

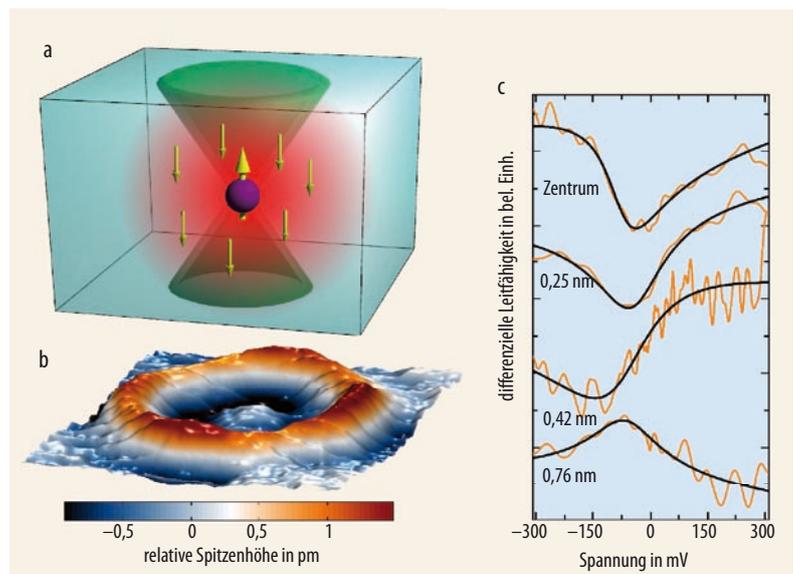
## ■ In die Tiefe geschaut

Der Fingerabdruck eines Vielteilchensystems reicht bis zur Oberfläche eines Kristalls.

Die Anwendung einer neuen Rastersondenmethode erlaubt nicht nur, Oberflächen mit atomarer Auflösung zu untersuchen, sondern auch Informationen aus der Tiefe eines Kristalls zu extrahieren. In einer kürzlich veröffentlichten Arbeit werfen Henning Prüser und Kollegen in Göttingen damit neues Licht auf ein seit langem bekanntes und vermeintlich gut verstandenes Vielteilchenphänomen der Festkörperphysik: den Kondo-Effekt [1].

Vor genau einhundert Jahren entdeckte Heike Kamerlingh Onnes die Supraleitung. Dabei gehen die Leitungselektronen von bestimmten Metallen unterhalb einer kritischen Temperatur in einen neuen quantenmechanischen Zustand über und der elektrische Widerstand springt auf null [2]. Ferromagnetische Metalle wie Eisen oder Kobalt zeigen keine Supraleitung, ändern aber als Verunreinigungen das Tieftemperaturverhalten von nichtmagnetischen Metallen gravierend. Zum Beispiel führt schon ein Anteil von weniger als 0,01 Prozent Eisen in Gold dazu, dass der elektrische Widerstand bei tiefen Temperaturen wieder ansteigt und nicht abnimmt, wie durch die geringere Streuung der Elektronen an den Schwingungen des Kristallgitters zu erwarten wäre.

Die Ursache für diesen überraschenden Effekt lag lange Zeit im Dunkeln und wurde erst in den 1960er-Jahren von Jun Kondo als ein Vielteilchen-Streuprozess erkannt [3]. Dabei streuen die für den Stromfluss verantwortlichen Elektronen an den magnetischen Störstellen unter Änderung ihres Spins und verringern damit die Leitfähigkeit des Metalls. Kondo zeigte, dass diese Streuung exponentiell mit abnehmender Temperatur ansteigt und deshalb bei genügend tiefen Temperaturen dominiert. Die quasifreien Elektronen im Metall koppeln dabei antiferromagnetisch mit dem magnetischen Moment der Störstellen und bilden einen neuen nichtmagnetischen Vielteil-



chenzustand. Dieser Phasenübergang ist gekennzeichnet von einer charakteristischen Temperatur, der Kondo-Temperatur, und führt zu einer Erhöhung der Zustandsdichte an der Fermi-Kante, welche sich z. B. in Photoemissionsmessungen spektroskopisch nachweisen lässt.

