

ULRICH ECKERN, KARL-HEINZ HÖCK

ELEKTRONEN — FAST SO SCHWER WIE WASSERSTOFF

Systeme von „schweren Fermionen“ sind exotische metallische Verbindungen, in denen die elektrischen Ladungsträger (Elektronen oder Löcher) in der Nähe des Nullpunktes der Temperatur anscheinend eine einige hundert- bis tausendmal vergrößerte Masse haben. Trotzdem zeigen einige dieser Materialien einen Übergang in einen supraleitenden Zustand, der sich aber drastisch von der Supraleitung in einfachen Metallen unterscheidet. Die Entdeckung immer neuer Verbindungen mit unerwarteten Eigenschaften macht diese Systeme seit etwa fünfzehn Jahren zu einem faszinierenden Gebiet der Festkörperphysik. — Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über die theoretischen Hintergründe.

In den letzten zwei Dekaden hat sich innerhalb der Physik der Metalle ein Gebiet rapide entwickelt, das zu einer Fülle neuer physikalischer Phänomene geführt hat. Es handelt sich dabei um bestimmte metallische Materialien, die „schwere“ Elektronen enthalten und für die sich die Bezeichnung „Schwere Fermionen-Systeme“ eingebürgert hat. Charakteristisch für diese Systeme ist die experimentelle Beobachtung, daß die für die Stromleitung verantwortlichen Ladungsträger, die Elektronen (oder auch die Löcher), eine Masse haben, die einige hundertmal größer ist als die von freien Elektronen bzw. die der Elektronen in einfachen Metallen wie Kupfer, Aluminium oder Blei. Dieses Phänomen tritt allerdings nur bei tiefen Temperaturen auf, etwa zehn Grad oberhalb des absoluten Nullpunktes der Temperatur. Bei „hohen“ Temperaturen, z.B. bei Zimmertemperatur, haben die Schwere Fermionen-Metalle relativ normale, leicht zu verstehende Eigenschaften.

Bahnbrechende Entwicklungen in der Festkörperphysik der letzten etwa 50 Jahre sind generell mit der Entdeckung und Erforschung neuartiger Grundzustände der kondensierten Materie verknüpft. Herausragendes Beispiel ist die Entdeckung (vor etwa 80 Jahren), daß der elektrische Widerstand von Quecksilber bei etwa 4 K ($K = \text{Kelvin}$, 4 Grad oberhalb des absoluten Nullpunkts der Temperatur) verschwindet, d.h. elektrischer Strom wird verlustfrei transportiert. Dieser Effekt hängt damit zusammen, daß die Leitungselektronen einen neuartigen Zustand von gepaarten Elektronen bilden, der durch eine anziehende Wechselwirkung, vermittelt durch die Schwingungen des Kristallgitters, möglich wird. Inzwischen ist das Phänomen der Supraleitung, mit seinen vielfältigen technischen Anwendungen, aus vielen Bereichen der Physik nicht mehr wegzudenken.

Schwere-Fermionen-Systeme sind metallische Verbindungen, in denen ein Bestandteil aus den Seltenen Erden oder den Aktiniden stammt. Einige Beispiele sind CeAl_3 (Entdeckung 1975), CeCu_2Si_2 (1979), UBe_{13} (1983), UPt_3 und CeCu_6 (beide 1984). Diese Materialien enthalten teilweise gefüllte 4f- und 5f-Elektronenschalen und verhalten sich bei hohen Temperaturen so, als würden die f-Elektronen auf ihren Gitterplätzen festsitzen. Dies ist genauso, wie es auch bei konventionellen Verbindungen mit Seltenen Erden oder Aktiniden beobachtet wird. Insbesondere ordnen sich bei den konventionellen Materialien, wenn man sie abkühlt, die magnetischen Momente spontan an — entweder antiferromagnetisch (benachbarte magnetische Momente antiparallel) oder seltener ferromagnetisch (Momente parallel). Im Gegensatz dazu zeigen die neuen Verbindungen bei tiefen Temperaturen ein metallisches Verhalten sehr ähnlich dem einfacher Metalle — abgesehen von der Tatsache, daß die Masse der beweglichen Elektronen einige hundertmal größer erscheint.

