

harmonische Abhängigkeit des gemessenen Signals von einer frei einstellbaren Phase belegt die Kohärenz der Überlagerung der beiden Phononenzustände, während der dabei beobachtete Kontrastverlust quantitative Rückschlüsse auf die Dekohärenz zulässt. Durch die Abbildung auf einen verschränkten Photon-Zustand der beiden anti-Stokes-Moden ist es möglich, die Verschränkung im Phononen-Zustand quantitativ zu untersuchen.^{§)} Die Forschergruppe kommt nach statistischer Datenanalyse zum Schluss, dass mit etwa 98 Prozent Wahrscheinlichkeit zwischen den beiden Diamanten Verschränkung vorgelegen haben muss.

Die Verschränkung lässt sich mithilfe der sog. Concurrence C quantifizieren: Für maximal verschränkte Zustände gilt $C = 1$, für unverschränkte Zustände $C = 0$. Die Phononen-Verschränkung ist mit einem abgeschätzten C von etwa fünf Millionstel sehr, sehr klein. Da der Nachweis der Verschränkung nur indirekt über den Anti-Stokes-Photonenzustand geführt wird, ist eine sehr sorgfältige

Argumentation nötig. Auch ist zu erwähnen, dass im Laborsystem die Anti-Stokes-Photonen entstehen (350 fs nach den Stokes-Photonen), noch bevor durch den Nachweis des Stokes-Photons im Detektor der verschränkte Phonon-Zustand erzeugt wird. Man darf auf weitere Untersuchungen gespannt sein. Insbesondere sollte die Dynamik des Verschränkungsverlusts aufgrund von Dekohärenzmechanismen in den Kristallen durch die vorhandene Femtosekudentechnik experimentell direkt zugänglich sein.

Verschränkte Photonenpaare sind heute Routine und finden Anwendungen etwa in der Quantenkryptographie. In vorangegangenen Experimenten wurden auf ganz ähnliche Weise verschränkte Zustände zweier Atomensembles präpariert, deren Anregungen allerdings elektronischer Natur waren [9]. Im aktuellen Experiment gelingt nun zum ersten Mal die Verschränkung von Bewegungsfreiheitsgraden (Gitterschwingungen) zweier makroskopischer Systeme. Die Untersuchungen

zeigen eindrucksvoll, wie Quantenphänomene und hier insbesondere Quantenkorrelationen bereits heute in Systemen mit makroskopischen Abmessungen und bei Zimmertemperatur experimentell zugänglich sind.

Walter Strunz

- [1] E. Schrödinger, *Naturwissenschaften*, **23**, 807 (1935)
- [2] W. T. Strunz, G. Alber und F. Haake, *Physik Journal*, November 2002, S. 47
- [3] M. Arndt, S. Gerlich, K. Hornberger und M. Mayor, *Physik Journal*, Oktober 2010, S. 37
- [4] J. Chan et al., *Nature* **478**, 89 (2011)
- [5] M. Aspelmeyer, *Physik Journal*, April 2008, S. 19
- [6] G. D. Scholes, G. R. Fleming, A. Olaya-Castro und R. van Grondelle, *Nature Chemistry* **3**, 763 (2011)
- [7] K.C. Lee et al., *Science* **334**, 1253 (2011)
- [8] L.-M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac und P. Zoller, *Nature* **414**, 413 (2001)
- [9] C. W. Chou et al., *Nature* **438**, 828 (2005) und T. Chaneliere et al., *ibid.*, 833

§) Dazu wird der Dichteoperator der Anti-Stokes-Photonen analysiert. Aus dem direkten Anti-Stokes-Nachweis folgt nur dessen Diagonalanteil. Die beiden Nebendiagonalelemente der Matrix (die „Kohärenzen“) lassen sich durch den Kontrast der erwähnten Phasemessung abschätzen.

Prof. Dr. Walter Strunz, Institut für Theoretische Physik, TU Dresden

■ Das Rätsel um Majorana

Ultrakalte Atome in optischen Gittern, die an ein dissipatives Bad gekoppelt sind, gelten als vielversprechender Kandidat bei der Suche nach Majorana-Fermionen.

Am 26. Mai 1938 verschwand der italienische Physiker Ettore Majorana spurlos. Die Spekulationen über seinen Verbleib deckten das ganze Spektrum von Selbstmord oder Eintritt in ein Kloster bis hin zu einer Auswanderung nach Argentinien ab. Die Suche nach Majorana wurde nach einigen Monaten eingestellt, die von ihm theoretisch vorhergesagten Majorana-Fermionen befinden sich heutzutage jedoch stärker im Visier der Wissenschaftler als je zuvor.

