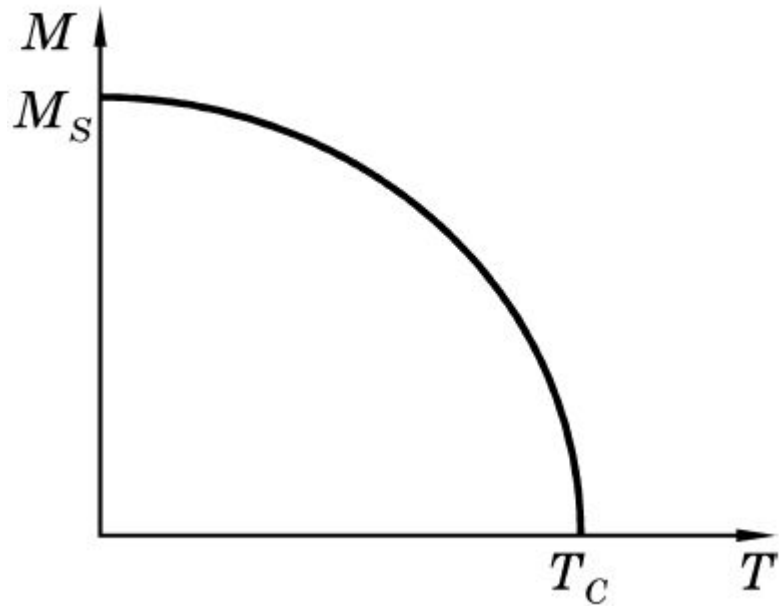
# *Диамagnetизм и парамагнетизм. Парамагнетизм*

$$p_{\text{эфф}} = g\sqrt{J(J+1)} \quad (34)$$

$$M_S = NgJ\mu_B \quad (35)$$

$$\mu_S = gJ\mu_B \quad (36)$$

# Магнитное упорядочение. Метод молекулярного поля



Зависимость спонтанной намагниченности ферромагнетика от температуры

$$\vec{B}_{\text{внутр}} \quad \vec{B}_{\text{внешн}} = 0$$

$$\vec{B}_{\text{внутр}} = \lambda \mu_0 \vec{M} \quad (37)$$

$$\vec{B}_{\text{полн}} = \vec{B}_{\text{внешн}} + \vec{B}_{\text{внутр}} = \vec{B}_{\text{внешн}} + \lambda \mu_0 \vec{M} \quad (38)$$

$$M = \frac{N \mu_{\text{ат}}^2}{3kT} (B_{\text{внешн}} + \lambda \mu_0 M) \quad (39)$$

*Магнитное упорядочение. Метод молекулярного поля*

$$M = \frac{N\mu_{\text{ат}}^2 B_{\text{внешн}}}{3k_B T \left( 1 - \lambda\mu_0 \frac{N\mu_{\text{ат}}^2}{3kT} \right)} = \frac{N\mu_{\text{ат}}^2 B_{\text{внешн}}}{3k_B \left( T - \frac{N\lambda\mu_0\mu_{\text{ат}}^2}{3k} \right)} \quad (40)$$

$$\chi = \frac{N\mu_{\text{ат}}^2\mu_0}{3k_B \left( T - \frac{N\lambda\mu_0\mu_{\text{ат}}^2}{3k} \right)} = \frac{C_2}{T - \theta} \quad (41)$$

$$\theta = \frac{N\lambda\mu_0\mu_{\text{ат}}^2}{3k} \quad (42) \quad C_2 = \frac{N\mu_0\mu_{\text{ат}}^2}{3k_B}$$

*Магнитное упорядочение. Обменное взаимодействие*