2.7 磁気モーメント間の相互作用

$S = 1/2$ で考える。

(遍歴電子の) Coulomb 相互作用

$$
\begin{array}{c|cccc}
 & \uparrow\uparrow & \downarrow\downarrow & \uparrow\downarrow & \downarrow\uparrow \\
\hline
\uparrow\uparrow & U-J_{ex} & 0 & 0 & 0 \\
\downarrow\downarrow & 0 & U-J_{ex} & 0 & 0 \\
\uparrow\downarrow & 0 & 0 & U & -J_{ex} \\
\downarrow\uparrow & 0 & 0 & -J_{ex} & U
\end{array}
$$

$\Downarrow$

対角化 $\lambda^2 - 2U\lambda + U^2 - J_{ex}^2 = 0$

$\lambda = U \pm J_{ex}$

$S=1.\ S_z = 1, 0, -1$ triplet

$$
\rightarrow \begin{pmatrix} U-J_{ex} & & & 0 \\ & U-J_{ex} & & \\ & & U-J_{ex} & \\ 0 & & & U+J_{ex} \end{pmatrix}
$$

singlet $S=0$

$$H = U + J_{ex} - J_{ex}|S|^2$$

$$= U - \frac{1}{2}J_{ex} \underbrace{- 2J_{ex}(S_1 \cdot S_2)}$$

$J_{ex} > 0$

ferro

交換相互作用

$$S = S_1 + S_2$$

$$S^2 = S_1^2 + S_2^2 + 2(S_1 \cdot S_2)$$

$$= \frac{3}{2} + 2(S_1 \cdot S_2)$$

$$H_{ferro} = \sum_{\langle i,j \rangle} -2J_{ex}(S_i \cdot S_j)$$

局在磁気モーメント：原子軌道上の U

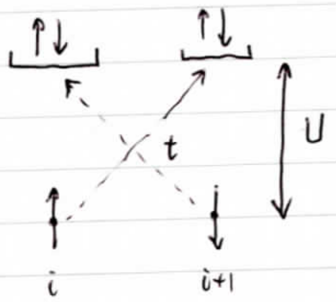
モット絶縁体

$$H = t \sum_i a_{i+1}^{+} a_i + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$

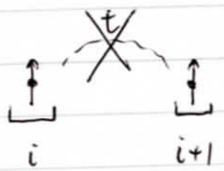
局在 → 交換項きかない

局在モーメントの相互作用

摂動



$\Delta E = -\dfrac{2t^2}{U}$ 反強磁性



$\Delta E = 0$

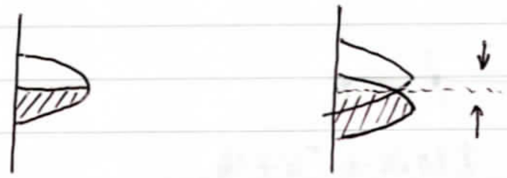
$$2(S_1 \cdot S_2) = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{triplet} \\ -\frac{3}{2} & \text{singlet} \end{cases}$$

$$H_{antiferro} = 2 \sum_{\langle i,j \rangle} J_{AF} (S_i \cdot S_j), \quad J_{AF} = \frac{2t^2}{4U}.$$

磁性体の多く モット絶縁体 局在モーメント
反強磁性体が多い！

強磁性相互作用が支配的になるケース

金属

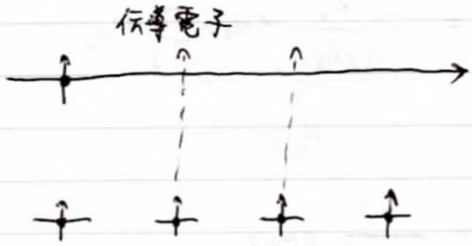


$N_\uparrow - N_\downarrow \neq 0$

スピンをそろえて交換相互作用かせぐ。

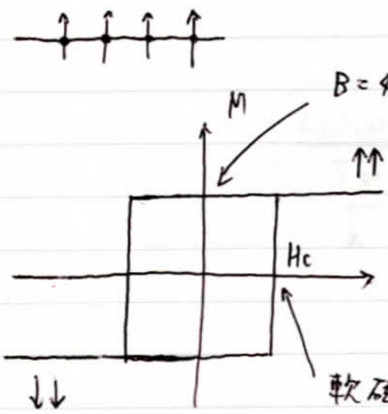
狭いバンド
クーロン相互作用 } 重要

二重交換相互作用



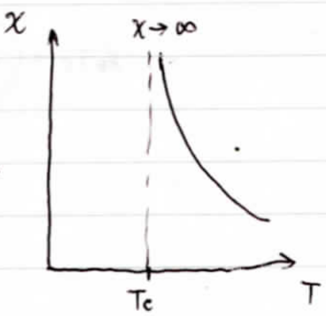
強磁性体金属が多い

2.8 強磁性



$B = 4\pi M \sim 10\,\mathrm{kG} = 1\,\mathrm{T}$

軟磁性体 ≤ 1 kG
硬磁性体 $\sim$ T

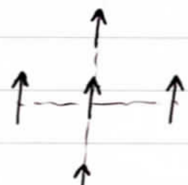


キュリー温度

$$H = -2J \sum_{\langle i,j \rangle} \boldsymbol{S}_i \cdot \boldsymbol{S}_j$$

実効磁場「分子場」

$$\begin{aligned} H &\sim -2J \sum_{\langle i,j \rangle} \langle \boldsymbol{S}_i \rangle \cdot \boldsymbol{S}_j \\ &= -J \sum_j z \langle \boldsymbol{S} \rangle \cdot \boldsymbol{S}_j \\ &= -\underbrace{\boxed{\frac{zJ}{(g\mu_B)^2} \langle M_z \rangle}}_{H_{eff}} \sum_j M_{zj} \end{aligned}$$



