

## Quantengase tauschen sich aus

Zwei unabhängige Experimente haben die Spin-Orbit-Austauschwechselwirkung in einem ultrakalten Quantengas beobachtet.

Die Simulation stark wechselwirkender Vielteilchensysteme mithilfe ultrakalter Quantengase hat in den letzten Jahren einen enormen Aufschwung erfahren. Dafür gibt es gute Gründe: Die Reinheit der verwendeten Systeme zusammen mit der außergewöhnlich guten Kontrolle über die relevanten experimentellen Parameter ermöglichen es einerseits, die Vorhersagen bekannter Vielteilchenmodelle zu überprüfen. Andererseits lassen sich auch ganz neuartige Systeme simulieren, die ansonsten weder theoretisch noch experimentell zugänglich wären. Zu den Erfolgen dieses Forschungsgebiets zählen beispielsweise die Untersuchung wechselwirkender Fermionen im Übergangsbereich zwischen Bose-Einstein-Kondensation und Bardeen-Cooper-Schrieffer-Regime sowie die Beobachtung des Übergangs zwischen Suprafluid und Mott-Isolator in optischen Gittern. Bisher nicht zugänglich war die Simulation von Festkörpern, bei denen ein Wechselspiel von Spin- und orbitalem Freiheitsgrad der Elektronen die charakteristischen Eigenschaften verursacht. Zu den sicherlich bekanntesten Erscheinungen dieses orbitalen Magnetismus gehören Ferromagnetismus, Schwere Fermionen (Verbindungen mit einer tausendfach erhöhten effektiven Elektronenmasse) und kolossaler Magnetowiderstand (hierbei lässt sich der Widerstand bestimmter Materialien durch ein externes Magnetfeld um viele Größenordnungen variieren).

Zentrale Ursache all dieser Effekte ist eine durch das Pauli-Prinzip hervorgerufene Austauschwechselwirkung von Elektronen in unterschiedlichen Orbitalen des Festkörpers. Lokalisierte Elektronen können auf diese Weise effektiv spinabhängig mit Elektronen im Leitungsband wechselwirken, wodurch je nach Charakter und Stärke dieser Wechselwirkung die beschriebenen Phänomene auftreten.

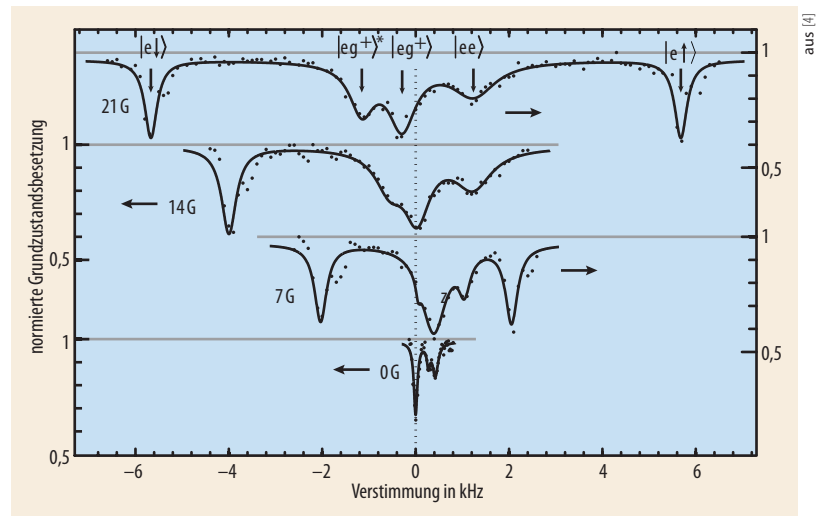


Abb. 1 Bei der Spektroskopie eines zwei-komponentigen  $^{173}\text{Yb}$ -Fermi-Gases im optischen Gitter spalten aufgrund der Wechselwirkung der Atome in den Zuständen  $|g\rangle$  und  $|e\rangle$  die Linien auf und verschieben sich.  $|e\downarrow\rangle$  und  $|e\uparrow\rangle$  entsprechen Atomen an einzeln besetzten Gitterplätzen, deren Energie durch den Zee-

man-Effekt verschoben wurde. Aus der Verschiebung des  $|eg^+\rangle$ -Zustands lässt sich die Stärke der Austauschwechselwirkung bestimmen. Das mit  $|eg^+\rangle$  bezeichnete Signal stammt von Atomen im ersten angeregten Band des optischen Gitters, während bei  $|ee\rangle$  beide Atome in den  $|e\rangle$ -Zustand angeregt wurden.

