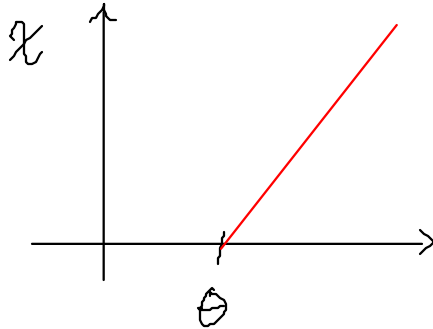
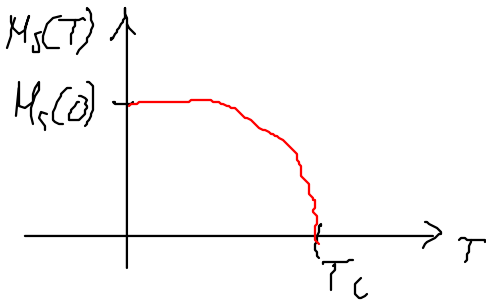


Ferromagnetismus

- Spontane Magnetisierung M_s unterhalb einer kritischen Temperatur T_c
- Energiegewinn durch Ausrichtung der magnetischen Momente $\mu \mu \mu T_c \rightarrow R \approx 1$
- Austauschwechselwirkung



Curie-Weiß-Gesetz
 $\chi = \frac{C}{T - \theta}$
 Paramagnetische CurieTemp. θ
 Curie-Konstante C

1. Präzisionslogischer Ansatz - Molekularfeldnäherung

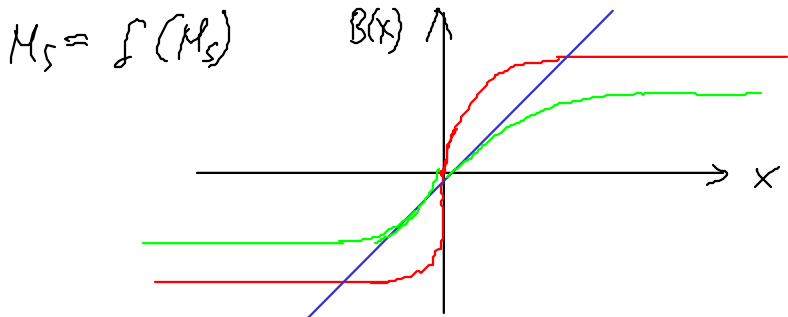
$$B_{eff} = B_a + B_M = B_a + \alpha \mu_0 M$$

- Molekularfeldkonstante α
 - äußeres Feld B_a
 - Molekularfeld
- Bsp $\approx 1000 T$ als Dipolfeld in echter Probe
 nur ca $0,1 T$, da mikroskopische Aspekte vernachlässigt

Behandlung wie Paramagnet:

$$M_s = n g \mu_B \int B(x)$$

- Brillouin-Funktion $B(x)$ mit $x = \frac{g \mu_B \int \alpha \mu_0 M_s}{k_B T}$



$T < T_c$ 2 Lösungen
 $T = T_c$ Paramagnetismus
 Steigung bei $B'(0) = 1$
 \Rightarrow kritische Temperatur

$$T_c = \frac{n g^2 \int (\int + 1) \mu_B^2 \alpha}{3 k_B} = C \alpha$$

2. Austauschwechselwirkungen zwischen lokalisierten Momenten

\uparrow $\uparrow \downarrow$ z.B. f-Elektronen der seltenen Erden

$$\psi_s = A_s (\psi_a(r_1) \psi_b(r_2) + \psi_b(r_1) \psi_a(r_2)) \text{ symmetr. Orbitalwellenfkt.} \Rightarrow \text{Spinanteil antisymm.}$$

$$\psi_{ant} = A_{ant} (\psi_a(r_1) \psi_b(r_2) - \psi_b(r_1) \psi_a(r_2)) \text{ antisymm. Orb. + sym.} \Rightarrow \text{Spin symmetr.}$$

$A_s = A_{an} = A$ aus Normierung $\int \psi^* \psi dV_1 dV_2 = 1$

$\tilde{V}(r_1, r_2) = \tilde{V}(r_2, r_1)$

$J = E_s - E_{an} = 4A^2 \int \psi_a^*(r_1) \psi_b^*(r_2) \tilde{V}(r_1, r_2) \psi_b(r_1) \psi_a(r_2) dV_1 dV_2$