Majorana fand kurz vor seinem Verschwinden eine modifizierte Dirac-Gleichung, die mit reellen Zahlen auskommt und reelle Lösungen hat [1]. Da die komplexe Konjugation reelle Felder nicht verändert, beschreiben diese Lösungen

der Majorana-Gleichung neutrale Elementarteilchen, die ihre eigenen Antiteilchen sind. In zweiter Quantisierung ist es möglich, die Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren eines Fermions c^\dagger und c in zwei Majorana-Fermion-Operatoren umzuschreiben: $\gamma_1 = (c^\dagger + c)/2$ und $\gamma_2 = (c^\dagger - c)/2i$. Diese Majorana-Operatoren erfüllen dieselben Antikommutationsregeln wie Fermionen, sind aber ihre eigenen Antiteilchen: Der Erzeugungsoperator ist gleich dem Vernichtungsoperator: $\gamma_i^\dagger = \gamma_i$. Rein mathematisch lassen sich die obigen Relationen umdrehen und alle Fermionen durch je zwei Majorana-Fermionen beschreiben. Doch kommen diese als solche in der Natur vor? Auf der Suche nach

Majorana-Fermionen haben Innsbrucker Physiker kürzlich einen vielversprechenden Kandidaten vorgeschlagen [2].

Bereits Ettore Majorana spekulierte, ob die damals erst hypothetischen Neutrinos Majorana-Fermionen sein könnten. Experimentelle Beobachtungen nach der Entdeckung des Neutrinos, insbesondere die Leptonenzahlerhaltung, bedingten solche Spekulationen jedoch frühzeitig. Seit der Entdeckung der Neutrino-Oszillationen fragen sich Wissenschaftler aber erneut, ob Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sein könnten. Ein eindeutiges Indiz dafür wäre die Beobachtung eines neutrinolosen Doppel-Betazerfalls, z. B. ${}^{76}\text{Ge} \rightarrow {}^{76}\text{Se}$.^{§)} Anstelle als Elementarteilchen können Majorana-

§) vgl. *Physik Journal*, März 2011, S. 23. Einen Überblick über geplante und vorgeschlagene Experimente bieten http://de.wikipedia.org/Doppelter_Betazerfall und http://en.wikipedia.org/wiki/Double_beta_decay

Fermionen auch als exotische Anregungen in Festkörpern oder Quantengasen auftauchen. Lokalisierte Anregungen in diesen Systemen haben meist entweder fermionische (z. B. Quasiteilchen und Quasilöcher in einer Landau-Fermi-Flüssigkeit) oder bosonische Statistik (z. B. Phononen in Festkörpern). In speziellen Systemen können allerdings auch exotischere Anregungen auftreten – Anyonen mit exotischer fraktionaler Statistik: Beim Austausch zweier Anyonen taucht nicht ein Phasenfaktor $+1$ auf wie bei Bosonen oder -1 wie bei Fermionen, sondern eine je nach Art des Teilchens unterschiedliche Phase $\exp(i\varphi)$ – daher der Name *anyon*. Die Suche nach Majorana-Fermionen in Festkörpern ist Teil einer breiteren Suche nach anyonischen Quasiteilchen. Während Anyonen zunächst eine rein mathematische Kuriosität waren, ist ihre Existenz inzwischen gesichert. Bestimmte Anyonen sind interessant, um einen fehlertoleranten topologischen Quantencomputer zu realisieren [3]. Insbesondere gelten manche Systeme, in denen Majorana-Fermionen vermutet werden, als potenzielle Kandidaten für robuste topologische Quantenbits.

Das bekannteste Beispiel für ein System mit anyonischen Anregungen ist der fraktionale Quanten-Hall-Effekt. Zur Beschreibung des Zustands mit Füllfaktor $\nu = 5/2$ wird der sog. Moore-Read-Zustand

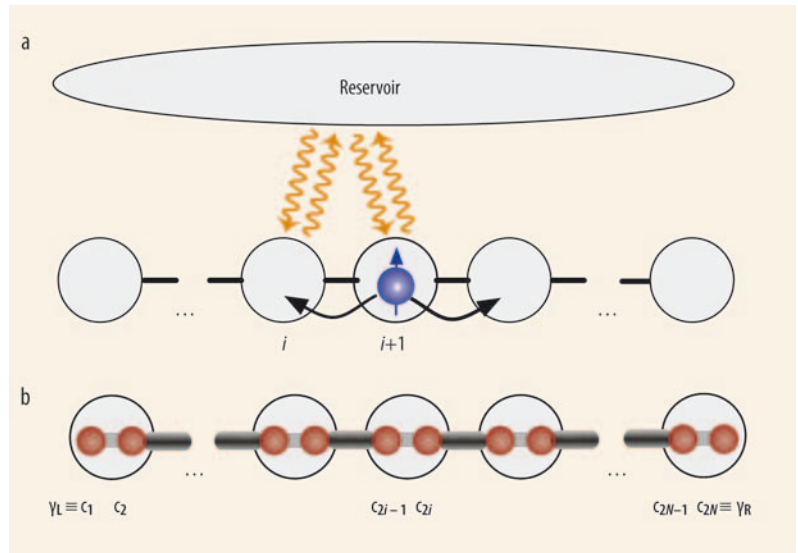


Abb. 1 Spinlose Fermionen (blau), die auf den Gitterplätzen i eines optischen Gitters sitzen und an ein Reservoir angekoppelt sind (a), lassen sich formal in zwei Majorana-Fermionen zerlegen. In

dem endlichen Gitter verbinden sich jeweils Majorana-Fermionen benachbarter Gitterplätze (b, schwarze Linien). Nur an den Enden bleiben zwei ungepaarte Majorana-Fermionen übrig.

diskutiert, in dem Majorana-Fermionen als Quasiteilchen mit Ladung $e/2$ auftauchen [4]. Experimentell wurden allerdings noch keine Majorana-Fermionen in diesem Zustand gesehen.

