

10. Übung (Abgabe Di. 17. Januar 2012 zu Beginn der Vorlesung oder spätestens bis 16:00 im Briefkasten im Sekretariat bei Frau Badow)

32. Wärmekapazität von Magnonen

Die energetisch kleinsten Anregungen eines Ferromagneten bei $T > 0$ bestehen aus Spin-Wellen, die in quantisierter Form Magnonen genannt werden. Die Energie eines Magnons der Frequenz ω beträgt $\hbar\omega$. Die Dispersionsrelation von Magnonen sei gegeben durch $\omega(k) = Ak^2$. Berechnen Sie damit den führenden Term der Wärmekapazität eines dreidimensionalen Ferromagneten bei tiefen Temperaturen ($k_B T \ll J$). Das Resultat ist:

$$C_V = 0.113 V k_B \left(\frac{k_B T}{\hbar A} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad \text{wobei } V \text{ das Volumen der Probe ist.}$$

Hinweis: Berechnen Sie zunächst die Zustandsdichte $D(\omega)$. Dazu bestimmen Sie zuerst die Anzahl Magnonen-Zustände im reziproken Raum $N(k)$ analog wie bei den Phononen. Die Wärmekapazität ergibt sich (analog wie bei den Phononen) aus der totalen Energie

$U(T) = \int_0^\infty dE D(E) \langle n(E, T) \rangle E$ der Magnonen. $\langle n(E, T) \rangle$ ist die mittlere Anzahl Magnonen der Energie E bei der Temperatur T und berechnet sich aus der Planck-Verteilung.

(4 Punkte)

33. Dicke einer Domänenwand

Schätzen Sie die Dicke d_w einer 180° -Domänenwand ab, die parallel zur (100)-Richtung in einem einfach kubischen Kristallgitter (Gitterkonstante a , an jedem Gitterplatz befindet sich ein Spin) ausgerichtet ist, indem Sie die Anzahl Gitterebenen N in der Wand bestimmen; es gilt dann:

$d_w = N a$. Die Flächenenergiedichte σ_{wand} einer Wand ist gegeben durch: $\sigma_{\text{wand}} = \sigma_{\text{exch}} + \sigma_{\text{aniso}}$, wobei σ_{exch} die Energiedichte für den Austausch und σ_{aniso} diejenige für die Anisotropie ist. Die Austauschkonstante zwischen benachbarten Spins im Heisenberg-Modell sei J , die Anisotropie-Konstante sei K . Nehmen Sie an, dass sich die Richtung der Spins zwischen zwei Gitterebenen um den konstanten Winkel $\alpha = \pi/N \ll 1$ ändert und dass die Anisotropie-Energie ΔE_{aniso} in dieser Näherung durch $\Delta E_{\text{aniso}} = K V$ gegeben ist, wobei V das betrachtete Volumen der Wand darstellt.

- Berechnen Sie zunächst den Beitrag der Austausch-Energie ΔE_{exch} für eine Kette von $N + 1$ Spins, die senkrecht durch die Domänenwand verläuft. Es ergibt sich: $\Delta E_{\text{exch}} = \frac{1}{2} JS^2 \pi^2 / N$.
- Zeigen Sie weiter, dass die Anisotropie-Energie für die Spin-Kette aus (a) gegeben ist durch $\Delta E_{\text{aniso}} = K N a^3$, wobei als Volumen das mittlere Volumen einer Spin-Kette genommen wird.
- Berechnen Sie mithilfe von (a) und (b) die Flächenenergiedichte σ_{wand} als Funktion der Anzahl Gitterebenen N . Die Wanddicke ergibt sich aus dem Energieminimum.
- Zeigen Sie, dass aus dem Ergebnis (c) folgt, dass für die Wandenergie gilt: $\sigma_{\text{wand}} \propto \sqrt{K J}$.

(4 Punkte)

Diskussion Magnetismus (zur Klausurvorbereitung) (0 Punkte)

- Diskutieren Sie allgemeine Eigenschaften von diamagnetischen und paramagnetischen Materialien in Zusammenhang mit Vorzeichen, Größe und Temperaturabhängigkeit der Suszeptibilität. Welche verschiedenen Beiträge gibt es zur diamagnetischen und paramagnetischen Suszeptibilität? Was ist das klassische Analogon zum Diamagnetismus?

- (b) Wie lauten die Hund'schen Regeln und wie können sie qualitativ erklärt werden? Welches Modell wird zur Herleitung des Curie-Gesetzes benutzt? Wie lautet das Modell, welches den Paramagnetismus der Leitungselektronen beschreibt? Warum findet man experimentell ein großes magnetisches Moment im Fall von $J=0$ und $S=L \neq 0$, obwohl die Hund'schen Regeln ein verschwindendes magnetisches Moment voraussagen? Warum muss in Übergangsmetalloxiden der Bahndrehimpuls L vernachlässigt werden?
- (c) Diskutieren Sie die Unterschiede zwischen den verschiedenen magnetischen Ordnungen (Ferro-, Ferri-, Antiferromagnetismus) in Bezug auf Ordnungsart, Ordnungstemperatur, Verhalten der Suszeptibilität oberhalb von der Ordnungstemperatur, Verhalten der Magnetisierung bzw. Suszeptibilität unterhalb der Ordnungstemperatur.
- (d) Diskutieren Sie das Stoner-Wohlfarth-Modell. Warum macht es trotz der extremen Vereinfachung bezüglich der Bandstruktur richtige Aussagen (Argumentieren Sie mit dem Verlauf der korrekten Bandstruktur der magnetischen Übergangsmetalle Fe, Co, Ni)?
- (e) Diskutieren Sie die Methode der Molekularfeldnäherung. Wo steckt die Näherung? Wo sind die Grenzen des Modells? Diskutieren Sie die unterschiedlichen Ansätze der Molekularfelder im Falle eines Ferro-, Ferri- und Antiferromagneten.
- (f) Diskutieren Sie den quantenmechanischen Grundzustand und die angeregten Eigenzustände des Heisenberg-Ferromagneten. Wie lassen sich die angeregten Zustände interpretieren? Wie lassen sich die angeregten Zustände experimentell verifizieren?
- (g) Erklären Sie, warum ferromagnetische Materialien wie z.B. Eisen, unterhalb der Ordnungstemperatur von außen betrachtet scheinbar keine resultierende Magnetisierung aufweisen.
- (h) Diskutieren Sie die Ursachen, die zur Ausbildung von magnetischen Domänen in Ferromagneten führen. Welche Energien sind bei diesem Prozess beteiligt, bzw. werden minimiert und welchen Einfluss hat das auf die Anordnung der magnetischen Domänen im Material? Welche Arten von Domänenwänden gibt es? Gibt es magnetische Domänen auch in Ferri- oder Antiferromagneten? Warum gibt es eine leichte Richtung der Magnetisierung? Welche Prozesse spielen sich auf der Ebene der Domänenwände beim Ummagnetisieren ab?