

Dem Rätsel der Hochtemperatursupraleiter auf der Spur

Eine deutsch-französische Forschungskoope-
ration unter maßgeblicher Beteiligung der Bochumer Festkör-
pertheoretiker (Lehrstuhl Prof. Efetov) berichtet in *Nature Physics* über theoretische Fortschritte im Verständnis
der Hochtemperatursupraleiter.

Seit ihrer Entdeckung vor etwas mehr als 25 Jahren berei-
tet die Frage nach dem Ursprung der Supraleitung in den aus
Kupferoxidverbindungen bestehenden Hochtemperatursupra-
leitern den Physikern Kopfzerbrechen. Neben dem namens-
gebenden und technologisch relevantesten Aspekt der außer-
gewöhnlich hohen Sprungtemperatur, bis zu der das Materi-
al supraleitendes Verhalten zeigt, weisen lochdotierte Kupra-
te wie $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ weitere faszinierende Phänomene auf: So
sind diese Materialien bei niedriger Dotierung Antiferromag-
neten, also Systeme, in denen magnetische Momente auf be-
nachbarten Stellen im Kristallgitter anders als in alltäglichen
(Ferro-)Magnetten nicht in gleicher Richtung sondern zuein-
ander umgekehrter Richtung orientiert sind. Andererseits be-
finden sich jene Kuprate bei mittlerer Dotierung oberhalb der
Sprungtemperatur für Supraleitung in einem mysteriösen als
Pseudogap [engl. für “Pseudo(energie)lücke”] bezeichneten
Zustand. Kennzeichnend für dieses Pseudogap ist, dass sich
Elektronen in bestimmten Richtungen nicht frei bewegen kön-
nen. Bis jetzt ist es Physikern noch nicht gelungen, zu einem

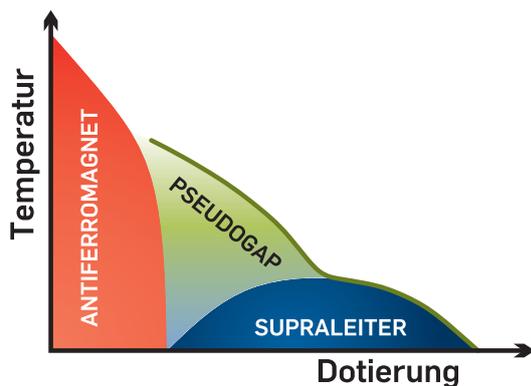


Abbildung 1: Das abgebildete Phasendiagramm zeigt, welchen Zu-
stand das lochdotierte Kuprat in Abhängigkeit vom Dotierungsgrad
und der Temperatur annimmt.

zufriedenstellenden Verständnis über mögliche physikalische
Ursachen des Pseudogaps, dessen physikalisches “Innenle-
ben” und besonders den Zusammenhang mit der Hochtempe-
ratursupraleitung zu gelangen. So bereiten theoretischen Phy-
sikern die starken Korrelationen und Quantenfluktuationen in
ihren analytischen Rechnungen große Schwierigkeiten, wäh-
rend Numeriker einen häufig aussichtslosen Kampf gegen expo-
nentiell lange Rechenzeiten in den Computersimulationen
relevanter Modelle führen.

Einem kleinen deutsch-französischen Forscherteam um

Prof. Konstantin Efetov (Theoretische Physik III, RUB) ist
auf dem Weg zur Lösung des Rätsels Pseudogap ein mögli-
cherweise entscheidender Fortschritt gelungen. Die Festkör-
perphysiker setzten dabei in ihrer in *Nature Physics* veröf-
fentlichten theoretischen Studie mit einem mikroskopischen
Modell an, das lediglich den Phasenübergang in die antifer-
romagnetische Phase am absoluten Temperaturnullpunkt vor-
aussetzt. Sie konnten zeigen, dass die starken antiferromag-
netischen Fluktuationen in der Nähe dieses Quantenphasenüber-
gangs in der Lage sind, den Zustand des physikalischen Sys-
tems grundlegend umzubauen.

Den neuen Zustand identifizierten die Physiker mit dem
in den letzten Jahren experimentell immer gründlicher er-
forschten Pseudogap. Ihre Theorie zeigt, dass dieser Zustand
zwei Ordnungen gleichzeitig beinhaltet: zum Einen *d*-Wellen-
Supraleitung und zum Andern eine spezielle modulierte elek-
trostatische Struktur, die an jedem Kupferatom im zweidi-
mensionalen Kristallgitter ein elektrostatisches Quadrupol-
moment induziert. Die theoretische Entdeckung dieser *Qua-
drupoldichtewelle* als im Pseudogap mit Supraleitung konkur-
rierender Ordnung ist das zentrale Ergebnis der in *Nature Phy-
sics* vorgestellten Arbeit.

