



Den magischen Zahlen der Quantenmaterie mit kalten Atomen auf der Spur

Den magischen Zahlen der Quantenmaterie mit kalten Atomen auf der Spur Die Topologie ist eigentlich ein Teilgebiet der Mathematik, das sich mit der Klassifizierung von geometrischen Objekten befasst. In der Physik wird sie dazu genutzt außergewöhnliche Zustände der Materie, sogenannte topologische Zustände, vorherzusagen und zu beschreiben, die gewöhnlich bei tiefen Temperaturen auftreten. Ihre einzigartigen elektrischen Eigenschaften machen sie interessant für eine Reihe technologischer Anwendungen. Die große Stabilität dieser topologischen Zustände beruht auf den für sie charakteristischen magischen ganzen Zahlen, den sogenannten Chernzahlen, die besonders unempfindlich gegenüber Störungen sind. Erstmals ist es nun einem internationalen Forscherteam gelungen, die topologische Chernzahl in einem nicht-elektronischen System mit hoher Präzision zu messen. Die Experimente wurden in der Gruppe von Prof. Immanuel Bloch (Ludwig-Maximilians-Universität, München und Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching) in Zusammenarbeit mit Nathan Goldman und Sylvain Nascimbène vom Collège de France in Paris und Nigel Cooper von der Cambridge University an einem System aus ultrakalten bosonischen Atomen durchgeführt. Unter extremen Bedingungen wie besonders starken Magnetfeldern und sehr tiefen Temperaturen können sich exotische Materiephasen mit äußerst ungewöhnlichem elektrischen Verhalten bilden, zum Beispiel dem verlustfreien Leiten elektrischer Ströme oder dem Auftreten quantisierter elektrischer Widerstände. Diese Materiephasen sind topologische Zustände, die durch magische (topologische) Zahlen beschrieben werden. Diese werden in der Mathematik zur Klassifizierung abstrakter geometrischer Objekte verwendet [zum Beispiel die Anzahl von Löchern in einer Oberfläche, Abb. 1a] und sind stabil gegenüber kleinen Formänderungen. Die Tatsache, dass bestimmten Quantenzuständen von Materie topologische Zahlen zugeordnet werden können, macht deren elektrische Eigenschaften robust gegenüber Störungen. Deshalb hofft man, diese Zustände für technologische Anwendungen, z.B. in der Spintronik oder in Quantencomputern, nutzen zu können, was die experimentelle Suche nach neuen Materialien mit topologischen Eigenschaften motiviert. Topologische Zustände wurden erstmals im Zusammenhang mit dem Quanten-Hall-Effekt entdeckt, für dessen Beobachtung 1985 der Nobelpreis verliehen wurde. Darunter versteht man das Phänomen, dass der elektrische Widerstand in Materialien, welche extremen Magnetfeldern ausgesetzt sind, bei ausreichend niedrigen Temperaturen große stabile Plateaus aufweist. Dieses Verhalten zeigt sich unabhängig von der Probe. Erstaunlicherweise hat diese universelle Eigenschaft ihren Ursprung in der Topologie, denn jedes Plateau in der Widerstandsmessung wird durch eine topologische Zahl, die Chernzahl, bestimmt. "Die besondere Schönheit dieses Ergebnisses liegt darin, dass diese magischen mathematischen Zahlen die intrinsischen Eigenschaften der Elektronen, die sich in dem Material bewegen, widerspiegeln; es ist erstaunlich, dass diese abstrakten Zahlen zu tatsächlich beobachtbaren Phänomenen führen", sagt der Theoretiker Nathan Goldman. Eine interessante Möglichkeit, topologische Phasen von Materie zu untersuchen, stellen synthetische Materialien aus kalten Atomen dar, die durch Laserstrahlen kontrolliert werden. In diesen sehr flexiblen und gut kontrollierbaren Experimenten werden neutrale Atome in periodischen Strukturen gefangen, die durch stehende optische Wellen erzeugt werden. Kalte Atome, die sich in diesen optischen Gittern bewegen, eignen sich gut dafür, das Verhalten von Elektronen in realen Materialien nachzubilden. Im Gegensatz zu Elektronen sind Atome jedoch elektrisch neutral; in einem externen Magnetfeld wäre aus diesem Grund kein Hall-Effekt zu beobachten. Das Münchner Team entwickelte deshalb neue experimentelle Methoden, mit denen künstliche Magnetfelder für neutrale Atome erzeugt wurden. In diesen Aufbauten verhalten sich Atome wie geladene Teilchen in Magnetfeldern und bieten somit eine neue Möglichkeit, topologische Phasen in einer besonders gut kontrollierbaren und reinen Umgebung zu erforschen. Der optische Gitteraufbau in den Münchner Experimenten wurde speziell dazu entworfen um topologische Eigenschaften zu untersuchen (Abb. 1b). In der Tat führt ein effektives Magnetfeld im Gitter dazu, dass die kalten Atome durch eine von Null verschiedene, topologische Chernzahl ausgezeichnet sind $\chi = 1$. Nathan Goldman erklärt: "In Analogie zum elektrischen Hall-Effekt erwartet man, dass die Atome eine transversale Bewegung relativ zu der auf sie wirkenden Kraft erfahren (Abb. 2). Darüber hinaus sagt unsere Theorie vorher, dass diese transversale Ablenkung proportional zur topologischen Chernzahl ($\chi = 1$) ist." Die Experimentalphysiker haben eine Kraft an die Atome im optischen Gitter gelegt und die resultierende Ablenkung mithilfe von Bildern der Atomwolke analysiert. Aus diesen Messungen konnten sie einen experimentellen Wert der Chernzahl $\chi_{\text{exp}} = 0.99(5)$ bestimmen. Dieses Ergebnis stellt die erste Chernzahl-Messung in einem nicht-elektronischen System dar. Im Gegensatz zu elektronischen Messungen, die auf Randströmen beruhen, gehen in die Münchner Messung die Eigenschaften des ganzen Quantensystems ein. Diese Messungen stellen einen wichtigen Schritt zur Erzeugung und zum Nachweis topologischer Zustände mit ultrakalten Atomen dar. Darüber hinaus könnten Wechselwirkungen zwischen den Atomen zu neuen spannenden Materiezuständen führen, wie zum Beispiel die fraktionalen Chern-Isolatoren. [N.G. und M.A.] Bildunterschriften: Abb. 1: Klassifizierung geometrischer Objekte und Topologie von Quantenmaterie. a. Die drei dargestellten geometrischen Objekte können durch ihre Topologie, die Anzahl der vorhandenen Löcher g in der Oberfläche, klassifiziert werden. Ein Doughnut ist in diesem Sinne äquivalent zu einer Tasse ($g=1$), jedoch nicht zu einem Ball ($g=0$). b. Schematische Darstellung eines Quantengases in einem zweidimensionalen optischen Gitter: ein herkömmliches Gitter (links) und eines mit externem Magnetfeld (rechts). Die zugehörigen Quantenphasen werden durch unterschiedliche topologische Zahlen charakterisiert, was schematisch mithilfe des Balls bzw. des Doughnuts dargestellt ist. Abb. 2: Schematische Darstellung der Chernzahl-Messung durch Anlegen einer Kraft. a. In einem gewöhnlichen Gitter mit Chernzahl Null werden die Atome nicht abgelenkt. b. Bei einer Chernzahl $\chi = 1$ erfahren die Atome eine Ablenkung senkrecht zur Kraft. Originalveröffentlichung: M. Aidelsburger, M. Lohse, C. Schweizer, M. Atala, J. T. Barreiro, S. Nascimbène, N. R. Cooper, I. Bloch, N. Goldman Measuring the Chern number of Hofstadter bands with ultracold bosonic atoms Nature Physics, 22. Dezember 2014, Advance Online Publication, DOI:10.1038/nphys3171 Kontakt: Prof. Dr. Immanuel Bloch Lehrstuhl für Quantenoptik, LMU München Schellingstr. 4, 80799 München Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik Hans-Kopfermann-Straße 1 85748 Garching b. München Telefon: +49 (0)89 / 32 905 -138 E-Mail: immanuel.bloch@mpq.mpg.de Prof. Dr. Nathan Goldman Collège de France, Laboratoire Kastler Brossel 11, place Marcelin Berthelot 75005 Paris, France, und Center for Nonlinear Phenomena and Complex Systems, Université Libre de Bruxelles, CP 231, Campus Plaine, B-1050 Brussels, Belgium Telefon: +32 2 6505797 E-mail: nathan.goldman@lkb.ens.fr und ngoldman@ulb.ac.be M. Sc. Monika Aidelsburger LMU München, Fakultät für Physik Schellingstr. 4 80799 München Telefon: +49 (0)89 / 2180 -6119 E-Mail: monika.aidelsburger@physik.uni-muenchen.de  width="1" height="1"/>

