

Garching, 03.10.2010

Presse-Information

## Quantensimulator trifft Supercomputer

**MPQ-LMU-Wissenschaftler ermitteln erstmals das Phasendiagramm eines atomaren Vielteilchensystems für endliche Temperaturen.**

Phasenübergänge sind ein alltägliches Phänomen: ein und derselbe Stoff kann, je nach Temperatur, fest, flüssig oder gasförmig sein. Die Frage, warum und unter welchen Bedingungen Materie von einer Phase in eine andere übergeht, ist seit langem Gegenstand der theoretischen und experimentellen Physik. Die Möglichkeit, mit Hilfe von kalten Atomen in optischen Gittern näherungsweise perfekte komplexe Vielteilchensysteme nach Belieben zu entwerfen, nährt die Hoffnung der Wissenschaftler, bislang offene Fragen der Festkörperphysik zu beantworten. Ein Team von Wissenschaftlern um Prof. Immanuel Bloch (Lehrstuhl für Experimentalphysik an der Ludwig-Maximilians-Universität München und Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik) hat nun in Zusammenarbeit mit Physikern aus der Schweiz, Frankreich, den Vereinigten Staaten und Russland das vollständige Phasendiagramm eines Systems aus vielen Quantenteilchen bestimmt (Nature Physics, AOP, 3.10.2010, DOI:10.1038/NPHYS1799). Der Vergleich mit den Ergebnissen numerischer „Monte-Carlo“-Rechnungen, die auf einem Supercomputer durchgeführt wurden, erhärtet die Aussagekraft der experimentellen Ergebnisse. Dies bestätigt, dass sich die hier erprobte Methode prinzipiell für Quantensimulationen eignet, die über die Möglichkeiten von numerischen Verfahren und aktuell verfügbaren Supercomputern hinausgehen.

In den hier beschriebenen Experimenten wurde eine Wolke aus rund 300 000 „bosonischen“ Rubidium-Atomen auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt, annähernd minus 273 Grad Celsius. Bei so tiefen Temperaturen neigen die Atome dazu, sich alle exakt gleich zu verhalten; sie bilden dann ein sogenanntes Bose-Einstein-Kondensat (BEC), den kältesten Zustand, der auf der Erde möglich ist. Sobald dieser Zustand erreicht ist, werden die Atome ein wenig „geschüttelt“ und dadurch geringfügig erwärmt. Mit diesem Verfahren lässt sich die Temperatur der Atome auf ein Hundertstel des millionsten Teils eines Grades genau einstellen. Anschließend wird das immer noch sehr kalte Gas in ein dreidimensionales „optisches Gitter“ geladen. Dieses entsteht durch die Überlagerung von drei zueinander senkrechten stehenden Laserlichtwellen. Sie formen dann einen „Kristall“ aus Licht, in dem die Atome gefangen sind. Ähnlich wie die Elektronen in einem richtigen Festkörperkristall können sich die Atome innerhalb dieses Gitters bewegen, und ähnlich wie diese üben sie aufeinander eine abstoßende Wechselwirkung aus. Aufgrund dieser Analogie lassen sich an solchen gezielt steuerbaren und annähernd defektfreien Quantensystemen viele Phänomene untersuchen, die in ausgedehnten Festkörpern auftreten.

In dem optischen Gitter können die Atome nach dem sogenannten Bose-Hubbard-Modell in Abhängigkeit von ihrer Temperatur, ihrer Beweglichkeit und der Stärke der abstoßenden Wechselwirkung drei verschiedene Phasen annehmen. Ist die Abstoßung stark gegenüber der Beweglichkeit, bildet sich am abso-

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

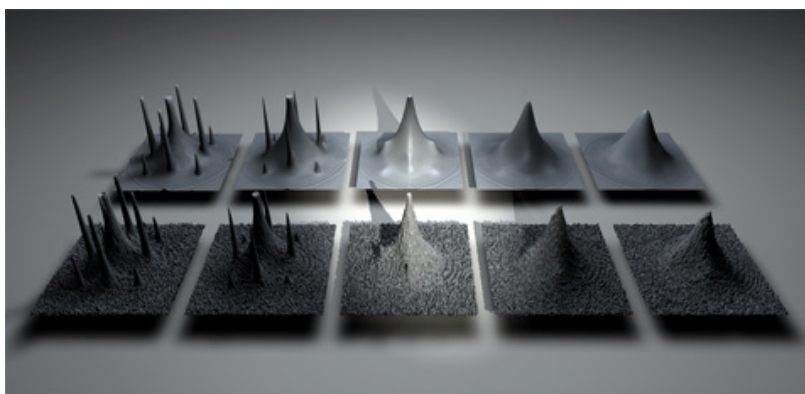
Tel.: +49(0)8932 905-0  
Fax: +49(0)8932 905-200

luten Nullpunkt der Zustand eines „Mott-Isolators“, in dem die Atome an ihren Gitterplätzen fixiert sind. Nimmt die Beweglichkeit zu, wird ein Quantenphasenübergang zu einem suprafluiden Zustand überschritten, in dem die Wellenfunktionen der Atome über das gesamte Gitter ausgedehnt sind. Dieser Zustand existiert bis hin zu einer Schwellentemperatur, oberhalb derer sich ein normales thermisches Gas bildet. Diese hängt von dem Verhältnis zwischen der atomaren Beweglichkeit und der Stärke der Abstoßung ab. Sie erreicht den absoluten Nullpunkt am Quantenphasenübergang zwischen dem superfluiden Zustand und dem Mott-Isolator.