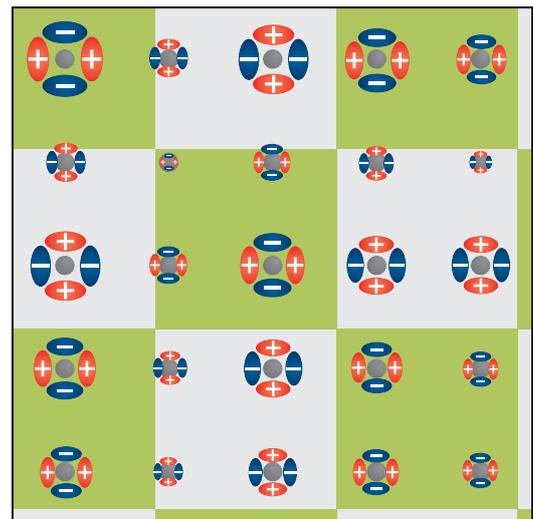


Abbildung 2: Die schematisch dargestellte Ordnung schachbrettartig
modulierter Quadrupolmomente an Kupferatomen (graue Kugeln)
befindet sich im Wettbewerb mit Supraleitung. In der Pseudogap-
Phase bleibt es beim Unentschieden zwischen beiden Ordnungen.

In der Pseudogap-Phase existieren Supraleitung und Qua-
drupoldichtewelle nebeneinander und können wegen starker
thermischer Fluktuationen keine langreichweitige Ordnung
ausbilden. Im Ergebnis zeigt das System als Ganzes keine
einheitliche Ordnung, behält aber die bestimmte Richtungen
der Elektronengeschwindigkeit unterdrückende Energielücke.
Kühlt man das System ab, werden die thermischen Fluktua-
tionen schwächer und unterhalb einer kritischen Temperatur

setzt sich eine der beiden Ordnungen durch. Unter normalen Umständen ist dies Supraleitung. Dabei ist von Bedeutung, dass die kritische Temperatur nicht den in konventionellen Supraleitern bestehenden Beschränkungen unterliegt und folglich sehr viel höher liegen kann. Es ist somit nicht ausgeschlossen, dass die neue Pseudogap-Theorie gleichzeitig die langersehnte Begründung für die ungewöhnlich hohen Sprungtemperaturen in Hochtemperatursupraleitern bereitstellt.

In den letzten Jahren haben sich die experimentellen Möglichkeiten, die auf Kupratverbindungen basierenden Hochtemperatursupraleiter zu studieren, immer weiter verbessert und interessante wie unerwartete Erkenntnisse zu Tage getragen. Einige mit den bisherigen theoretischen Modellen unverstandene experimentelle Befunde, z.B. das Verhalten in magnetischen Feldern, kann das deutsch-französische Forscherteam mit Hilfe seiner neuen Theorie für den Pseudogap-Zustand bereits erklären und hofft, dass zukünftige, auf diese Theorie aufbauende Untersuchungen sowohl von experimenteller als auch theoretischer Seite die Geheimnisse der Hochtemperatursupraleiter bald zu lüften vermögen.

Die in *Nature Physics* publizierte Arbeit entstand im Wesentlichen am Institut für Theoretische Physik (IPhT) in

Saclay bei Paris, wo Prof. Konstantin Efetov im Rahmen des ihm letztes Jahr vom französischen Staate und der Region Île-de-France verliehenen *Forschungslehrstuhls Blaise Pascal* einen längeren Aufenthalt hatte und gemeinsam mit der französischen Physikerin Dr. Catherine Pépin (IPhT) und seinen Doktoranden im Bereich der theoretischen Festkörperphysik forschte. Für seine Doktoranden ergab sich somit außerdem die Gelegenheit, in Frankreich über einen längeren Zeitraum wertvolle Auslandserfahrungen zu sammeln. Finanziell wurde die Arbeit außerdem durch den SFB/TR 12 "Symmetrie und Universalität in mesoskopischen Systemen" gefördert. Dr. Hendrik Meier, der seine unter Betreuung von Prof. Efetov angefertigte Dissertation vor knapp einem Jahr verteidigte und Mitautor des Artikels ist, wird seinen Weg in der theoretischen Festkörperphysik an der Yale-Universität im US-Staat Connecticut fortsetzen. Dort wird er im September eine durch ein Yale-Preisstipendium geförderte Stelle als Postdoktorand antreten.

Konstantin B. Efetov, Hendrik Meier, Catherine Pépin,
Pseudogap state near a quantum critical point,
Nature Physics (2013), DOI: 10.1038/NPHYS2641