Noch überraschender aber war die Beobachtung von Steglich und Mitarbeitern (1979), daß die Cer-Kupfer-Silizium-Verbindung bei etwa 0.6 K einen Übergang in einen supraleitenden Zustand zeigt! Dieses Phänomen, das später auch in anderen Verbindungen gefunden wurde, war deshalb überraschend, weil die äußerst erfolgreiche, von Bardeen, Cooper und Schrieffer gefundene Theorie der Supraleitung auf die nahezu lokalisierten Elektronen der Schwere-Fermionen-Verbindungen gerade nicht anwendbar sein sollte.

Zahlreiche Merkmale dieses supraleitenden Zustandes sind sehr ungewöhnlich — Anlaß für die Vermutung, daß nicht nur ein unkonventioneller Mechanismus ursächlich für den supraleitenden Übergang ist, sondern daß sich außerdem die Konfiguration des Suprazustandes von der gewöhnlicher Supraleiter drastisch unterscheidet. Während bei konventionellen Supraleitern die Wechselwirkung mit den Gitterschwingungen zu einer isotropen Lücke im Spektrum der elektronischen Anregungen führt (BCS-Theorie), vermutet man als Ursache für den supraleitenden Zustand der Schwere-Fermionen-Systeme eine durch magnetische Fluk-

tuationen vermittelte Wechselwirkung, möglicherweise mit einer stark anisotropen Energielücke.

Normale Schwere Fermionen

Auch die ungewöhnlichen Eigenschaften der Schwere-Fermionen-Verbindungen im Normalzustand (d.h. einige Grad oberhalb der Temperatur des Eintritts in den Suprazustand) sind noch weitgehend unverstanden. Wie schon erwähnt, verhalten sich die schweren Elektronen „fast“ wie die Elektronen in einfachen Metallen. Zwei Größen stehen bei der Diskussion der physikalischen Eigenschaften häufig im Vordergrund: die spezifische Wärme und die magnetische Suszeptibilität. Insbesondere zeigen die Experimente, daß die spezifische Wärme dividiert durch die Temperatur, die Sommerfeld-Konstante (üblicherweise mit γ bezeichnet), und auch die magnetische Suszeptibilität, χ , im Bereich unterhalb von etwa 10 K einen konstanten Wert annehmen, wie auch bei einfachen Metallen. Das Verhältnis γ/χ ist eine universelle, nur von Naturkonstanten bestimmte Zahl — auch für die schweren Elektronen! Aber einzeln sind diese Größen in den Schwere-Fermionen-Systemen einige hundertmal größer als die freier Elektronen, was sich direkt in eine entsprechend größere Masse umrechnen läßt.

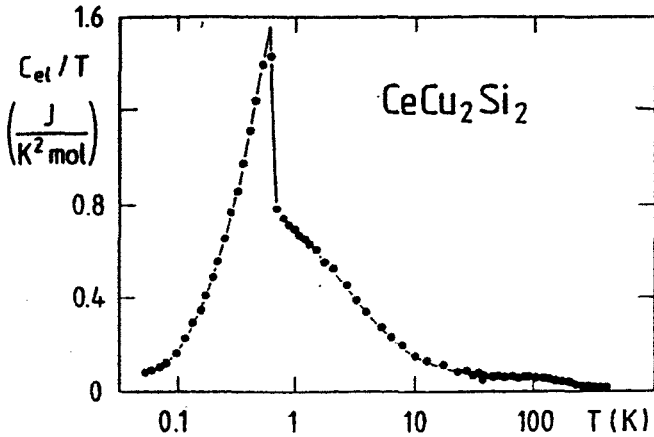
Selbst die einfachsten theoretischen Modelle für diese Systeme enthalten die von den s- und p-Elektronen gebildeten Leitungsbänder, die lokalisierten f-Elektronen-Zustände mit einer starken abstoßenden Wechselwirkung zwischen zwei f-Elektronen am gleichen Gitterplatz, und insbesondere den Transfer zwischen Leitungs- und lokalisierten Elektronen (Hybridisierung), der von enormer Bedeutung ist. Leider sind immer noch keine exakten Lösungen dieses Modells verfügbar, und es besteht nur teilweise Einigkeit über eine näherungsweise Behandlung.