Um herauszufinden, welchen der drei Zustände das System gerade einnimmt, werden die im optischen Gitter gefangenen Atome am Ende des Experiments „freigelassen“. Gemäß den Gesetzen der Quantenmechanik breitet sich nun von jedem Gitterplatz eine Materiewelle aus, ähnlich wie elektromagnetische Wellen, die von gitterartig angeordneten Lichtquellen kommen. Da Materiewellen im Prinzip genauso wie elektromagnetische Wellen interferieren, gibt das resultierende Interferenzmuster, d.h. die Dichteverteilung der Atome, deren ursprüngliche Kohärenzeigenschaften wieder.

In einem gewöhnlichen thermischen Gas weisen die Materiewellen nur eine geringe Kohärenz auf, und nach der Freilassung der Atome treten praktisch keine Interferenzmuster auf. Im suprafluiden Zustand dagegen sind die Materiewellen über große Entfernungen phasenkohärent, was sich in deutlich ausgeprägten Beugungsmaxima in der Dichteverteilung der Atome niederschlägt. Indem die Wissenschaftler die Schwellentemperatur, bei der sich die klaren Konturen des Interferenzmusters ausbilden, in Abhängigkeit von dem Verhältnis von Beweglichkeit zur Wechselwirkungsstärke der Atome bestimmten, waren sie erstmals in der Lage, ein vollständiges Phasendiagramm des kalten Quantengases zu ermitteln.

Angesichts der hohen Teilchenzahlen und der Größe des künstlichen Kristalls stellt es eine große Herausforderung dar, die Physik solcher Systeme auf klassischen Computern zu simulieren. Erst vor kurzem wurden an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich auf dem Cluster-Rechner „Brutus“ Quanten-Monte-Carlo-Verfahren entwickelt, welche die direkte Simulation der Systeme auf bis zu zehn Milliarden Gitterplätzen ohne zu starke Vereinfachungen erlauben. Diese Modellrechnungen bestätigen den experimentell ermittelten Verlauf des Phasendiagramms. „Während die numerischen Rechnungen jedoch mehrere Tage bis Wochen dauern können, werden die entsprechenden Experimente in ein bis zwei Stunden durchgeführt“, erklärt Stefan Trotzky, Doktorand am Experiment. „Dieser Zeitunterschied verdeutlicht, welchen Wert die experimentellen Quantensimulationen für uns haben. Wir hoffen, damit die Physik von weit komplexeren Quantensystemen beschreiben zu können, bei denen numerische Methoden an ihre Grenzen stoßen.“ [ST/OM]



**Interferenzmuster einer Materiewelle in einem Gitter beim Übergang in die BEC-Phase.** Die Abbildung zeigt die gemessenen (vordere Reihe) und simulierten Dichteverteilungen (hintere Reihe) für verschiedene Temperaturen des atomaren Gases – ansteigend von links nach rechts. Der Phasenübergang zwischen dem superfluiden Zustand und dem des normalen Gases ist gekennzeichnet durch das Verschwinden der ausgeprägten Beugungsmaxima in der Bildmitte.

**Originalveröffentlichung:**

Stefan Trotzky, Lode Pollet, Fabrice Gerbier, Ute Schnorrberger, Immanuel Bloch, Nikolay V. Prokof'ev, Boris Svistunov and Matthias Troyer  
„Suppression of the critical temperature for superfluidity near the Mott transition”  
*Nature Physics, Advance Online Publication, DOI: 10.1038/NPHYS1799*

**Kontakt:**

<http://www.quantum-munich.de>

**Dipl.-Phys. Stefan Trotzky**

LMU München, Fakultät für Physik  
Schellingstr. 4  
80799 München  
Tel.: +49 89 2180 6133  
Fax: +49 89 2180 63851  
E-Mail: [stefan.trotzky@lmu.de](mailto:stefan.trotzky@lmu.de)

**Prof. Dr. Immanuel Bloch**

Lehrstuhl für Experimentalphysik,  
LMU München, und  
Direktor am Max-Planck-Institut  
für Quantenoptik  
Hans-Kopfermann-Straße 1  
5748 Garching b. München  
Tel.: +49 89 32905 138  
Fax: +49 89 32905 313  
E-Mail: [immanuel.bloch@mpq.mpg.de](mailto:immanuel.bloch@mpq.mpg.de)