

Ein Baustein stark korrelierter Materie

Ein Doppelpotential und Lithium-Atome ermöglichen es, den einfachsten Baustein des Fermi-Hubbard-Modells zu realisieren.

Prof. Dr. Dieter Jaksch, Clarendon Laboratory, University of Oxford, OX1 3PU Oxford, UK

Eine Vielzahl der Eigenschaften von Festkörpern lässt sich erstaunlich gut durch Modelle nichtwechselwirkender Elektronen verstehen. In vielen Metallen und Halbleitern ist die Coulomb-Wechselwirkung zwischen Elektronen im Kristall so gut abgeschirmt, dass sie nur eine untergeordnete Rolle spielt und oft vernachlässigbar ist. Eine Erklärung dafür liefert die von Lev Landau 1956 entwickelte Theorie der Fermi-Flüssigkeit [1]. Die Annahmen dieser Theorie gelten allerdings nicht mehr, wenn hohe Potentialbarrieren das Tunneln von Elektronen zwischen Kristallgitterplätzen stark unterdrücken. Dann beginnt die Coulomb-Abstoßung zwischen den Elektronen eine wichtige Rolle zu spielen. Die Abstoßungsenergie wird minimiert, wenn die einzelnen Elektronen an verschiedenen Gitterplätzen lokalisiert sind. Sie tritt damit in Konkurrenz zur Tunnelenergie, welche über das gesamte Gitter delokalisierte Elektronen favorisiert.

Bei steigender Wechselwirkung kann daher ein metallisches System mit delokalisierten Elektronen in einem Quantenphasenübergang [2] in einen sog. Mott-Isolator mit lokalisierten Elektronen übergehen. Das Fermi-Hubbard-Modell beschreibt die Physik dieses Vorgangs

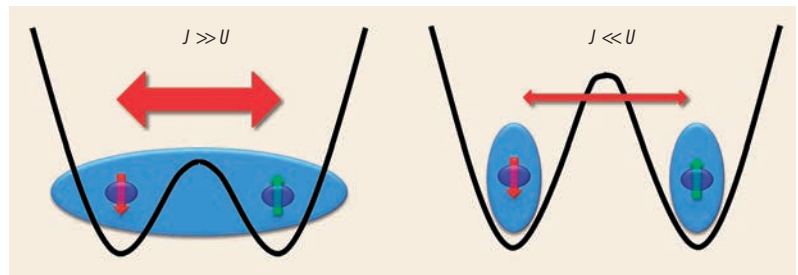


Abb. 1 Bei niedriger Potentialbarriere (links) dominiert das Tunneln J , welches die Atomwellenfunktionen über beide Potentialtöpfe delokalisiert. Eine hohe

Potentialbarriere (rechts) unterdrückt Tunneln. Aufgrund der dann dominanten Abstoßung U sind die Atomwellenfunktionen in den Töpfen lokalisiert.

[3]. Diese unterscheidet sich fundamental von der Physik in konventionellen Isolatoren, in denen das Pauli-Ausschlussprinzip für die Immobilisierung von Elektronen in gefüllten Bloch-Bändern sorgt.

Auch wenn der mikroskopische Ursprung von Tunneln und Wechselwirkung verstanden ist, steht eine umfassende Einsicht in die Vielteilchenphysik von stark wechselwirkenden Elektronen noch aus. So ist z. B. nicht bekannt, ob und wie Hochtemperatur-Supraleitung alleine aus dem Wechselspiel zwischen Elektron-Elektron-Wechselwirkung und der Tunnelenergie im Fermi-Hubbard-Modell entstehen kann. Um eine bessere Einsicht in diese Zusammenhänge zu erhalten, wurden in den letzten Jahren verstärkt Verfahren entwickelt, die kalte

