

2. 磁性

2.0 磁性とは

磁場に対する物質の応答

$$F(H) \text{ 磁化 } M = - \frac{\partial F}{\partial H}$$
 体積当り

$$\text{磁化率 } \chi = \frac{\partial M}{\partial H} = - \frac{\partial^2 F}{\partial H^2}$$

$$\chi: \text{無次元} \quad M: \text{体積当り}$$

$$B = \mu_0 (H + M) \quad \text{MKS}$$

1 T (Wb/m²)

$$B = H + 4\pi M \quad \text{cgs emu}$$

1 T = 10⁴ Gauss

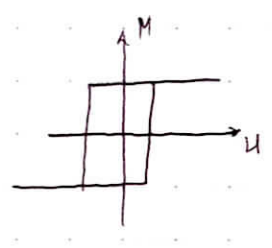
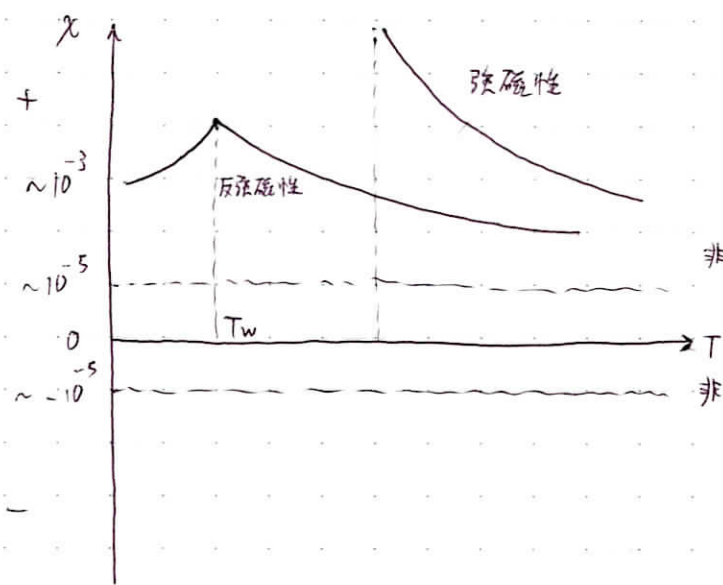
磁化 M erg/cm³/Oe ↔ B Gauss ↔ H Oe

↓
m = M · V erg/Oe ← [emu]

1 mol 当りの磁化 [emu/mol]

磁化率 無次元

1 mol 当りの磁化率



局在モーメント

非磁性金属 χ > 0
 常磁性
 非磁性絶縁体 χ < 0
 反磁性

$\Delta F = -\frac{1}{2} \chi H^2$
 常磁性: 磁場に引き込まれる
 反磁性: はじかれる

誘起モーメント

ボア磁子 $\mu_B = \frac{e\hbar}{2mc} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$
 $= 0.927 \times 10^{-20} \text{ erg/Oe [emu]}$

	電子スピン	軌道モーメント
角運動量	$S\hbar$	$L\hbar$
磁気モーメント (z成分)	$(-)\ gS\mu_B$ $g = 2.0023$	$(-)\ L\mu_B$
	$M = L + \underline{2S}$	

ゼーマンエネルギー $M_B H$
 $S = +\frac{1}{2} \rightarrow -M_B H$
 $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$
 $9.27 \times 10^{-24} \text{ J} \quad 0.927 \times 10^{-16} \text{ erg}$
 $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
 $1 \text{ T} \rightarrow 0.67 \text{ K}$

ボア磁子集団の作る磁場



$(3 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 = 27 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$
 $1 \text{ cm} \text{ 当り } \sim 4 \times 10^{22}$
 $M = 0.927 \times 10^{-20} \times 4 \times 10^{22}$
 ~ 400
 $B = 4\pi M = 4800 \sim 5 \text{ k Gauss}$
0.5 T

黒板, ビン, プラズマ管, 磁石 1 kg

2.1 Larmor 反磁性 — 弱い反磁性の起源

複数電子からなるイオンを磁場中に置く

$$H = \sum_i \frac{1}{2m} \left(\mathbf{p}_i + \frac{e}{c} \mathbf{A} \right)^2 + g \mu_B \sum_i \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{H}$$

$$\mathbf{A} = -\frac{1}{2} \mathbf{r} \times \mathbf{H}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$$

$$= \sum_i \frac{1}{2m} \left(\mathbf{p}_i - \frac{e}{2c} \mathbf{r} \times \mathbf{H} \right)^2 + g \mu_B \mathbf{S} \cdot \mathbf{H}$$

$$= \sum_i \frac{p_i^2}{2m} + \sum_i \left(\frac{e\hbar}{2mc} \right) \left(\frac{\mathbf{r}_i \times \mathbf{p}_i}{\hbar} \right) \cdot \mathbf{H} + \frac{e^2}{8mc^2} \sum_i r_i^2 H^2 + g \mu_B \mathbf{S} \cdot \mathbf{H}$$

$$= \sum_i \frac{p_i^2}{2m} + (L + gS) \mu_B H + \frac{e^2}{8mc^2} H^2 \sum_i (x_i^2 + y_i^2)$$