In diesem neuen quantenmechanischen Zustand sind es aber nicht einzelne Elektronen, die die Störstelle abschirmen, sondern es bildet sich vielmehr eine Wolke aus den zahlreichen Elektronen des Kristalls (Abb. 1a). Theoretische Modelle lassen diese Wolke erwarten, sie ist aber der experimentellen Beobachtung nur schwer zugänglich. Hier nun setzten die Göttinger Forscher ihre vor kurzem entwickelte Methode an, Störstellen im Inneren eines Kupfereinkristalls an der Oberfläche zu vermessen [4].<sup>#)</sup> Dabei benutzten sie die Spitze eines Rastertunnelmikroskops, um lokal Elektronen in den Kristall zu injizieren. Dort breiten sich diese

kristall aufspüren: Bei konstant gehaltenem Strom und konstanter Spannung durchfährt die Mikroskopspitze Höhenunterschiede von etwa 2 pm. Die Bildgröße beträgt 2 nm × 2 nm (b). Misst man in verschiedenen Abständen vom Zentrum die differentielle Leitfähigkeit als Funktion der Spannung (orangefarbene Kurven), ergeben sich Variationen im Bereich um 0 mV, die charakteristisch für den Kondo-Effekt sind (c; schwarze Kurven: Modellrechnungen).

ausschließlich in Richtungen aus, die den zu ihrer Energie passenden Wellenvektoren entsprechen. Liegt dort eine Störstelle, kann die einlaufende mit der reflektierten Elektronenwelle interferieren und kreisförmige Muster an der Oberfläche erzeugen. Diese lassen sich mit dem Rastertunnelmikroskop abbilden und erlauben es, auf die Tiefe der Störstellen zu schließen (Abb. 1b).

Schon bei ihren ersten Messungen diskutierten die Autoren die Möglichkeit, mit dieser Methode kollektive Prozesse wie den Kondo-Effekt zu studieren. Um dieses Experiment nun durchzuführen, benutzten sie einen speziell präparierten Kupferkristall, bei dem sie die äußersten Atomlagen mit 0,02 Prozent Eisen- oder Kobaltatomen gezielt verunreinigt hatten, und maßen an jedem Bildpunkt die differentielle Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Spannung (Abb. 1c). Daraus konnten sie den schwachen „Fingerabdruck“ der

<sup>#)</sup> A. J. Heinrich, Unter die Oberfläche geschaut, Physik Journal, Mai 2009, S. 21.

Kondo-Resonanz extrahieren, obwohl die magnetischen Atome sich mehrere Atomlagen tief im Kristall befanden und deshalb normalerweise dem nur oberflächensensiblen Rastertunnelmikroskop nicht zugänglich sind.

Interessanterweise ändert sich in Abhängigkeit von der Tiefe der Störstelle und dem seitlichen Messabstand die Form dieser Resonanz stark und reicht von einer Verringerung bis zu einer Erhöhung der differentiellen Leitfähigkeit an der Fermi-Energie (Abb. 1c). Diese Variationen lassen sich mit dem Phasensprung zwischen der einlaufenden und der reflektierten Elektronenwelle schlüssig erklären. Fortschrittliche Methoden der quantenmechanischen Vielteilchenbeschreibung können dies nachvollziehen. Die Wissenschaftler fanden, dass die über der Oberfläche gemittelte Kondo-Temperatur, die sich aus der Breite der Resonanzen bestimmen lässt, mit früheren Messungen an makroskopischen

Proben übereinstimmt. Unerwartet stellten sich jedoch lokal große Variationen in Abhängigkeit von der Tiefe der Störstelle und der Messposition an der Oberfläche ein [1]. Die Forscher vermuten, dass es an der räumlichen Ausdehnung der Elektronenorbitale liegt, die für das magnetische Moment der Störstelle verantwortlich sind. Bei den im Experiment benutzten Eisen- und Kobaltatomen erzeugen die nur teilweise besetzten und stark ausgerichteten 3d-Orbitale das magnetische Moment und die Wechselwirkung mit den Elektronen im Kristall.