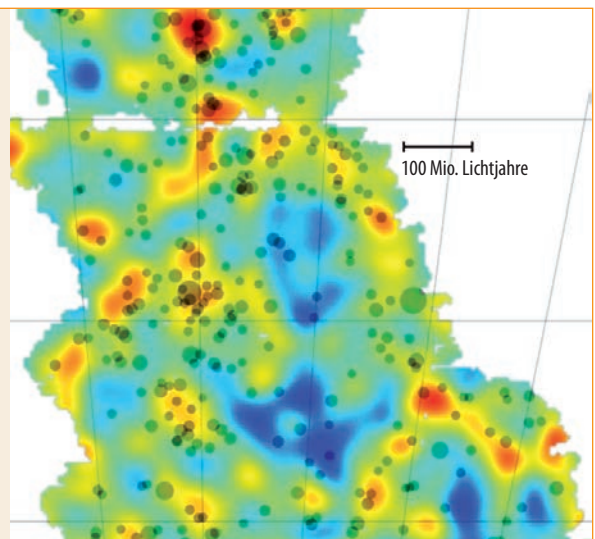
Atome als Quantensimulatoren für stark korrelierte Elektronen verwenden [4]. Meist dienen dazu atomare Bose-Einstein-Kondensate oder quantenentartete Fermi-Gase als Ausgangspunkt. Mithilfe elektromagnetischer Felder lassen sich im Experiment die quantenmechanischen Freiheitsgrade kalter Atome gezielt kontrollieren und manipulieren [5].

Die Arbeitsgruppe von Selim Jochim an der Universität Heidelberg hat nun einen experimentellen Meilenstein auf diesem Gebiet erreicht [6]. Die Physiker haben Atome in zwei unterschiedlichen Hyperfeinzuständen (Spins) im Bewegungsgrundzustand einer optischen Pinzette gefangen. Das im Experiment verwendete Lithium-Isotop ${}^6\text{Li}$ ist ein Fermion. Die

DUNKLE MATERIE KARTIERT

Dunkle Materie macht rund ein Viertel des gesamten Energie- und Materieinhalts des Universums aus. Obwohl sie – wie der Name schon sagt – nicht direkt sichtbar ist, lässt sie sich aufgrund ihrer Gravitationswechselwirkung sichtbar machen. Denn Dunkle Materie wirkt als Gravitationslinse und verzerrt die Bilder von Galaxien, die sich von uns aus betrachtet „hinter“ ihr befinden. Mithilfe einer 570-Megapixel-Kamera an einem Teleskop in Chile kartiert die internationale Kollaboration des „Dark Energy Survey“ derzeit systematisch die Verteilung der Dunklen Materie. Die Abbildung zeigt diese Verteilung für einen kleinen Himmelsausschnitt farbcodiert, wobei grün dem Mittelwert entspricht, blau Werten darunter und gelb, rot Werten darüber. Im Einklang mit der Theorie gibt es offenbar dort besonders viel Dunkle Materie, wo sich auch gewöhnliche Materie in Form von Galaxienclustern befindet (Kreise). Diese Kartierung soll es auch ermöglichen, die Dunkle Energie besser zu quantifizieren.

V. Vikram et al., arXiv:1504.03002



Fermi-Statistik garantiert daher, dass maximal zwei Atome im Bewegungsgrundzustand der Pinzette gefangen werden und dort einen Spin-Singulettzustand bilden.

Anschließend deformierten die Forscher das Fallenpotential der optischen Pinzette in einen Doppelpotentialtopf und untersuchten in diesem die Eigenschaften des Zweiatomsystems. Sie können dabei unter anderem die Höhe der Barriere zwischen den beiden Töpfen, und damit die Tunnelenergie J , sowie die Stärke der Wechselwirkung zwischen Atomen im gleichen Topf U experimentell über einen weiten Bereich verändern. Dieses Quantensystem bildet den fundamentalen Baustein des Fermi-Hubbard-Modells.

An einem einzelnen solchen Baustein haben die Forscher zuerst die Tunnelphysik der beiden Atome untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Atome nur bei schwacher Wechselwirkung $U \ll J$ unbeeinflusst voneinander zwischen den beiden Potentialtöpfen tunneln können und dass eine korrelierte Dynamik auftritt für $U \geq J$. Im Experiment wurde auch der Grundzustand des Systems untersucht (Abb. 1). Für $U \ll J$ sind die Atome über beide Töpfe delokalisiert, sodass Doppel- und Einzelbesetzung der beiden Töpfe gleich wahrscheinlich sind. Starke Abstoßung ($U \gg J$) führt dazu, dass die Atome einzeln in den Potentialtöpfen lokalisieren und Doppelbesetzung unterdrückt ist. Das beobachtete Verhalten stimmt exakt mit den Vorhersagen des Fermi-Hubbard-Modells für einen Doppelpotentialtopf überein.

Die Vielseitigkeit von Quantensystemen kalter Atome zeigt sich insbesondere daran, dass es auch gelang, angeregte Quantenzustände im Detail zu untersuchen. Dies erlaubte es, den Effekt des Superaustausches zu beobachten. Dabei können die Atome in einem Tunnelprozess höherer Ordnung gemeinsam ihre Spins umklappen, obwohl die starke Wechselwirkung $U \gg J$ individuelles Tunneln der Atome unterdrückt. Dieser Effekt spielt eine bedeutende Rolle bei der

Beschreibung von Quantenmagnetismus und kann Spinordnung in Materialien induzieren. Angesichts der extrem kleinen Energien J^2/U des Superaustausches war es bis vor kurzem nicht möglich, ausreichend tiefe Temperaturen zu erreichen, um diesen Effekt direkt zu beobachten [7]. Alle experimentellen Ergebnisse stimmen exzellent überein mit den theoretischen Vorhersagen. Das Experiment ist daher eine präzise Realisierung des auf einen Doppelpotentialtopf reduzierten Fermi-Hubbard-Modells.

In dem Experiment spielen die fermionischen Eigenschaften der Atome hauptsächlich beim Laden in die optische Pinzette eine Rolle. Danach tritt aufgrund der unterschiedlichen Spinkonfiguration der Atome und der fehlenden Spin-Orbit-Kopplung keine Pauli-Blockade auf. Die Arbeitsgruppe plant daher, ihre Zwei-Atom-Bausteine zu Gittern zusammenzusetzen, um damit wirklich die fermionischen Aspekte des Fermi-Hubbard-Modells zu studieren. Dabei werden sich die Gittergeometrie und der Füllfaktor des künstlichen Kristalls fast beliebig verändern lassen. Das beschriebene Experiment ist damit ein bedeutender erster Schritt auf einem neuen und spannenden Weg zur Erforschung emergenter Phänomene wie der Hochtemperatur-Supraleitung in stark korrelierten Vielteilchenquantensystemen.

Dieter Jaksch

- [1] G. Baym und C. Pethick, Landau Fermi-Liquid Theory, John Wiley & Sons, New York (1991)
- [2] S. Sachdev, Quantum Phase Transitions, Cambridge University Press, Cambridge (2011)
- [3] J. Hubbard, Proc. R. Soc. A **276**, 238 (1963)
- [4] I. Bloch, J. Dalibard und S. Nascimbène, Nat. Phys. **8**, 267 (2012); T. H. Johnson, S. R. Clark und D. Jaksch, EPJ Quantum Technology **1**, 10 (2014)
- [5] D. Jaksch und P. Zoller, Annals of Physics **315**, 52 (2005)
- [6] S. Murmann, A. Bergschneider, V. M. Klinkhamer, G. Zürn, T. Lompe und S. Jochim, Phys. Rev. Lett. **114**, 080402 (2015)
- [7] D. C. McKay und B. DeMarco, Rep. Prog. Phys. **74**, 054401 (2011)