

Schwere Fermionen platt gemacht

In künstlichen Schichtstrukturen ist es gelungen, stark korrelierte Elektronen so auf zwei Dimensionen einzuschränken, dass ein neuartiger Quantenphasenübergang auftrat.

Prof. Dr. Philipp Gegenwart, I. Physikalisches Institut, Universität Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen

Die räumliche Dimensionalität hat einen starken Einfluss auf die elektronischen Eigenschaften von Materialien. So zeigen zweidimensionale Strukturen interessante Quantenzustände wie den Quanten-Hall-Effekt oder Grenzflächensupraleitung zwischen isolierenden Oxiden. Generell verstärken sich die gegenseitigen Wechselwirkungen von Elektronen, wenn man sie räumlich einschränkt. Übersteigt die Energie der Coulomb-Abstoßung die kinetische Energie der Elektronen, verhalten diese sich nicht mehr unabhängig voneinander. Eine aktuelle Herausforderung der Festkörperphysik ist es, diese Korrelationseffekte besser zu verstehen, um gezielt funktionale Materialien wie magnetische Speichermedien oder Hochtemperatur-Supraleiter zu entwickeln. Ein wichtiger Durchbruch auf diesem Weg ist kürzlich der Arbeitsgruppe um Yuji Matsuda von der Universität Kyoto gelungen. In künstlichen Schichtstrukturen, in denen die normalen bzw. hochkorrelierten Metalle LaIn_3 und CeIn_3 gestapelt sind, konnten sie zum ersten Mal die Dimensionalität eines Schwere-Fermionen (SF)-Systems kontinuierlich von drei auf zwei reduzieren

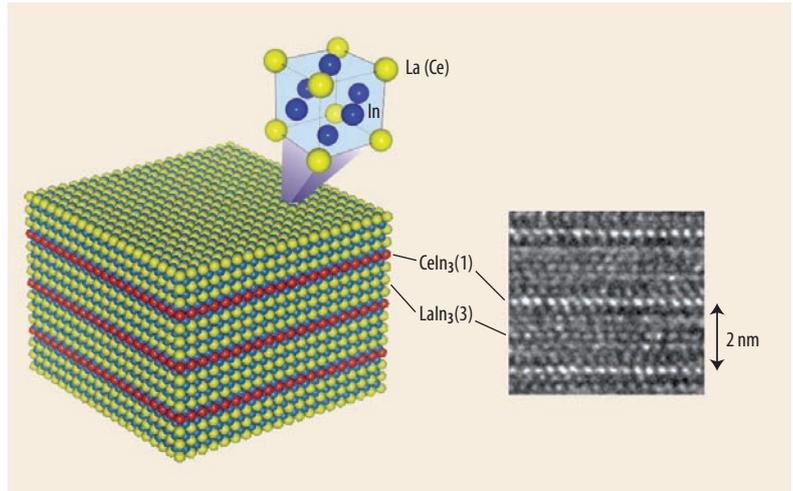


Abb. 1 Mit Molekularstrahl-Epitaxie lassen sich künstliche Stapel aus dem Schwere-Fermionen-Metall CeIn_3 und dem normalen Metall LaIn_3 (links) auf-

schichten. Im Transmissionselektronenmikroskop (rechts) erkennt man die Schicht der Ce-Atome als Reihe aus hellen Punkten [1].

und so Korrelationseffekte verstärken [1].

Im Unterschied zu Lanthan tragen Cer-Atome je ein 4f-Elektron, welche bei Raumtemperatur stabile magnetische Momente liefern. Bei tiefen Temperaturen verhält sich reines CeIn_3 , das eine kubische Kristallstruktur besitzt, wie ein magnetisch ordnendes SF-System. Seine Ladungsträger lassen sich in Landau's Fermi-Flüssigkeitstheorie als so genannte Quasiteilchen beschreiben. Diese tragen zwar die Ladung und den Spin freier Elektronen, bewegen sich aber viel langsamer durch den Kristall als Elektronen in normalen Metallen wie LaIn_3 , so als ob ihre Massen enorm erhöht wären. Ursache hierfür ist der Kondo-Effekt, der zur Streuung zwischen magnetischen Momenten und Leitungselektronen mit gegenseitiger Spinumkehr führt. Bei tiefen Temperaturen werden die 4f-Momente durch die umgebenden Leitungselektronen abgeschirmt. Es entsteht ein extrem schmales Band mit sehr großer Zustandsdichte nahe der Fermi-Energie. Die komplizierte kollektive Bewegung der Elektronen dieses Bands, welche extrem verlangsamt ist, wird durch schwere Quasiteilchen beschrieben. Eine zweite Wechselwirkung, die

indirekte Austauschkopplung zwischen 4f-Momenten, konkurriert mit dem Kondo-Effekt und bewirkt eine Ausrichtung der magnetischen 4f-Momente. Ob ein SF-System bei tiefen Temperaturen magnetisch geordnet oder ungeordnet ist, hängt von der relativen Stärke beider Wechselwirkungen ab [2].

