

Paul Leiderer, Alois Loidl

## Elektronen – fast so schwer wie Atomkerne

Im Jahr 1986 gründeten etwa dreißig Wissenschaftler der TH Darmstadt, der Universitäten Frankfurt/M. und Mainz sowie des Max Planck-Institutes für Festkörperphysik in Stuttgart einen neuen Sonderforschungsbereich, dessen Ziel die Aufklärung der exotischen Eigenschaften einer neuartigen Gruppe von Festkörpern ist. Obwohl diese Substanzen wegen ihres unvorhergesehenen Verhaltens zunächst vornehmlich bei den Grundlagenforschern Aufsehen erregten, sind sie auch für die Anwendung höchst attraktiv. Mögliche Auswirkungen sind nicht auf die Physik beschränkt, sondern reichen hinein in die Technik, ja sogar in die Medizin. „Elektronisch hochkorrelierte metallische Materialien“ – was verbirgt sich hinter diesem für Nichteingeweihte spröden und abstrakt klingenden Namen?

Auf den ersten Blick sind es eher unscheinbare Kristalle, undurchsichtig, metallisch glänzend, und oftmals nur in mikroskopischer Größe verfügbar. Sie werden aus zwei, manchmal auch drei Elementen sorgfältig in sehr genauen Verhältnissen gemischt und zu Legierungen verschmolzen. Nun gibt es natürlich eine Unzahl von metallischen Mischkristallen. Denen, die beim neuen SFB 252 im Brennpunkt des Interesses stehen, ist eines gemeinsam: Ihre Elektronen, die für die elektrische Leitfähigkeit verantwortlich sind, unterscheiden sich drastisch von den Elektronen in „normalen“ Metallen. Der Unterschied liegt in der Masse der Elektronen (genauer: der „effektiven“ Masse). In gewöhnlichen Metallen wie Kupfer oder Aluminium sind die Elektronen etwa tausendmal „leichter“ als die Protonen und Neutronen, aus denen die Atomkerne aufgebaut sind. Zwar kann man die Elektronen im Metall nicht wiegen, doch ihre effektive Masse ergibt sich aus Eigenschaften wie der spezifischen Wärme und dem elektrischen und magnetischen Verhalten. In den hier interessierenden Materialien nun täuschen die Elektronen eine Masse vor, die um zwei bis drei Größenordnungen über der eines freien Elektrons im Vakuum



liegt – damit werden die Massen von Protonen und Elektronen fast vergleichbar. Dies gilt allerdings nur bei tiefen Temperaturen; bei Zimmertemperatur sind die Elektronen leicht wie in einem gewöhnlichen Metall. Bei den Physikern hat sich für diese Materialien wegen ihrer hohen Elektronenmasse der Name „Schwere-Fermionen-Systeme“ eingebürgert. (Fermionen – zu denen auch die Elektronen gehören – sind Teilchen, bei denen eine bestimmte Quantenzahl, der Spin, den Wert  $1/2$  hat. Der Name rührt daher, daß diese Teilchen der Fermi-Statistik gehorchen.)

Woher die riesige effektive Masse der Elektronen bei den tiefen Temperaturen kommt, ist im einzelnen noch nicht verstanden. Vermutet wird aber, daß die – im Titel des SFB angesprochenen – Korrelationen zwischen den Elektronen dafür verantwortlich sind. Dies bedeutet, daß die Elektronen nicht wie sonst üblich weitgehend unabhängig voneinander sind, sondern daß sie sich gegenseitig stark beeinflussen und jedes einzelne Rückwirkungen auf alle anderen hat, die Elektronen untereinander also stark korreliert sind.

### **CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, der erste Schwere-Fermionen-Supraleiter**

Die Geburtsstunde der Schwere-Fermionen-Systeme läßt sich nicht genau festlegen. Bereits Mitte der siebziger Jahre experimentierten Forschergrup-

*Abb. 1: Polykristall aus dem Schwere-Fermionen-Material CeCu<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>. Die ursprünglich ellipsoidförmige Probe wurde im Hochfrequenz-Induktionsofen erschmolzen und anschließend mit der Diamantsäge zerteilt, um auch das Probeninnere studieren zu können. Die Probengröße beträgt 5 mm.*

