

■ Kalte Atome im Quantenkarussell

In einem optischen Gitter lassen sich mithilfe von Lasern starke künstliche, alternierende Magnetfelder erzeugen.

Was haben Kinder auf einem Karussell und Elektronen, die durch ein Magnetfeld fliegen, gemeinsam? Beide erfahren eine Kraft senkrecht zu ihrer Geschwindigkeit, die sie auf einer Kreisbahn hält. So wie eine Drehbewegung für Kinder faszinierend und lehrreich ist, sind magnetische Felder seit Jahrzehnten ein unverzichtbares Mittel für Physiker, um Materialeigenschaften besser zu verstehen. Zum Beispiel erlaubte es erst die Entdeckung der vollständigen Verdrängung magnetischer Felder aus Supraleitern, diese als thermodynamischen Zustand zu beschreiben. Beeindruckende Phänomene wie der Quanten-Hall-Effekt, bei dem die Leitfähigkeit zweidimensionaler Elektronengase quantisiert wird, sodass sich fundamentale Naturkonstanten messen lassen, treten nur in starken Magnetfeldern auf. Diese und viele andere Beispiele machen das Magnetfeld zu einem der wichtigsten Werkzeuge, um die Physik von Festkörpern und speziell die dabei auftretenden Quanteneffekte besser verstehen zu lernen.

Mit der Erzeugung ultrakalter atomarer Bose-Einstein-Kondensate (BEC) hat sich seit 1995 eine neuartige Möglichkeit eröffnet, solche Quanteneffekte zu untersuchen. Dazu lässt sich das BEC mit Lasern so manipulieren, dass dessen Atome das Verhalten von Elektronen in einem Festkörper simulieren. Die Atome bewegen sich in einem aus Laserlicht erzeugten, diskreten Gitter und tunneln zwischen den Gitterplätzen. Kalte Atome bewegen sich vollkommen quantenmechanisch durch diese optischen Gitter.

Optische Gitter bieten entscheidende Vorteile, z. B. lassen sich Systemparameter über einen sehr großen Bereich exakt kontrollieren und die Eigenschaften einzelner Atome messen, zudem ist der experimentelle Aufbau sehr flexibel. Besondere Herausforderungen entstehen durch die benötigten extrem tiefen Temperaturen ($\approx 10^{-9}$ K) und

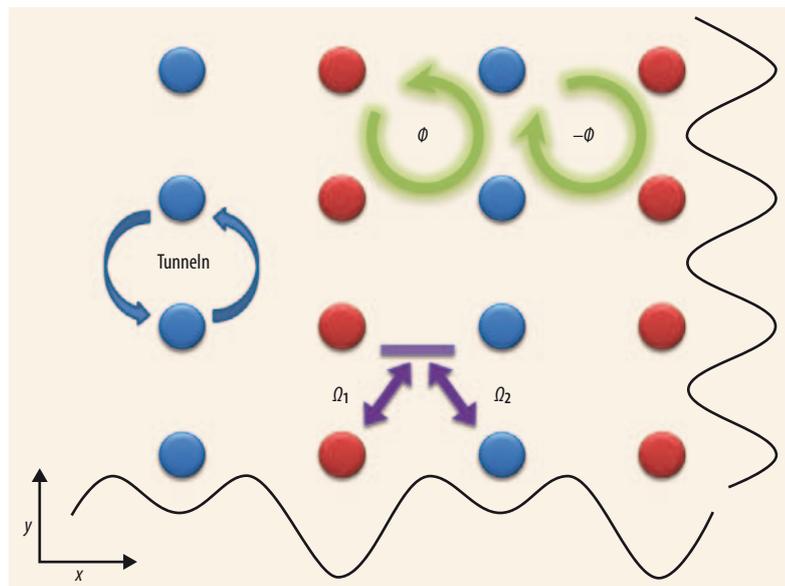


Abb. 1 Mithilfe optischer Gitter lassen sich künstliche Magnetfelder erzeugen: Durch das Supergitterpotential entlang der x -Richtung verschiebt sich die Energie jedes zweiten Atoms, sodass sie nicht tunneln können. Zwei Raman-Laser Ω_1 und Ω_2 können aber die Bewegung antreiben. Beim Übergang von einer roten in eine blaue Spalte absorbiert das Atom ein Photon aus dem Laser Ω_1 und emittiert ein Photon mit niedrigerer Energie

durch die vergleichsweise langsame Dynamik im Bereich einiger Millisekunden. Außerdem sind BEC-Atome elektrisch neutral, sodass ihre Bewegung nicht auf elektrische und magnetische Felder anspricht.

