

Am 2. Februar 2001 gelang es dann mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte in Chile, ein kombiniertes Spektrum der beiden Sterne aufzunehmen [6]. Während im kurzwelligen Bereich Spektrallinien des (heißen) GMW-Sterns dominieren, sind bei längeren Wellenlängen deutlich Kalium- und Natrium-Linien zu sehen, die eine Klassifizierung der Linse als Stern des Spektraltyps M4–5 gestatten. Solche Sterne haben eine Masse von etwa einem Zehntel der Sonnenmasse. Aus der empirischen Relation zwischen Farbe und absoluter Helligkeit dieses Sterntyps schließen die Autoren auf eine Entfernung des Linsensterns von etwa 600 parsec (ca. 2000 Lichtjahre).

Diese Massen- und Entfernungsabschätzung steht allerdings im Widerspruch zum Ergebnis einer komplementären Analyse, bei der die Parallaxe zugrundegelegt wird, die Änderung der Beobachtungsposition durch die Bewegung der Erde um die Sonne. Letztere resultiert in einer deutlich geringeren Masse und kleinerem Abstand. Diese Diskrepanz steht nach wie vor im Raum, wird aber durch zukünftige genauere Positions-Messungen des Linsensterns geklärt werden.

Die Tatsache jedoch, dass zum erstmalig ein als Mikrolinse wirkendes Objekt direkt nachgewiesen und als in der Scheibe der Milchstraße residierender sichtbarer Stern niedriger Masse identifiziert wurde, bleibt zweifelsfrei bestehen. Dies steht immer noch in Einklang mit der Hypothese, dass die meisten anderen Mikrolinsen-Ereignisse wirklich durch nicht leuchtende MACHOs erzeugt wurden. Einer ist keiner, sozusagen. Aber viel mehr Linsen dürften nicht mehr auf diese Weise „sichtbar“ werden. Sonst wäre dies als starker Hinweis auf die Existenz anderer Dunkle-Materie-Kandidaten aus der Teilchenphysik zu interpretieren, etwa die WIMPs. Zur endgültigen Klärung dieser Frage ist allerdings noch ein bißchen Geduld notwendig.

JOACHIM WAMBSGANSS

- [1] S. Refsdal, Monthly Not. Roy. Astr. Soc. **128**, 295 (1964) und **128**, 307 (1964)
- [2] D. Walsh, R. F. Carswell, R. J. Weymann, Nature **279**, 381 (1979)
- [3] J. Wambsganss, Scientific American 11/2001; Physik in unserer Zeit, 3/2000; www.livingreviews.org/Articles/Volume1/1998-12wamb/

- [4] B. Paczyński, Astroph. Journ. **304**, 1 (1986).
- [5] C. Alcock et al., Astroph. Journ. **542**, 281 (2000);
- [6] C. Alcock et al., Nature **414**, 617 (2001); A. P. Gould, Nature **414**, 591 (2001).

Überraschung im Fermi-See

Versagt die Theorie der Fermi-Flüssigkeitstheorie in Hochtemperatur-Supraleitern? Ein neues Experiment wird so interpretiert.

Metalle sind sowohl gute elektrische Leiter als auch gute Wärmeleiter. Für die gute Leitfähigkeit sind die Leitungselektronen verantwortlich: Sie sind sehr beweglich und können somit Ladung und Wärme effizient transportieren. Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts entdeckten G. Wiedemann und R. Franz einen empirischen Zusammenhang zwischen der thermischen (κ) und der elektrischen (σ) Leitfähigkeit von Metallen [1]. Unabhängig davon, welches Metall sie untersuchten, fanden sie die erstaunlich einfache Beziehung

$$\kappa = \frac{\pi^2}{3} \frac{k_B^2}{e^2} T \sigma,$$

das später nach ihnen benannte Wiedemann-Franz-Gesetz. Es lässt sich durch die Messung von Temperatur sowie elektrischer und thermischer Leitfähigkeit direkt überprüfen und wurde in Experimenten mit traditionellen Metallen – einfachen Metallen, Übergangsmetallen und intermetallischen Verbindungen – vielfach bestätigt. Das Wiedemann-Franz-Gesetz erwies sich bisher als äußerst robust und universell gültig.