z : 配位数

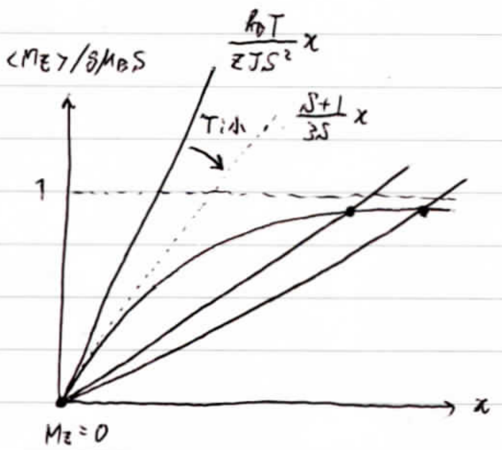
- $H_{eff} = \dfrac{zJ}{(g\mu_B)^2} \langle M_z \rangle$

  H_{eff} がつくる $\langle M_z \rangle$ → H_{eff} を与える ; self-consistent

- $\dfrac{\langle M_z \rangle}{g\mu_B S} = B_S(x)$, $x = \dfrac{g\mu_B H_{eff} S}{k_B T}$

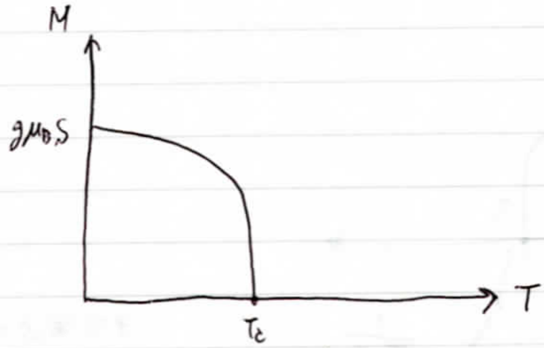
$$\frac{\langle M_z \rangle}{g\mu_B S} = \frac{g\mu_B}{zJS} H_{eff} = \frac{k_B T}{zJS^2} \underbrace{\frac{g\mu_B H_{eff} S}{k_B T}}_{x}$$

$$\rightsquigarrow \quad B_S(x) = \frac{k_B T}{zJS^2} x$$



$$\frac{k_B T_c}{zJS^2} = \frac{S+1}{3S}$$

$$k_B T_c = \frac{1}{3} zJ \underbrace{S(S+1)}_{\boldsymbol{S}^2}$$ 相互作用のエネルギー



$$= \frac{zJS(S+1)}{3k_B}$$

$T > T_c$

$H \to 0$ で考える。

$$\langle M_z \rangle = \chi (H + H_{eff})$$

$$\langle M_z \rangle = \frac{g^2 \mu_B^2 S(S+1)}{3k_B T} \left(H + \frac{zJ}{(g\mu_B)^2} \langle M_z \rangle \right)$$

$$= \frac{C}{T} (H + \lambda \langle M_z \rangle)$$

$$\left(1 - \frac{C\lambda}{T}\right) \langle M_z \rangle = \frac{C}{T} H$$

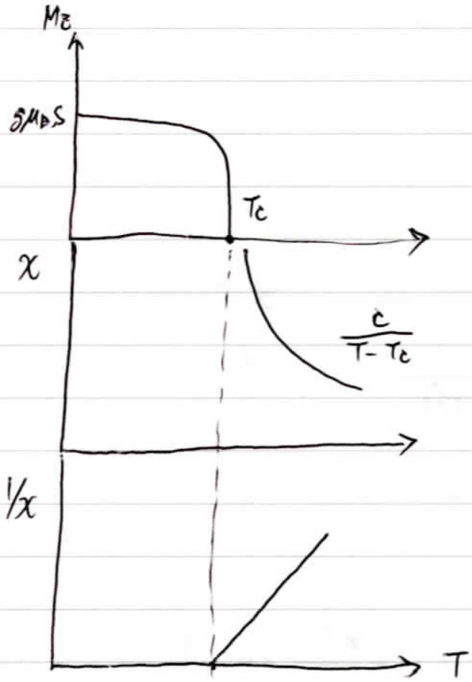
$$\langle M_z \rangle = \frac{C}{T - C\lambda} H$$

$$\chi = \frac{C}{T - T_c}$$

$$T_c = C\lambda = \frac{zJ(S+1)S}{3k_B}$$

No.

Date



平均場近似

分子場近似