Um dennoch Zugang zur reichhaltigen Quantenphysik in Magnetfeldern zu erhalten, kann man optische Gitter wie ein Karussell in Rotation versetzen. Durch das rotierende Bezugssystem ergibt sich eine Kraft auf neutrale Atome, die der eines Magnetfeldes auf bewegte elektrische Ladungen entspricht. Mit dieser Technik ließen sich z. B. Quantenwirbel aus Atomen erzeugen [1]. Die technischen Herausforderungen an Rotationsexperimente sind jedoch hoch und haben es bisher verhindert, sehr starke künstliche Magnetfelder zu erreichen.

Im Gegensatz dazu beruht ein kürzlich von Monika Aidelsburger und ihren Kollegen an der Universität München durchgeführtes

Experiment auf der Einsicht, dass der quantenmechanische Effekt eines Magnetfeldes lediglich der Aufprägung einer Phase auf die Wellenfunktion eines tunnelnden geladenen Teilchens entspricht [2]. Der eingeschlossene magnetische Fluss bestimmt dabei die Phasendifferenz zwischen Anfangs- und Endpunkt einer geschlossenen Teilchenbahn. Dieser Mechanismus lässt sich mittels Lasern experimentell nachbilden.

Experiment auf der Einsicht, dass der quantenmechanische Effekt eines Magnetfeldes lediglich der Aufprägung einer Phase auf die Wellenfunktion eines tunnelnden geladenen Teilchens entspricht [2]. Der eingeschlossene magnetische Fluss bestimmt dabei die Phasendifferenz zwischen Anfangs- und Endpunkt einer geschlossenen Teilchenbahn. Dieser Mechanismus lässt sich mittels Lasern experimentell nachbilden.

Dazu verwenden die Experimentatoren einen Aufbau, der optische Gitter und Raman-Laser kombiniert (Abb. 1). Ein gewöhnliches optisches Gitter in y -Richtung ermöglicht es den Atomen, sich in diese Richtung durch Quantentunneln zu bewegen, ohne die Phase zu ändern. Im Gegensatz dazu wiederholt sich das Potential eines Supergitters in x -Richtung nur alle zwei Gitterplätze, sodass kein direktes Tunneln möglich ist.

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

Die beiden Raman-Laser induzieren aber die Bewegung der Atome entlang dieser Richtung, indem sie ihnen Energie zur Verfügung stellen bzw. Energie aufnehmen, um diese Energielücken zu überwinden. Eine genaue quantenmechanische Analyse des optischen Quantentunnels zeigt, dass sich dabei die Phase der Raman-Laser auf die Wellenfunktion der Atome überträgt. Eine entsprechende Laserkonfiguration ermöglicht es, ein beliebig hohes Magnetfeld zu simulieren [3]. Im Experiment gelang es den Münchner Physikern, diese Magnetfeldsimulation mit einer erst kürzlich entwickelten Technologie zur optischen Auflösung einzelner Gitterplätze zu kombinieren. Dies eröffnet völlig neue Möglichkeiten, um mikroskopische Quantenbewegung in Magnetfeldern zu manipulieren und zu beobachten.

In den ersten Experimenten haben Aidelsburger und ihre Kollegen alternierende Magnetfelder untersucht. Dabei wechselt der magnetische Fluss von einer Spalte des optischen Gitters zur nächsten sein Vorzeichen (Abb. 1). Das Experiment demonstriert, dass solche Magnetfelder zur Frustration der Atome führen können. Im Gegensatz zu einem herkömmlichen Gitter mit nur einem einzigen wohldefinierten Grundzustand kann das Magnetfeld zwei entartete Grundzustände kreieren, die für die Atome gleichermaßen (un)attraktiv

sind. Im Experiment teilen sich die Atome gleichmäßig auf diese beiden Zustände auf, was sich durch die Messung des Quasiimpulses der Atomwolke deutlich zeigt.

