

■ Jenseits von Landau

Experimente in Schwer-Fermion-Metallen deuten darauf hin, dass das Konzept der Quasiteilchen an Quantenphasenübergängen zusammenbricht.

Unser Verständnis elektronischer Eigenschaften von Metallen basiert auf der von Landau begründeten Theorie der Fermi-Flüssigkeiten. Ausgangspunkt ist die Annahme, dass sich die Leitungselektronen – trotz ihrer starken gegenseitigen Coulomb-Wechselwirkung – als Gas schwach wechselwirkender „Quasiteilchen“ modellieren lassen. Diese Quasiteilchen tragen die Quantenzahlen der ursprünglichen Elektronen, also Ladung $-e$ und Spin $1/2$. Ihre effektive Masse m^* kann jedoch von der eines freien Elektrons deutlich abweichen. Dies ist eine Folge der Wechselwirkung sowohl mit den Ionenrümpfen als auch mit den anderen Elektronen. Aus der Existenz wohldefinierter Quasiteilchen-Anregungen mit Fermi-Dirac-Statistik lassen sich viele wichtige Eigenschaften von Metallen direkt ableiten. Dazu gehören das Verhalten der Wärmekapazität, $C(T) \propto \gamma T$, und des elektrischen Widerstandes, $\rho(T) = \rho_0 + AT^2$, bei tiefen Temperaturen T . Dabei sind γ und A materialspezifische Konstanten, und ρ_0 ist der durch Gitterdefekte bedingte Restwiderstand bei $T = 0$. Da Quasiteilchen sowohl Ladung als auch Energie transportieren, ergibt sich ein wichtiger Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit σ und Wärmeleitfähigkeit κ : Das

Wiedemann-Franz-Gesetz besagt, dass das Verhältnis $\kappa/(\sigma T)$ bei tiefen Temperaturen temperaturunabhängig ist, $\kappa/(\sigma T) = (\pi^2/3) (k_B/e)^2$, dabei ist k_B die Boltzmann-Konstante [1].

Besonders interessante Fermi-Flüssigkeiten finden sich in intermetallischen Verbindungen, in denen lokalisierte f-Elektronen von Seltenerd-Ionen mit delokalisierten Leitungselektronen koexistieren. Die Elektronen in den teilweise gefüllten f-Schalen bilden lokale magnetische Momente, die bei tiefen Temperaturen durch die Wechselwirkung mit den Leitungselektronen abgeschirmt werden können. Dieser kollektive quantenmechanische Kondo-Effekt führt zu einem nichtmagnetischen metallischen Zustand. Dessen Elementaranregungen sind Quasiteilchen im Sinne von Landau, jedoch mit m^* von hundert oder tausend Elektronenmassen. Ursache ist die starke Streuung der Leitungselektronen an den f-Elektronen.

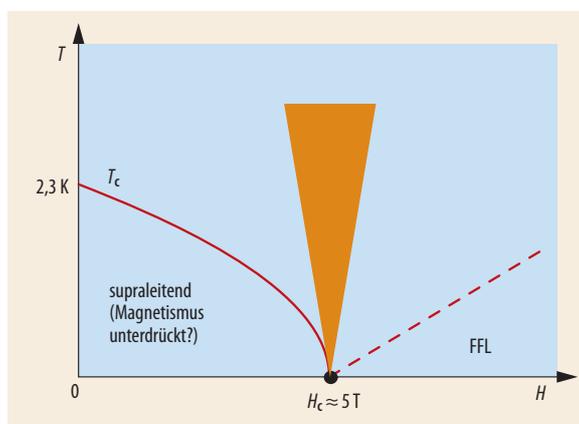
Schwer-Fermion-Systeme haben sich in den letzten Jahren zu einem spannenden Gebiet der Festkörperforschung entwickelt: Neue Untersuchungen beleuchten die Konkurrenz zwischen Kondo-Abschirmung und wichtigen Ordnungsphänomenen wie Supraleitung und Magnetismus. Im Zentrum stehen dabei Phasenübergänge am Temperaturnullpunkt (bei Variation von z. B. Druck oder Magnetfeld), deren Eigenschaften von Quantenfluktuationen dominiert werden und die zu ungewöhnlichen Temperaturabhängigkeiten thermodynamischer Größen führen können [2].

