

## Ein neues, simulierbares Modell für exotische Quantenphänomene

**Wissenschaftler am MPQ entwickeln ein neues Modell für das Auftreten  
des Fraktionellen Quanten-Hall-Effekts in Gittersystemen.**

Es ist faszinierend, wie das quantenmechanische Verhalten von Teilchen im Mikrokosmos zu seltsamen Eigenschaften führen kann, die sich sogar in der klassischen Welt bemerkbar machen. Ein Beispiel dafür ist der Fraktionelle Quanten-Hall-Effekt (FQH), der vor rund 30 Jahren an Halbleiter-Bauelementen entdeckt wurde. Er zählt zu den faszinierendsten Phänomenen in der Festkörperphysik und ist hier bereits eingehend untersucht worden. Heutzutage sind Experimentalphysiker in der Lage, Effekte, die in der Festkörperphysik auftreten, mit ultrakalten Atomen in optischen Gittern zu modellieren. Diese Möglichkeiten wecken das Interesse an der Frage, unter welchen Bedingungen der FQH in diesen Systemen beobachtet werden könnte. Die theoretische Physikerin Dr. Anne Nielsen hat jetzt zusammen mit anderen Wissenschaftlern aus der Abteilung Theorie von Prof. Ignacio Cirac am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und der Universidad Autónoma de Madrid ein neues Gittermodell entwickelt, das ein FQH-ähnliches Verhalten zeigen würde (*Nature Communications*, 28. November 2013).

Der klassische Hall-Effekt beschreibt das Verhalten von Elektronen, allgemeiner gesagt von Ladungsträgern, in einem elektrischen Leiter unter dem Einfluss eines Magnetfeldes, das senkrecht zum elektrischen Strom gerichtet ist. Aufgrund der Lorentz-Kraft baut sich eine sogenannte Hall-Spannung auf, die linear mit der Stärke des Magnetfeldes steigt.

1980 untersuchte der deutsche Physiker Klaus von Klitzing die elektronische Struktur von flachen Halbleiter-Transistoren (auch als MOSFETs bezeichnet) bei extrem tiefen Temperaturen und extrem hohen Magnetfeldern. Dabei machte er die verblüffende Beobachtung, dass der Hall-Widerstand mit steigendem Magnetfeld nicht linear, sondern stufenweise anstieg, wobei der Wert jeder Stufe umgekehrt proportional zum Vielfachen einer Kombination aus bestimmten Naturkonstanten war. Einige Jahre später deckten Messungen an Bauteilen aus Galliumarsenid unter ähnlichen Bedingungen zusätzliche Plateaus auf, die Bruchteilen dieses Vielfachen entsprachen. Beide Phänomene sind von fundamentaler Bedeutung, geben sie doch völlig neue Einblicke in die quantenmechanischen Prozesse, die in flachen Halbleiterstrukturen ablaufen, und sie brachten ihren Entdeckern den Nobelpreis: 1985 wurde Klaus von Klitzing mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet, 1998 erhielten die Physiker Robert Laughlin, Horst Störmer and Daniel Tsui diese höchste Auszeichnung in der Wissenschaft.

Der FQH ist ein äußerst spannendes Phänomen. Er wird von Theoretikern damit erklärt, dass einzelne oder mehrere Elektronen mit den magnetischen Flussquanten des Feldes zusammengesetzte Zustände bilden. Genauere experimentelle Untersuchungen dieses Zustandes gestalten sich jedoch schwierig, zumal er sehr empfindlich auf Störungen reagiert. Mit optischen Gittern, in

Presse- und  
Öffentlichkeitsarbeit  
Dr. Olivia Meyer-Streng

Tel.: 089 / 32 905-213  
E-Mail: [olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de](mailto:olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de)

Hans-Kopfermann-Str. 1  
D-85748 Garching

Tel.: 089 / 32 905-0  
Fax: 089 / 32 905-200

denen Atome die Rolle von Elektronen spielen, ließe sich das Phänomen sehr viel sauberer darstellen. Dies, und die Hoffnung auf einfachere und robustere FQH-Systeme ist der Grund dafür, dass Theoretiker weltweit zu verstehen versuchen, welche Mechanismen zu der Entstehung des FQH in Gittersystemen führen.

Das MPQ-Team konzentriert sich dabei auf die topologischen Eigenschaften der FQH-Zustände. Die Topologie eines Objektes repräsentiert bestimmte geometrische Eigenschaften. So sind z.B. eine Teetasse mit einem geschlossenen Henkel und ein Bagel topologisch äquivalent, da sie ineinander überführt werden können ohne Einschnitte oder das Stanzen von Löchern. Ein Fußball und ein Bagel sind dagegen nicht topologisch äquivalent. In ausgedehnten Festkörpersystemen spüren die Elektronen die elektrischen Kräfte vieler periodisch angeordneter Ionen. Gewöhnlich bilden ihre erlaubten Energiezustände gerade und kontinuierliche „Bänder“, deren Topologie trivial ist. In Systemen jedoch, die den FQH aufweisen, verleiht die Topologie dem Material exotische Eigenschaften, z.B. dass der elektrische Strom nur an den Kanten durchgelassen wird und sehr widerstandsfähig gegenüber Störungen ist.