Prüser und seine Kollegen haben mittels Rastertunnelmikroskopie im Kristall liegende Vielteilchensysteme gemessen, analysiert und spannende Ergebnisse erhalten. Mit der Methode der Elektronenfokussierung dürften sie künftig viele weitere interessante Einblicke in die Tiefe des Kristalls erhalten. So planen die Autoren, externe magnetische Felder zu benutzen,

um die Kondo-Resonanz in ihre unterschiedlichen Spinanteile zu trennen und diese Aufspaltung richtungsabhängig zu untersuchen. Auch Wechselwirkungen zwischen benachbarten Kondo-Störstellen sowie Kondo-Gitter lassen sich auf diese Weise erfolgversprechend experimentell angehen. Aber auch andere korrelierte Vielteilchensysteme, wie neuartige Supraleiter, in denen Störstellen und gezielte Verunreinigungen in schichtartig aufgebauten Kristallen eine entscheidende Rolle spielen, versprechen interessante Ergebnisse.

Markus Ternes

Dr. Markus Ternes,  
Max-Planck-Institut  
für Festkörperforschung,  
Heisenbergstr. 1, 70569 Stuttgart

- [1] H. Prüser et al., *Nature Physics* 7, 203 (2011)
- [2] H. Kamerlingh Onnes, *Comm. Leiden* 122b, (1911)
- [3] J. Kondo, *Prog. Theor. Phys.* 32, 37 (1964)
- [4] A. Weismann et al., *Science* 323, 1190 (2009)

## ■ Verschränkte Photonenspeicher

Supraleitende Resonatoren haben großes Potenzial für die Quanteninformationsverarbeitung.

Mit der Entwicklung von supraleitenden Quantenbits (Qubits) haben sich neue Perspektiven für die Quanteninformationsverarbeitung ergeben. Noch sind die erreichten Kohärenzzeiten zu gering, um kompliziertere Algorithmen mittels eines Registers aus vielen Qubits ausführen zu können. Diese Situation könnte sich durch den Einsatz von Resonatoren als Speicher verbessern, da sie weniger anfällig für Dekohärenz sind. In einem kürzlich durchgeführten Experiment ist es nun gelungen, die Quantenzustände verschiedener Resonatoren miteinander zu verschränken und damit die Möglichkeiten für Quantenalgorithmen zu erweitern [1].

Der harmonische Oszillator steht am Anfang jeder einführenden Vorlesung zur Quantenmechanik und gehört dadurch wohl zu den am gründlichsten studierten Systeme-

men. Sehr viel schwieriger als die Theorie gestaltet sich aber der experimentelle Nachweis seiner Quanteneigenschaften. Dies rührt daher, dass die quantenmechanischen Erwartungswerte, etwa der Amplitude, mit den klassischen Werten übereinstimmen. Auch ist es nicht möglich, durch eine resonante Anregung nur ein bestimmtes Energieniveau zu besetzen und so einen Fock-Zustand zu erzeugen. Aufgrund der Linearität des harmonischen Oszillators haben alle Energieniveaus den gleichen Abstand voneinander, was dazu führt, dass benachbarte Übergänge immer simultan angeregt werden und man dadurch eine Poisson-Verteilung der Besetzungszahlen erhält, also einen kohärenten Zustand.

Erst die Kopplung an ein nichtlineares System erlaubt es, die Quanteneigenschaften des harmonischen Oszillators zu beobachten und

vollständig zu kontrollieren. Ein berühmtes Beispiel hierfür ist die Wechselwirkung einzelner Atome mit dem elektromagnetischen Feld eines Resonators im Rahmen der Hohlraum-Quantenelektrodynamik („Cavity QED“). Gelangt ein angeregtes Atom in einen Resonator, dessen Resonanzfrequenz auf die des optischen Überganges abgestimmt ist, so emittiert das Atom ein Photon in den Resonator, absorbiert es erneut und so weiter. Dies bezeichnet man als Vakuum-Rabi-Oszillation. Deren Rate ist durch die Kopplungsstärke der Systeme gegeben.

Mit supraleitenden Qubits haben sich eindrucksvolle Verbesserungen ergeben, da hier wesentlich höhere Kopplungsstärken erreichbar sind. Diese Qubits bestehen aus elektrischen Schaltkreisen, die durch den Einsatz von Josephson-Tunnelkontakten nichtlineare