Bei solchen Quantenphasenübergängen steht das Konzept der Landau-Quasiteilchen auf dem Prüfstand. Tatsächlich deuten einige bemerkenswerte Experimente auf das Zusammenbrechen dieses grundlegenden Konzepts der Metalltheorie hin [3]. Kürzlich haben M. A. Tanatar und seine Kollegen aus Sherbrooke und Toronto (Kanada) einen neuen wichtigen

Hinweis auf den Kollaps schwerer Quasiteilchen an einem Quantenphasenübergang gefunden [4]. Die von ihnen untersuchte Verbindung CeCoIn_5 gehört zu einer interessanten Klasse von Substanzen, die viele Ordnungsphänomene vereint: CeRhIn_5 ist bei tiefen Temperaturen ein Antiferromagnet, während CeCoIn_5 und CeIrIn_5 Supraleiter sind. Alle Materialien besitzen eine geschichtete Kristallstruktur aus CeIn_3 -Ebenen, d. h. sie sind quasi-zweidimensional, was Parallelen zu den Hochtemperatur-Supraleitern eröffnet. Das Phasendiagramm von CeCoIn_5 (Abb.) weist Überraschungen auf: Wird Supraleitung durch ein externes Magnetfeld unterdrückt, so ist der am kritischen Feld H_c entstehende metallische Zustand im Gegensatz zu anderen Supraleitern keine gewöhnliche Fermi-Flüssigkeit [5]. Fermi-Flüssigkeits-Verhalten im elektrischen Widerstand wird nur oberhalb von H_c bei tiefen Temperaturen beobachtet (Abb.). Vergleiche mit anderen Materialien legen einen Quantenphasenübergang bei H_c nahe, der durch magnetische Fluktuationen dominiert sein könnte. Da jedoch bisher keine magnetische Ordnung in CeCoIn_5 für $H < H_c$ entdeckt wurde, wird spekuliert, dass diese durch Supraleitung unterdrückt wird [5].

Tanatar et al. haben in ihrem Experiment [4] die Transport-Eigenschaften von CeCoIn_5 studiert und die Gültigkeit des Wiedemann-Franz-Gesetzes überprüft. Dazu haben sie das Verhältnis $\kappa/(\sigma T)$ am Phasenübergangspunkt $H = H_c$ als Funktion von T bestimmt. Das spektakuläre Ergebnis ist, dass das Wiedemann-Franz-Gesetz für Transport *parallel* zu den CeIn_3 -Ebenen erfüllt, jedoch für Transport *senkrecht* zu den Ebenen deutlich verletzt ist.

Als Erklärung schlagen die Autoren einen *anisotropen* Zusammenbruch des Fermi-Flüssigkeits-Konzepts vor, d. h. Quasiteilchen werden für Impulse senkrecht zur



Das schematische Phasendiagramm von CeCoIn_5 zeigt, dass Fermi-Flüssigkeits-Verhalten (FFL) auf Felder $H > H_c$ und tiefe Temperaturen T beschränkt ist [5]. In der orangenen Region werden Landau-Quasiteilchen möglicherweise zerstört.

Ebenenrichtung durch Quantenfluktuationen zerstört, in anderen Richtungen aber nicht. Eine Ursache könnte ein Verschwinden des Kondo-Effekts am Phasenübergangspunkt sein. Eine theoretische Beschreibung dieses Phänomens ist außerordentlich schwierig, da der Kondo-Effekt nicht mit einem lokalen Ordnungsparameter verbunden ist. Die in den letzten Jahren vorgeschlagenen Theorien für einen solchen Kondo-Phasenübergang nehmen an, dass der Kondo-Effekt auf der kompletten Fermi-Fläche gleichzeitig verschwindet [3] – damit lässt sich offenbar das anisotrope Verhalten in CeCoIn₅ nicht verstehen.

Bei der Interpretation des Transport-Experiments [4] ist jedoch Vorsicht geboten. Das

Wiedemann-Franz-Gesetz gilt nur bei tiefsten Temperaturen, wenn die Streuung der Quasiteilchen elastisch, d. h. energieerhaltend, ist. Möglicherweise wurde dieses Regime im Experiment noch nicht erreicht. In diesem Fall könnte inelastische Streuung von Quasiteilchen, z. B. an Spinfluktuationen, Abweichungen vom Wiedemann-Franz-Gesetz verursachen. Da die Kopplung antiferromagnetischer Spinfluktuationen an Elektronen stark impulsabhängig ist, könnte dies auch die beobachtete Richtungsabhängigkeit erklären. Eine konkrete theoretische Beschreibung dieses alternativen Szenarios existiert jedoch nicht. Auf experimenteller Seite wird es also wichtig sein, an CeCoIn₅ und anderen Schwerfermion-Metallen elektrischen

und thermischen Transport bis zu tiefsten Temperaturen sorgfältig zu untersuchen.

In jedem Fall zeigen die jüngsten Experimente, dass es sich lohnt, fundamental neue Konzepte bei der Beschreibung von Elementaranregungen in Metallen zu entwickeln.

Matthias Vojta

Prof. Dr. Matthias Vojta, Institut für Theoretische Physik, Universität zu Köln, Zülpicher Str. 77, 50937 Köln

- [1] G. Wiedemann und R. Franz, Ann. Phys. **89**, 497 (1853); A. Sommerfeld, Naturwissenschaften **15**, 825 (1927).
- [2] M. Vojta, Physik Journal, März 2002, S. 55
- [3] H. v. Löhneysen, A. Rosch, M. Vojta und P. Wölfle, arXiv:cond-mat/0606317 (Rev. Mod. Phys. im Druck)
- [4] M. A. Tanatar, J. Paglione, C. Petrovic und L. Taillefer, Science **316**, 1320 (2007)
- [5] J. Paglione et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 246405 (2003); A. Bianchi et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 257001 (2003)

■ Elementare Bestätigung

Die Entdeckung von superschweren Elementen in Dubna, Russland, wurde nun in zwei unabhängigen Experimenten bestätigt.

Die Existenz von superschweren Elementen wurde schon bald nach der Aufstellung des Schalenmodells für den Atomkern 1948 vorhergesagt. Ganz ähnlich der Anordnung von Atomelektronen in Schalen, die bei Schalenabschlüssen der Edelgase besonders fest gebunden sind, ordnen sich auch Protonen (Z) und Neutronen (N) im Atomkern in Schalen an. Die letzten bekannten Schalenabschlüsse – auch magische Zahlen genannt – sind $Z = 82$ und $N = 126$.¹⁾ Erste Vorhersagen des Schalenmodells ergaben $Z = 126$ und $N = 184$ als nächste magische Zahlen. Spätere Rechnungen zeigten, dass für die Protonen bei 114 und 120 Unterschalen aufgefüllt sind. Da für die Lebensdauern von Kernen in diesem Bereich ähnliche Werte abgeschätzt wurden wie für Uranisotope, würde eine Insel superschwerer und langlebiger Kerne existieren, die von instabilen Kernen umgeben ist. Nach dieser Insel wird seither fieberhaft gesucht.

Trotz gering scheinender Aussichten auf Erfolg startete Yuri Ts. Oganessian mit seiner Arbeitsgrup-

pe vor etwa zehn Jahren am Flerov-Labor in Dubna die Suche nach Element 114 [1]. Ihre Idee war, sich durch die Fusion des neutronenreichen Isotops ⁴⁸Ca als Projektil und neutronenreicher Targets aus Aktiniden-Isotopen der magischen Neutronenzahl 184 zu nähern. Die Fusionsprodukte wurden in einem gasgefüllten Separator abgetrennt und mit einem ortsempfindlichen Siliziumdetektor nachgewiesen – eine Methode, wie sie die GSI für den Nachweis der Elemente 107 bis 112 entwickelt hat [2].

Die Dubna-Experimente verliefen höchst erfolgreich: Im Laufe von zehn Jahren wurde nicht nur Element 114 synthetisiert (mit ²⁴²Pu und ²⁴⁴Pu als Target), sondern mit Targets aus Americium-, Curium- und Californium-Isotopen auch die neuen Elemente 115, 116 und 118 [3]. Die gemessenen Alpha-Zerfallsketten endeten nach maximal sechs Alpha-Zerfällen bei spontan spaltenden Kernen. Inzwischen sind etwa hundert Zerfallsketten gemessen und acht verschiedene Reaktionen bei verschiedenen Pro-

jektilenergien untersucht. Bei der Zuordnung von insgesamt 35 neuen Isotopen entstand ein in sich konsistentes und zusammenhängendes Gebiet neuer Kerne.

Da aber keines dieser Isotope vorher bekannt war, hätte es durchaus sein können, dass das ganze Gebiet neuer Kerne um ein Alphateilchen nach unten verschoben ist, bedingt durch Emission von Alphateilchen aus dem Projektilfragment schon vor der eigentlichen Fusionsreaktion. Weiterhin waren die ersten Ergebnisse zum Element 112 nicht ganz stimmig. Am schwersten wog aber, dass Experimente mit ⁴⁸Ca-Strahlen und Uran-Targets am Lawrence Berkeley Laboratory in Kalifornien keine Hinweise auf die Bildung von Element 112 fanden [4].

Kürzlich führte nun eine Kollaboration unter Leitung von Schweizer Kernchemikern des Paul-Scherer-Institutes in Dubna ein Experiment mit einem Pu-Target durch, um Element 114 zu erzeugen [5]. Mit 4,5 Picobarn (pb) liegt die Bildungswahrscheinlichkeit für diese Synthese höher als bei Element 112

1) Zusammen ergeben diese Kernbausteine den doppelt magischen Kern des Bleiisotops mit der Massenzahl $Z + N = 208$. Durch den doppelten Schalenabschluss ist ²⁰⁸Pb zugleich der schwerste stabile Atomkern überhaupt.