

Garching, 14.10.11

Presse-Information

## Quantenfluktuationen unter dem Mikroskop

**Forscher am Max-Planck-Institut für Quantenoptik vermögen erstmals Quantenfluktuationen am absoluten Temperaturnullpunkt direkt sichtbar zu machen**

Fluktuationen sind in unserer Alltagswelt grundlegend für zahlreiche physikalische Phänomene, so z.B. für den Phasenübergang von einer Flüssigkeit in ein Gas oder von einem Festkörper in eine Flüssigkeit. Selbst am absoluten Temperaturnullpunkt, an dem jede Bewegung in der klassischen Welt eingefroren ist, treten besondere quantenmechanische Fluktuationen auf, die den Übergang zwischen zwei Phasen verursachen können. Jetzt ist es einem Team um Immanuel Bloch und Stefan Kuhr am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) erstmals gelungen, solche Quantenfluktuationen direkt zu beobachten. Wie die Forscher in der jüngsten Ausgabe von Science (14. Oktober 2011, DOI: 10.1126/science.1209284) berichten, konnten sie die Bildung von quantenkorrelierten Teilchen-Loch-Paaren in einem Gas ultrakalter Atome durch ein hochauflösendes Mikroskop sichtbar machen. Damit war es ihnen sogar möglich, eine vorliegende versteckte Ordnung zu enthüllen und somit verschiedene Phasen des Quantengases neu zu charakterisieren. Unterstützt wurden sie bei dieser Arbeit von Physikern aus der Abteilung Theorie am MPQ sowie Wissenschaftlern der ETH Zürich. Die Messungen eröffnen Möglichkeiten zur Beobachtung ungewöhnlicher neuer Quantenphasen.

Die Wissenschaftler beginnen damit, eine kleine Wolke von Rubidiumatomen auf nur wenige Nanokelvin über dem absoluten Nullpunkt, etwa minus 273 Grad Celsius, abzukühlen. Die Atome werden in einem Lichtfeld gehalten, das die Bewegungsfreiheit der Teilchen entscheidend einschränkt: sie dürfen sich nur noch entlang eindimensionaler, parallel verlaufender Röhren bewegen. Diesen Röhren aus Licht wird schließlich eine stehende Laserwelle überlagert, so dass sich die Atome in einer periodischen Aneinanderreihung heller und dunkler Gebiete befinden, einem eindimensionalen „optischen Gitter“.

Die Atome bewegen sich in den periodischen Lichtfeldern wie Elektronen in einem Festkörperkristall. Und so wie es elektrisch leitende und isolierende Festkörper gibt, können sich auch die Atome im Gitter bei tiefen Temperaturen mal wie eine Supraflüssigkeit und mal wie ein Isolator verhalten. Entscheidend ist dabei vor allem die Tiefe des optischen Gitters. Von ihr und der Abstoßung zwischen den Atomen hängt es ab, ob die Atome auf ihrem Platz fixiert sind oder von Gitterplatz zu Gitterplatz hüpfen können. Wenn das optische Gitter sehr tief ist, sitzt an jedem Platz genau ein Atom. Dieser hoch geordnete Zustand wird „Mott-Isolator“ genannt, nach dem britischen Physiker und Nobelpreisträger Sir Neville F. Mott. Wird die Gittertiefe ein wenig verringert, dann haben die Teilchen genügend Bewegungsenergie, um mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zum benachbarten Gitterplatz hinüber zu „tunneln“. Dadurch entstehen Paare aus leeren und doppelt besetzten Gitterplätzen, sogenannte Teilchen-Loch-Paare. Diese Quantenfluktuationen treten interessanterweise auch am absoluten Temperaturnullpunkt auf, an dem in der klassischen Welt jede Bewegung eingefroren

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit,  
Dr. Olivia Meyer-Streng

Tel.: +49(0)8932 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.: +49(0)8932 905-0  
Fax: +49(0)8932 905-200

ist. Die Position der quantenkorrelierten Teilchen-Loch-Paare ist im Kristallgitter völlig unbestimmt und wird erst durch die Beobachtung der Atome festgelegt.

Bereits in früheren Experimenten hatten die Wissenschaftler unter Leitung von Stefan Kuhr und Immanuel Bloch Verfahren entwickelt, mit denen sie einzelne Atome auf einzelnen Gitterplätzen sichtbar machen können: Die Laserstrahlen, die das Quantengas kühlen, regen die Atome gleichzeitig zum Leuchten an. Ein eigens entwickeltes Mikroskop bildet die fluoreszierenden Atome Gitterplatz für Gitterplatz ab. Dabei erscheinen Löcher naturgemäß dunkel, doppelt besetzte Plätze aber auch, da die beiden Teilchen heftig miteinander zusammenstoßen und dabei aus dem Gitter herausfliegen. Teilchen-Loch-Paare werden deshalb in den Mikroskopaufnahmen direkt als zwei dicht nebeneinander auftretende Dunkelstellen abgebildet. Das benachbarte Auftreten der Fluktuationen können die Physiker durch eine sogenannte Korrelationsfunktion quantitativ erfassen. „Mit dieser Technik können wir ein fundamentales Quantenphänomen erstmals direkt beobachten!“, begeistert sich Doktorand Manuel Endres.