Pressekontakt

Max-Planck-Institut für Quantenoptik

85748 Garching

immanuel.bloch@mpq.mpg.de

Firmenkontakt

Max-Planck-Institut für Quantenoptik

85748 Garching

immanuel.bloch@mpq.mpg.de

Im Fokus der wissenschaftlichen Aktivitäten des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik steht die Wechselwirkung von Licht und Materie unter extremen Bedingungen. Dabei ist ein Schwerpunkt die hochpräzise Messung der Spektrallinien des Wasserstoffatoms. Hierfür wurde die Frequenzkammtechnik entwickelt, für die Prof. T.W. Hänsch 2005 den Nobelpreis für Physik erhielt. Andere Experimente zielen darauf, einzelne Photonen und einzelne Atome einzufangen und ihre Wechselwirkung miteinander zu kontrollieren und legen damit den Grundstein für zukünftige Quantencomputer. Gleichzeitig entwickeln Theoretiker am MPQ Konzepte, die auf Quantenbits gespeicherten Informationen möglichst effektiv zu übertragen. Mit den dabei entwickelten Algorithmen lassen sich geheime Nachrichten sicher verschlüsseln. Ferner werden am MPQ die bizarren Eigenschaften untersucht, die quantenmechanische Vielteilchensysteme bei extrem tiefen Temperaturen (etwa ein Millionstel Kelvin über dem absoluten Nullpunkt) annehmen können. Und schließlich werden Lichtblitze mit der unvorstellbar kurzen Dauer von einigen hundert Attosekunden (ein Milliardstel von einer Milliardstel Sekunde) erzeugt, die es z. B. ermöglichen, quantenmechanische Prozesse wie das Tunneln von Elektronen oder atomare Übergänge in Echtzeit zu beobachten.