

Raum D 008

Beginn: 8 Uhr

Dauer: 8 h

Betreuer: PD Dr. S. Sahling, Raum D 212, Tel.: 34881, sahling@physik.tu-dresden.de

PD Dr. M. Dörr, Raum D 208, Tel.: 35036, doerr@physik.tu-dresden.de

Phasenübergang in Supraleitern (PSL)

1. Aufgabenstellung

Das Experiment beinhaltet die Messung des Phasenübergangs eines Typ-II-Supraleiters vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand ohne äußeres Magnetfeld. Die charakteristische physikalische Größe ist die Wärmekapazität, so dass gleichzeitig experimentelle Kenntnisse und Fähigkeiten für kalorimetrische Untersuchungen von Festkörpern gewonnen werden. Folgende Aufgaben sind zu erledigen:

1. Messung der Wärmekapazität von Niob im Temperaturbereich von $T = 4.3 \text{ K}$ bis 20 K mittels der quasi-adiabatischen Heizimpulsmethode .
2. Bestimmung der Debye-Temperatur Θ_D und der Zustandsdichte $N(E_F)$ der Elektronen an der Fermienergie.
3. Bestimmung der Sprungtemperatur T_c und der Sprunghöhe der Wärmekapazität, Vergleich der Ergebnisse mit den Vorhersagen der BCS-Theorie.
4. Analyse der Wärmekapazität bei $T \ll T_c$ und Bestimmung der Energielücke.
5. Ermittlung des Einflusses des Druckes im Probenraum auf die gemessene Wärmekapazität (optional)

2. Experiment

Eine Niob-Probe mit der Masse $m = 90.1122 \text{ g}$ hängt an dünnen Nylonfäden im Probenraum eines Kalorimeters (Skizze s.u.). Zur Abkühlung der Probe wird das Kalorimeter mit ^4He -Austauschgas gefüllt und in eine Kanne mit flüssigem Helium eingeführt. Nach Abkühlung der Probe auf 4.2 K wird das Austauschgas abgepumpt. Nach Erreichen eines ausreichend guten Vakuums ($p < 10^{-2} \text{ Pa}$) kann mit den Messungen begonnen werden. Die Messung erfolgt mit Hilfe der Heizimpulsmethode. Auf der Nb-Probe befinden sich ein Heizer und ein geeichtes Thermometer (Cernox CX-1030-SD der Firma Lake Shore). Mit Hilfe eines rechnergesteuerten Stromversorgungsgeräts wird für die Zeit $t_H = 20 \text{ s}$ ein Strom I auf den Heizer gegeben. Parallel dazu wird die Heizspannung U gemessen. Die Wärmekapazität erhält man aus:

$$c_p \equiv \Delta Q / \Delta T = U \cdot I \cdot t_H / (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Die Temperaturen T_1 und T_2 werden aus den Driftgeraden der Temperatur vor und nach dem Heizen bestimmt. Die Wärmekapazitäten des Heizers und des Thermometers sind kleiner 1% des Wertes der Niobprobe und werden vernachlässigt.

3. Auswertung

3.1 Bestimmung von Θ_D und $N(E_F)$

Oberhalb T_c ist die Probe normalleitend und die Wärmekapazität wird durch den Gitterbeitrag C_{ph} und dem Elektronenbeitrag C_{el}^n bestimmt:

$$c_p = c_{ph} + c_{el}^n \quad (2)$$

(der Index „n“ steht für „normalleitend“). Der Phononenbeitrag kann mit Hilfe der Debye-Theorie berechnet werden:

$$c_{ph} = (9Nk_B T^3 / \Theta_D^3) \cdot \int_0^{\Theta/T} dx \cdot x^4 e^x / (e^x - 1)^2 \quad (3)$$

mit $x = \hbar\omega_D / k_B T = \Theta_D / T$, wobei Θ_D die Debye-Temperatur ist. Bei ausreichend tiefen Temperaturen ($T < \Theta_D / 20$) liefert Gl. (3):

$$c_{ph} = 12\pi^4 Nk_B / 5 \cdot (T / \Theta_D)^3 = \beta \cdot T^3. \quad (4)$$

Für den Elektronenbeitrag liefert das Modell des freien Elektronengases:

$$c_{el}^n = \pi^2 N(E_F) k^2 T / 3 = \gamma \cdot T, \quad (5)$$

sodass die Zustandsdichte der Elektronen and der Fermikante $N(E_F)$ bestimmt werden kann. Zur Trennung des Elektronen- und Phononenbeitrages sowie der graphischen Bestimmung der Fehler von γ und β empfiehlt es sich, die Wärmekapazität als Funktion C_p/T über T^2 aufzutragen.