pen mit diesen Materialien, allerdings ohne deren spektakuläre Eigenschaften in voller Breite zu erkennen. Ein denkwürdiges Jahr für die Forschung an Schwere-Fermionen-Systemen ist 1979, als Frank Steglich und seinen Mitarbeitern an der TH Darmstadt eine von den Festkörperphysikern weltweit beachtete Entdeckung gelang (1): Das Material CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> – eine Schwere-Fermionen-Legierung aus je zwei Teilen Kupfer und Silizium und einem Teil Cer – verliert bei tiefen Temperaturen nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt bei  $-273^{\circ}\text{C}$  seinen elektrischen Widerstand vollständig; es wird supraleitend. In einer Drahtwindung, aus solch supraleitendem Material gewickelt, könnte ein elektrischer Strom völlig verlustlos fließen, so daß über Tage hinweg keine Abnahme meßbar ist. Nun ist die Tatsache der Supraleitung an sich ein wohl bekanntes Phänomen, das schon zu Beginn dieses Jahrhunderts entdeckt wurde. Die Liste der Metalle, die bei tiefen Temperaturen supraleitend werden, umfaßt so bekannte Materialien wie Blei und Quecksilber. Das Bedeutsame am CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> aber war, daß es nicht in das Schema paßte, das man für andere Supraleiter hatte. Zum einen ist die Kopplung zwischen Elektronen und Gitterschwingungen, die die Supraleitung fördert, in diesem System offenbar schwach. Zudem tragen die Cer-Ionen magnetische Momente, die dem CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> eine merkbare Magnetisierbarkeit verleihen. Beim Abkühlen bis herunter zu einer charakteristischen Temperatur  $T^*$  von ca. 10 K (das sind  $-263^{\circ}\text{C}$ , zehn Grad über dem absoluten Nullpunkt) nimmt die Magnetisierbarkeit sogar noch weiter zu. Stoffe, die magnetisch sind, werden aber im allgemeinen nicht supraleitend, da der Magnetismus den subtilen Effekt, der

zur Supraleitung führt, zerstört. Daher bleibt ein Material mit hoher Magnetisierbarkeit wie Eisen auch bei den tiefsten Temperaturen ein normaler Leiter mit endlichem elektrischen Widerstand.

Das Umschwenken von einem magnetischen Metall bei höheren zum Supraleiter bei tiefen Temperaturen gehört zu den großen Ausnahmen. Es deutet darauf hin, daß die Elektronen, die sowohl für das eine als auch für das andere Verhalten verantwortlich sind, sich nicht so recht „entscheiden“ können. Bereits kleine Änderungen in den äußeren Bedingungen wie dem Druck oder in der Feinstruktur des mikroskopischen Aufbaus können dann einen Umschlag von dem einen zum anderen Zustand hervorrufen.

### Weitere Schwere-Fermionen-Kristalle

Mehrere Jahre lang war es unklar, ob dieses supraleitende Schwere-Fermionen-System  $CeCu_2Si_2$  nur einen Einzelfall, sozusagen eine Laune der Natur, darstellt. 1983 aber wurde mit  $UBe_{13}$  ein weiteres Material gefunden, das ähnliche Eigenschaften zeigt (2): Wie bei  $CeCu_2Si_2$  läßt sich beim Abkühlen ein Anwachsen der Magnetisierbarkeit bis zu  $T^* \approx 10$  K feststellen, wie im  $CeCu_2Si_2$  haben die Elektronen eine extrem hohe effektive Masse unterhalb  $T^*$ , und das Einsetzen der Supraleitung – in  $CeCu_2Si_2$  bei  $T_c \approx 0,6$  K – wurde im  $UBe_{13}$  sogar bei einer noch etwas höheren Temperatur,

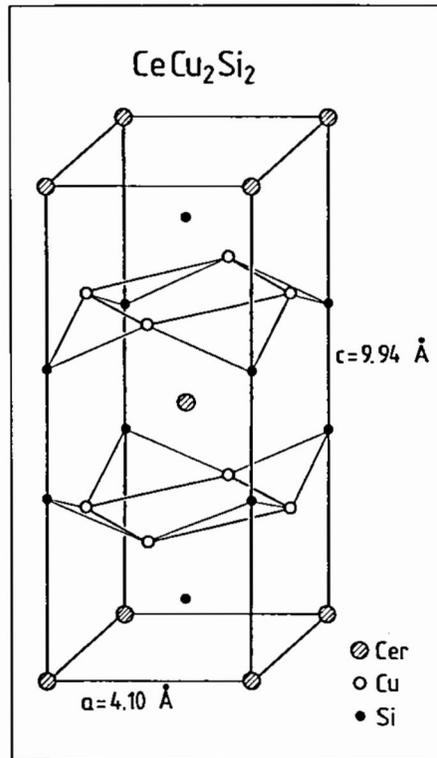


Abb. 2: Kristallstruktur von  $CeCu_2Si_2$ .

nämlich 0,85 K, beobachtet. Damit war klar, daß das Auftreten Schwerer Fermionen nicht nur an eine einzige metallische Verbindung geknüpft ist, und mithin die Materialwissenschaftler gefordert sind, sich mit den folgenden Fragen auseinanderzusetzen:

- Welche Verbindungen kann man herstellen, die solch exotisches Verhalten zeigen?

- Auf welche Bestandteile kommt es an? Welche Elemente können, welche müssen beteiligt sein?
- Wie schafft man es, Materialien zu schneiden, in denen diese Eigenschaften wie z.B. die Supraleitung besonders ausgeprägt sind?

