

gehend von Protonen, Neutronen und den zwischen ihnen wirkenden Zwei- und Dreiteilchenkräften sehr genau berechnen lassen [5]. Inzwischen ist dieses Programm unter anderem auf Reaktionen leichter Kerne, mittelschwere Atomkerne und exotische Zustände in kurzlebigen Isotopen ausgedehnt worden. *Ab initio*-Rechnungen tragen somit wesentlich zu unserem Verständnis der Kernkräfte bei und bilden die unterste Sprosse auf der Leiter zu einer systematischen und modellunabhängigen Theorie der Atomkerne [6].

Eine robuste und genaue Theorie ist besonders wichtig zum Verständnis kurzlebiger und exotischer Isotope. Diese Atomkerne zeichnen

sich durch ein ungewöhnliches Verhältnis von Protonen- und Neutronenzahl aus, und in ihnen kommen Aspekte der starken Wechselwirkung zum Vorschein, die uns aus stabilen Kernen nur wenig bekannt sind. Ein qualitativ und quantitativ verbessertes Verständnis der Atomkerne ist notwendig, um fundamentale Fragen zu beantworten: Wie viele Neutronen kann ein Isotop höchstens besitzen? (Grenzen der nuklearen Bindung), Wie sind die Elemente zwischen Eisen und Uran entstanden? (Ursprung der auf der Erde vorhandenen chemischen Elemente), Was ist das Ende massereicher Sterne? Die existierenden und zukünftigen Anlagen zur experimentellen Erforschung

der Struktur exotischer Kerne in Europa, Japan, Kanada und den Vereinigten Staaten tragen – im Zusammenspiel mit der Theorie – zur Beantwortung dieser Fragen Wesentliches bei.

Thomas Papenbrock

Prof. Dr. Thomas Papenbrock, Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, and Physics Division, Oak Ridge National Laboratory, USA

- [1] F. Hoyle, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **1**, 121 (1954)
- [2] D. N. F. Dunbar, R. E. Pixley, W. A. Wenzel und W. Whaling, *Phys. Rev.* **92**, 649 (1953)
- [3] C. W. Cook, W. A. Fowler, C. C. Lauritsen und T. Lauritsen, *Phys. Rev.* **107**, 508 (1957)
- [4] E. Epelbaum, H. Krebs, D. Lee und U.-G. Meißner, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 192501 (2011)
- [5] S. C. Pieper und R. B. Wiringa, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **51**, 53 (2001)
- [6] G. F. Bertsch, D. J. Dean und W. Nazarewicz, *SciDAC Review* **6**, 48 (2007)

## ■ Simulierter Übergang

Erstmals ließ sich ein Quanten-Spin-System mit atomarer Auflösung in einem System ultrakalter Atome simulieren.

Die Rechenkapazität konventioneller Computer verhindert ein tieferes Verständnis der Quantendynamik durch numerische Simulationen. So gelang es zwar kürzlich mit einem der zehn leistungstärksten Supercomputer (JUGENE in Jülich), ein Quantensystem mit 42 Quanten-Bits, äquivalent zu 42 Spin-1/2-Teilchen, zu simulieren. Das Hinzufügen jedes weiteren Teilchens würde die ohnehin beeindruckende erforderliche Rechenleistung aber verdoppeln. 1982 schlug Richard Feynman als Ausweg aus diesem Dilemma vor, ein zweites, präzise kontrollierbares Quantensystem zu nutzen, um damit das interessierende System zu simulieren und zu untersuchen. Das Ziel solcher Quantensimulationen ist es nicht, das zu untersuchende System vollständig abzubilden. Vielmehr soll untersucht werden, ob sich bestimmte beobachtbare Phänomene bereits mit vereinfachten Modellen erklären lassen. Damit hofft man, ein tiefer gehendes Verständnis für die wichtigen Zusammenhänge zu gewinnen.

Um sich als Quantensimulator zu eignen, muss ein System drei

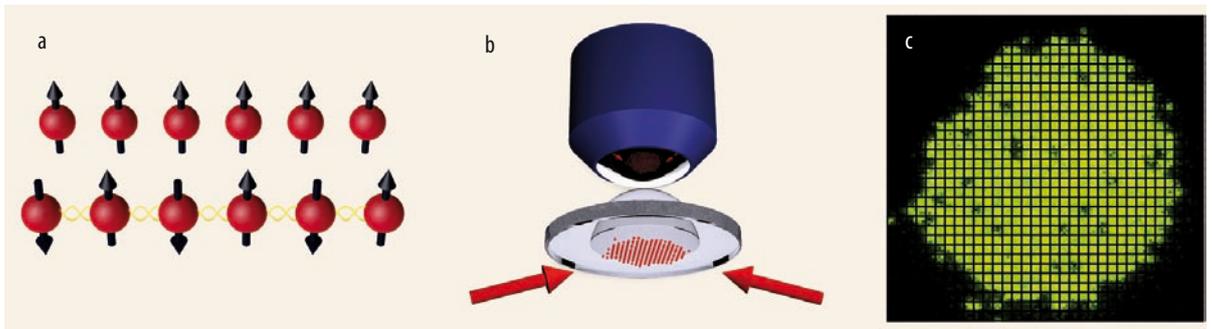
Anforderungen erfüllen:

- Sein Anfangszustand muss sich exakt einstellen lassen.
- Die relevanten Parameter müssen präzise manipulierbar sein.
- Die wichtigen Charakteristika des Endzustands müssen sich effizient analysieren lassen.

Für die Simulation von Quanten-Spin-Systemen bieten sich insbesondere Ionen in Paul-Fallen [1], Josephson-Kontakte [2] oder ultrakalte Atome in optischen Gittern an. Mit letzteren gelang es nun der Gruppe von Markus Greiner an der Harvard Universität, das sog. Quanten-Ising-Modell in einer Dimension mit atomarer Auflösung zu simulieren [3]. Das Modell beschreibt eine Kette von Spin-1/2-Teilchen, die der Wechselwirkung mit einem transversalen Magnetfeld  $B$  sowie der Spin-Spin-Wechselwirkung  $J$  mit ihren Nachbarn unterliegen. Bei einer sehr großen Anzahl von Spins (thermodynamischer Grenzfall) tritt beim Durchstimmen des Ordnungsparameters  $J/B$  ein Quantenphasenübergang zwischen der para- und der ferromagnetischen Ordnung auf. Die Forscher beobachteten diesen Übergang an

sechs Atomen (Abb. 1). Für die Analyse des Zustands haben sie, und unabhängig davon eine Gruppe am MPI für Quantenoptik, ein Mikroskop entwickelt, mit dem sich die optischen Kristalle mit atomarer Auflösung untersuchen [4] und individuell adressieren lassen [5].

Um das System zu initialisieren, erzeugen die Wissenschaftler aus Harvard ein zweidimensionales optisches Gitter, in dem jeder Gitterplatz genau mit einem Atom besetzt ist. Hierfür generieren sie zunächst ein Bose-Einstein-Kondensat aus Rubidium-87-Atomen [6] und laden das Quantengas anschließend in das optische Gitter um. In diesem superfluiden Zustand ist jedes Atom über das gesamte Gitter delokalisiert. Die Intensität der Laserstrahlen, die das optische Gitter formen, ist so gewählt, dass die Atome lediglich entlang einer Dimension tunneln können. Wird der Einschluss entlang dieser Dimension erhöht und damit das Tunneln sukzessive unterbunden, entwickelt sich das System zu einem Mott-Isolator [6]. Bei diesem ist jeder Gitterplatz genau einmal besetzt, da das System so die zu-



**Abb. 1** Eine eindimensionale Kette aus sechs Atomen (rote Kugeln) simuliert das sog. Quanten-Ising-Modell (a). Die Spins gehen dabei von der paramagnetischen (oben) in die antiferromagne-

tische Ordnung (unten) über. Das Mikroskop bildet die einzelnen Atome im optischen Gitter ab (b). Im Fluoreszenzbild lässt sich zwischen gerader (dunkel) und ungerader Atomzahl (hell) auf den Git-

terplätzen unterscheiden (c). Die schwarzen Linien zeigen das Gitter. Eine grüne Fläche entspricht einem einzelnen Atom.

sätzliche Wechselwirkungsenergie zwischen zwei Atomen auf einem gemeinsamen Gitterplatz einsparen kann. Um damit Spin-Systeme zu simulieren, assoziieren die Wissenschaftler zwei Positionen des Atoms im Gitter mit dem Zwei-Niveau-System des Spin-1/2-Teilchens. Ein Atom an seinem ursprünglichen Gitterplatz kodiert „Spin-up“, das identische Atom am benachbarten Gitterplatz „Spin-down“ (Abb. 2a). In dieser Betrachtungsweise repräsentiert der erzeugte Mott-Isolator den paramagnetischen Grundzustand des Systems.

