

ist. Diese Anisotropie geht sogar so weit, dass je nach Ausbreitungsrichtung die Dispersion von positiv zu negativ wechselt. Für eine Propagation der Spinwellen senkrecht zur Magnetisierung steigen die Frequenzen mit größeren Wellenvektoren, wohingegen die Frequenzen zunächst kleiner werden, wenn sich die Spinwellen parallel zur Magnetisierung ausbreiten (Abb. 1c). Dieser Effekt entsteht durch die magnetischen Dipolfelder, die eine Spinwelle erzeugt und deren Stärke mit der Dicke des Ferromagneten skaliert. Je dicker der Film ist, umso stärker ist die Anisotropie ausgeprägt. Für sehr große Wellenvektoren führt letztendlich die isotrope magnetische Austauschwechselwirkung zu einem quadratischen Anstieg der Spinwellenfrequenzen, auch für den Fall mit der anfänglich negativen Dispersion.

In ihrem Experiment regten die Regensburger Experimentalphysiker Spinwellen in einem 60 Nanometer dünnen Film aus einer Nickel-Eisen-Legierung mit Mikrowellen an (Abb. 1b). Die angeregten Spinwellen breiteten sich mit positiver Dispersion senkrecht zur Magnetisierung aus. Nach wenigen Mikrometern trafen sie auf ein

Gebiet, in dem die Dicke des Ferromagneten gezielt um die Hälfte reduziert wurde. Vom dickeren zum dünneren Film heißt in diesem Fall vom „optisch“ dünnen in das „optisch“ dichte Medium (Abb. 1c). Analog zu Licht war im Experiment die Brechung der Spinwellen hin zum Lot zu beobachten. Bis zu einem gewissen Einfallswinkel stimmt der Beugungswinkel für Spinwellen mit dem überein, der für Licht zu erwarten wäre.

Für größere Einfallswinkel jedoch verhalten sich Spinwellen ganz anders. Nicht nur werden sie weniger stark gebrochen als Lichtwellen, es ändert sich auch ihre Wellenlänge, wenn man den Einfallswinkel variiert. Der Brechungsindex ist somit eine Funktion des Einfallswinkels, und zwar für die gebeugten wie auch die reflektierten Spinwellen. Außerdem gilt aufgrund der anisotropen Dispersion der Spinwellen das für Licht gültige Reflexionsgesetz nicht mehr. Gewissermaßen haben die Forscher also einen Spiegel entdeckt, der die Farbe ändert und das sogar abhängig von der Position des Beobachters.

Neben diesen grundlagenphysikalisch sehr interessanten Aspekten

steht auch die technologische Relevanz dieser Entdeckung außer Frage. Mit ihren Experimenten konnten die Forscher zeigen, dass sich durch Brechung Spinwellen mit Wellenlängen einiger zehn Nanometer erzeugen lassen, die ansonsten mittels Antennenstrukturen nur schwer erreichbar sind [6]. Dies ist für die technische Realisierung von Computern, in denen Magnonen für Logikoperationen zum Einsatz kommen [7], von enormer Bedeutung. Da zudem der Brechungsindex der Spinwellen durch die anisotrope Dispersion vom Einfallswinkel abhängt, ergeben sich für die Konstruktion von Spinwellen-Optiken völlig neue, noch unbekannte Möglichkeiten, die über die klassische Optik hinausgehen werden.

Helmut Schultheiß

- [1] J. Stigloher et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 037204 (2016)
- [2] V. V. Kruglyak et al., J. of Phys. D. **43**, 264001 (2010)
- [3] B. Lenk et al., Phys. Rep. **507**, 107 (2011)
- [4] A. V. Chumak et al., Nat. Phys. **11**, 453 (2015)
- [5] J. Fassbender et al., New J. Phys. **11**, 125002 (2009)
- [6] H. Yu, Nat. Comm. **4**, 2702 (2013)
- [7] B. Leven et al., Physik in unserer Zeit **46**, 34 (2015)

Dr. Helmut Schultheiß, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzener Landstraße 400, 01328 Dresden

## ■ Vielseitige Quantenbits

Ein 4-Qubit-Quantencomputer ermöglicht es, die Paarerzeugung von Teilchen und Antiteilchen zu berechnen.