3.2 Analyse der Phasenumwandlung vom normalleitenden in den supraleitenden Zustand

In der Thermodynamik werden die thermodynamischen Gleichgewichtszustände eines Systems durch die Gibbs-Funktionen beschrieben. Die Gleichgewichtszustände werden durch die Extremalwerte der Gibbs-Funktion festgelegt. Hat man ein System, bei dem lediglich der äußere Druck p , die Temperatur T und das Magnetfeld B variiert werden, ist die entsprechende Gibbs-Funktion die freie Enthalpie $G = G(p, T, B)$. Auf der Phasengrenze zwischen dem normalleitendem und supraleitendem Zustand ist die freie Energie gleich. Unterscheidet sich die erste Ableitung der freien Enthalpie nach einer der unabhängigen Variablen in unmittelbarer Nähe zur Phasengrenze, spricht man von einer Phasenumwandlung erster Ordnung. Ist auch die erste Ableitung noch gleich und unterscheidet sich erst die zweite Ableitung, haben wir eine Phasenumwandlung zweiter Ordnung. Entsprechend der allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik gelten für die Ableitungen nach der Temperatur folgende Zusammenhänge:

$$S = - (\delta G / \delta T)_{p, B} \quad (6)$$

$$Q = T (S_1 - S_2) \quad (7)$$

$$C_p = -T (\delta^2 G / \delta T^2)_{p, B} \quad (8)$$

Bei einer Phasenumwandlung erster Ordnung ist Q ungleich Null, d.h. es wird Wärme freigesetzt oder aufgenommen. Die zweite Ableitung und damit die Wärmekapazität strebt gegen unendlich. Das ist der Fall beim Übergang in den supraleitenden Zustand im Magnetfeld. Ohne Magnetfeld ist der Übergang in den supraleitenden Zustand eine Phasenumwandlung zweiter Ordnung, sodass die Wärmekapazität einen Sprung hat. Nach der BCS-Theorie gilt für diesen Sprung:

$$C_{el}^s - C_{el}^n = 1.43 C_{el}^n . \quad (9)$$

Zur experimentellen Bestimmung der Sprunghöhe sollte $C_p - \beta T^3$ als Funktion von T im Bereich der Phasenumwandlung gezeichnet werden. Die Sprunghöhe ergibt sich aus der Extrapolation der experimentellen Kurven oberhalb und unterhalb des Übergangs. Die Übergangstemperatur T_c wird in der Regel so gewählt, dass die Flächen zwischen den experimentellen und extrapolierten Kurven unterhalb und oberhalb T_c gleich sind. T_c wird mit der Breite ΔT_c des Überganges angegeben.

3.3 Analyse der Wärmekapazität unterhalb T_c

Die BCS-Theorie der klassischen Supraleitung (Bardeen, Cooper, Schrieffer, 1957) liefert für $T \ll T_c$:

$$c_{el}^s = 9.17 \gamma T_c \cdot e^{-\Delta_0 / k_B T} \quad (10)$$

mit $\Delta_0 / k_B T_c = 1.76$. (11)

Diese Abhängigkeit lässt sich am besten überprüfen, indem man $\ln(C_p - \beta T^3)$ als Funktion von T/T_c darstellt.

Vergleichen Sie alle erhaltenen Parameter mit Literaturwerten.

