

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

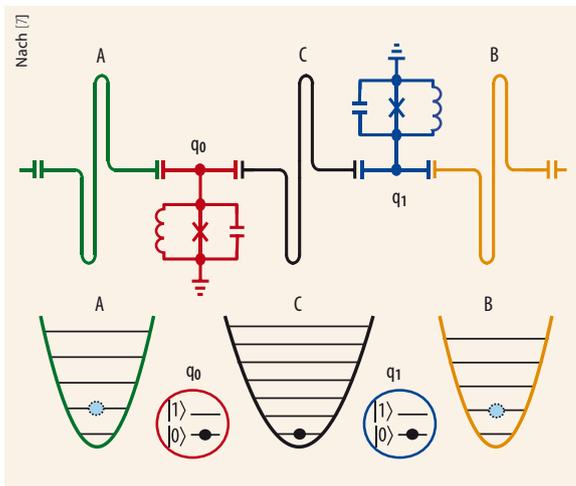


Abb. 1 Die Photonen in den Resonatoren A und B werden mittels zweier Phasenqubits q_0 und q_1 verschränkt. Die Qubits sind über einen weiteren Resonator C gekoppelt. Gezeigt sind das Schaltkreisschema des Experiments (oben) und die Energielevelausdarstellung eines erzeugten verschränkten Zustands.

Eigenschaften besitzen. Andreas Wallraff und Kollegen führten 2004 an der Yale-Universität die ersten „Circuit QED“-Experimente mit an Wellenleiterresonatoren gekoppelten Qubits durch [2]. Mittlerweile gelang es in einer Reihe interessanter Experimente außerdem, die Resonator-Vakuumfluktuationen nachzuweisen [3] oder einzelne Mikrowellenphotonen zu erzeugen und zu detektieren [4]. Experimente in Garching [5] und Delft [6] erreichten extrem hohe Kopplungsstärken, bei denen die Frequenz der Vakuum-Rabi-Oszillationen in der Größenordnung der Resonanzfrequenz liegt.

Das Team von John Martinis von der University of California in Santa Barbara (UCSB) demonstrierte 2009 in einem eindrucksvollen Experiment, dass sich beliebige Superpositionen von bis zu neun Fock-Zuständen mit definierter Phasenrelation gezielt erzeugen lassen [7]. Dazu koppelt ein Phasenqubit kapazitiv an das Ende eines Resonators. Ein Phasenqubit besteht aus der Parallelschaltung einer Induktivität mit einem kapazitiv kurzgeschlossenen Josephson-Kontakt, wodurch ein anharmonischer LC-Resonator entsteht. Die Probenparameter legen den Energieabstand zwischen Grundzustand und erstem angeregtem Zustand so fest, dass thermische Anregungen bei üblichen Betriebstemperaturen von 20 mK vernachlässigbar sind. Ty-

pische Übergangsfrequenzen liegen im Mikrowellenbereich von etwa 6 bis 10 GHz, die im Fall des Phasenqubits durch ein angelegtes Magnetfeld verstimmbar werden können.

Um sukzessive einzelne Photonen in den Resonator zu laden, regten die Forscher wiederholt zunächst das Qubit an und brachten es für die Dauer einer halben Periode der Vakuum-Rabi-Oszillation mit dem Resonator in Resonanz. Dabei skaliert die Frequenz dieser Oszillation mit der Wurzel der Quantenzahl des am Photonen-austausch beteiligten Resonatorzustandes. Diese Abhängigkeit erlaubte es, die Besetzungswahrscheinlichkeiten der Resonatorzustände zu messen und zwar, indem die Frequenzen der auftretenden Vakuum-Rabi-Oszillationen mit einem im Grundzustand präparierten Qubit analysiert wurden. Darüber hinaus ließen sich auch die Phasenrelationen zwischen den einzelnen Photonenzuständen (und somit die vollständige Resonator-Dichtematrix) mittels sog. Wigner-Tomographie ermitteln.

In der aktuellen Arbeit demonstriert die Gruppe an der UCSB nun die Weiterentwicklung dieses Experimentes, indem sie Photonen in unterschiedlichen Resonatoren verschränkt [1]. Der neue Schaltkreis besteht aus zwei koplanaren Resonatoren (A und B in Abb. 1), die an jeweils ein Phasenqubit gekoppelt sind. Weiterhin sind beide Qubits über einen dritten Resonator (C) verbunden, der es erlaubt, die Qubits in einen maximal verschränkten Zustand (Bell-Zustand) zu bringen.

Dazu regten die Forscher zunächst ein Qubit an und brachten dann beide Qubits nacheinander für die Dauer einer halben Vakuum-Rabi-Periode mit dem Kopplungsresonator in Resonanz. Schließlich übertrugen sie diesen verschränkten Zustand durch gleichzeitiges Verstärken der Qubits auf die jeweiligen Resonatoren.

Mit dieser Technik ließen sich verschränkte Resonatorzustände mit Beteiligung von bis zu drei Photonen erzeugen und diese durch eine weiter entwickelte Wigner-Tomographie nachweisen. Bemerkenswert ist dabei die Größe des verschränkten Systems, da jeder der etwa zwei Millimeter voneinander entfernten Resonatoren rund einen Zentimeter lang war. Der limitierende Faktor in diesem Experiment war die Kohärenzzeit der Qubits, die bei etwa 300 ns lag, während die Resonatoren eine Photonenlebensdauer von immerhin 3 μ s zeigten. Dies verdeutlicht das große Potenzial von supraleitenden Resonatoren für den Ansatz, Quanteninformation auf Basis von Josephson-Qubits zu verarbeiten.

Jürgen Lisenfeld und Alexey V. Ustinov

- [1] H. Wang et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 060401 (2011)
- [2] A. Wallraff, Physik Journal, Dezember 2008, S. 39
- [3] A. Fragner et al., Science **28**, 1357 (2008)
- [4] D. Bozyigit et al., Nature Physics **7**, 154 (2011)
- [5] T. Niemczyk et al., Nature Physics **6**, 772 (2010)
- [6] P. Forn-Díaz et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 237001 (2010)
- [7] M. Hofheinz et al., Nature **459**, 546 (2009)

KURZGEFASST

■ Elektronenpakete in Echtzeit

Kurze hochintensive Laserpulse, die z. B. auf Heliumgas treffen, können die Atome ionisieren. Während die Elektronen dem Laserfeld folgen, bleiben die Ionen stationär, sodass eine Plasmawelle mit riesigen elektrischen Feldern entsteht, die Elektronen bis nahe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigen kann. Einem Team um Ferenc Krausz (MPI für Quantenoptik und LMU München) ist es mit Physikern aus Jena erstmals gelungen, in Echtzeit Plasmawellen und beschleunigte Elektronenpakete zu beobachten. Bisher war dies

nur einzeln mit reduzierter Auflösung für die Elektronen oder die gesamte Plasmawelle möglich. Die kombinierte Aufnahme mit hoher Auflösung im fs-Bereich glückte nun mit dem gleichen Lichtpuls, der auch die Elektronen beschleunigte. Dazu hatten die Physiker den Puls zuvor gespalten, sodass ein kleiner Teil davon im rechten Winkel auf das System aus freien Elektronen und Ionen auftraf. Dieses Licht wurde zum Teil an der periodischen Plasmawelle abgelenkt und detektiert. A. Buck et al., Nature Phys., doi:10.1038/nphys1942 (2011)

Dr. Jürgen Lisenfeld,
Prof. Dr. Alexey Ustinov,
Physikalisches Institut,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Wolfgang-Gaede-Str. 1,
76131 Karlsruhe