Die effiziente Berechnung der Zeitentwicklung von Quanten-Vielteilchensystemen, angefangen bei stark korrelierten Elektronen in Festkörpern bis hin zu stark wechselwirkender Quark-Gluon-Materie, ist eine der fundamentalen Herausforderungen der heutigen Physik. Klassische Computer stoßen bei diesen Problemen oft an ihre Grenzen, da der Rechenaufwand typischerweise exponentiell mit der Zahl der Freiheitsgrade wächst. 1982 stellte Richard Feynman die Vermutung auf, dass ein universeller Quantencomputer in der Lage wäre, beliebige Quantensysteme wesentlich effizienter zu berechnen [1].

In einem Quantencomputer wird Information direkt in Form von Qubits (z. B. Quantenspins  $\frac{1}{2}$ ) gespeichert, anstatt diese in klassischen Bits zu kodieren. Rechenoperationen lassen sich durch die sequenzielle Anwendung von Quantengattern implementieren. Theoretisch gelang es bereits zu beweisen, dass es möglich ist, eine beliebige Zeitentwicklung für ein gegebenes Quantensystem durch eine überschaubare Anzahl von Quantengatter-Operationen zu realisieren [2].

Solche Quantenrechnungen wären für die Hochenergiephysik von immenser Bedeutung, um beispielsweise den zeitlichen Verlauf

von Schwerionenkollisionen mit anschließender Teilchen-Antiteilchen-Produktion rein auf Basis der Quantenchromodynamik (QCD) – der fundamentalen Eichfeldtheorie von Quarks und Gluonen – besser zu verstehen. Derartige nicht-perturbative Probleme lassen sich im Rahmen der Gitterfeldtheorie, in der das Raum-Zeit-Kontinuum durch ein diskretes Gitter approximiert wird, zwar exakt formulieren. Aufgrund des exponentiell großen Rechenaufwands ist es aber nicht möglich, diese Probleme mit klassischen Computern zu lösen.

Wissenschaftler der Universität Innsbruck, des Instituts für Quantenoptik und Quanteninformation

Dr. David Mesterhazy, Dr. Florian Hebenstreit und Prof. Dr. Uwe-Jens Wiese, Albert Einstein Center for Fundamental Physics, Institut für Theoretische Physik, Universität Bern, Sidlerstr. 5, 3012 Bern, Schweiz



Die lineare Paul-Falle, in der die einzelnen Ionen gefangen und manipuliert

werden, bildet das Herzstück des Versuchsaufbaus.

(IQOQI) und der TU München aus den Gruppen von Peter Zoller und Rainer Blatt haben nun mit einem Quantencomputer bestehend aus vier Calcium-Ionen in einer linearen Paul-Falle das so genannte Schwinger-Modell implementiert [3]. Dabei handelt es sich um eine Gitterfeldtheorie: die Quantenelektrodynamik in nur einer Raumdimension. Das Schwinger-Modell [4] ist besonders interessant, da es fundamentale Eigenschaften mit der QCD teilt. Gleichzeitig eignet es sich aber wegen der reduzierten Dimensionalität (eine Raum- und eine Zeitdimension) als ideale Spielwiese, um neue Methoden zu testen.

Bereits in vorangegangenen Arbeiten ist es gelungen, einfache Quantenspin-Modelle zu imple-

mentieren. Im Gegensatz dazu ist es ungleich schwieriger, eine Eichfeldtheorie zu realisieren, da die Feldfreiheitsgrade (Fermionen und Eichfelder) ursprünglich nicht durch Quantenspins beschrieben werden. Die reduzierte Dimensionalität des Schwinger-Modells erlaubt es jedoch, das Eichfeld vollständig zu eliminieren und die Fermionen auf ein System nicht-lokal wechselwirkender Quantenspins abzubilden. Dass es möglich ist, ein solches System mit langreichweitigen Wechselwirkungen effizient zu simulieren, hat die aktuelle Arbeit nun eindrucksvoll gezeigt.