Aus der Beantwortung dieser Fragen kann man sich wichtige Impulse für die Grundlagenforschung, aber auch für die Anwendung erhoffen. Für die Grundlagenforschung, weil man z.B. aus dem Wert der maximal erreichbaren Sprungtemperatur  $T_c$ , bis zu der ein Material supraleitend ist, Hinweise auf die Mechanismen erhalten kann, die hier überhaupt erst zur Supraleitung führen. Für die Anwendung, weil man z.B. mit supraleitenden Spulen wegen ihrer verlustlosen Dauerströme hohe Magnetfelder sehr energiesparend erzeugen kann. Derartige Spulen lassen sich dann zu so unterschiedlichen Zwecken wie als Hubmagnet einer Magnetschwebebahn oder als Herzstück eines Kernspintomographen in der Klinik einsetzen. Beispiele dieser Art mit konventionellen Supraleitern gibt es bereits; mit den Schwere-Fermionen-Supraleitern könnte ein Vordringen in neue Bereiche möglich werden, wobei nicht nur möglichst hohe Sprungtemperaturen von Interesse sind, sondern vor allem auch hohe kritische Magnetfelder, bis zu denen die Supraleitung stabilisiert werden kann. Gerade in letzterer Hinsicht sind die neuen Materialien vielversprechend, weil bei ihnen der Supralei-

tungsmechanismus möglicherweise grundverschieden ist von dem in Blei oder Niob-Titan – dem Material, aus dem heutzutage die meisten Supraleitungsspulen gewickelt werden.

Da schon bald klar war, daß die neue Substanzklasse sehr nützliche Materialien mit hoher technologischer Bedeutung hervorbringen kann, stieg schnell auch die Zahl der Arbeitsgruppen, die sich mit diesen Substanzen beschäftigten. Als Ergebnis der intensiven Forschungstätigkeit kennt man bis heute rund ein Dutzend von Schweren-Fermionen-Systemen, und in immer rascherer Folge kommen neue Vertreter dazu. Nur einige werden supraleitend wie das  $CeCu_2Si_2$  oder das  $UPt_3$ ; andere zeigen einen Phasenübergang in einen magnetisch geordneten Zustand wie z.B.  $CeAl_3$ . Auffallend ist eine Gemeinsamkeit in der Zusammensetzung: In nahezu allen bisher gefundenen Materialien mit den superschweren Elektronen kommt als Bestandteil entweder das Lanthaniden-Element Cer oder das Aktiniden-Element Uran vor.

### Wie ist das eigenartige Verhalten der Schweren-Fermionen-Systeme zu verstehen?

Eine eindeutige Antwort auf diese Frage gibt es noch nicht. Es ist gerade das Ziel des neuen Sonderforschungsbereiches, Licht in diese noch sehr im Dunkeln liegenden Mechanismen zu bringen. Dennoch läßt sich anhand der bisherigen Ergebnisse schon eine

grobe Vorstellung für die hohen Massen skizzieren, vor allem aus der Erkenntnis, daß durchweg Cer oder Uran in den Verbindungen enthalten ist:

Wie in gewöhnlichen Metallen sind auch hier die Elektronen, die aus der äußersten Schale der Atomhülle stammen, nicht an einen bestimmten Atomrumpf gebunden, sondern bilden einen See von Leitungselektronen. Elektronen aus einer inneren Schale (bezeichnet als 4f bei Cer, 5f bei Uran) liegen nun aber in ihrer Energie sehr dicht bei der Energie der Leitungselektronen. Ein Elektron kann daher, ohne seine Energie merklich zu ändern, zeitweise in die Rolle eines Leitungselektrons, zeitweise in die eines f-Elektrons schlüpfen. Vom quantenmechanischen Standpunkt aus läßt sich gar nicht mehr genau unterscheiden, in welchem Zustand sich das Elektron befindet – es bildet sich ein „Hybrid-Zustand“ aus. Hybridisiert haben die Teilchen eine sehr kleine Geschwindigkeit, und dies bedeutet eine hohe effektive Masse.

Noch völlig offen ist, welcher Mechanismus in diesen Systemen zur Supraleitung führt. In den konventionellen Supraleitern glaubt man seit der Theorie von Bardeen, Cooper und Schrieffer („BCS-Theorie“), die dafür 1961 den Nobelpreis erhielten, den Mechanismus sehr genau zu kennen: Die Leitungselektronen finden sich aufgrund ihrer Wechselwirkung mit dem Kri-

stallgitter zu sog. Cooper-Paaren zusammen, wobei ihre Spins von jeweils  $1/2$  entgegengesetzt gerichtet sind. Für den Gesamtspin eines solchen Paares ergibt sich somit der Wert Null. Teilchen mit Spin 0 aber gehorchen nicht mehr der Fermi-, sondern der Bose-Statistik. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für das Auftreten von Supraleitung, denn aus quantenmechanischen Gründen können sich nur Bose-Teilchen („Bosonen“) in großer Zahl zu einem gemeinsamen, supraleitenden Zustand zusammenschließen. Bei Fermionen dagegen kann in einem bestimmten Zustand jeweils nur *ein* Teilchen sitzen.

Nun ist freilich auch denkbar, daß sich Elektronenpaare mit parallel gestellten Spins ausbilden, so daß sich ein Gesamtspin von 1 ergibt. Auch in diesem Fall hätte man Bose-Teilchen, die ebenfalls zur Supraleitung befähigt sind. Trotz intensiver Suche hat man aber bisher noch kein Metall mit diesen Spin 1-Paaren finden können. Um so aufregender für die Festkörperphysiker ist die Spekulation, einige der supraleitenden Schweren-Fermionen-Systeme könnten Vertreter für diesen lange gesuchten Typus sein. Die Kopplung der Elektronen zu Paaren mit Gesamtspin 1 („Triplett-Supraleitung“) könnte in diesem Fall eventuell auch durch eine neue Art der Wechselwirkung zustande kommen. Antiferromagnetische Korrelationen sind ein denkbarer Kopplungsmechanismus; sie würden die Nachbarschaft von Magne-

tismus und Supraleitung in den Schweren-Fermionen-Systemen erklären. (An der grundsätzlichen Möglichkeit, daß auch Spin 1-Paare zur Supraleitung führen können, gibt es keinen Zweifel. Belegt wird dies durch das Edelgas  $^3\text{He}$ , das bei tiefen Temperaturen zwar keinen supraleitenden, aber einen eng damit verwandten suprafluiden Zustand bildet.)

Es versteht sich, daß man angesichts der vielfältigen Fragen den neuen Materialien mit dem gesamten Instrumentarium zu Leibe rückt, das die moderne Festkörperphysik aufzubieten hat. Schon die Herstellung der Proben ist eine Herausforderung, da es sich um hochschmelzende und sehr reaktive Stoffe handelt. Die Legierungen müssen daher nach ausgetüftelten Rezepten in spezialisierten Kristall-Labors erschmolzen werden. Die Experimente an den Materialien umfassen Messungen der spezifischen Wärme und des Ohmschen Widerstandes, Messungen bei extrem tiefen Temperaturen und extrem hohen Magnetfeldern ebenso wie den Beschuß mit Neutronen, Laserlicht und Röntgenquanten. Da die hierfür notwendigen hochgezüchteten Apparaturen teuer und aufwendig sind, ist der Zusammenschluß der Forschergruppen der TH Darmstadt und der Universitäten Frankfurt und Mainz ein wichtiger Schritt zur gegenseitigen Ergänzung. Stimulierend auf den Beitrag der Mainzer Physiker hat sich hier auch die Gründung eines materialwissenschaftlichen Schwerpunktes an der Johannes Gutenberg-Universität ausgewirkt.

Im folgenden wollen wir noch einen kurzen Überblick geben, wo die Schwerpunkte der Arbeitsgruppen aus Mainz liegen. Es handelt sich um Experimente zur Neutronen-, Röntgen- und Ramanstreuung sowie zum Tunnel-effekt.

### Röntgen- und Neutronenstreuung

Sehr lange bereits ist bekannt, daß Licht an einem optischen Gitter gebeugt werden kann, wenn die Gitterkonstanten (die Abstände der Beugungsspalte) in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichtes liegen. Eine Analyse des Beugungsbildes gibt Aufschluß einerseits über die Natur des Lichtes und andererseits über den Aufbau des streuenden Objektes.



**Paul Leiderer (rechts)**

1944 in Dorfen/Obb. geboren, studierte er Physik an der TU München, wo er 1973 promovierte. Nach einem Aufenthalt als DFG-Stipendiat an der Cornell-University und einer einjährigen Industrietätigkeit kehrte er 1975 als wissenschaftlicher Assistent an die TU München zurück. Dort folgte 1979 die Habilitation und 1981 die Berufung zum Professor. Für seine Arbeiten an flüssigen Mischungen der Heliumisotope  $^3\text{He}$  und  $^4\text{He}$  erhielt er 1980 den Physikpreis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Im Jahr 1982 wurde er als Professor für Experimentalphysik nach Mainz berufen. Im SFB 252 ist er Sprecher der Universität Mainz. Seine Hauptarbeitsgebiete liegen im Bereich der Tieftemperatur- und Grenzflächenphysik.

**Alois Loidl (links)**

1945 in Ebensee (Österreich) geboren, studierte er von 1963 bis 1970 Technische Physik an der TU Wien. Anschließend war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Frankfurt/M., wo er 1976 promovierte. Seit 1977 arbeitet er am Institut für Physik der Universität Mainz. Nach Gastaufenthalten am Institut Laue-Langevin in Grenoble (Frankreich) und am Risø National Laboratory in Dänemark habilitierte er 1981 in Mainz und erhielt hier eine C2-Professur auf Zeit. Im Sommersemester 1986 übernahm er eine Lehrstuhlvertretung im Institut für Festkörperphysik an der TH Darmstadt. Seine Hauptarbeitsgebiete sind materialwissenschaftliche Aspekte nichtmetallischer amorpher Materialien und die Physik Seltener-Erd-Metalle und Schwerer-Fermionen-Systeme.

1912 konnte Max von Laue zeigen, daß die von Röntgen entdeckten X-Strahlen ganz analog an Kristallen gestreut werden können: Einkristalle sind ideale dreidimensionale Beugungsgitter, und die Wellenlänge der Röntgenstrahlen entspricht den Abständen der Gitterbausteine (Atome). Aufgrund des Dualismus von Teilchen und Welle können auch Neutronen durch eine Wellenlänge charakterisiert werden. Forschungsreaktoren, wie der Hochflußreaktor des Institutes Max von Laue-Paul Langevin in Grenoble in Frankreich, dienen als Quellen für thermische Neutronen. Ihre Wellenlänge ist ähnlich der von Röntgenstrahlen.

Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch in der Wechselwirkung von Röntgenstrahlen und Neutronen mit Materie: Röntgenstrahlen werden an den Elektronenhüllen der Gitterbausteine gestreut. Die Analyse der Streubilder gibt Aufschluß über die exakte Lage der Metallatome im Kristallgitter. Neutronen wechselwirken einerseits mit den Atomkernen; diese sogenannte Kernstreuung gibt ebenfalls Einblick in den mikroskopischen Aufbau der Metalle. Andererseits tragen Neutronen aber auch ein magnetisches Moment, und dieses tritt in Wechselwirkung mit magnetischen Ionen, wie z.B. mit dem Cer-Ion in  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$ . Man gewinnt also zusätzlich Aufschluß

Abb. 3: Schematischer Aufbau der Raman-Apparatur.

über Anordnung und Größe der magnetischen Momente im Kristall, die die magnetischen Eigenschaften bestimmen. Ein weiterer Vorteil der Neutronenstreuung sei hier ebenfalls kurz erwähnt: Die Energie thermischer Neutronen ist wesentlich kleiner als die Energie der Röntgenquanten und liegt im Bereich der Energien der Schwingungen der Atome im Kristallgitter. Mittels Neutronenstreuung ist es nun möglich, die Energien dieser Schwingungen zu messen und neben der Struktur so Aufschluß über die Dynamik von Schweren-Fermionen-Systemen zu gewinnen.

Struktur Schwerer-Fermionen-Systeme: Es existiert heute eine steigende Zahl experimenteller Befunde, die zeigen, daß die Abstände der magnetischen Ionen im Kristallgitter von entscheidender Bedeutung für das Verhalten des Metalles sind:

- Liegen die magnetischen Cer-Ionen im Kristall sehr dicht beieinander, so wird das äußerste Hüllenelektron (das  $4f^1$ -Elektron, es bestimmt das magnetische Verhalten des Metalles) vollständig delokalisiert. Es verhält sich wie ein Leitungselektron und das Metall wird unmagnetisch.
- Sind die Cer-Ionen sehr weit voneinander entfernt, so bleibt das  $4f^1$ -Elektron gut lokalisiert in seiner Hüllbahn und trägt das ungestörte magnetische Moment. Bei tiefen Temperaturen ordnen diese Metalle magnetisch.
- Das Schwere-Fermionen-Verhalten findet man in einem Bereich mittlerer Atomabstände.

Durch ein detailliertes Studium isostruktureller Verbindungen des Prototyp Schweren-Fermionen-Supraleiters  $CeCu_2Si_2$  versuchen wir, die Korrela-

