Frank Laube (Autor)
Punktkontaktspektroskopie an den Supraleitern MgB2 und Sr2RuO4

Frank Laube

Punktkontaktspektroskopie an den Supraleitern MgB_2 und Sr_2RuO_4

Cuvillier Verlag Göttingen

https://cuvillier.de/de/shop/publications/3944

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

Kapitel 1

Einleitung

Die Theorie von Bardeen, Cooper und Schrieffer [1] (BCS, Nobelpreis 1972) zur Erklärung der Supraleitung zeigt, dass eine noch so kleine attraktive effektive Wechselwirkung zwischen den Elektronen des Fermi-Sees in der Umgebung der Fermi-Kante zu der Bildung von sogenannten Cooper-Paaren führt, Paare von Elektronen mit entgegengesetztem Impuls und Spin. Ein kohärenter Vielteilchengrundzustand ist die Folge. Die Übergangstemperatur in diesen Zustand hängt nach der BCS-Näherung für schwache Kopplung von drei wichtigen Parametern ab: den für die Kopplung wichtigen Phononenenergien Θ_c – denn die Elektron-Phonon-Kopplung ist nach der BCS-Theorie in der ursprünglichen Formulierung der Vermittler der attraktiven Wechselwirkung – der elektronischen Zustandsdichte an der Fermi-Kante $N(E_\mathrm{F})$ und der Elektron-Phonon-Streumatrix V:

$$T_c \propto \Theta_c \exp[-1/N(E_\mathrm{F})V]$$

Die Theorie konnte wichtige Voraussagen über das Verhalten von Supraleitern liefern, die später experimentell verifiziert wurden, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll. Eine zentrale Aussage der BCS-Theorie ist unter anderem das Auftreten einer Energielücke im Anregungsspektrum. Die Energielücke beschreibt die Energie, die minimal aufzuwenden ist, um ein Cooper-Paar aufzubrechen und zwei Quasiteilchen-Anregungen zu erzeugen. Die Energielücke ist die Größe, um die es in dieser Arbeit zentral geht: Sie wird mit der Methode der Punktkontaktspektroskopie an zwei Supraleitern untersucht. Dabei geht es nicht nur um die Überprüfung der Vorhersagen der BCS-Theorie, mit der man die zuerst entdeckten sogenannten klassischen Supraleiter verstehen kann.

Das zufriedenstellende Bild, das man sich bis dato von der Supraleitung gemacht hatte, traf nicht mehr auf alle Supraleiter zu, nachdem 1979 mit den

sogenannten Schwer-Fermion-Supraleitern [2] und 1986 mit den Hochtemperatursupraleitern [3] (HTSL, Nobelpreis 1987) neue Klassen von Supraleitern entdeckt worden waren.

Die Schwer-Fermion-Supraleiter sind hauptsächlich Cer- und Uran-haltige Verbindungen, bei denen schwere Quasiteilchen mit effektiven Massen bis etwa zum tausendfachen der Elektronenmasse zu Cooper-Paaren kondensieren. Die kritische Temperatur dieser Systeme liegt allerdings nur in der Größenordung von Kelvin. Unter den Schwer-Fermion-Supraleitern gilt UPt_3 [4] als *das* Modellsystem für unkonventionelle Supraleitung.

Das Charakteristikum der HTSL ist der schichtartige Aufbau, bei dem CuO_2-Ebenen eine wichtige Rolle für die Supraleitung spielen und die deswegen auch Kuprat-Supraleiter genannt werden. Eine enorme Belebung des Gebietes der Supraleitung war die Folge, unter anderem natürlich wegen der möglichen Anwendungspotentiale von HTSL, die eine kritische Temperatur oberhalb des Siedepunktes des flüssigen Stickstoffs aufweisen. Der Rekord für die höchste Übergangstemperatur unter Normaldruck überhaupt wird mit 134 K vom HTSL $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ gehalten [5]. Diese neuartigen Supraleiter scheinen nicht mehr mit den mikroskopischen Vorstellungen der BCS-Theorie vereinbar zu sein. Insbesondere der Paarungsmechanismus, der zur Bildung der Cooper-Paare führt, ist letztlich noch ungeklärt. Neben der klassischen Elektron-Phonon-Wechselwirkung sind auch magnetische Anregungen als Vermittler der attraktiven Wechselwirkung in der Diskussion.

Auch in organischen Verbindungen ist Supraleitung entdeckt worden [6]. Sogar die Koexistenz von Supraleitung und Ferromagnetismus, im Rahmen der BCS-Theorie sich eigentlich ausschließende Ordnungen[1], ist möglich [7, 8]. Die allgemeine Symmetrisierungsvorschrift für Fermionen besagt lediglich, dass das Produkt aus Orts- und Spinfunktion antisymmetrisch sein muss. Klassische Supraleiter weisen eine symmetrische Ortsfunktion auf und besitzen somit ein Spin-Singlett-Zustand. Eine parallele Spinausrichtung, ein Spin-Triplett-Zustand, ist prinzipiell möglich, wenn die Ortsfunktion antisymmetrisch ist.