In der experimentellen Realisierung wurden dabei zwei elektronische Zustände eines jeden Ions mit den Spin-Zuständen  $|\uparrow\rangle$  und

$|\downarrow\rangle$ , die einem Qubit entsprechen, identifiziert. Um die Anwendbarkeit des Quantencomputers auf fundamentale dynamische Prozesse des Schwinger-Modells zu demonstrieren, simulierten die Wissenschaftler die Paarerzeugung von Teilchen und Antiteilchen (Abb. 1). Hierzu präparierten sie einen Anfangszustand, der einem Zustand ohne Teilchen oder Antiteilchen entspricht. Anschließend berechneten sie dessen Zeitentwicklung mit Hilfe des Quantencomputers. Da der Anfangszustand in diesem Experiment kein Eigenzustand des simulierten Hamilton-Operators ist, zerfällt er im Laufe der Zeit in eine Superposition von Zuständen, die sich als Teilchen-Antiteilchen-Paare interpretieren lassen.

Die Präparation des Anfangszustands entspricht einer kurzen Sequenz von etwa zehn optischen Laserpulsen und ist daher wenig fehleranfällig. Ein Zeitschritt im Schwinger-Modell hingegen benötigt eine speziell abgestimmte Folge von etwa fünfzig Laserpulsen, die dazu dienen, einzelne oder mehrere Ionen nach einem programmierten Schema zu manipulieren. Eine so komplexe Abfolge ist notwendig, um die langreichweitigen Wechselwirkungen zu realisieren. Bemerkenswerterweise gelang es, die Ionen in der Falle über hunderte von Quantengatter-Operationen experimentell zu kontrollieren.

Wie in jedem Quantenexperiment ist es erforderlich, die Quantenrechnung häufig zu wiederholen, um Erwartungswerte (beispielsweise der Teilchenzahl) im Endzustand zu bestimmen. Dazu muss man messen, in welchem der beiden Zustände  $|\uparrow\rangle$  oder  $|\downarrow\rangle$  sich die einzelnen Ionen befinden. Die Zeitentwicklung des Schwinger-Modells ist für vier Quantenspins auch mit klassischen Computern noch gut berechenbar. Daher war es möglich, die Funktionalität des Quantencomputers, insbesondere die quantenmechanische Verschränkung der erzeugten Teilchenpaare, explizit nachzuweisen. Auf Systemen mit einer größeren Zahl von Qubits sollte der Quantencom-

## KURZGEFASST

### ■ Holographie ohne Artefakte

Um die Eigenschaften moderner Werkstoffe zu verstehen, ist es nötig, die Anordnung der Atome im Festkörper genau zu kennen. Einen Blick unter die Oberfläche verspricht Holographie mit Elektronenwellen, weil ihre Wellenlänge zu hohen Streuquerschnitten bei leichten Elementen führt. Physiker der TU Dortmund entwickelten einen Rekonstruktionsalgorithmus, mit dem sich die dreidimensionale Struktur des Werkstoffs und dessen chemische Zusammensetzung ohne Artefakte bestimmen lässt. Um den Algorithmus zu testen, untersuchten sie Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) und wiesen die Position der Eisen- und Schwefelatome im Gitter nach.

T. Lühr et al., *Nano Lett.* **16**, 3195 (2016)

### ■ In Ouzo veritas

Ouzo besteht – wie alle Anis-Schnäpse – aus Wasser, Alkohol und Anisöl. Diese Mischung zeigt erstaunliche Effekte, wenn sich das Verhältnis der Stoffe z. B. beim Verdunsten verändert. So ist die Flüssigkeit in einem Tropfen nur dort durchsichtig, wo die Anteile von Wasser und Alkohol gerade so groß sind, dass das Öl keine Mikrotropfen bildet. Forscher der TU Delft aus der Gruppe von Detlef Lohse beobachteten während des Verdunstens vier verschiedene Phasen. Könnte man diese gezielt erzeugen, würden sich technische Anwendungen eröffnen, z. B. beim Bedrucken von LEDs.