- kinetische Energie vernachlässigt
- Energie unterscheid allein aufgrund der Symmetrie der Wellenfkt zwischen Singlett (S=0) und Triplett (S=1) - Zustand
- $J > 0$ oder $J < 0$

• neue Formulierung des Hamilton-Operators H_{spin}

$$S_1 S_2 = \begin{cases} -\frac{3}{4} & S=0 \\ +\frac{1}{4} & S=1 \end{cases}$$

$$H_{spin}' = -(E_s - E_{an}) S_1 \cdot S_2 + \underbrace{\frac{1}{4} (E_s + 3E_{an})}_{\text{neuer Energie nullpunkt}} = \begin{cases} E_s & S=0 \\ E_{an} & S=1 \end{cases}$$

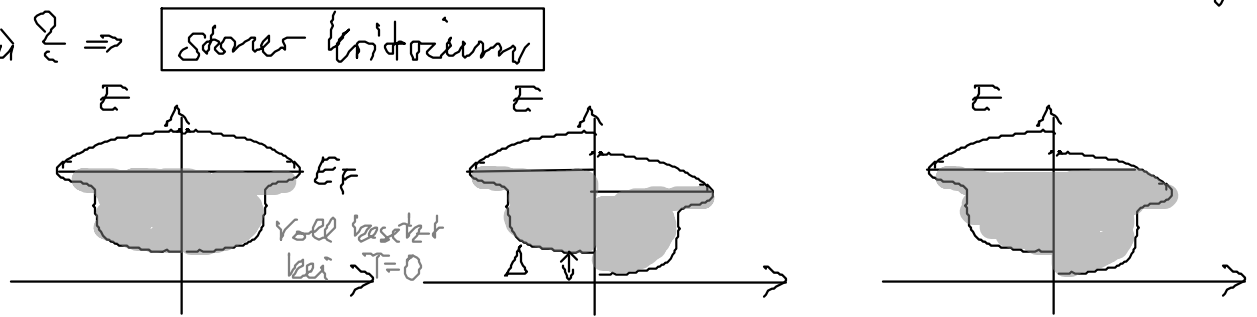
$H_{spin} = -J \hat{S}_1 \hat{S}_2$ Heisenberg-Modell

3. Austausch-Wechselwirkungen im freien Elektronengas

- Zwei Elektronen mit parallelem Spin \Rightarrow antisym Ortswell
- Freie Elektronen \Rightarrow Überlagerung ebener Wellen
- $\psi(r_1, r_2) = A (e^{ik_1 r_1} e^{ik_2 r_2} - e^{ik_1 r_2} e^{ik_2 r_1}) = A e^{i(k_1 r_1 + k_2 r_2)} (1 - e^{-i(k_1 + k_2)(r_1 - r_2)})$
- „Austauschloch“ \Rightarrow schwächere Abschirmung des Potentials der Atomrümpfe. Reduktion der Bindungsenergie (verbleibendes Coulomb Potential) insgesamt Energiegewinn

4. Bandmodell des Ferromagnetismus

Unter welchen Bedingungen stellt sich ein ferromagnetischer Grundzustand ein? \Rightarrow Stoner-Kriterium



Paramagnetisch

Energieaufwand

"Elektronen übertritt"

bis chemisches

Potential ausgeglichen

→ spontane Magnetisierung

- Näherungsweise Berechnung der Energiebilanz

1) Kosten an kinetischer Energie

n Elektronen treten über $n = \frac{N_{el}}{V}$

$$n_{Atom} = \frac{N_{el}}{N_{Atom}}$$

$$\tilde{D}(E_F) = D(E_F) \frac{V}{N}$$

Die Zustandsdichte $D(E_F) \approx \text{konstant}$

Verbreiterung \Rightarrow kinetische Energie $\frac{\Delta}{2}$ pro Elektron

$$E_{Atom, kin} = \underbrace{\tilde{D}(E_F) \Delta}_{\text{Elektronenzahl}} \frac{\Delta}{2}$$

2) Gewinn an Austauschenergie

$$H = -J \vec{s}_1 \vec{s}_2 \text{ oder "Stoner-Energie"} \quad E = -U_{ex} N_{\uparrow} N_{\downarrow}$$