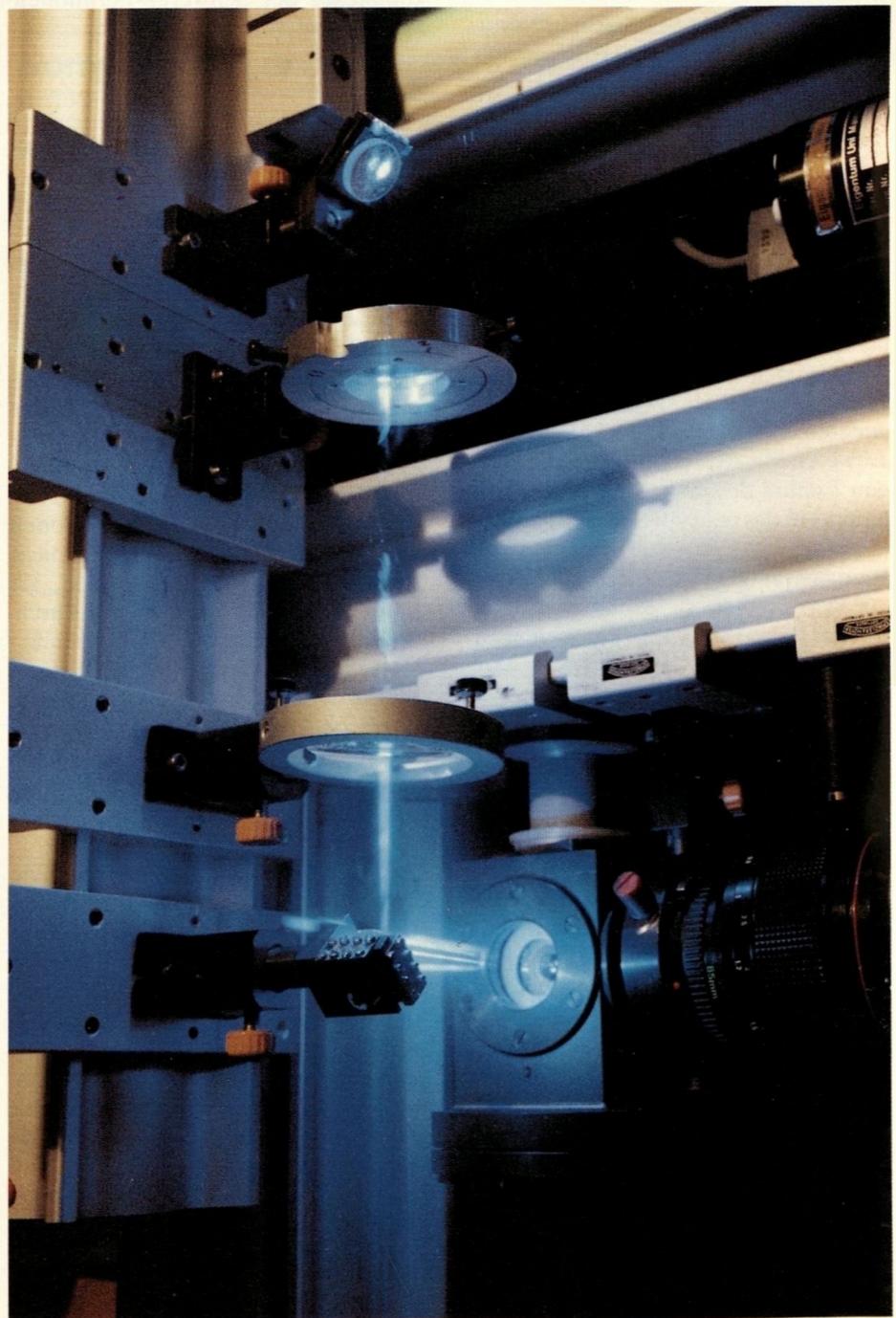
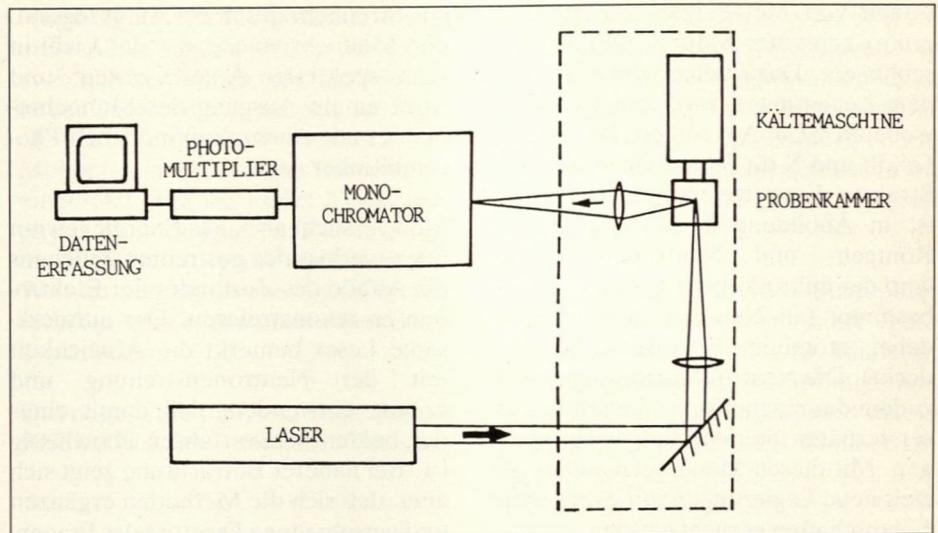


Abb. 4: Blick auf einen Teil der Raman-Apparatur (in Abb. 3 eingerahmt dargestellt). Die Probe befindet sich in der quadratischen Zelle in der oberen Bildhälfte. Die Zelle ist an eine Kältemaschine angeflanscht, mit der Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt erzeugt werden können.

tionen von Metalleigenschaften und mikroskopischer Natur weiter zu entschlüsseln. Dazu untersuchen wir ternäre Legierungen des Typus  $CeM_2X_2$ , wobei  $M = Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Ir, Rh, Os, Pt$  und  $X$  für  $Si$  und  $Ge$  steht. Die Struktur dieser tetragonalen Kristalle ist in Abbildung 2 dargestellt. Mit Röntgen- und Neutronenstreuung wird der mikroskopische Gitteraufbau bestimmt (als Nebenprodukt werden dabei störende Fremdphasen entdeckt). Die Neutronenstreuung liefert zudem das magnetische Verhalten dieser ternären metallischen Verbindungen. Mit diesen Messungen sollen gezielt neue Legierungen mit exotischen Eigenschaften gesucht werden.

**Dynamik Schwerer-Fermionen-Systeme:** Mittels der Neutronenstreuung hat man unmittelbaren Zugriff auf das für die Materialeigenschaften entscheidende Elektron der Cer-Atome. Mißt man die Energie, die das Neutron bei dem Stoß mit dem  $4f^1$ -Elektron verloren oder gewonnen hat, so erhält man ein direktes Abbild des Zustandes dieses Elektrons und seines magnetischen Momentes: eine Analyse der Streudaten erlaubt Aussagen über Stabilität (wie lange verweilt dieses Elektron in der  $4f$ -Hülle), über Wechselwirkung mit den anderen Leitungselektronen, die die schweren Massen bestimmen, und über den Einfluß des umgebenden Kristallgitters auf das magnetische Verhalten.

