

## Die Pseudolücke gestreift

Neue Experimente an Kuprat-Supraleitern zeigen ungewöhnliche Ordnungsphänomene im Regime der so genannten Pseudolücke. Über Ursache und Wirkung wird debattiert.

Die Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung in Kupraten 1986 hat große Teile der Festkörperphysik revolutioniert. Um diese komplexen Materialien zu verstehen, wurden völlig neue theoretische Ideen entwickelt sowie die Genauigkeit vieler experimenteller Techniken teilweise um mehrere Größenordnungen verbessert. Allerdings besteht – trotz der Fülle verfügbarer Messdaten – nach wie vor kein Konsens über den entscheidenden Mechanismus, der zur Supraleitung führt. Die konzeptionellen Schwierigkeiten liegen in der starken Wechselwirkung zwischen den Leitungselektronen begründet: Während sich diese Wechselwirkung in den meisten Metallen als kleine Störung behandeln lässt, dominiert sie viele Effekte in Kupraten. So sind undotierte Kuprate trotz ihres halbgefüllten Leitungsbandes Isolatoren: In ihnen werden Elektronen durch starke gegensei-



Tragen die Streifen eine Botschaft? Bei diesem Tiger schon.<sup>9</sup> Für die Streifenmus-

ter in Kuprat-Supraleitern ist die Frage jedoch nicht so einfach zu beantworten.

tige Abstoßung lokalisiert und bilden magnetische Momente. Supraleitung entsteht, wenn ein solcher Mott-Isolator mit Ladungsträgern dotiert wird – ein Prozess, der theoretisch wenig verstanden ist [1].

In Kupraten lassen sich oberhalb der Sprungtemperatur der Supraleitung  $T_c$  zahlreiche Anomalien beobachten, d. h. Abweichungen vom Verhalten eines konventionellen Metalls. Besonders spektakulär ist die „Pseudolücke“ [2] (Abb. 1): Bei geringer Dotierung zeigen thermodynamische und spektrale Messungen in allen Kuprat-Familien, dass beim Abkühlen unterhalb von  $T^*$  niederenergetische elektronische Zustände allmählich verschwinden. Dies legt die Existenz einer partiellen Energielücke im Spektrum nahe, die beispielsweise dann entsteht, wenn nur Teile der Fermi-Fläche im Grundzustand enthalten sind. Über die Ursache dieser Pseudolücke ist viel spekuliert worden. Die prominentesten Szenarien sind dabei:

- das Bilden phaseninkohärenter Cooper-Paare als Vorstufe zur Supraleitung,
- das Einsetzen einer konventionellen (aber möglicherweise schwer nachweisbaren) elektronischen Ordnung wie z. B. Spin- oder Ladungsdichtewellen, und

- die Existenz einer exotischen metallischen Phase im schwach dotierten Mott-Isolator, in der lokale magnetische Momente mit Ladungsträgern koexistieren.

Tatsächlich ließen sich in den vergangenen Jahren in einigen schwach dotierten Kupraten Ordnungsphänomene beobachten, die vorhergesagt und mit der Pseudolücke in Verbindung gebracht wurden [3–5]. Dazu gehören die „Streifenordnung“ (eine eindimensionale Modulation der Ladungsdichte, Abb. 2), weiterhin nematische Ordnung (die spontane Auszeichnung einer Raumrichtung) und schließlich eine magnetische Ordnung innerhalb der Einheitszelle, die nicht ferromagnetisch ist und mit spontanen Ringströmen assoziiert wird. In allen diesen Fällen sind jedoch entscheidende Fragen weitgehend ungeklärt: Tritt die symmetriebrechende Ordnung universell in allen Kuprat-Familien auf? Ist die Ordnung Ursache oder Folge der Pseudolücke? Sind die Ordnung oder ihre Fluktuationen wichtig für die Supraleitung selbst?

Neue Experimente haben nun entscheidende Fortschritte bei der Charakterisierung einiger Ordnungsphänomene gebracht. Parker et al. haben Rastertunnel-Spektro-

1) Die Streifen bilden die Wörter „THE HIDDEN TIGER“. Daher der Titel „The Hidden Tiger Illusion“ für dieses Bild des amerikanischen Naturmalers Rusty Rust.