Bereits vor einigen Jahren wurde vorgeschlagen, diesen orbitalen Magnetismus sowie ganz neuartige Mechanismen mit kalten Quantengasen aus Erdalkali-Atomen zu untersuchen [1]. Das Termschema solcher und ähnlicher Atome wie Strontium oder Ytterbium weist mehrere metastabile Zustände auf, die einen orbitalen Freiheitsgrad repräsentieren können und auf Grund der extrem schmalen Übergänge oft für optische Atomuhren genutzt werden [2]. Für die hier relevanten Vielteilchensysteme erscheinen speziell der angeregte Zustand  $^3P_0 := |e\rangle$  zusammen mit dem Grundzustand  $^1S_0 := |g\rangle$  interessant. Im Zusammenspiel mit einem entsprechend zustandsabhängigen optischen Gitter könnten dann die Atome in  $|e\rangle$  die lokalisierten Elektronen und diejenigen in  $|g\rangle$  die mobilen Elektronen repräsentieren.<sup>1)</sup> Doch hinter diesem Vorschlag standen große Fragezeichen, da unbekannt war, wie sich die Lebensdauer der metastabilen Atome bei Wechselwirkung ändert und wie stark die Austauschwechselwirkung in solchen kalten Gasen ist.

Zwei Forschergruppen um Leonardo Fallani und Massimo Inguscio in Florenz sowie Simon Fölling und Immanuel Bloch in München ist es nun erstmals gelungen, die beschriebene Spin-Orbit-Austauschwechselwirkung in einem ultrakalten Quantengas aus fermionischen Ytterbium-Atomen direkt zu beobachten [3, 4]. Dabei hat sich gezeigt, dass sowohl die Lebensdauer des atomaren Ensembles als auch die Wechselwirkungsstärke groß genug sind, um zukünftig Modelle mit Spin- und orbitalem Freiheitsgrad wie das Kondo-Gitter zu untersuchen.

In ihren Experimenten begannen beide Gruppen damit, fermionisches  $^{173}\text{Yb}$  (Kernspin  $I=5/2$ ) im elektronischen Grundzustand in einer Mischung aus spin-up ( $m_F=+5/2 := |g\uparrow\rangle$ ) und spin-down ( $m_F=-5/2 := |g\downarrow\rangle$ ) bis zur Quantenentartung abzukühlen und in ein dreidimensionales optisches Gitter zu laden. Die experimentellen Parameter wurden dabei so gewählt, dass sich die Atome im Grundzustand der Schwerpunktsbewegung befanden und im Mittel jeweils ein

1) Dass in den beiden Zuständen  $^3P_0$  und  $^1S_0$  mit  $J=0$  zusätzlich die Einstellung des Kernspins unabhängig von den Stoßeigenschaften der Atome wird und somit zu einer  $SU(N)$ -Symmetrie der Wechselwirkung führt, kann in direkter Analogie zur Spinunabhängigkeit und  $SU(2)$ -Symmetrie der Coulomb-Wechselwirkung von Elektronen gesehen werden.

Atom mit spin-up und eines mit spin-down jeden Gitterplatz besetzte. Nach der Präparation wurde bei diesen isolierten Zwei-Teilchen-Systemen der Uhrenübergang  $|g\rangle \rightarrow |e\rangle$  angeregt und mittels hochpräziser Spektroskopie untersucht. Aus den resultierenden Wechselwirkungsverschiebungen und Aufspaltungen der Linien war es möglich, die Austauschwechselwirkung zu extrahieren und zu quantifizieren (Abb. 1).

Mithilfe von Magnetfeldern und Laserpulsen, die mit dem Uhrenübergang resonant waren, erzeugten die Forscher in einem weiterführenden Experiment an jedem Gitterplatz einen Überlagerungszustand aus zwei orbitalen und zwei Spinzuständen  $|e\ g^\pm\rangle \propto (|g^\uparrow, e^\downarrow\rangle \pm |g^\downarrow, e^\uparrow\rangle)$ . Anschließend beobachteten sie kohärente Oszillationen in den Besetzungen zwischen den Spinzuständen  $|g^\uparrow\rangle$  und  $|g^\downarrow\rangle$  (Abb. 2). Da die Oszillationen ohne vorherige Überlagerung verschwanden, ließen sie sich eindeutig der interorbitalen Austauschwechselwirkung zuordnen. Aus der Oszillationsfrequenz extrahierten die Forscher anschließend erneut

den Wert für die Austauschwechselwirkung. Beeindruckend bei diesen Messungen war vor allem die Kohärenzzeit der Oszillation relativ zur Stärke der Kopplung.

Die Experimente in Florenz und München bilden einen überaus vielversprechenden Ausgangspunkt, um neue stark korrelierte Vielteilchensysteme mit Yb-Atomen zu untersuchen. Würde man in einem ähnlichen Experiment beispielsweise Tunneln zwischen den einzelnen Gitterplätzen erlauben, hätte man direkt ein Quantengas-Analogon des Kondo-Gitters oder Kugel-Khomskii-Modells realisiert. Unter Verwendung der bis zu sechs verschiedenen Spinzustände von  $^{173}\text{Yb}$  ergeben sich sogar ganz neue experimentelle Möglichkeiten, um multi-orbitale Modelle mit  $SU(N)$ -symmetrischer Wechselwirkung zu realisieren, wie sie bereits in kalten Quantengasen ohne orbitalen Freiheitsgrad studiert wurden [5–7]. Damit würde man Zugriff auf exotische Quantenphasen oder Spinflüssigkeiten erlangen, die in der Natur nicht realisiert sind.