Kürzlich jedoch haben Hill et al. neue experimentelle Daten zur thermischen und elektrischen Leitfähigkeit im Normalzustand des Hochtemperatur-Supraleiters $\text{Pr}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ veröffentlicht, die auf eine gravierende Abweichung vom universellen Wiedemann-Franz-Gesetz hinweisen [2]. Um diese Beobachtung einordnen zu können, muss man sich klar machen, in welchem Sinne das Wiedemann-Franz-Gesetz als universell gültig eingestuft wurde, bzw. ob und unter welchen Umständen ein Zusammenbruch dieses Gesetzes erwartet wird. Antworten auf diese Fragen liefert die Theorie des Ladungs- und Wärmetransports in Metallen.

Arnold Sommerfeld und Hans Bethe präsentierten schon 1934 eine schlüssige Herleitung des Wiedemann-Franz-Gesetzes [3]. Sie berechneten die thermische und die elektrische Leitfähigkeit durch Lösen einer klassischen Boltzmann-Transportgleichung unter Berücksichtigung der Fermi-Statistik der Elektronen. Zugleich nahmen sie an, dass die Elektronen mit einer von der Elektronenenergie unabhängigen Rate elastisch gestreut werden, wie sie für die Streuung an Störstellen typisch ist. Heute weiß man, dass das Wiedemann-Franz-Gesetz nur bei genügend tiefen Temperaturen gilt, bei denen inelastische Prozesse wie Elektron-Phonon- und Elektron-Elektron-Streuung unterdrückt werden und die Fermi-Statistik der Leitungselektronen zum Tragen kommt. Diese Bedingung dürfte in den Experimenten von Hill et al. gut erfüllt sein und fällt wahrscheinlich als Ursache der beobachteten deutlichen Abweichungen vom Wiedemann-Franz-Gesetz aus.

Die Autoren schlagen hingegen eine sehr spektakuläre Interpretation des Zusammenbruchs des Wiedemann-Franz-Gesetzes vor. Sie vermuten, dass die Standardtheorie der Leitungselektronen von Metallen, die Fermi-Flüssigkeitstheorie, im normalleitenden Zustand der Hochtemperatur-Supraleiter völlig zusammenbricht. Um ihre Argumente zu verstehen, ist es notwendig, im Folgenden einige Grundtatsachen der von Lew D. Landau entwickelten Fermi-Flüssigkeitstheorie zu rekapitulieren.

Schon in den Anfangszeiten einer quantentheoretischen Behandlung der Festkörper in den späten 20er Jahren wurde klar, dass die Physik der Festkörper, speziell auch der Metalle, von Quanteneffekten dominiert wird. Man entdeckte z. B. die Bandstruktur der Elektronen, die Phononen als quantisierte Gitterschwingungen und die wichtige Rolle des Pauli-Prinzips, das die Stabilität der Festkörper und kollektive Effekte, wie den Festkörpermagnetismus, erklärt. Umso erstaunlicher war die Tatsache, dass man die elektrische und thermische Leitfähigkeit der Elektronen und weitere Transportphänomene in Metallen mit großer Genauigkeit durch eine klassische Boltzmann-Transportgleichung beschreiben konnte. Die Lösung dieses

Prof. Dr. Joachim Wambsganß, Universität Potsdam, Institut für Physik, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam, E-Mail: jkw@astro.physik.uni-potsdam.de

Prof. Dr. Dierk Rainer, Theoretische Physik III, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth

scheinbaren Widerspruchs gelang Landau, der in den Jahren 1956 – 1959 in drei Publikationen seine *Fermi-Flüssigkeitstheorie* präsentierte. Landaus Grundidee war, dass die energetisch tief liegenden Anregungen eines Vielteilchensystems wechselwirkender Fermionen, wie z. B. flüssiges ^3He oder die „Flüssigkeit“ der Leitungselektronen in Metallen, ähnliche Eigenschaften besitzen wie ein ^3He -Teilchen bzw. Elektron. Diese Anregungen werden *Quasiteilchen* genannt, um ihre Verwandtschaft mit den Originalteilchen zu betonen. Ein Quasiteilchen in einem Metall ist ein Fermion, trägt Spin $\frac{1}{2}$ und hat die Ladung $\pm e$ (Elektron- bzw. Lochanregung). Die Masse eines Quasiteilchens im Metall wird von den Wechselwirkungen der Elektronen mit dem Gitter und der Elektron-Elektron-Wechselwirkung bestimmt und unterscheidet sich teilweise sehr stark von der Masse eines freien Elektrons. In sog. Schwere-Fermion-Metallen wurden z. B. Quasiteilchenmassen gemessen, die die Elektronenmasse m_0 um mehr als einen Faktor 100 übertreffen. Landau gelang es in einer sehr fundamentalen Arbeit zu zeigen, dass die Dynamik dieser exotischen Quasiteilchen durch eine klassische Boltzmann-Landau-Transportgleichung beschrieben wird. Das Landausche Fermi-Flüssigkeitsmodell rechtfertigt somit rückwirkend die Herleitung des Wiedemann-Franzschens Gesetzes durch Bethe und Sommerfeld aus einer klassischen Transportgleichung.

Das Wiedemann-Franzsche Gesetz ist daher eine direkte Konsequenz der Gültigkeit der klassischen Transportgleichung und der Dominanz elastischer Quasiteilchen-Streuprozesse, wie z. B. der Streuung an Störstellen. Da man annehmen kann, dass bei tiefen Temperaturen die Störstellenstreuung dominiert, bietet die Messung der Lorenz-Zahl $\kappa/\sigma T$ und der Vergleich mit dem sich aus dem Wiedemann-Franzschens Gesetz ergebenden fundamentalen Wert $(\pi^2 k_B^2)/3e^2$ einen idealen Test für die Gültigkeit der Boltzmann-Landau-Transportgleichung und somit auch der Gültigkeit der Landauschen Fermi-Flüssigkeitstheorie. Bei traditionellen Metallen hat sich die Beschreibung durch die klassische Transportgleichung der Fermi-Flüssigkeitstheorie sehr bewährt.

Ganz anders sieht es dagegen in außergewöhnlichen Metallen – wie den Hochtemperatur-Supraleitern – aus, für die die Bedeutung und Interpretation der Lorenz-Zahl $\kappa/\sigma T$ und des Wiedemann-Franzschens Gesetzes weitgehend ungeklärt und daher besonders interessant sind.

Hill et al. berichten über den ersten experimentellen Hinweis auf eine Verletzung des Wiedemann-Franzschens Gesetzes in dem typischen Kuprat-Hochtemperatur-Supraleiter $\text{Pr}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ (PCCO). Die Durchführung der Experimente war sehr subtil, da man in den Hochtemperatur-Supraleitern gleichzeitig die Bedingung tiefer Temperaturen und die Abwesenheit von Supraleitung erreichen musste. Die Autoren lösten das Problem, indem sie einen Hochtemperatur-Supraleiter mit relativ geringer Übergangstemperatur (20 K) wählten und zusätzlich ein hohes Magnetfeld (bis zu 14 T) anlegten, das die Supraleitung unterdrücken sollte. Im hohen Magnetfeld wurden dann bei tiefen Temperaturen (bis etwa 0,1 K) die elektrische und thermische Leitfähigkeit gemessen und die Lorenz-Zahl bestimmt. Nach der Meinung von Experten ist die Messung sehr schwierig und wurde noch nicht mit der notwendigen Präzision und Unanfechtbarkeit durchgeführt, um den Zusammenbruch des Fermi-Flüssigkeitsmodells zu „beweisen“. Die Autoren haben einen ersten wichtigen Hinweis auf den Zusammenbruch erhalten, und man erwartet, dass das Versagen des Fermi-Flüssigkeitsmodells in naher Zukunft durch weitere Experimente schlüssig bestätigt oder widerlegt wird.

DIERK RAINER

- [1] G. Wiedemann, R. Franz, *Ann. Phys.* **89** (1853)
- [2] R. W. Hill et al., *Nature* **441**, 711 (2001)
- [3] A. Sommerfeld, H. Bethe, *Handbuch der Physik*, 24/2 (1934)
- [4] P. Fulde, *Electron Correlations in Molecules and Solids* Springer Series in Solid State Sciences; 100, Springer Verlag (1991)