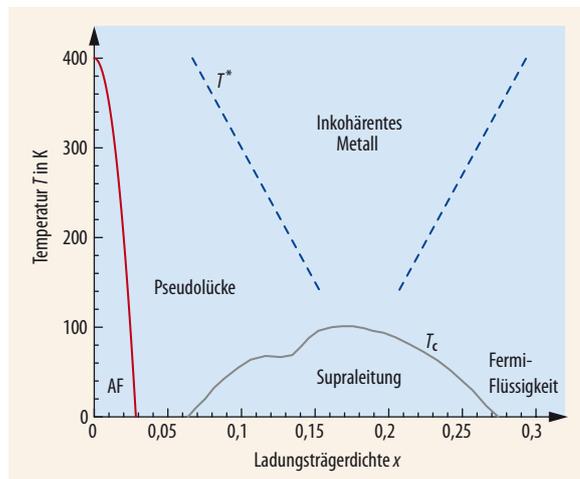


Abb. 1 Phasendiagramm von Kuprat-Supraleitern als Funktion von Temperatur  $T$  und Ladungsträgerdichte  $x$  (mittlere Lochzahl pro Cu-Atom, die experimentell durch Dotierung variiert wird): Bei  $x=0$  sind Kuprate Mott-Isolatoren; die ungepaarten Elektronen auf den Cu-Ionen bilden magnetische Momente, die antiferromagnetisch (AF) ordnen. Mit wachsendem  $x$  verschwindet der Antiferromagnetismus. Zwischen 6 und 28 % tritt Supraleitung auf, mit einem maximalen  $T_c$  bei „optimaler“ Dotierung (rund 16 %). Signaturen eines konventionellen Metalls zeigen sich nur bei großen  $x$  und tiefen  $T$  (Fermi-Flüssigkeit), während bei hohen  $T$  inkohärentes Verhalten überwiegt. Das Pseudolücken-Regime umfasst den Bereich  $T < T^*$  bei kleinen  $x$ . In den meisten Messgrößen ist die Änderung bei  $T^*$  graduell, ohne Hinweise auf einen Phasenübergang.

skopie an der Kuprat-Verbindung  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  über einen weiten Bereich von Dotierungen und Temperaturen ausgeführt [6]. Mit dieser Technik lassen sich Modulationen in der Ladungsdichte auf atomarer Skala (und damit z. B. Streifenordnung) an der Oberfläche einer Probe direkt beobachten. Eine wesentliche Komplikation ist jedoch, dass Streifenordnung in Kupraten nicht „perfekt“ ist, sondern selbst bei tiefen Temperaturen starke räumliche Unordnung (bedingt durch Pinning an Kristalldefekten) auftritt. Daher sind Streifen schwer von anderen Modulationen zu unterscheiden – dies betrifft insbesondere stehende Wellen, die durch Streuung von Elektronen an Defekten entstehen (Quasiteilchen-Interferenz). Tatsächlich werden Ladungsmodulationen in Tunnelexperimenten an Kupraten schon seit einigen Jahren beobachtet [3, 4]; allerdings war deren Interpretation stets umstritten. Parker et al. ist es nun erstmals gelungen, Signaturen von Streifenordnung klar von Quasiteilchen-Interferenz-Signalen zu separieren. Dabei haben sie, wie vor einigen Jahren vorgeschlagen, die Energieabhängigkeit der Phase der komplexen Modulation als Kriterium herangezogen [3].

Die Datenauswertung zeigt, dass Streifenordnung in einem signifikanten Teil des Phasendiagramms von  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  auftritt, und zwar praktisch nur innerhalb des

Pseudolücken-Regimes [6]. Zusammen mit früheren Experimenten, die wohlgeordnete Streifenphasen in Kupraten der  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ -Familie etabliert haben [4], zeigt dies, dass Streifenordnung in Kupraten wesentlich weiter verbreitet ist als bisher angenommen. Allerdings zeigen die Tunnelexperimente [6] auch, dass Pseudolücke und Streifenordnung unterschiedlich von der Dotierung abhängen: Während die charakteristischen Temperatur- und Energieskalen der Pseudolücke mit zunehmender Dotierung monoton abnehmen, sind Streifenphänomene bei einer Dotierung von  $x = 1/8$  am stärksten. Insgesamt legt dies nahe, dass Streifenordnung als Folge der Pseudolücke entsteht (oder zumindest durch sie stark begünstigt wird), jedoch nicht deren Ursache sein kann.

Für andere im Pseudolücken-Regime auftretende Ordnungsphänomene liegen für vergleichbare Schlussfolgerungen noch nicht genug Daten vor. Allerdings gelangen auch hier bemerkenswerte Fortschritte. So entdeckten Li et al. in  $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$  mittels Neutronenstreuung eine bisher unbeobachtete magnetische Anregung [7]. Diese Anregung korreliert mit der vor einigen Jahren etablierten Existenz einer ungewöhnlichen magnetischen Ordnung innerhalb der Kuprat-Einheitszelle in  $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$  [8]. Tatsächlich sind Eigenschaften der entdeckten Anregung kon-