Fragen und Aufgaben zur Vorbereitung

1. Was sagt die Regel von Dulong-Petit aus und wann gilt sie ?
2. Was sind die wichtigsten Annahmen des Einsteinmodells für die Wärmekapazität eines dielektrischen Festkörpers ? Leiten Sie die Gleichungen für die Wärmekapazität bei hohen und tiefen Temperaturen her !
3. Was sind die wichtigsten Annahmen des Debye-Modells für die Wärmekapazität eines dielektrischen Festkörpers ? Leiten Sie die Gleichung der Wärmekapazität bei tiefen Temperaturen her !
4. Was sind die wichtigsten Annahmen des Modells des freien Elektronengases ? Warum kann die Regel von Dulong-Petit für das Gas nicht angewandt werden ? Leiten Sie den Ausdruck für die Wärmekapazität eines freien Elektronengases her !
5. Wie ist die Phasenumwandlung erster und zweiter Ordnung definiert und wie verhält sich dabei die Wärmekapazität ?
6. Was sind die wichtigsten Annahmen der BCS-Theorie für Supraleiter ? Welche Aussagen macht das Modell für die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit ?

Literatur

1. Ch. Kittel: Einführung in die Festkörperphysik

Kapitel 5: Phononen II, thermische Eigenschaften: Gitteranteil der spezifischen Wärme
Kapitel 6: Das freie Elektronengas: freies Elektronengas im Dreidimensionalen, die spezifische Wärme des Elektronengases, Experimente zur spezifischen Wärme von Metallen.

2. W. Buckel: Supraleitung,

Kapitel 2: der supraleitende Zustand,

Kapitel 4: Thermodynamik und thermische Eigenschaften des supraleitenden Zustandes.

3. J. F. Annett: Superconductivity, Superfluids and Condensates

Chapter 3: Superconductivity

Chapter 4: The Ginzburg-Landau model

Chapter 6: The BCS theory of superconductivity

Versuchsaufbau

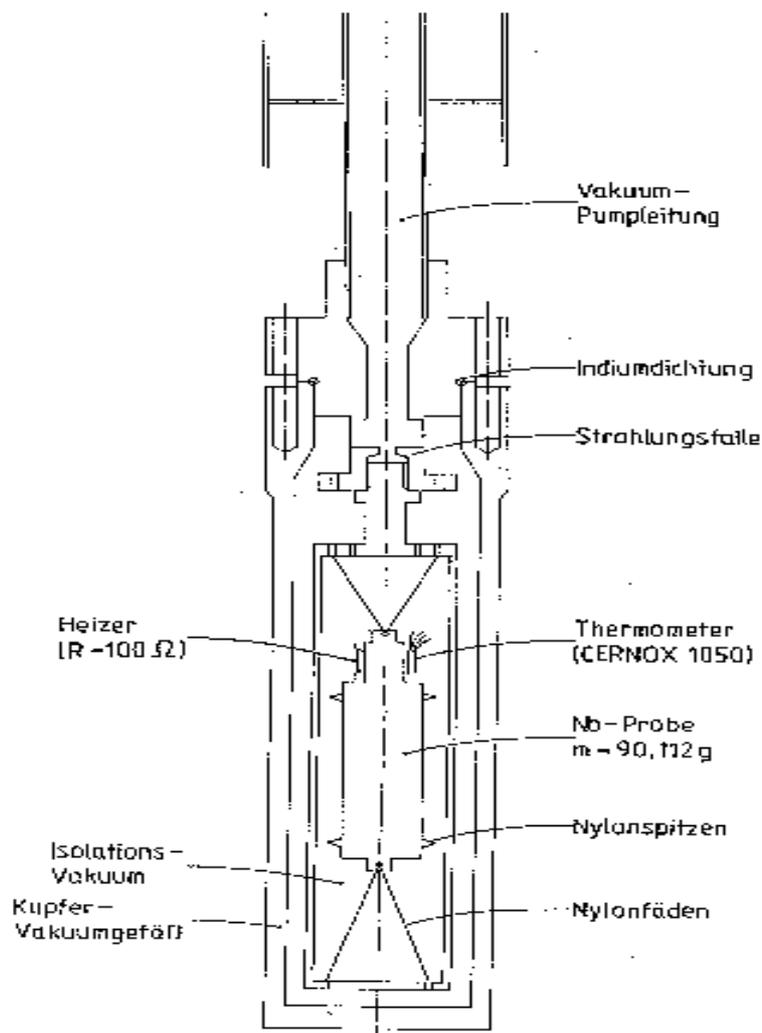


Abbildung 1.:
Darstellung des
schematischen
Versuchsaufbaus