Um einen ersten Eindruck in die Komplexität dieses Modells zu bekommen, betrachten wir zuerst eine verdünnte Legierung von magnetischen Ionen in einem Metall, d.h. ein einzelnes magnetisches Moment, das über die Austauschwechselwirkung an den Eigendrehimpuls (Spin) der Leitungselektronen koppelt. Wenn das Vorzeichen der Austauschwechselwirkung eine Antiparallelstellung der Momente begünstigt, zeigen diese Systeme unterhalb der Kondo-Temperatur, T_K (etwa 10 K), u.a. einen Anstieg des elektrischen Widerstands, der mit der Ausbildung eines spin-korrelierten Vielteilchenzustands in Verbindung gebracht wird (Kondo-Effekt). Glücklicherweise konnte dieses Problem inzwischen exakt gelöst und das Modell experimentell bestätigt werden.

In Gegensatz dazu bilden die magnetischen Momente der f-Elektronen in den Schwere-Fermionen-Systemen ein reguläres Gitter („Kondo-Gitter“). Der Überlapp der f-Wellenfunktionen ist nur klein. Daher ist bei „hohen“ Temperaturen ihr Beitrag zur magnetischen Suszeptibilität von der bekannten Curie-Weiss-Form, d.h. die Momente sind unabhängig voneinander. Bei tiefen Temperaturen, unterhalb T_K , kommt nun wiederum die Hybridisierung mit den Leitungselektronen zum Tragen, die f-Elektronen müssen durch ausgedehnte (metallische) Zustände beschrieben werden. Allerdings können diese Elektronen nicht einfach herumhüpfen — die starke Coulombabstoßung („starke Korrelation“), wenn zwei Elektronen am gleichen Gitterplatz sitzen, verhindert dies. (Siehe auch den vorhergehenden Beitrag von D. Vollhardt.) Es gibt aber vielfältige Möglichkeiten, die Eigendrehimpulse anzuregen, und dies bedeutet eine hohe Zustandsdichte und damit eine sehr große Masse.

Schwere-Fermionen-Supraleiter

Können wir nun, in dem oben beschriebenen Modell, die Supraleitung der Schwere Fermionen verstehen, wo doch selbst die Bestimmung der Normalzustandseigenschaften nur bruchstückhaft gelungen ist? Diese Frage wird wohl noch lange offen bleiben. Ein klarer experimenteller Befund ist zunächst ein gigantischer Sprung in der spezifischen Wärme bei der Übergangstemperatur, siehe Abbildung, in Übereinstimmung mit der BCS-Theorie und damit klares Indiz dafür, daß die schweren Elektronen die Cooper-Paare bilden. Unterhalb des Übergangs nimmt die spezifische Wärme, C_{el} , nur algebraisch ab, d.h. langsamer als bei einfa-



Elektronische spezifische Wärme von CeCu_2Si_2 in einer halblogarithmischen Auftragung, C_{el}/T versus T (aus: F. Steglich, Physikalische Blätter 49, 395 (1993)). Beim Abkühlen von Raumtemperatur bis zur kritischen Temperatur von etwa 0.6 K wächst der Sommerfeld-Koeffizient $C_{el}(T)/T$ von 5 auf 800 $\text{mJ}/(\text{K}^2 \cdot \text{mol})$ an, was als Entstehung extrem schwerer Quasiteilchen interpretiert werden kann. Aus dem riesigen Sprung der spezifischen Wärme am supraleitenden Phasenübergang schließt man, daß die Cooper-Paare aus diesen „Schweren Elektronen“ gebildet werden.

chen Supraleitern: Dies ist ein klarer Hinweis auf einen unkonventionellen Paarungsmechanismus. Zum Beispiel erlauben ganzzahlige Potenzen, $C_{el} \sim T^2$ oder $\sim T^3$, wie sie in einigen Uran-Verbindungen zu finden sind, den Schluß, daß die Energielücke auf Linien oder an Punkten auf der Fermifläche verschwindet. Entsprechend kann die Cooper-Paar-Wellenfunktion eine komplizierte Spin- und Ortsraumstruktur erhalten — anders als in der einfachen Supraleitung, wo die Wellenfunktion eine einfache, impulsunabhängige Größe ist. Dies eröffnet auch die Möglichkeit mehrerer supraleitender Phasen, die je nach Temperatur und Druck realisiert werden können. Neue Ergebnisse zum Phasendiagramm von leicht (einige Atom-%) Thorium-dotiertem UBe_{13} zeigen zum Beispiel unterhalb von etwa 2 kBar als Funktion der Temperatur zwei Übergänge, Normalmetall \rightarrow Supraleiter 1 \rightarrow Supraleiter 2, und unterhalb etwa 0.4 K einen Übergang Supraleiter 2 \rightarrow Supraleiter 3 bei Zunahme des Drucks. (Siehe auch den folgenden Beitrag von E.-W. Scheidt, Th. Schreiner und G.R. Stewart.) Über die Natur dieser Zustände ist aber noch sehr wenig bekannt.

