

Press release

Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Katharina Jarrah

01/19/2023

<http://idw-online.de/en/news807892>

Research results, Scientific Publications
Physics / astronomy
transregional, national

Quantensimulator ermöglicht erste mikroskopische Beobachtung von Ladungsträger-Paaren

Ein Forscherteam am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) hat zum ersten Mal experimentell verfolgt, wie sich Löcher (positive Ladungsträger) in einem Festkörpermodell zu Paaren zusammenschließen könnten. Dieser Vorgang könnte eine wichtige Rolle bei Verständnis von Hochtemperatursupraleitern spielen.

Forscherinnen und Forscher am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) haben mit Hilfe einer Quantensimulation Paare von Ladungsträgern sichtbar gemacht, die möglicherweise für den widerstandslosen Stromtransport in Hochtemperatur-Supraleitern sorgen. Bislang sind die genauen physikalischen Mechanismen in diesen komplexen Werkstoffen noch weitgehend unbekannt. Theorien gehen davon aus, dass die Ursache für die Paarbildung und damit für das Phänomen der Supraleitung in magnetischen Kräften liegt. So entstandene Paare konnte das Team in Garching nun zum ersten Mal experimentell nachweisen. Die Grundlage dafür bildete eine gitterförmige Anordnung von kalten Atomen sowie ein trickreiches Unterdrücken der Bewegung freier Ladungsträger. Darüber berichten die Forscherinnen und Forscher im Magazin „Nature“.

Seit der Entdeckung von Hochtemperatur-Supraleitern vor rund 40 Jahren versuchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, deren grundlegenden quantenphysikalischen Mechanismen auf die Spur zu kommen. Doch immer noch geben die komplexen Materialien Rätsel auf. Die neuen Erkenntnisse eines Teams an der Abteilung Quanten-Vielteilchensysteme des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik (MPQ) in Garching erlauben nun einen ersten mikroskopischen Einblick in Prozesse, die sogenannten unkonventionellen Supraleitern zu Grunde liegen können.

Entscheidend für jede Art von Supraleitung ist die Bildung von fest verknüpften Paaren aus Ladungsträgern – Elektronen oder Löchern, wie Orte fehlender Elektronen genannt werden. „Die Ursache dafür liegt in der Quantenmechanik“, erklärt MPQ-Physikerin Sarah Hirthe: Jedes Elektron oder Loch trägt einen halbzahligen Spin – eine quantenphysikalische Größe, die man sich als Maß für eine Drehbewegung des Teilchens vorstellen kann. Auch Atome besitzen einen Spin. Aus quantenstatistischen Gründen können sich aber nur Partikel mit ganzzahligem Spin unter bestimmten Bedingungen widerstandlos durch ein Kristallgitter bewegen. „Deshalb müssen sich Elektronen oder Löcher dazu paarweise zusammenfügen“, sagt Hirthe.

In konventionellen Supraleitern helfen Gitterschwingungen, die Phononen, bei der Paarung. In nichtkonventionellen Supraleitern dagegen ist ein anderer Mechanismus wirksam – aber die Frage, welcher das ist, blieb bisher unbeantwortet. „In einer weit verbreiteten Theorie spielen indirekte magnetische Kräfte eine entscheidende Rolle“, berichtet Sarah Hirthe. „Doch das ließ sich bislang nicht experimentell bestätigen.“

Mit Löchern gespicktes Festkörpermodell

Um die Vorgänge in solchen Materialien besser zu verstehen, nutzten die Forscherinnen und Forscher einen Quantensimulator: eine Art Quantencomputer, der physikalische Systeme nachbaut. Dazu ordneten sie ultrakalte Atome im Vakuum mit Laserlicht so an, dass sie die Elektronen in einem vereinfachten Festkörpermodell, simulieren. Dabei arrangierten sich die Spins der Atome abwechselnd in entgegengesetzte Richtungen: Es entstand eine antiferromagnetische Struktur, die charakteristisch ist für viele Hochtemperatur-Supraleiter – und durch magnetische Kräfte stabilisiert wird. Anschließend „dotierte“ das Team dieses Modell, indem es weniger Atome im System zuließ, als es Plätze gibt. So gelangten Löcher in die gitterförmige Struktur.