Im nächsten Schritt überlagern die Wissenschaftler dem optischen Gitter ein variables magnetisches Feld mit einem Gradienten entlang der Kette von Atomen. Mithilfe des Gradienten lässt sich die Energiedifferenz zwischen benachbarten Gitterplätzen präzise manipulieren (Abb. 2b, c). Entspricht diese der abstoßenden Wechselwirkungsener-

gie zweier Atome am identischen Gitterplatz, kann ein Atom zum nächst tieferen Gitterplatz tunneln, ohne seine Energie zu ändern. Allerdings ist dies nur erlaubt, wenn der benachbarte Gitterplatz besetzt ist. Wird die Neigung des Gitterpotentials adiabatisch erhöht, geht die zunächst gleichmäßige Besetzung (paramagnetische Ordnung) in eine mit zwei Atomen auf jedem zweiten Gitterplatz (antiferromagnetische Ordnung) über (Abb. 2d).

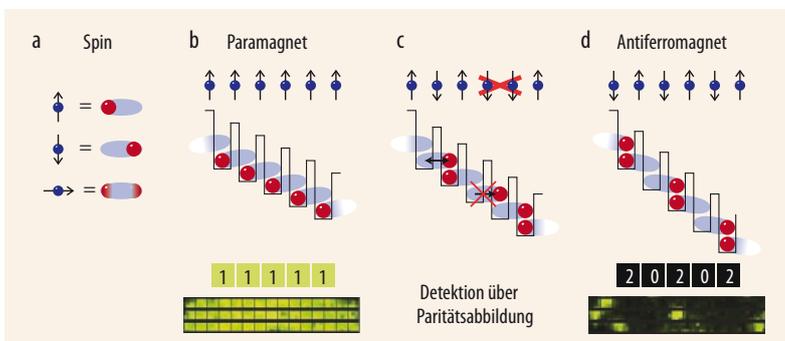
Die große Herausforderung für dieses wie für andere Systeme besteht darin, die Zahl der zu simulierenden Teilchen bei ausreichender Präzision der erforderlichen Operationen zu vergrößern. Ein Ausbau der Quantensimulatoren auf zweidimensionale Arrays, der bei optischen Gittern Erfolg verspricht (Abb. 1c), ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Die Resultate lassen sich noch mit klassischen Computern nu-

merisch simulieren und daher auch gut überprüfen. Im Rahmen der Messgenauigkeit stimmen die Ergebnisse exzellent überein. Die von der Gruppe um Markus Greiner eingesetzten Methoden sollten es zudem erlauben, nahezu beliebige Gitteranordnungen zu erzeugen. Antiferromagnetische Wechselwirkung in Dreiecksgittern mit der beobachteten hohen Ordnung würde die Untersuchung von Spin-Frustration, die für Effekte wie Hochtemperatur-Supraleitung verantwortlich sein könnte, sowie Spin-Flüssigkeiten ermöglichen.

Offen bleibt aber, wie sich Ergebnisse von Quantensimulationen überprüfen lassen, wenn klassische Computer bereits in naher Zukunft keine Vorhersagen mehr treffen können. Dann wird es hilfreich sein, die Ergebnisse mehrerer Quantensimulatoren, die auf unterschiedlichen Systemen und Methodiken beruhen, miteinander zu vergleichen, um systematische Fehler aufzudecken.

**Magnus Albert, Martin Enderlein, Thomas Huber, Christian Schneider und Tobias Schätz**



**Abb. 2** Ein Atom auf dem linken (rechten) Gitterplatz simuliert „Spin-up“ („Spin-down“, a). Im paramagnetischen Zustand ist jeder Gitterplatz zunächst einfach besetzt (b), wie Fluoreszenzaufnahmen bestätigen (unten). Ist das Potential ausreichend gekippt, können die

Atome resonant auf Nachbarplätze tunneln (c). Bei weiterer Neigung des Potentials wird jeder zweite Gitterplatz doppelt besetzt (d), und das System geht in die antiferromagnetische Ordnung über. Die Fluoreszenzbilder zeigen doppelte bzw. keine (schwarze) Besetzung.

- [1] D. Porras und I. Cirac, Phys. Rev. Lett. **92**, 207901 (2004); A. Friedenauer et al. Nature Physics **4**, 757 (2008) und R. Islam et al., arXiv 1103.2400 (2011)
- [2] M. W. Johnson et al. Nature **473**, 194 (2011)
- [3] J. Simon et al., Nature **472**, 307 (2011)
- [4] W. S. Bakr et al., Nature **462**, 74 (2009) und J. Sherson et al., Nature **467**, 68 (2010)
- [5] C. Weitenberg et al., Nature **471**, 319 (2011)
- [6] D. Jaksch et al, Phys. Rev. Lett. **81**, 3108 (1998) und M. Greiner et al., Nature **415**, 39 (2002)

Dr. Magnus Albert, M. Sc. Martin Enderlein, Dipl.-Phys. Thomas Huber, M. Sc. Christian Schneider und Dr. Tobias Schätz, MPI für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching und Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Physikalisches Institut, Hermann-Herder-Str. 3a, 79104 Freiburg