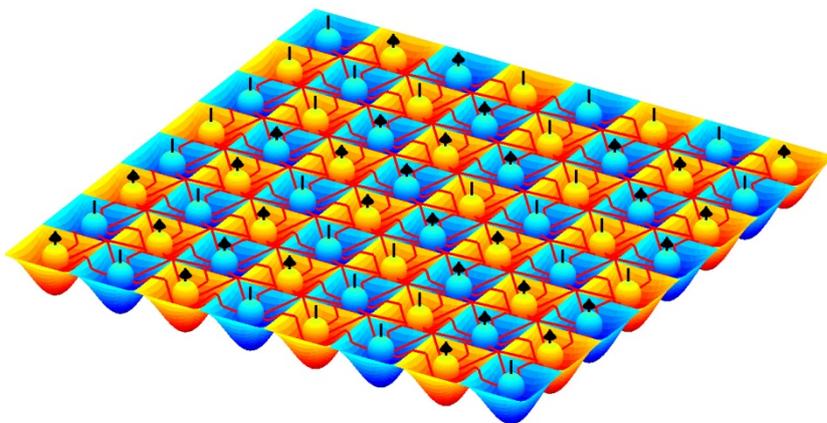


Abbildung 1: Illustration des Gittermodells, in dem sich jedes Teilchen entweder in dem Zustand „Spin aufwärts“ oder „Spin abwärts“ befindet. (Grafik: Anne Nielsen, MPQ)

„Wir haben ein neues Gittermodell entwickelt, an dem der FQH-Zustand beobachtet werden sollte“, sagt Anne Nielsen, die Erstautorin der Veröffentlichung. „Dabei gehen wir von einem zweidimensionalen Gitter aus, an dem jeder Platz mit einem Teilchen besetzt ist. Jedes Teilchen ist durch seinen sogenannten Spin charakterisiert, der entweder nach oben oder nach unten zeigt. Außerdem besteht zwischen den Teilchen eine lokale Wechselwirkung mit kurzer Reichweite.“ (Siehe Abbildung 1.) Numerische Untersuchungen ergaben, dass die Eigenschaften und die Topologie des Systems dem Verhalten entsprechen, das man für einen FQH-Zustand erwartet. So bilden sich Korrelationen über große Entfernungen aus, die zu der Entstehung von zwei verschiedenen Grundzuständen des Systems führen, wenn man periodische Randbedingungen berücksichtigt.

Die hier verwendeten mathematischen Werkzeuge haben ein breites Anwendungsgebiet und öffnen damit die Perspektive für die Entwicklung weiterer interessanter Modelle. „Der Mechanismus, der hier zur Ausbildung des FQH führt, unterscheidet sich offenbar von den Mechanismen früherer Modelle“, erklärt Anne Nielsen. „Außerdem haben wir gezeigt, wie sich das Modell mit ultrakalten Atomen in optischen Gittern im Experiment realisieren ließe. Dadurch ergäben sich einzigartige Möglichkeiten, diese fragilen Zustände unter kontrollierten Bedingungen experimentell zu untersuchen, was einen Meilenstein für Quantensimulationen bedeuten würde.“ *Olivia Meyer-Streng*

#### Originalveröffentlichung:

Anne E. B. Nielsen, Germán Sierra, and J. Ignacio Cirac

**Local models of fractional quantum Hall states in lattices and physical implementation**

*Nature Communications* 10.1038/ncomms3864, 28 November 2013

**Kontakt:****Prof. Dr. J. Ignacio Cirac**

Honorarprofessor, TU München  
Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik  
Telefon: +49 (0)89 / 32 905 -705/736  
Telefax: +49 (0)89 / 32 905 -336  
E-Mail: [ignacio.cirac@mpq.mpg.de](mailto:ignacio.cirac@mpq.mpg.de)

**Dr. Anne Nielsen**

Max-Planck-Institut für Quantenoptik  
Hans-Kopfermann-Str. 1  
85748 Garching b. München  
Telefon: + 49 (0)89 / 32 905 -130  
Telefax: + 49 (0)89 / 32 905 -336  
E-Mail: [anne.nielsen@mpq.mpg.de](mailto:anne.nielsen@mpq.mpg.de)

**Dr. Olivia Meyer-Streng**

Presse-und Öffentlichkeitsarbeit  
Max-Planck-Institut für Quantenoptik  
85748 Garching b. München  
Telefon: +49 (0)89 / 32 905 -213  
E-Mail: [olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de](mailto:olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de)