Bindungsmechanismus in einem magnetisch geordneten System. Die roten und blauen Kugeln sind Spins verschiedener Ausrichtung, die schattierten Bänder, die die Kugeln verbinden, zeigen die magnetische Ordnung. Die weißen Kugeln sind Löcher. Wenn sich ein Loch wie von (i) nach (ii) bewegt, zerstört es die magnetische Ordnung. Wenn jedoch ein zweites Loch, wie in (iii) mit dem ersten verbunden ist, bleibt die magnetische Ordnung trotz Bewegung erhalten. Die Löcher paaren also, um die magnetische Ordnung im System zu erhalten.

Dem Team am MPQ ist es nun gelungen zu zeigen, dass die magnetischen Kräfte tatsächlich zu Paaren führen. Dazu nutzten sie einen experimentellen Trick. „Bewegliche Ladungsträger in einem für Hochtemperatur-Supraleiter typischen Festkörper, unterliegen einem Wettstreit verschiedener Kräfte“, erklärt Hirthe. Zum einen haben sie den Drang, sich auszubreiten, also möglichst überall gleichzeitig zu sein. Das verschafft ihnen einen energetischen Vorteil. Zum anderen sorgen magnetische Wechselwirkungen für eine regelmäßige Anordnung der Spinzustände von Atomen, Elektronen und Löchern – und vermutlich auch die Bildung von Ladungsträger-Paaren. Allerdings: „Die Konkurrenz der Kräfte hat es bisher verhindert, solche Paare mikroskopisch zu beobachten“, sagt Timon Hilker, der die Forschungsgruppe leitet. „Deshalb hatten wir die Idee, die störende Bewegung der Ladungsträger in einer Raumrichtung zu unterbinden.“

Ein scharfer Blick durchs Quantengasmikroskop

So konnten die magnetischen Kräfte weitgehend ungestört wirken. Die Folge: Löcher, die sich nahekamen, formten die erwarteten Paare. Um das zu beobachten, nutzte das Team ein Quantengasmikroskop – eine Vorrichtung, mit der sich quantenmechanische Prozesse detailliert verfolgen lassen. Darin zeigten sich bei hoher Dotierung nicht nur die Lochpaare. Es wurde auch deutlich, wie sie sich – durch abstoßende Kräfte – zueinander anordneten. Darüber berichtet das Team im Fachmagazin „Nature“. „Die Resultate unterstreichen die Vorstellung, dass der Verlust des elektrischen Widerstands in nichtkonventionellen Supraleitern durch magnetische Kräfte verursacht wird“, betont Prof. Dr. Immanuel Bloch, Direktor am MPQ und Leiter der Forschungsabteilung Quanten-Vielteilchensysteme. „Das führt zu einem besseren Verständnis dieser außergewöhnlichen Materialien und zeigt einen neuen Weg auf, wie stabile Lochpaare auch bei sehr hohen Temperaturen entstehen können und so möglicherweise die kritische Temperatur von Supraleitern deutlich erhöhen.“

Die Forscherinnen und Forscher am MPQ planen nun neue Experimente an komplexeren Modellsystemen, in denen große zweidimensionale Netze von Atomen miteinander verbunden sind. Damit, so die Hoffnung, werden mehr Lochpaare entstehen – und es wird sich auch deren Bewegung durch das Atomgitter beobachten lassen: der widerstandlose Stromtransport durch die Supraleitfähigkeit.

contact for scientific information:

Sarah Hirthe
Doktorandin
+49 89 32905-713
sarah.hirthe@mpq.mpg.de
Max Planck Institut für Quantenoptik, Garching

Prof. Dr. Immanuel Bloch

Direktor
+49 89 32905-238
immanuel.bloch@mpq.mpg.de
Max Planck Institut für Quantenoptik, Garching

Original publication:

Hirthe, S., Chalopin, T., Bourgund, D. et al., Magnetically mediated hole pairing in fermionic ladders of ultracold atoms. Nature 613, 463–467 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05437-y>

URL for press release: <https://www.nature.com/articles/d41586-022-04520-8>



Künstlerische Darstellung eines Lochpaares, die vom magnetischen Hintergrund des Systems verursacht wird.
Christoph Hohmann, MPQ