U_{ex} Austauschenergie

$$\text{Anzahl der Elektronen } N_{\uparrow} = \frac{1}{2} (N + D(E_F) \Delta)$$

$$N_{\downarrow} = \frac{1}{2} (N - D(E_F) \Delta)$$

Pro Atom

$$n_{\uparrow} = \frac{1}{2} (n_{Atom} + \tilde{D}(E_F) \Delta)$$

$$n_{\downarrow} = \frac{1}{2} (n_{Atom} - \tilde{D}(E_F) \Delta)$$

- Magnetisierung $M_{Atom} = \mu_B (n_{\uparrow} - n_{\downarrow})$

je des Elektron trägt μ_B

- Magnetische Austauschenergie pro Atom

$$\Delta E_{Atom} = -\frac{1}{2} \mu_0 n' M_{Atom}^2 = -\frac{1}{2} \mu_0 \mu_B^2 n' (n_{\uparrow} - n_{\downarrow})^2$$

- Austauschenergie:

$$U_{ex} = \mu_0 \mu_B^2 n' \quad , \quad \Delta E_{Atom} = -\frac{1}{2} U_{ex} (\tilde{D}(E_F) \Delta)^2$$

3) Energiebilanz

$$\Delta E = \Delta E_{kin} + \Delta E_{Atom} = \frac{1}{2} \tilde{D}(E_F) \Delta^2 - \frac{1}{2} U_{ex} (\tilde{D}(E_F) \Delta)^2$$

erfüllt für

$$U_{ex} \tilde{D}(E_F) > 1$$

Stoner Kriterium

- Beispiel: Ni

0,6 Löcher pro Atom im Minoritätsband

volles Majoritätsband

⇒ ungerade Anzahl μ_B pro Atom können jetzt erklärt werden

an der Fermi kante neue Zustandsdichte für Minoritätsladungsträger

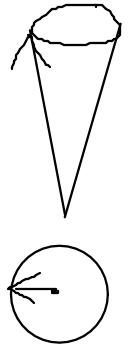
⇒ viele elektronische Eigenschaften durch Minoritätsladungsträger bestimmt
 $A \sim 1 \text{ eV} \Rightarrow T_c \sim 10^4 \text{ K}$ aber $T_c = 63 \text{ K}$

5. Spinwellen

Bei der energetischen Aufregung ähnlich Phononen kollektive Bewegung
 Spinwellen im Molekularfeld Näherung

• Drehmoment $\vec{\mu} \times \vec{B}$ mit $\vec{\mu} = -g \mu_B \vec{S}$ (1)

"Änderung des Drehimpulses" $\frac{d\vec{S}}{dt} = -g \mu_B \vec{S} \times \vec{B}_M$ **BGL**



• lineare Kette, WW nur zwischen nächsten Nachbarn
 $U_n = -J \vec{S}_n (\vec{S}_{n-1} + \vec{S}_{n+1})$ und $U_n = -\vec{\mu}_n \vec{B}_M \stackrel{(1)}{=} g \mu_B \vec{S}_n \vec{B}_M$

$$\vec{B}_n = -\frac{J}{g \mu_B} (\vec{S}_{n-1} + \vec{S}_{n+1}) \Rightarrow \frac{d\vec{S}_n}{dt} = \frac{J}{\hbar} \vec{S}_n \times (\vec{S}_{n-1} + \vec{S}_{n+1})$$

• Ansatz für kleine Auslenkungen

$$S_{n,x} = A \cos(mq a - \omega t) \quad S_{n,y} = A \sin(mq a - \omega t)$$

$$\Rightarrow \text{Dispersionsrelation } \omega = \frac{2JS}{\hbar} (1 - \cos(qa)) = \frac{4JS}{\hbar} \sin^2\left(\frac{qa}{2}\right)$$



6. Antiferromagnetismus

↑ ↓ ↑ ↓ ↑ falls Momente unterschiedl. ausgerichtet

↑ ↓ ↑ ↓ ↑ allgemein: komplizierte Anordnungen möglich

Molekularfeld jetzt 2 Terme von 2 Untergittern

$$n_{AA} = n_{BB} \quad \mu_A = \mu_B$$

$$B^A = -\mu_0 n_{AA} \mu_A - \mu_0 n_{AB} \mu_B$$

$$n_{AB} = n_{BA}$$

$$B^B = -\mu_0 \chi_{BA} M_A - \mu_0 \chi_{BB} M_B$$

$$\chi_i > 0$$

$$\Rightarrow B^A = \mu_0 (\chi_{AB} - \chi_{AA}) M_A$$

• kritische Temperatur (Neel Temperatur) $T_N = C \frac{\chi_{AB} - \chi_{BB}}{2}$

$$\chi_F = \frac{C}{T + \Theta} \quad \text{Divergenz erst bei } T = -\Theta$$

