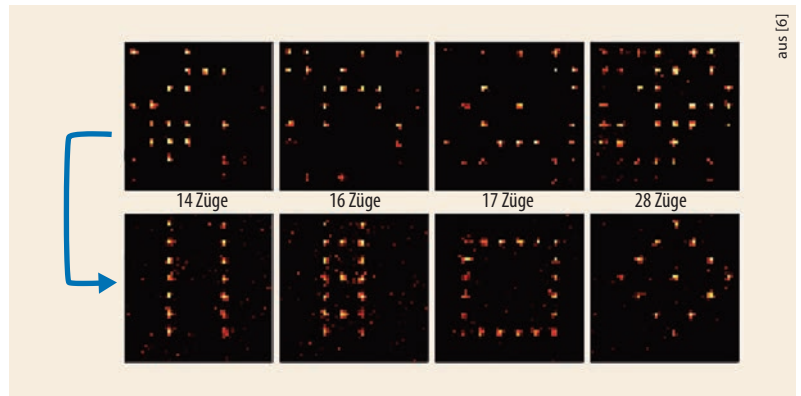


## Rydbergs Baukasten für die Quantensimulation

Experimente mit riesigen Rydberg-Atomen erlauben die präzise Kontrolle der dipolaren Wechselwirkung über mesoskopische Distanzen.

Aufgrund ihrer extremen Eigenschaften faszinieren elektronisch hochangeregte Atome, sog. Rydberg-Atome, die Physiker seit mehr als einem Jahrhundert. So erstreckt sich ihre elektronische Wellenfunktion bis in den Mikrometerbereich, während die Umlaufperiode des Elektrons um viele Größenordnungen länger als die eines Elektrons im Grundzustand ist. Zudem sind Rydberg-Atome durch äußere elektrische Felder sehr leicht polarisierbar, da das Coulomb-Feld des Kerns bei derart großen Abständen nur einen geringen Einfluss auf das Elektron hat. Daraus resultiert eine extreme dipolare Wechselwirkung zwischen Rydberg-Atomen. Selbst bei mesoskopischen Abständen von vielen Mikrometern, bei denen die van der Waals-Kräfte zwischen Atomen und Molekülen im elektronischen Grundzustand völlig vernachlässigbar sind, entfalten Rydberg-Atome enorme Wechselwirkungen (Abb. 1).

Da sich die interatomare Wechselwirkung präzise kontrollieren lässt, bieten sich Rydberg-Atome zur Realisierung eines Quantensimulators an [1, 2]. Der Vision Feynmans folgend könnte es für die Simulation eines komplexen



Beliebige zweidimensionale Arrays einzelner Atome (untere Zeile) entstehen

aus den ursprünglichen zufälligen Konfigurationen (oben).

quantenmechanischen Vielteilchenproblems, wie es in Modellen des Magnetismus vorkommt, günstig sein, den Computer aus Elementen aufzubauen, die quantenmechanischen Gesetzen folgen. Eine mögliche Anwendung ist das nach Ernst Ising benannte Modell des Ferromagnetismus, in dem atomare Spins, die auf einem Gitter oder einem beliebigen Muster angeordnet sind, mit einem äußeren Feld sowie über eine dipolare Kopplung miteinander wechselwirken [3].

Es bedurfte vieler Jahre experimenteller Anstrengungen, um die ausgefeilten modernen Methoden der atomaren Quantenkontrolle auf so fragile Objekte wie Rydberg-Atome anzuwenden und sie als Quantensimulatoren nutzbar zu machen. Beispielsweise ist die Bindungsenergie der Rydberg-Elektronen so gering, dass kleinste äußere Felder oder die Kollision mit einem anderen Rydberg-Atom zur Ionisation führen. Durch jüngste Arbeiten der Gruppe um Antoine Browaeys am Institut d'Optique in Palaiseau bei Paris hat die Kontrolle eines wechselwirkenden Vielteilchensystems aus Rydberg-Atomen eine neue Dimension erreicht [4, 5]. In ihrer bahnbrechenden Arbeit zur Quantensimulation eines Ising-Modells speichern die Physiker einzelne Rubidium-Atome in mikroskopischen optischen Dipolfallen, welche die Lokalisierung

der Atome auf wenige Hundert Nanometer erlauben [4]. Diese Dipolfallen lassen sich mittels eines räumlichen Lichtmodulators in nahezu beliebige zweidimensionale Muster anordnen, in denen der Abstand benachbarter Atome nur einige Mikrometer beträgt (Abb. 2). Mittels einer ausgefeilten Präparations- und Detektionsmethode, die auf dem Nachweis der Fluoreszenz der gespeicherten Atome basiert, wird zunächst die Anordnung der Atome bestimmt. In dieser Arbeit war es nämlich noch reiner Zufall, ob ein einzelnes Atom tatsächlich in eine der Mikrofallen geladen wurde. In zwei neueren Artikeln stellen die Pariser Gruppe [6] und eine Kollaboration aus Gruppen in Harvard und am MIT [7] Ansätze vor, wie beliebige ein- und zweidimensionale Anordnungen mit exakt einem Atom auf jedem Gitterplatz defektfrei zu realisieren sind. Der Clou besteht darin, die zuvor gewonnene Information über die zufällige Anordnung zu nutzen, um die Atome durch räumliche Manipulation der Dipolfallen umzusortieren (Abb. oben).

Resonante Laserfelder erlauben es, den atomaren elektronischen Grundzustand mit einem Rydberg-Zustand kohärent zu koppeln, was der Wechselwirkung mit dem äußeren Feld im Ising-Modell entspricht. Zugleich wirken Dipolkräfte zwischen den Rydberg-

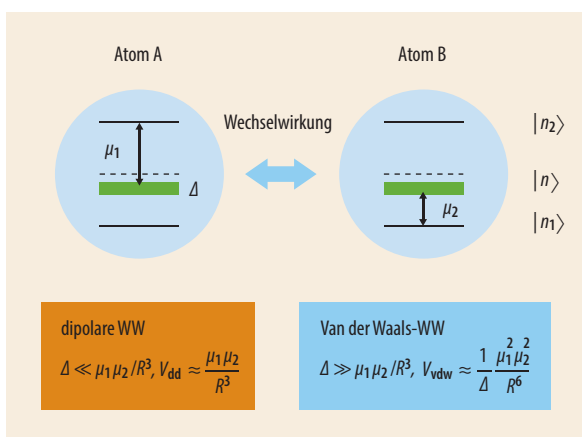


Abb. 1 Zwei Rydberg-Atome A und B im elektronischen Zustand  $|n\rangle$ , die sich im Abstand  $R$  befinden, wechselwirken miteinander. Die elektrischen Dipolmatrixelemente dieses Zustands mit anderen Zuständen  $|n_1\rangle$  und  $|n_2\rangle$  sind mit  $\mu_i$  bezeichnet. Durch Abstimmung des Energieunterschieds  $\Delta$  zwischen den Paarzuständen  $|n, n_1\rangle$  und  $|n, n_2\rangle$  lassen sich Stärke und Abstandsskalierung der Wechselwirkung beeinflussen.

Atomen, sodass alle Zutaten für eine Quantensimulation im Feynmanschen Sinne bereitstehen. Als Observable dient die räumliche Paar-Korrelationsfunktion der angeregten Atome. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, ein Atom im Rydberg-Zustand vorzufinden, falls sich in einer anderen Mikrofalle mit gegebenem räumlichen Abstand bereits ein angeregtes Atom befindet. Bei einem einzelnen Paar aus Rydberg-Atomen führt die gegenseitige Wechselwirkung zu einer Energieverschiebung der Rydberg-Zustände, infolge derer das Laserlicht nicht mehr resonant mit dem Übergang zwischen Grund- und Rydberg-Zustand ist. Nur eines der Atome wird dann in den Rydberg-Zustand angeregt (Rydberg-Blockade [8, 9]). Dieser Effekt tritt nur auf, wenn die beiden Atome sich innerhalb des Blockade-Radius befinden. Daher verschwindet die Korrelationsfunktion für zwei Rydberg-Atome innerhalb dieses Radius.

Interessant ist nun die Messung der Korrelationsfunktion des Ising-Modells für Konfigurationen, bei denen sich die Rydberg-Blockade über einen endlichen Bereich des atomaren Ensembles erstreckt. Dann ist das Ising-Modell notwendig, um die Korrelationsfunktion zu beschreiben. Dazu realisieren Browaeys und Mitarbeiter zwei unterschiedliche Anordnungen der Atome (eindimensionale kreisförmige Gitter mit periodischen Randbedingungen und zweidimen-

sionale regelmäßige Gitter) und vergleichen die gemessenen Korrelationsfunktionen mit numerischen Simulationen des Ising-Modells (Abb. 2). Abweichungen treten durch die komplexe atomare Struktur der Rydberg-Atome auf, die zu Korrekturen in der effektiven Wechselwirkungsstärke führt.

In den vergangenen Monaten hat sich ein rasanter Wettlauf um den Titel des „weltbesten Systems für einen Quantensimulator“ entwickelt. Rydberg-Atome liegen gut im Rennen. Der Palaiseau-Gruppe ist es kürzlich gelungen, die Wechselwirkung der Rydberg-Atome nahezu nach Belieben mit hoher räumlicher Auflösung lokal durch Lichtfelder zu kontrollieren [5]. Kernidee ist dabei die selektive Energieverschiebung der Rydberg-Zustände durch den Stark-Effekt in optischen Feldern, die sich direkt auf die Stärke der Wechselwirkung auswirkt (Abb. 1). Wissenschaftler aus Okazaki konnten zusammen mit Physikern aus Straßburg und Heidelberg zeigen, dass sich die kollektiven Effekte des Ising-Hamilton-Operators aufgrund der starken Rydberg-Wechselwirkung bereits auf Zeitskalen im Sub-Nanosekundenbereich zeigen [10]. Eine Gruppe am MPI für Quantenoptik untersuchte kürzlich gemeinsam mit Theoretikern die kohärente Vielteilchen-Quantendynamik einer auf Rydberg-Atomen basierenden Ising-Spinkette und gewann Aufschlüsse über die Rolle von Paar-

Korrelationen auf die Dynamik der globalen Magnetisierung [11]. In ihrer neuesten Arbeit demonstrierte die MIT/Harvard-Kollaboration in fast perfekt kontrollierter Manier Ising-artige Vielteilchendynamik mit Rydberg-Atomen und stellt sich mit dem provokanten Titel ihres Artikels in direkte Konkurrenz zu Googles Ambitionen, einen Quantencomputer zu realisieren [12].

Es stellt sich die fundamentale Frage, ab welcher Größe und ab welchem Grad an Komplexität ein Vielteilchen-Quantensystem als ausreichend von allen nicht kontrollierbaren äußeren Störungen isoliert zu betrachten ist, um als veritabler Quantensimulator zu gelten.<sup>9)</sup> Die jüngsten Entwicklungen geben Hoffnung, dass Quantensimulatoren basierend auf Rydberg-Atomen einen wichtigen Beitrag leisten können.

Matthias Weidemüller

- [1] H. Weimer et al., Nat. Phys. **6**, 382 (2009)
- [2] M. Saffman, T. G. Walker und K. Mølmer, Rev. Mod. Phys. **82**, 2313 (2010)
- [3] I. M. Georgescu et al., Rev. Mod. Phys. **86**, 153 (2014)
- [4] H. Labuhn et al., Nature **534**, 667 (2016)
- [5] S. de Léséleuc et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 053202 (2017)
- [6] D. Barredo et al., Science **354**, 1021 (2016)
- [7] M. Endres et al., Science **354**, 1024 (2016)
- [8] K. Singer et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 163001 (2004)
- [9] R. Heidemann et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 163601 (2007)
- [10] N. Takei et al., Nat. Commun. **7**, 13449 (2016)
- [11] J. Zeiher et al., arXiv:1705.08372
- [12] H. Bernien et al., arXiv:1707.04344

1) Fragen dieser Natur behandelt unter anderem der Heidelberger SFB 1225 Isolated Quantum Systems and Universality in Extreme Conditions.

Prof. Dr. Matthias Weidemüller, Physikalisches Institut, Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 226, 69120 Heidelberg und University of Science and Technology of China, Hefei, China

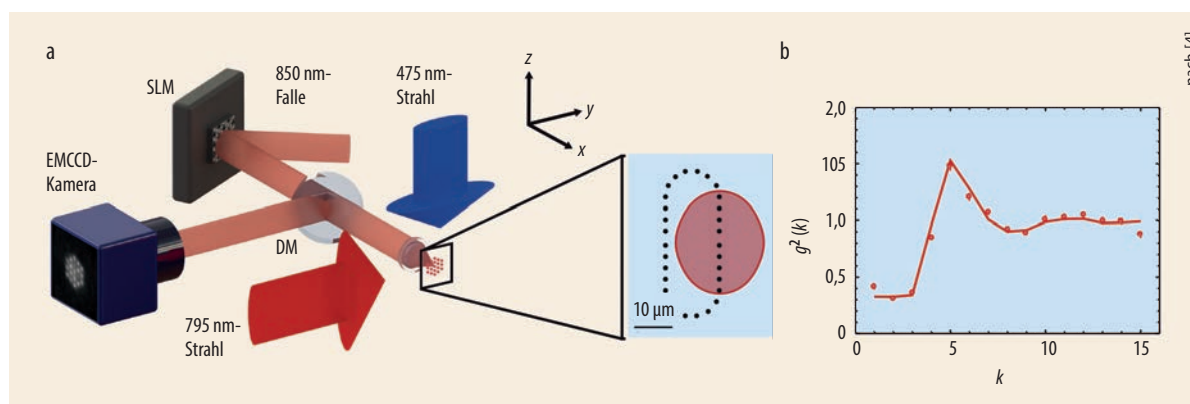


Abb. 2 Die Konfiguration der Rydberg-Atome wird durch einen räumlichen Lichtmodulator (Spatial Light Modulator, SLM) gesteuert (a), der die gefangenen Atome kontrolliert. Die Anregung der Rydberg-Atome erfolgt durch nicht-

resonante Zweiphotonenanregung bei 795 und 475 nm. Im Beispiel bilden die Atome die Form einer Rennbahn, um eine homogene Ausleuchtung aller Atome zu gewährleisten. Der rote Bereich kennzeichnet die räumliche Aus-

dehnung der Rydberg-Blockade. Die gemessenen Korrelationsfunktionen (Punkte) stimmen mit der numerischen Lösung des Ising-Modells (Linie) gut überein (b).