$H \parallel z$

$\langle 0 | L + gS | 0 \rangle \neq 0$: 局在磁性

$\langle 0 | L + gS | 0 \rangle = 0$ 磁場誘起
 パウリ常磁性
 バンブレル常磁性 (2次)

$\langle 1 | L + gS | 0 \rangle \neq 0$

$$\Delta F(H) = \frac{e^2}{8mc^2} \sum_i \left(\frac{2}{3} r_i^2 \right) H^2$$

$$= \frac{Ze^2}{12mc^2} \langle r^2 \rangle H^2 \quad \sum_i \langle r_i^2 \rangle = Z \langle r^2 \rangle$$

$1 \in L$
 $\Delta F(H) = \frac{Ze^2}{12mc^2} \langle r^2 \rangle H^2$

磁場中でエネルギー上がる

→ 反磁性

$$\chi_{mol} = - \frac{\partial^2 F}{\partial H^2}$$

$$= - \frac{zNA}{6} \frac{e^2}{mc} \langle r^2 \rangle$$

$$= - 0.79 \times 10^{-6} z \times \left(\frac{\langle r^2 \rangle}{a_B^2} \right) \sim 1$$

$\chi_{mol} \sim 10^{-5}$ 程度。重元素ほど大き

	10^{-6} emu/ml	z	$z+1$	$z-1$
F^{-1}	-9.4	9	10	
Cl^{-1}	-24.2	17	18	
Br^{-1}	-34.5	35	36	
I^{-1}	-50.6	53	54	
Li^{+}	-0.7			2
Na^{+}	-6.1			10

軌道大、核電荷小

2.2 Pauli 常磁性 — 弱い常磁性の起源

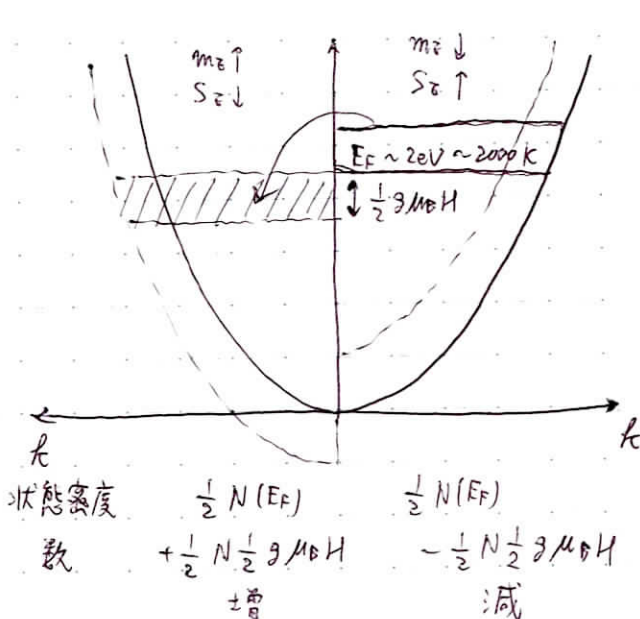
自由電子に近い金属

$$L = 0$$

$$S \mu_B S \cdot H$$

$$S_z = \pm \frac{1}{2} \text{ に対して}$$

$$\Delta E_{Zeem} = \mp \frac{1}{2} S \mu_B H$$



$H \uparrow$

$$dM = \frac{1}{2} g M_B \cdot \frac{1}{2} N \frac{1}{2} g M_B H - \left(-\frac{1}{2} g M_B\right) \cdot \frac{1}{2} N \frac{1}{2} g M_B H$$

$$= \frac{g^2}{4} M_B^2 N(E_F) H$$

$$\chi = \frac{dM}{dH} = \frac{g^2}{4} M_B^2 N(E_F) \sim M_B^2 N(E_F)$$

1 mol 当り $N(E_F) \sim \frac{N_A}{E_F}$

$$dM = \chi H = \left(\frac{N_A M_B}{E_F}\right) \left(\frac{M_B H}{E_F}\right)$$

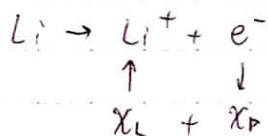
全電子が 差分しか効かない

$$M_B = 0.927 \times 10^{-20} \text{ emu}$$

$$N(E_F) = \frac{N_A}{E_F} = \frac{6 \times 10^{23}}{2 \times (1.6 \times 10^{-19}) \text{ J}} = \frac{6 \times 10^{23}}{3.2 \times 10^{-12} \text{ erg}} \sim 2 \times 10^{35} \text{ erg}^{-1}$$

$$M_B^2 N(E_F) \sim 2 \times 10^{-5} \text{ emu/mol}$$

	χ_{obs}	χ_L	χ_P
Li	$+2.5 \times 10^{-5} \text{ emu/mol}$	-0.7×10^{-6}	2.6×10^{-5}
Na	$+1.5 \times 10^{-5} \text{ emu/mol}$	-6.1×10^{-6}	2.1×10^{-5}



$$\chi_{\text{Li}} > \chi_{\text{Na}}$$

$$Z = 29 \quad \text{Cu}$$

$$\chi_{\text{obs}} = -5 \times 10^{-6} \text{ emu/mol} \quad \text{反磁性}$$

$$- \chi_L \gtrsim \chi_P !$$