Als weiteres Beispiel möchten wir aktuelle Resultate, die an der Verbindung UPd_2Al_3 gewonnen wurden, erwähnen. Dieses Material ist ein

echter „magnetischer Supraleiter“: Unterhalb 14 K ordnen sich die benachbarten Eigendrehimpulse der f-Elektronen antiferromagnetisch (antiparallel) an, und bei 2 K wird die Substanz supraleitend. Aber auch unterhalb dieser Temperatur bleibt die antiferromagnetische Ordnung bestehen. Wie ist das möglich, da man doch zunächst denkt, daß die magnetischen Momente die Spins der Cooper-Paare durcheinander bringen? Die Elektronen sind aber nicht wie Atome in Molekülen eng gebunden, sondern haben einen Abstand von etwa 100 Atomdurchmessern. Über einen solchen Abstand mitteln sich die magnetischen Momente nahezu zu Null. Die neuen Ergebnisse, unter anderem die Messung der thermischen Ausdehnung als Funktion der Temperatur und für verschiedene Magnetfelder, geben klare Hinweise auf einen räumlich modulierten supraleitenden Zustand. Dieser Zustand wurde bereits in den sechziger Jahren theoretisch von Fulde & Ferrell und Larkin & Ovchinnikov vorhergesagt. Zwei glückliche Umstände machten die Beobachtung dieses Phänomens möglich. Zum einen ist das obere kritische Feld, bedingt durch die schwere Masse der Elektronen, in den Schwere-Fermionen-Systemen ungewöhnlich groß (einige Tesla), und zum zweiten ließ sich ein perfekter Einkristall aus der U-Pd-Al-Verbindung herstellen. Das Zusammenwirken des orbitalen Effekts (Elektronen im Magnetfeld bewegen

sich auf Kreisbahnen) mit dem Zeeman-Effekt (Verschiebung der „spin up“ gegen die „spin down“ Zustände) ist für dieses Phänomen entscheidend, während sich Defekte im Kristallgitter sehr ungünstig auswirken.

Worin liegt nun die Bedeutung der (experimentellen und theoretischen) Untersuchungen dieser doch recht exotisch anmutenden, neuen Verbindungen? Die obigen Ausführungen geben, unseres Erachtens, einen guten Eindruck von der Tatsache, daß wir, die Festkörperphysiker, immer wieder Phänomenen gegenüberstehen, die sich trotz intensiver Bemühungen weitgehend unserem Verständnis entziehen — obwohl wir doch die Grundlagen der Festkörperphysik, nämlich die wellenmechanische Beschreibung der Bewegung der Elektronen in einem Festkörper, gut verstanden haben. Es zeigt sich aber, daß in einem System von sehr vielen Teilchen (hier Elektronen), im Gegensatz zu Atomen und kleineren Molekülen, oft sogenannte kooperative oder kohärente Phänomene auftreten, die mit einfachen klassischen Vorstellungen nicht in Einklang zu bringen sind. Dies betrifft insbesondere elektronische Systeme, bei denen die starke Wechselwirkung zwischen den Teilchen, die unter Umständen zu magnetischen Grundzuständen führt, eine wichtige Rolle spielt. Zu diesen Materialien gehören auch die neuen keramischen Hochtemperatur-Supraleiter, deren Verhalten entscheidend durch die starken elektronischen Korrelationen in den Kupfer-Oxid-Ebenen bestimmt wird.

Prof. Dr. Ulrich Eckern, Theoretische Physik II, Tel. 598-3236

Priv.-Doz. Dr. Karl-Heinz Höck, Theoretische Physik I & II, Tel. 598-3224

Elektronische Post:

eckern@physik.uni-augsburg.de, hoeck@physik.uni-augsburg.de

Internet: <http://www.physik.uni-augsburg.de/theo2>