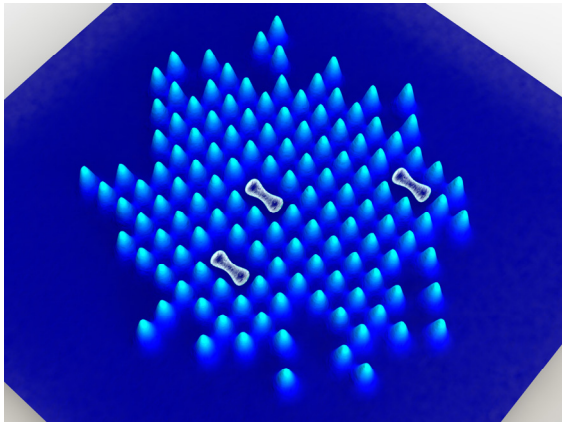


Abb. 1: Schematische Darstellung der Atomverteilung im optischen Gitter. Die Quantenfluktuationen (weiß) sind im Bild als benachbarte Dunkelstellen zu erkennen. (Bildmaterial online unter: [www.quantum-munich.de/media/](http://www.quantum-munich.de/media/).)

Mit zunehmender Bewegungsenergie tunneln immer mehr Teilchen auf benachbarte Plätze und die Paar-Korrelationen nehmen zu. Wenn aber die Zahl der Teilchen-Loch-Paare sehr groß wird, lassen sich Löcher und doppelt besetzte Plätze nicht mehr eindeutig zuordnen. Deshalb nehmen die Korrelationen bei hoher Bewegungsenergie der Atome wieder ab. Schließlich geht die geordnete Struktur des Mott-Isolators ganz verloren und das Quantengas bildet eine Supraflüssigkeit. In dieser Phase treten Fluktuationen von Löchern und Teilchen völlig unabhängig voneinander auf. Der im Experiment beobachtete Verlauf der Quantenkorrelationen wird hervorragend durch Simulationsrechnungen wiedergegeben, die Mitarbeiter der Abteilung Theorie am MPQ und an der ETH Zürich durchführten. Interessanterweise zeigten entsprechende Messungen an zweidimensionalen Quantengasen, dass Quantenfluktuationen hier eine weit geringere Rolle spielen als in eindimensionalen Systemen.

Die Wissenschaftler beschränken sich aber nicht auf die Analyse von Korrelationen zweier benachbarter Gitterplätze. Vielmehr untersuchen sie auch Korrelationen zwischen mehreren Gitterplätzen entlang einer Kette. Solche nicht-lokalen Quantenkorrelationen enthalten wichtige Informationen über das zugrundeliegende Vielteilchensystem und lassen sich als Ordnungsparameter für die Charakterisierung verschiedener Quantenphasen nutzen. In der vorliegenden Arbeit wurden solche nicht-lokalen, versteckten Ordnungsparameter erstmals experimentell gemessen. Diese Methode in Zukunft für die Detektion sogenannter topologischer Quantenphasen anzuwenden ist nun ein wesentliches Ziel der Wissenschaftler. Solche topologischen Phasen können die Grundlage robuster Quantenrechner bilden und könnten helfen, Supraleitung bei hohen Temperaturen zu verstehen. *Olivia Meyer-Streng*

#### **Originalveröffentlichung:**

M. Endres, M. Cheneau, T. Fukuhara, C. Weitenberg, P. Schauß, C. Groß, L. Mazza, M.C. Banuls, L. Pollet, I. Bloch, and S. Kuhr

#### **Observation of Correlated Particle-Hole Pairs and String Order in Low-Dimensional Mott Insulators**

*Science*, 14. Oktober 2011, DOI: 10.1126/science.1209284

**Kontakt:****Prof. Dr. Immanuel Bloch**

Lehrstuhl für Quantenoptik, LMU München  
Schellingstr. 4, 80799 München, und  
Max-Planck-Institut für Quantenoptik  
Hans-Kopfermann-Straße 1  
85748 Garching b. München  
Tel.: +49 89 32905 138  
E-Mail: immanuel.bloch@mpq.mpg.de

**Prof. Dr. Stefan Kuhr**

University of Strathclyde  
Department of Physics  
107 Rottenrow East  
Glasgow G4 0NG, U.K.  
Tel.: +44 141-548-3364  
E-Mail: stefan.kuhr@strath.ac.uk

**Manuel Endres**

Max-Planck-Institut für Quantenoptik  
Hans-Kopfermann-Straße 1  
85748 Garching b. München  
Tel.: +49 89 32905 214  
E-Mail: manuel.endres@mpq.mpg.de