Christoph Becker und Klaus Sengstock

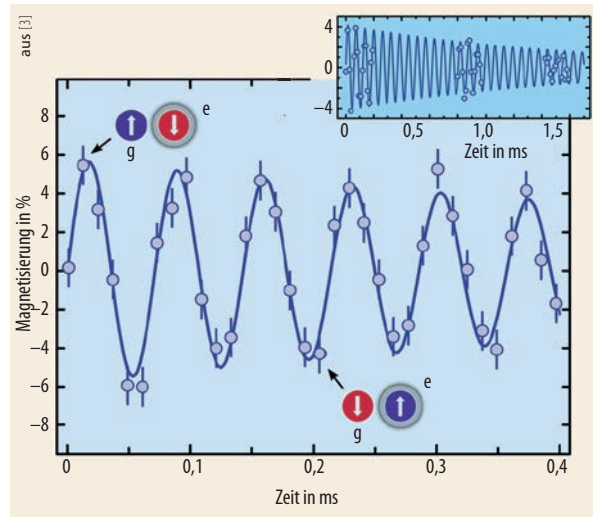


Abb. 2 Aus diesen kohärenten Grundzustands-Spinzustände  $|g^\uparrow\rangle$  und  $|g^\downarrow\rangle$ . Im Inset ist das Abklingen der Oszillationen über einen längeren Zeitraum zu erkennen.

[1] A. V. Gorshkov et al., Nature Physics **6**, 289 (2010)  
 [2] A. Derevianko und H. Katori, Rev. Mod. Phys. **83**, 331 (2011)  
 [3] G. Cappellini et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 120402 (2014)  
 [4] F. Scazza et al., Nature Physics **10**, 779 (2014)  
 [5] S. Taie et al., Nature Physics **8**, 1 (2012)  
 [6] X. Zhang et al., Science **345**, 1467 (2014)  
 [7] G. Pagano et al., Nature Physics **10**, 198 (2014)

Dr. Christoph Becker, Prof. Dr. Klaus Sengstock, Institut für Laserphysik, Universität Hamburg, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg

## Schnappschuss in 3D

Die räumliche Struktur eines Nanokristalls lässt sich bereits aus einer einzelnen atomar aufgelösten elektronenmikroskopischen Aufnahme gewinnen.

Nanoteilchen zeigen oft ganz andere physikalische Eigenschaften als die entsprechenden makroskopischen Kristalle. Das nutzte man bereits im Mittelalter: Die verschiedenen Farben von Kirchenfenstern verdanken wir unterschiedlich großen Gold-Nanopartikeln. Eine moderne Anwendung für metallische Nanopartikel ist die heterogene Katalyse, deren Effektivität entscheidend von Größe und Oberflächenstruktur der Partikel abhängt. Für ein genaues Verständnis ist es unerlässlich, die detaillierte Struktur der Nanoteilchen zu ermitteln. Hier hat sich die Transmissions-Elektronen-Mikroskopie (TEM) etabliert. Allerdings liefert diese im

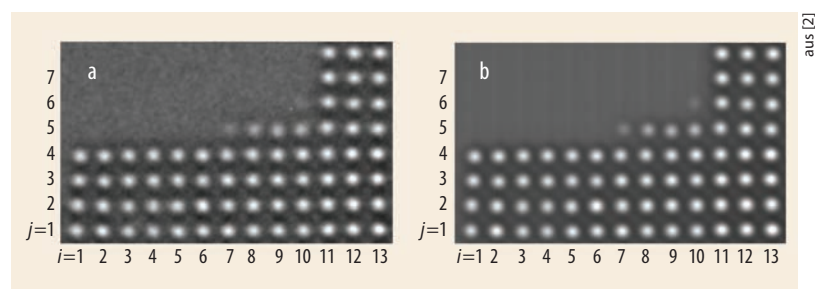


Abb. 1 Ausschnitt aus der elektronenmikroskopischen Aufnahme eines MgO-Partikels, das mit einem aberrationskorrigierten Transmissions-Elektronen-Mikroskop in [001]-Richtung durchstrahlt wurde (a): Die hellen Punkte entsprechen den projizierten Atomsäulen. In den oberen

Reihen sind deutlich Helligkeitsunterschiede zu sehen, die durch atomare Stufen verursacht sind. Die Atomsäulen sind durch die Zahlentupel  $(i, j)$  indiziert. Die Bildsimulation (b) mit angefitzten Abbildungsparametern hat dieselbe Intensitätsskala wie das TEM-Bild.

Wesentlichen nur die Projektion der Struktur entlang der Einstrahlrichtung. Wesentlich aufschlussreicher ist die dreidimensionale

Struktur der Nanopartikel. Dafür kommt die Elektronentomographie zum Einsatz: Aus Aufnahmen bei unterschiedlicher Verkipfung des