H. Tan et al., *PNAS* **113**, 8642 (2016)

puter einen exponentiellen Vorteil gegenüber klassischen Computern besitzen, welche bereits bei der Simulation von zwanzig bis dreißig Quantenspins an ihre Grenzen stoßen. Diese aktuelle Arbeit ist daher als wegweisender Schritt in ein neues Zeitalter des Quantencomputing zu verstehen.

Als wesentliche Herausforderung für weiterführende Experimente bleibt die explizite Berücksichtigung der Eichfreiheitsgrade, da sie sich nur in einer Raumdimension praktikabel eliminieren lassen. Dies wäre vor allem für die Simulation der QCD interessant, welche wichtige Einblicke in die Dynamik stark wechselwirkender Quark-Gluon-Materie unter kontrollierten Bedingungen bieten würde.

All jene, die nicht für unbestimmte Zeit auf den universellen Quantencomputer warten wollen, können schon in näherer Zukunft mit weiteren Fortschritten auf diesem hochaktuellen Gebiet rechnen. So gibt es bereits konkrete Vor-

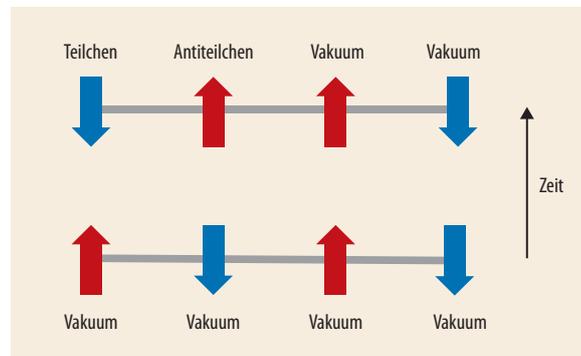


Abb. 1 Im Anfangszustand zeigen die Spins an benachbarten Gitterplätzen abwechselnd nach oben und unten (Teilchenzahl 0). Das simultane Umklappen zweier benachbarter Spins entspricht der Produktion eines Teilchen-Antiteilchen-Paares (Teilchenzahl 2).

schläge, wie sich ultrakalte Atome in optischen Gittern zwar nicht als universelle Quantencomputer, aber doch als dedizierte Quantensimulatoren für Gittereichtheorien nutzen lassen könnten [5 – 9]. Schon heute kann man mit Sicherheit sagen, dass der interdisziplinäre Weg zur Entwicklung und Anwendung von Quantencomputern und Quantensimulatoren für alle Beteiligten – von der Atom- bis zur Hochenergiephysik – bereichernd sein wird.

David Mesterhazy, Florian Hebenstreit  
und Uwe-Jens Wiese

- [1] R. P. Feynman, *Int. J. Theor. Phys.* **21**, 467 (1982)
- [2] S. Lloyd, *Science* **273**, 1073 (1996)
- [3] E. A. Martinez, C. A. Muschik, P. Schindler, D. Nigg, A. Erhard, M. Heyl, P. Hauke, M. Dalmonte, T. Monz, P. Zoller und R. Blatt, *Nature* **534**, 516 (2016)
- [4] J. Schwinger, *Phys. Rev.* **128**, 2425 (1962)
- [5] U.-J. Wiese, *Ann. Phys.* **525**, 777 (2013)
- [6] D. Banerjee, M. Bögli, M. Dalmonte, E. Rico, P. Stebler, U.-J. Wiese und P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 125303 (2013)
- [7] L. Tagliacozzo, A. Celi, P. Orland, M. W. Mitchell und M. Lewenstein, *Nat. Comm.* **4**, 2615 (2013)
- [8] E. Zohar, J. I. Cirac und B. Reznik, *Rep. Prog. Phys.* **79**, 014401 (2015)
- [9] V. Kasper, F. Hebenstreit, M. K. Oberthaler und J. Berges, *Phys. Lett. B* **760**, 742 (2016)

**WILEY**

**MORE CONTENT  
ON LASERS, OPTICS  
& PHOTONICS**