Frustrierte Zustände spielen in der Erforschung von Magnetismus in Festkörpern eine wichtige Rolle, da den entarteten Grundzuständen verschiedene magnetische Konfigurationen entsprechen, die in Konkurrenz zueinander stehen. Dies führt zu Überlagerungen und damit zu neuen magnetischen Anordnungen. Solche Prozesse theoretisch zu beschreiben, stellt nach wie vor eine Herausforderung dar, insbesondere wenn viele entartete Grundzustände beteiligt sind. Experimente mit frustrierten Zuständen können wertvolle Hinweise auf ihre Eigenschaften liefern und zu einem besseren Verständnis magnetischer Phasen führen.

Im zweiten Teil der Arbeit geht es darum, ein Quantenkarussell für kalte Atome zu studieren. Dieses besteht aus vier Gitterplätzen, angeordnet an den Eckpunkten eines Quadrates, das wie in Abb. 1 einen magnetischen Fluss Φ einschließt. Die Atome starten in einer quantenmechanischen Überlagerung in zwei der Gitterplätze gleichzeitig. Der Fluss Φ versetzt sie in eine (fast) periodische Zyklotronbewegung. Diese konnten die Münchner Physiker im Experiment zeitaufgelöst erfassen und dadurch einen detaillierten Einblick in die mikro-

oskopische Quantendynamik von Atomen im Magnetfeld gewinnen.

Experimente mit dem Ziel, Quanteneffekte im Magnetfeld mittels kalter Atome zu studieren, verfolgen weltweit mehrere Gruppen. So haben Wissenschaftler in Hamburg kürzlich magnetische Frustration in Dreiecksgittern nachgewiesen [4]. Eine Gruppe am NIST hat im Januar 2012 vom ersten Nachweis des Hall-Effektes in superflüssigen kalten Atomen berichtet [5]. Die Herstellung künstlicher Magnetfelder für neutrale Atome eröffnet eine ganze Reihe von neuen Möglichkeiten, um Einblicke in die Welt der Quantenmechanik zu erlangen. Allerdings sind auch die nächsten Herausforderungen groß: Um nämlich Zugang zu magnetischen Effekten in stark korrelierten wechselwirkenden Quantensystemen zu erhalten, sind noch niedrigere Temperaturen und eine noch exquisitere Kontrolle über die Teilchenzahlen im optischen Gitter erforderlich. Diese ersten Experimente sind jedoch bereits außerordentlich wichtige Schritte auf diesem Weg zum besseren Verständnis von Magnetismus.

Dieter Jaksch

- [1] R. A. Williams et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 050404 (2010)
- [2] M. Aidelsburger et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 255301 (2011)
- [3] D. Jaksch et al., New J. Phys. **5**, 56 (2003)
- [4] J. Struck et al., Science **333**, 996 (2011)
- [5] L. J. LeBlanc et al., arXiv:1201.5857v1

■ Mit dem Kopf durch die Wand

Quantenmechanisches Klein-Tunneln lässt sich in ultrakalten Gasen realisieren.

Die Quantenmechanik zwingt uns in vielerlei Hinsicht dazu, unsere klassisch geprägte physikalische Intuition aufzugeben. So besagt die nichtrelativistische Quantenmechanik, dass ein Teilchen mit exponentiell kleiner, aber endlicher Wahrscheinlichkeit in einen klassisch verbotenen Bereich eindringen und sogar hindurch tunneln kann. Die relativistische Quantenmechanik geht sogar noch einen Schritt weiter: 1929 machte

Oskar Klein die Vorhersage, dass eine Barriere unter bestimmten Umständen sogar perfekt durchlässig werden kann [1].

Der Schlüssel zum Verständnis dieses Phänomens, kurz Klein-Tunneln genannt, liegt in der Struktur der Energie-Impuls-Beziehung für Lösungen der relativistischen Dirac-Gleichung. Diese lässt Lösungen mit positiver und negativer Energie zu (Abb. 1a). Die Lösungen positiver Energie sind von denen mit negativer

Energie durch eine Energielücke getrennt, die für elementare Teilchen der doppelten Ruheenergie entspricht, d. h. $\Delta E = 2 m c^2$ (m ist die Ruhemasse und c die Lichtgeschwindigkeit). Ein Tunnelvorgang geht wie folgt vonstatten (Abb. 1b): Ausgangspunkt ist ein Teilchen mit einer kinetischen Energie E (blauer Punkt), das auf eine Potentialbarriere der Höhe V_b aufläuft (Abschnitt ii). Dort verschiebt sich die Energie-Impuls-Beziehung um

+) Die Wahrscheinlichkeit wird sogar eins, wenn $\Delta E = 0$.