### Ramanstreuung

Bei der Ramanstreuung (benannt nach dem indischen Physiker Raman, der diesen Streuprozess entdeckt hat) wird die Probe anstelle von Neutronen mit Photonen (Lichtquanten) bestrahlt. Der grundsätzliche Aufbau einer derartigen Apparatur ist in Abbildung 3 skizziert:

Laserlicht einer scharf definierten Wellenlänge wird mit einem Linsensystem auf die Probe fokussiert. Bei weitem der größte Teil dieses Lichts wird elastisch gestreut, hat also genau die gleiche Wellenlänge wie das einfallende Licht. Ein kleiner Teil der Lichtquanten aber hat eine Wechselwirkung mit den Elektronen in der Probe erfahren und dabei Energie an die Elektronen abgegeben (oder auch von ihnen aufgenommen). Durch die Energieänderung wird das Licht in seiner Wellenlänge etwas verschoben. Um die Verschiebung zu bestimmen, schickt man

das Streulicht durch ein Analysegerät, den Monochromator, der das Licht in seine spektralen Anteile zerlegt, und weist es am Ausgang des Monochromators mit einem empfindlichen Photomultiplier nach.

Man versucht also, aus Energiegewinn oder -verlust des gestreuten Teilchens ein Abbild des Zustandes der Elektronen zu rekonstruieren. Der aufmerksame Leser bemerkt die Ähnlichkeit mit der Neutronenstreuung und könnte einwenden, daß damit eines der beiden Meßverfahren überflüssig ist. Bei näherer Betrachtung zeigt sich aber, daß sich die Methoden ergänzen und verschiedene Facetten des Fragenkomplexes der Schweren-Fermionen-Systeme beleuchten.

### Tunneleffekt

Diese Meßmethode ist verwandt mit dem Verfahren der Tunnelmikroskopie, das von den letztjährigen Nobelpreisträgern Binnig und Rohrer erfunden wurde. Man bewegt hierbei eine feine Metallspitze im Vakuum vorsichtig auf eine leitfähige Unterlage zu. Solange der Abstand größer ist als einige Nanometer (= millionstel Millimeter), kann kein Strom fließen, da das Vakuum zwischen den beiden Leitern als Isolator wirkt. Bei weiterer Annäherung ist dann aber doch ein Stromfluß festzustellen. Da die Elektronen die Energiebarriere des Vakuums nicht überspringen können, müssen sie diese Barriere offensichtlich „durchtunneln“. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß die Barriere extrem dünn ist. Einstellen kann man so submikroskopische Abstände mit Hilfe von piezoelektrischen Keramiken, die sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung etwas in ihrer Länge ändern.

Was kann man nun damit messen? Wie wir bereits gesehen haben, ist eine entscheidende Größe bei den Schweren-Fermionen-Systemen die Energieverteilung der Elektronen. Diese Verteilung spiegelt sich auch in der Kennlinie der Tunnelanordnung wider: Man fährt die an den beiden Kontakten anliegende Spannung durch und mißt den jeweils fließenden Strom. Für ein normales Metall ist die Kennlinie eine Gerade, für einen Supraleiter hingegen erhält man eine stufenartige Kurve (Abbildung 5). Der Abstand  $\Delta U$  der beiden Stufen ist ein direktes Maß für die „Energilücke“ des Supraleiters,

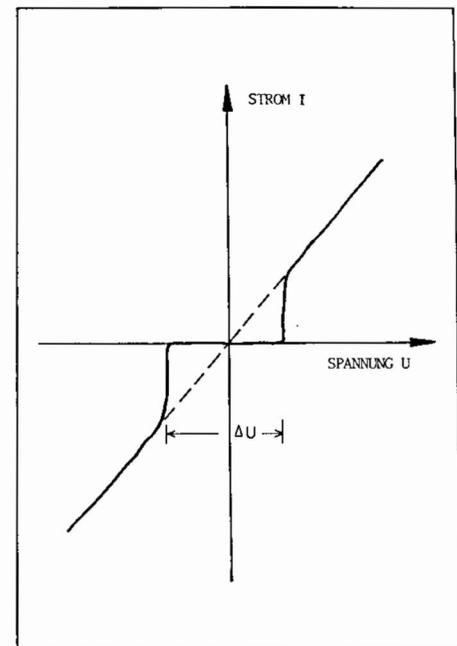


Abb. 5: Strom-Spannungskennlinie eines Tunnelkontakts aus zwei Supraleitern. Die gestrichelte Linie gibt zum Vergleich dazu die Kennlinie zweier Normalleiter wieder.

die gleichbedeutend mit der Bindungsenergie der Cooper-Paare ist. Gelingt es, den Verlauf der Energilücke für die Schweren-Fermionen-Materialien zu messen, so hat man einen wichtigen Prüfstein für theoretische Modelle gewonnen.