In CeIn_3 ist der Kondo-Effekt zu schwach, um die Momente komplett abzuschirmen. Stattdessen tritt schwache magnetische Ordnung bei 10 K auf. Durch Zusammenpressen von CeIn_3 lässt sich der Kondo-Effekt verstärken und so die Balance der beiden Wechselwirkungen zugunsten des unmagnetischen Zustands kippen. Man spricht hier von einem Quantenphasenübergang, da sich der Grundzustand am absoluten Temperaturnullpunkt ändert, getrieben durch Fluktuationen als Folge der Heisenbergschen Unschärferelation. In Druckexperimenten zeigte sich, wie in unmittelbarer Nähe zum kritischen Druck von 26 kbar, der die magnetische Ordnung vollständig zerstört, Supraleitung entsteht [3]. Diese ist nur in extrem sauberen Einkristallen zu finden und auf die unmittelbare Nähe zum Quantenphasenübergang beschränkt. Beides deutet auf einen unkonventionellen

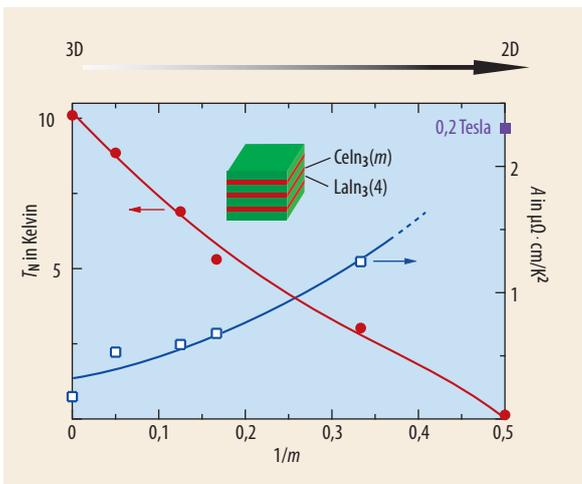


Abb. 2 Mit abnehmender Schichtdicke des CeIn_3 werden die Heterostrukturen immer „zweidimensionaler“, und die magnetische Ordnungstemperatur T_N geht gegen 0. Gleichzeitig divergiert der Widerstandskoeffizient A , welcher ein Maß für die Masse der Schwere Fermionen darstellt [1].

supraleitenden Zustand, welcher nicht in herkömmlicher Art durch Gitterschwingungen, sondern sehr wahrscheinlich durch magnetische Fluktuationen zustande kommt.

Bislang ließen sich Quantenphasenübergänge in dreidimensionalen SF-Systemen durch Variation von Druck, chemischer Dotierung oder Anlegen äußerer Magnetfelder erzeugen [4]. Für zweidimensionale Systeme ist ein neuartiges Verhalten zu erwarten, da magnetische Fluktuationen in reduzierten Dimensionen einen stärkeren Einfluss haben. Um die Dimensionalität systematisch zu verändern, haben die japanischen Forscher die in der Halbleitertechnik entwickelte Molekularstrahlepitaxie zum ersten Mal erfolgreich angewandt, um einkristalline Heterostrukturen von SF-Metallen kontrolliert zu wachsen. Die Zucht von epitaktischen einkristallinen SF-Dünnschichten ist extrem anspruchsvoll und über viele Jahre nur im Fall der SF-Supraleiter UPd_2Al_3 [5] und CeCoIn_5 [6] gelungen. Für Heterostrukturen bietet sich CeIn_3 als prototypisches geordnetes SF-System auch wegen seiner einfachen binären Struktur an.

Die Überstrukturen bestehen aus jeweils 30 Stapeln von $\text{CeIn}_3(m)/\text{LaIn}_3(n)$, wobei die Anzahl von LaIn_3 -Lagen pro Stapel mit $n = 4$ so gewählt wurde, dass

die magnetische Kopplung zwischen benachbarten Stapeln vernachlässigbar klein ausfällt (Abb. 1). Tatsächlich sinkt die magnetische Ordnungstemperatur proportional zur inversen Dicke m der CeIn_3 -Schichten und verschwindet schließlich nahe $m = 2$ (Abb. 2). Gleichzeitig wächst die Masse der schweren Quasiteilchen enorm an. Im zweidimensionalen Grenzfall ist nicht nur die magnetische Ordnung unterdrückt, es bricht auch die Beschreibung der Schwere Fermionen als Quasiteilchen zusammen.

Noch weisen die bisherigen Heterostrukturen aufgrund von Grenzflächendiffusion von Ce- und La-Atomen einen relativ hohen Restwiderstand auf, der zweidimensionale SF-Supraleitung verhindert. Dennoch sind diese Experimente richtungsweisend für die Untersuchung hochkorrelierter Systeme reduzierter Dimensionalität.

Philipp Gegenwart

- [1] H. Shishido et al., *Science* **327**, 980 (2010)
- [2] F. Steglich, *Physik Journal* **3**, 61 (2004)
- [3] N. D. Mathur et al., *Nature* **394**, 39 (1998)
- [4] P. Gegenwart, Q. Si und F. Steglich, *Nature Phys.* **4**, 186 (2008)
- [5] M. Jourdan, M. Huth, H. Adrian, *Nature* **398**, 47 (1998)
- [6] M. Izaki et al., *Appl. Phys. Lett.* **91**, 122507 (2007)

SO NAH WIE NIE ZUVOR

Die ESA-Raumsonde Mars Express umrundet den Roten Planeten auf einer stark elliptischen Bahn. Alle fünf Monate nähert sie sich dabei dem Marsmond Phobos. Anfang März kam die Sonde dem Mond so nah wie nie zuvor – auf eine Distanz von nur 67 Kilometern. Dabei konnte Mars Express neue Bilder von Phobos aufnehmen und sein Gravitationsfeld mit bislang unerreichter Präzision messen. Mit diesen Daten wollen die Wissenschaftler nun die Dichteverteilung im Mond bestimmen und seinen Ursprung klären. Denn Phobos sieht zwar aus wie ein massiver Körper, doch haben bisherige Flyby-Manöver bereits gezeigt, dass er zu 25 bis 35 Prozent porös sein muss. Auch wenn die Wissenschaftler noch unsicher sind, wie Phobos entstanden ist, wissen sie doch eins: Letzten Endes wird er auseinander bröseln...



ESA/DIR/FU Berlin (G. Neukum)