Für einen Großteil dieser neuen Substanzen ist die Topologie der Energielücke anders als von der BCS-Theorie vorausgesagt. Eine Energielücke, die auf bestimmten Bereichen der Fermi-Fläche verschwindet, wird beobachtet. Diese Bereiche werden als Nullstellen bezeichnet. Da die Energielücke und deren Symmetrieeigenschaften eng mit dem Mechanismus der Supraleitung verknüpft ist, ist es von besonderem Interesse von experimenteller Seite Aussagen über die Energielücke zu gewinnen. Es existieren verschie-

[1] Die Spins der Elektronen im Cooper-Paar stehen antiparallel zueinander, im Ferromagnet wird aber eine parallele Spinanordnung bevorzugt!

dene Messmethoden, mit denen unterschiedliche Aspekte der Energielücke untersucht werden können. Über die Topologie der Energielücke lässt sich aus der Temperaturabhängigkeit ($T \ll T_c$) der spezifischen Wärme oder der Relaxation resonant angeregter Kerne (NMR) globale Information gewinnen. Aussagen über die Richtungsabhängigkeit der Energielücke lassen sich prinzipiell beispielsweise über Messung der Ultraschalldämpfung, der thermischen Leitfähigkeit, der magnetischen Eindringtiefe, der Tunnelspektroskopie und auch mit der Punktkontaktspektroskopie gewinnen. Über die Phasenbeziehungen im Supraleiter sind mittels Josephson-Kontakten (und darauf aufbauende Experimente mit Quanteninterferometern, sog. SQUIDs) Aussagen möglich [9]. Da sich aus den Phasenbeziehungen für bestimmte Supraleiter ein gebundener Oberflächenzustand ergibt, lassen sich mit der Tunnelspektroskopie und der Punktkontaktspektroskopie in diesen Fällen auch Informationen über die Phase gewinnen.

Mit der Entdeckung von Supraleitung in dotiertem C_{60} [10], zuletzt löcherdotiertem $C_{60}/CHBr_3$ ($T_c = 117$ K) [11], und MgB_2 ($T_c = 39$ K) [12] ist in jüngerer Zeit die Supraleitung in Verbindungen mit den Hauptgruppenelementen des Periodensystems wieder ins Rampenlicht gerückt. Das T_c der zwei letztgenannten Substanzen übersteigt die Übergangstemperatur aller Nichtkuprat-Supraleiter, die vor der Entdeckung der Supraleitung in beiden Systemen maximal 30 K ($Ba_{1-x}K_xBiO_3$) [13] betrug, bei weitem.

MgB_2 ist eine der Verbindungen die in dieser Arbeit untersucht wird. Wegen der ungewöhnlich hohen kritischen Temperatur – der bislang höchsten überhaupt für ein binäres System, besonders im Vergleich zu anderen Supraleitern aus leichten Elementen – stellt sich zunächst die Frage, ob in dieser Substanz neuartige Mechanismen zur Supraleitung führen. Das beobachtete T_c in MgB_2 befindet sich an bzw. schon über der Grenze dessen, was an maximaler kritischer Temperatur für über Phononen vermittelte Supraleitung theoretisch erwartet wird [14].

Für die zweite Substanz, die in dieser Arbeit untersucht wird, Sr_2RuO_4 [15], kommen die Hinweise auf ungewöhnliche supraleitende Eigenschaften nicht aus der Größe der kritischen Temperatur; sie ist mit $T_c = 1.5$ K vergleichsweise winzig. Vielmehr ist zunächst die strukturelle Verwandtschaft zu den HTSL interessant: Sr_2RuO_4 ist isostrukturell zum ersten HTSL $(La,Sr)_2CuO_4$ [3], wobei jedoch Cu durch Ru ersetzt wird. Bis heute ist Sr_2RuO_4 damit der einzige bekannte Supraleiter dieser Struktur, der ohne die für die HTSL so wichtigen CuO_2-Ebenen auskommt. Wie die HTSL befindet sich Sr_2RuO_4 in der Nähe eines Metall-Isolator-Übergangs [16]. Während die HTSL jedoch erst durch Dotierung eine metallische Phase aufweisen und Supraleitung zeigen, tritt in Sr_2RuO_4 die Supraleitung ohne weitere Dotierung

auf. Das hat aus experimenteller Sicht den Vorteil, dass die Untersuchung der Kristalle nicht durch Unordnungseffekte gestört wird. Die supraleitende Phase selbst zeigt ebenfalls ungewöhnliche Eigenschaften, die starke Hinweise auf das Vorliegen unkonventioneller Supraleitung geben, und von denen hier einige einleitend erwähnt werden sollen: (i) Die Supraleitung wird schon durch nichtmagnetische Verunreinigungen kleinster Konzentration stark unterdrückt [17], (ii) Messungen der Knight-Shift zeigen keine Änderung der Spinsuszeptibilität unterhalb T_c, was mit dem Vorliegen eines Spin-Triplett-Zustandes interpretiert wird [18] und (iii) das Auftreten eines spontanen Magnetfeldes unterhalb T_c, durch Myonenspinrotation (μSR) detektiert [19], impliziert eine gebrochene Zeitumkehrsymmetrie.

Das Ziel der in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen an den genannten Systemen ist, Aussagen über die Symmetrie des Ordnungsparameters der Supraleitung zu gewinnen und so zum Verständnis der Mechanismen die zur Supraleitung führen beizutragen. Im nächsten Kapitel werden zunächst begriffliche Grundlagen zur Messmethode und Supraleitung eingeführt. Es folgt in Kapitel 3 die Beschreibung der experimentellen Vorgehensweise, bevor in den darauf folgenden Kapiteln 4 und 5 die Messungen an MgB_2 und Sr_2RuO_4 vorgestellt und diskutiert werden.