Doch Tunnelexperimente sollten noch weitergehende Informationen liefern. So hofft man, damit klären zu können, ob es in den Materialien die exotische Supraleitung mit Spin 1-Paarung gibt. Der Vorschlag für das Experiment klingt simpel: Man messe, ob zwischen einem konventionellen Supraleiter, wie z.B. Blei, und einem Schweren-Fermionen-Material ein Suprastrom fließen kann. Gelingt der Nachweis, so sind die Cooper-Paare in den beiden Materialien wahrscheinlich von gleicher Natur, also Spin 0-Teilchen. Wird dagegen kein Suprastrom durch den Tunnelkontakt festgestellt, liegt der Verdacht nahe, daß der Charakter der Supraleitung sich in den neuen Materialien von dem üblichen Verhalten unterscheidet.

Die genannten Beispiele zeigen, daß zur Zeit gerade die ersten Gehversuche auf dem Weg zu einem tieferen Verständnis der „elektronisch hochkorrelierten metallischen Materialien“ ge-

macht werden. Es ist ein inniges Wechselspiel zwischen Experiment und Theorie erforderlich, will man auf diesem Weg weitere erfolgreiche Schritte zurücklegen. Daher ist am SFB 252 auch eine starke Gruppe theoretischer Physiker beteiligt. Die Vorzeichen stehen günstig, daß in gemeinsamer Anstrengung die Teile des Puzzles „Schwere-Fermionen-Systeme“ zusammengesetzt werden können, und daß daraus dann Erkenntnisse erwachsen, die für die Grundlagenforschung und Praxis gleichermaßen interessant sind.

**Nachtrag:** Der vorausgehende Artikel entstand zu Beginn letzten Jahres. Inzwischen hat durch die Entdeckung neuer Supraleiter – eingeleitet durch die Nobelpreisträger Bednorz und Müller – eine stürmische Entwicklung eingesetzt, wie sie in der Festkörperphysik ohne Beispiel ist. Zur Zeit dürften mehrere tausend Forscher in aller Welt an den aufsehenerregenden Materialien vom sogenannten Perowskit-Typ arbeiten.

Das ungeheure Interesse an den neuen Perowskiten hat ähnliche Ursachen

wie bei den zur Gründung des SFB 252 bekannten „Schweren Fermionen“-Systemen. Was allerdings damals noch als fernes Ziel angesehen werden mußte, ist bei den inzwischen entdeckten Materialien mit Zusammensetzungen wie  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$  und  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  greifbar nahe:

– *Supraleitung bei* (vom Standpunkt der Tieftemperaturphysiker gesehen) *hohen Temperaturen*. Eindeutig nachgewiesen ist eine Sprungtemperatur von 92 K, und es wird bereits über Supraleitung bei Zimmertem-

## Literatur

(1) F. Steglich; J. Aarts; C.D. Bredl; W. Lieke; D. Meschede; W. Franz; H. Schäfer. Phys. Rev. Lett. 43, 1892 (1979)

(2) H.R. Ott; H. Rudigier; Z. Fisk; J.L. Smith. Phys. Rev. Lett. 50, 1595 (1983)

peratur spekuliert. Selbst ein  $T_c$  von 92 K eröffnet schon ungeahnte Möglichkeiten, da zum Erreichen des supraleitenden Zustandes nicht mehr das teure flüssige Helium notwendig ist, sondern der viel billigere und leichter verfügbare flüssige Stickstoff mit einer Siedetemperatur von 77 K ausreicht.

- *Supraleitung bei extrem hohen Magnetfeldern.* Das maximale kritische Magnetfeld in den neuen Materialien ist so hoch, daß eine Bestimmung im Labor selbst mit den stärksten vorhandenen Magneten bisher nicht möglich war. Aufgrund von Abschätzungen durch Extrapolation rechnet man aber damit, daß sich Felder von über hundert Tesla erreichen lassen, grob eine Größenordnung mehr als der Stand der Technik bei den konventionellen Supraleitern.

Die Auswirkung solcher Werkstoffe auf den Bau von supraleitenden Überlandleitungen, Teilchenbeschleunigern, Computern etc. liegt auf der Hand. Bis zum technischen Einsatz sind freilich noch verschiedene Probleme zu lösen, zu denen auch im Rahmen des SFB 252 Untersuchungen laufen. Eine der Hauptschwierigkeiten liegt gegenwärtig noch in dem keramischen Aufbau dieser Substanzen: Wegen der damit verbundenen Sprödigkeit ist es nicht ohne weiteres möglich, Drähte herzustellen, wie man sie z.B. für das Wickeln von Magnetspulen braucht. Es dürfte aber nur eine Frage der Zeit sein, bis auch diese Hürde durch geeignete Verfahren überwunden ist.

Faszination geht von den neuen Supraleitern nach wie vor auch für die Grundlagenforschung aus, entziehen sie sich doch immer noch einer befriedigenden Erklärung für den Mechanismus der Supraleitung – eine erstaunliche Tatsache angesichts der immensen Forschungsaktivitäten. Neben Erklärungsversuchen auf der Basis der bekannten BCS-Theorie gibt es eine Reihe von Vorschlägen für neuartige Paarungsmechanismen der Elektronen. Auch hier eröffnet sich ein weites Betätigungsfeld für die theoretischen wie die experimentellen Arbeitsgruppen des SFB 252.