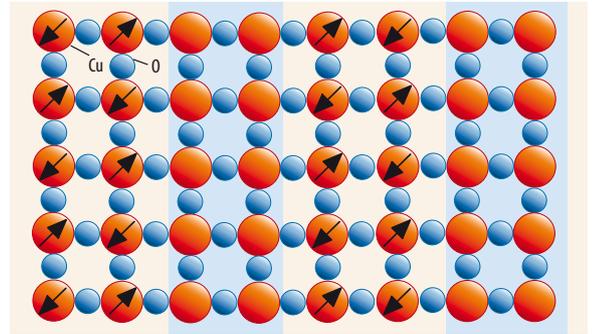


Abb. 2 In einer Kupferoxid-Ebene bildet sich eine periodische Anordnung aus Streifen mit hoher (blaue Streifen) und niedriger Ladungsträgerdichte. In letzteren tritt häufig antiferromagnetische Ordnung ähnlich zum Mott-Isolator auf. Die genaue mikroskopische Struktur von Kuprat-Streifen ist jedoch ungeklärt. Parker et al. haben eine räumlich ungeordnete Version solcher Streifenordnung mittels Rastertunnelmikroskopie nachgewiesen [6].

sistent mit entsprechenden Vorhersagen innerhalb eines Modells spontaner Ringströme [5], d. h. es liegt nahe, dass hier erstmalig die Elementaranregung dieser exotischen Ringstrom-Ordnung experimentell nachgewiesen wurde. Die detaillierte Dotierungsabhängigkeit dieser Ordnung, insbesondere bei kleinen  $x$ , ist jedoch nicht untersucht und damit ihre Beziehung zur Pseudolücke nicht hinreichend geklärt. Ähnliches gilt für nematische Ordnung [4].

Die Frage nach der Ursache der Pseudolücke bleibt also spannend. Sollte es sich herausstellen, dass keines der beobachteten Ordnungsphänomene hierfür in Frage kommt, dann rückt das eingangs genannte Szenarium einer neuartigen Nicht-Fermi-Flüssigkeits-Phase ohne Symmetriebrechung als Grundzustand schwach dotierter Mott-Isolatoren wieder in den Fokus des Interesses. Ein solches Szenarium eröffnet Raum für neue, bisher unerforschte, Mechanismen der Supraleitung.

Matthias Vojta

## KURZGEFASST

### ■ Avogadro-Konstante $N_A$ bestimmt

Mikroskopische und makroskopische Größen eines Körpers sind durch die Avogadro-Konstante verknüpft, die die Zahl der Teilchen pro Mol angibt. Um diese zu ermitteln, hat eine Kollaboration aus acht Metrologie-Instituten an der PTB in Braunschweig eine hochreine Einkristallkugel aus Silizium-28 mittels Präzisions-Röntgenkristallographie vermessen. Der ermittelte Wert von  $6,022\,140\,78(18) \cdot 10^{23}$  hat einen relativen Fehler von nur  $3,0 \cdot 10^{-8}$  und liegt  $1,0 \cdot 10^{-6}$  unterhalb der gegenwärtigen Codata-Empfehlung. Diese genaue Messung könnte als Grundlage für die Neudefinition des Kilogramms dienen. B. Andreas et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 030801 (2011)

### ■ Verschränktes Licht gespeichert

Zwei Gruppen aus Kanada und der Schweiz ist es gelungen, in speziellen dotierten Kristallen je ein Photon verschränkter Paare zwischenzuspeichern. Dabei übertrugen diese Quanten ihre Eigenschaften auf einzelne Atome oder kollektive Anregungszustände des Kristalls. Diesen präparierten die Forscher zuvor durch Bestrahlung mit frequenzmoduliertem Laserlicht. Nach einigen Nanosekunden verließen die Photonen den Speicher wieder. Beide Teams konnten zeigen, dass die Verschränkung der Paare auch danach intakt war. C. Clausen et al., Nature online, doi: 10.1038/nature09662 (2011); E. Saglamyurek et al., Nature online, doi: 10.1038/nature09719 (2011)

- [1] P. A. Lee, N. Nagaosa und X.-G. Wen, Rev. Mod. Phys. **78**, 17 (2006)
- [2] T. Timusk und B. W. Statt, Rep. Prog. Phys. **62**, 61 (1999)
- [3] S. A. Kivelson et al., Rev. Mod. Phys. **75**, 1201 (2003)
- [4] M. Vojta, Adv. Phys. **58**, 699 (2009)
- [5] C. M. Varma, Phys. Rev. B **73**, 155113 (2006)
- [6] C. V. Parker et al., Nature **468**, 677 (2010)
- [7] Y. Li et al., Nature **468**, 283 (2010)
- [8] Y. Li et al., Nature **455**, 372 (2008)

Prof. Dr. Matthias Vojta, Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden