

■ Präzise simulierte Magnete

Aktuelle Experimente mit Rydberg-Atomen und -Ionen machen synthetische Quantenmagnete in einem Bereich zugänglich, der numerisch nicht mehr zu simulieren ist.

Eine der großen Herausforderungen der experimentellen Physik besteht darin, synthetische Quanten-Vielteilchensysteme präzise zu kontrollieren. Zum einen eignen sich solche Laborsysteme ideal, um fundamentale Fragen der Vielteilchenphysik zu untersuchen, insbesondere auch in Parameterbereichen, die in der Natur schwer zugänglich oder gar nicht direkt realisiert sind. Zum anderen ist die Kontrolle wechselwirkender Quantensysteme die Grundlage für zukünftige Quantentechnologien.

Einen Quantensimulator kann man als einen spezialisierten Quantencomputer ansehen, der das zu simulierende System präzise nachbildet. Sein Design ist so ausgelegt, dass sich möglichst alle Parameter des Vielteilchen-Hamilton-Operators kontrollieren lassen. Diese Herangehensweise kann neue Einblicke in die Vielteilchenphysik des ursprünglichen Systems liefern, insbesondere wenn keine direkte numerische Simulation möglich ist. Zudem bietet der Quantensimulator neue Nachweismethoden, die bis zur Detektion einzelner Konstituenten des Systems und deren Quantenzustand reichen.

Ultrakalte Atome in optischen Gittern bilden derzeit die Referenzplattform für die Quantensimulation stark wechselwirkender bosonischer oder fermionischer Vielteilchensysteme, die oft ein Pendant in der Festkörperphysik haben. In den letzten Jahren gab es hier entscheidende Fortschritte. So ermöglichten es sog. Quantengasmikroskope, einzelne Atome – und damit die fundamentalen Bausteine des synthetischen Systems – zu detektieren. Auch haben diese atomaren Quantensimulatoren inzwischen Bereiche erreicht, die nicht mehr klassisch simulierbar sind – bei verbesserter Kontrolle des Systems [1].

Neben Quantensystemen basierend auf ununterscheidbaren Teilchen bilden Quantenmagnete ein

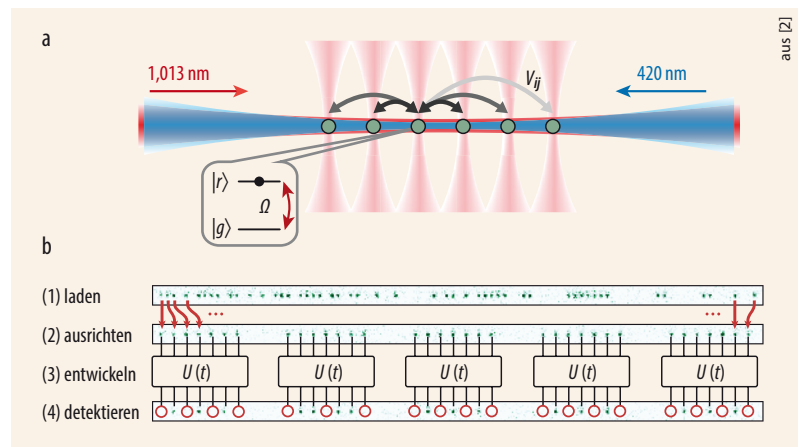


Abb. 1 Beim Rydberg-Mikrofallenexperiment werden die atomaren Qubits in unabhängigen optischen Fallen gehalten (a). Die Qubit-Zustände $|g\rangle$ und $|r\rangle$ werden durch die Laser bei 1013 und 420 nm gekoppelt und wechselwirken miteinander (V_{ij}). Die ersten Schritte des Quanten-

wichtiges, in der Festkörperphysik relevantes Vielteilchensystem. Da sich die einzelnen Elementarmagnete nicht bewegen, lassen sie sich durch ihren Ort eindeutig unterscheiden. Dies vereinfacht ihre theoretische Beschreibung gegenüber fermionischen Systemen, in denen die Antisymmetrisierung der Gesamtwellenfunktion zu beachten ist. Dennoch realisieren Quantenmagnete oft minimale Modelle, die fundamentale Vielteilcheneffekte aufweisen. Beispiele sind Quantenphasenübergänge im Gleichgewicht oder Nichtgleichgewichtseffekte wie Lokalisierung oder Thermalisierung. Zudem basieren viele Anwendungen, z. B. quantengestützte Optimierungsalgorithmen, auf der perfekten Kontrolle synthetischer Quantenmagnete.

Sie lassen sich auf verschiedenen Plattformen realisieren, die von gekoppelten supraleitenden Qubits bis zu atomaren Systemen reichen. Wichtig ist hierbei, dass die einzelnen Konstituenten räumlich unterscheidbar sind und jeweils mindestens zwei Freiheitsgrade besitzen, denen man die beiden Ausrichtungen eines Elementarmagneten zuordnen kann. Außerdem müssen sich die Elementarmagnete („Qu-

simulators erzeugen die deterministische Anordnung der einzelnen Zustände $|g\rangle$ bzw. $|r\rangle$ (b, grün bzw. rot). Nach der Quantensimulation, also einer kontrollierten Zeitentwicklung mit $U(t)$, werden die einzelnen Atome zustandsselektiv detektiert.

bits“) kontrolliert zur Wechselwirkung bringen lassen, sodass sich ein komplexes Quanten-Vielteilchensystem ergibt. Bisher lagen die Größen der experimentell realisierten und voll kontrollierten Systeme bei etwa zehn Qubits, was noch recht einfach exakt numerisch lösbar ist. Gleich mehreren Gruppen ist nun ein entscheidender Fortschritt gelungen. Am eindrucksvollsten ist die Entwicklung im Bereich neutraler Atome, die mittels selektiver Laserkopplung zu Rydberg-Zuständen paarweise miteinander wechselwirken können. Hierbei definiert der Grund- und Rydberg-Zustand die Basis der Qubits. Die van-der-Waals- oder Dipol-Wechselwirkung zwischen den hochangeregten Zuständen ist so stark, dass die Kopplung selbst bei Abständen im Mikrometerbereich noch ausreichend groß ist.

Diese Fortschritte basieren auf deterministischer Präparation ein- oder zweidimensionaler Anordnungen einzelner Atome in optischen Mikrofallen, die eine nahezu beliebige Positionierung von mehr als fünfzig Atomen ermöglichen. Dann bestimmt der Abstand der einzelnen Rydberg-Atome ihre Wechselwirkung. Die gewählte

Anordnung lässt sich mehrmals pro Sekunde erzeugen. Das ist für die statistische Auswertung wichtig, da jede einzelne Messung das Quantensystem zerstört.

In der Gruppe von Mikhail Lukin an der Harvard University diente diese Mikrofallenplattform dazu, die Dynamik eindimensionaler synthetischer Ising-Quantenmagnete zu simulieren (Abb. 1) [2]. Ähnliche Resultate erzielte die Gruppe von Antoine Browaeys in Paris, und zwar sogar in zwei Dimensionen [3]. Die Kontrolle über den Spin-Freiheitsgrad erlaubte es, das System in einem ferromagnetischen, d. h. voll ausgerichteten Anfangszustand perfekt zu initialisieren. Das Ziel der Experimente bestand darin, einen klassischen antiferromagnetisch geordneten Zustand durch dynamische Kontrolle der Laserkopplungsparameter zu erzeugen. Dafür muss das System kohärente Quanten-Vielteilchendynamik durchlaufen, womit das Experiment einen wichtigen Test der erreichbaren Kohärenz darstellt.

Tatsächlich gelang es der Lukin-Gruppe, die hohe Kohärenz des Quantensimulators nachzuweisen und antiferromagnetische Korrelationen deutlich jenseits der direkten Nachbarn zu beobachten. Weiterhin zeigten sich unerwartet robuste Oszillationen der antiferromagnetischen Korrelationen, nachdem die Laserkopplung abrupt verändert wurde (Abb. 2). Ein solches Verhalten ist sehr untypisch für ein generisches Quanten-Vielteilchen-

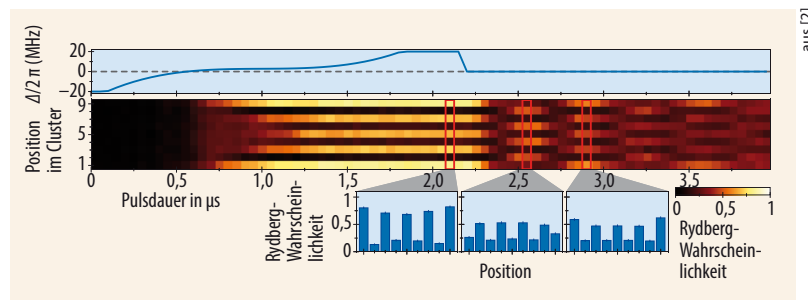


Abb. 2 Robuste Oszillationen der antiferromagnetischen Korrelationen treten nach einem abrupten Sprung in der Laserverstimmung Δ auf – einem Parameter des Hamiltonians. Vor dem Sprung bei etwa 2,2 μs wird der antiferromagne-

tische Zustand durch die Rampe in der Verstimmung präpariert. Die Histogramme zeigen, wie die Position der Atome im Rydberg-Zustand zwischen ungeraden und geraden Positionen oszilliert.

system, in dem Oszillationen durch die Dephasierung der beteiligten Eigenzustände sehr schnell abnehmen. Auch in stark wechselwirkenden Quanten-Vielteilchensystemen existieren also Bereiche robuster Dynamik, die experimentell zugänglich sind.

Eindimensionale, voll kontrollierte Quantenmagnete lassen sich auch mit Ionenketten simulieren. Eine einstellbare, langreichweitige Wechselwirkung entsteht dabei durch nahresonante, von Raman-Lasern induzierte Kopplung an kollektive Schwingungsmoden. Der Gruppe von Christopher Monroe an der University of Maryland gelang es, ein solches System auf mehr als fünfzig Ionen zu vergrößern und magnetische Vielteilchendynamik zu untersuchen [4]. Dabei bestätigten sich Hinweise auf eine neue Art von dynamischem Phasenübergang, die schon aus kleinen Systemen bekannt war [5].

Im Gegensatz zu gewöhnlichen Phasenübergängen im Gleichgewicht, die als Funktion der Temperatur oder eines Parameters im Hamiltonian auftreten, hängt der dynamische Phasenübergang von der Evolutionszeit ab. Auch haben die üblichen thermodynamischen Potentiale, deren nicht-analytisches Verhalten einen Gleichgewichtsphasenübergang charakterisiert, außerhalb des Gleichgewichts keine Bedeutung. Diese Aufgabe übernimmt die sog. Loschmidt-Amplitude, die an einem dynamischen Quantenphasenübergang einen nicht-analytischen Knick zeigt [6].

Diese Neuerungen erlauben es nun, stark korrelierte Quantenmagnete in Bereichen zu untersuchen, in denen numerische Simulationen nicht mehr ohne Näherung möglich sind. Dies wird künftig präzise kontrollierte Untersuchungen von komplexen Vielteilcheneffekten ermöglichen und bietet einen neuen Zugang zur Physik korrelierter magnetischer Systeme. Mit den zu erwartenden Fortschritten im Hinblick auf Kohärenz, Systemgröße und Kontrolle haben diese Plattformen das Potenzial, neue Quantentechnologien wie die quantengestützten Optimierungsalgorithmen zu realisieren.

Christian Groß

KURZGEFASST

■ Schwerer geht nicht

Ein Neutronenstern, der nicht rotiert, kann maximal $2,16 M_{\odot}$ schwer sein. Diesen Wert haben Physiker aus Frankfurt kürzlich in Übereinstimmung mit japanischen und amerikanischen Kollegen berechnet. Dazu nutzten sie die Gravitationswellensignale und elektromagnetischen Beobachtungen aus dem Verschmelzen zweier Neutronensterne. Die Daten setzten sie in ihr Modell ein, das die Eigenschaften des Neutronensterns als quasi-universelle Größen behandelt und unabhängig von der Zustandsgleichung der extrem dichten Neutronensternmaterie ist. L. Rezzolla et al., *ApJL* **852**, L25 (2018)

■ Lieber Makro als Mikro

In großflächigen Stromnetzen wie dem kontinentaleuropäischen kommt es seltener zu starken Frequenzschwankungen als in kleineren Netzen wie dem auf Mallorca. Das zeigt eine internationale Studie. Microgrids – kleine autonome Zellen im Stromnetz – kommen demnach nicht ohne Weiteres infrage, um die Schwankungen gezielt zu reduzieren. Zu den Schwankungen trägt derzeit der europäische Stromhandel stärker bei als die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen. B. Schäfer et al., *Nat. Energy* (2018), DOI: 10.1038/s41560-017-0058-z

- [1] C. Gross und I. Bloch, *Science* **357**, 995 (2017)
- [2] H. Bernien et al., *Nature* **551**, 579 (2017)
- [3] V. Lienhard et al., arXiv:1711.01185
- [4] J. Zhang et al., *Nature* **551**, 601 (2017)
- [5] P. Jurcevic et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 080501 (2017)
- [6] M. Heyl et al., *Phys. Rev. Lett.* **110**, 135704 (2013)

Dr. Christian Groß,
Max-Planck-Institut
für Quantenoptik,
Hans-Kopfermann-
Str. 1, 85748 Garching