Auch in Supraleitern kann die Teilchenzahlerhaltung verletzt sein, wenn zwei Elektronen ein bosonisches Cooper-Paar bilden und im Kondensat untergehen. Die Ladung der Anregungen ist daher nur modulo $2e$ erhalten, sodass Anregungen ihre eigenen Antiteilchen sein könnten. In einem Supraleiter existieren auch Quasiteilchen, die tatsächlich Mischungen aus Teil-

chen und Löchern sind, allerdings sind sie keine Majorana-Fermionen. Alexei Kitaev schlug jedoch vor, dass Majorana-Anregungen am Rand von supraleitenden Quantendrähten auftreten könnten [5].

Die Idee hinter Kitaevs Modell ist einfach, aber genial: In einer Kette von spinlosen (z. B. polarisierten) Fermionen wird jedes durch zwei Majorana-Fermionen beschrieben. Der Hamilton-Operator führt zu einer Paarung der Majorana-Fermionen mit je einem weiteren Majorana-Fermion des linken und rechten Nachbarn. Dies funktioniert überall außer am

KURZGEFASST

■ **Ohm gilt selbst auf atomarer Skala**

Die fortschreitende Miniaturisierung der Elektronik ist nicht nur eine Herausforderung, um aktive Bauelemente wie Transistoren herzustellen, sondern auch für die elektrischen Verbindungen dazwischen. Unklar ist, ab welchen Abmessungen das Ohmsche Gesetz aufgrund von Quanteneffekten nicht mehr gilt. Eine amerikanisch-australische Forschergruppe hat nun Phosphor-Atome in einen Silizium-Kristall eingelagert und damit Nanodrähte hergestellt. Selbst wenn diese nur ein Atom hoch und vier Atome breit sind, gilt darin das Ohmsche Gesetz – bei einer mit Kupfer vergleichbaren Leitfähigkeit.
B. Weber et al., Science 335, 64 (2012)

■ **Positronen-Puzzle geht weiter**

Im Jahr 2008 fand eine internationale Kollaboration mithilfe des Pamela-Satelliten bei der Analyse der kosmischen Strahlung einen unerwarteten Überschuss an Positronen bei Energien bis 100 GeV.^{+) Dieser Überschuss könnte von dem Zerfall bislang unbekannter Teilchen der Dunklen Materie herrühren. Der Kollaboration des Large Area Telescope (LAT) an Bord des Fermi-Satelliten ist es nun gelungen, die Spektren von Elektronen und Positronen bis zu einer Energie von 200 GeV zu messen und damit das Pamela-Resultat zu bestätigen. Um zwischen Teilchen und Antiteilchen unterscheiden zu können, nutzten die Wissenschaftler auf geschickte Weise das Erdmagnetfeld.}

Die Frage nach dem Ursprung dieses Überschusses bleibt indes offen.
M. Ackermann et al., Fermi LAT Collaboration, Phys. Rev. Lett. 108, 011103 (2012)

■ **Gespitztes Nano-Ohr**

Eine Million Mal empfindlicher als das menschliche Ohr ist ein „Nano-Ohr“, das Münchner Physiker entwickelt haben. Dazu halten sie mit einer optischen Pinzette ein 60 nm kleines Nanopartikel aus Gold in einer wässrigen Umgebung fest und analysieren dessen „Zittern“ mit einem Dunkelfeld-Mikroskop und einer aufgesetzten Kamera. Die Empfindlichkeit entspricht einer „Laut“-Stärke von -60 Dezibel.
A. Ohlinger et al., Phys. Rev. Lett. 108, 018101 (2012)

^{+) vgl. Physik Journal, Februar 2009, S. 19}

linken und rechten Rand, wo zwei ungepaarte Majorana-Fermionen übrig bleiben. Um dies in einem Supraleiter zu realisieren, ist ein sog. topologischer Supraleiter erforderlich, für den es einige Kandidaten gibt [6–9], aber bisher noch keinen experimentellen Nachweis eines Majorana-Fermions.

Suche in einem neuen System

Die Innsbrucker Wissenschaftler präsentieren einen ganz anderen Weg und schlagen vor, direkt mit quantenoptischen Mitteln Kitaevs mikroskopisches Gittermodell für einen Quantendraht zu realisieren [2]. Die erste Zutat sind spinlose Fermionen, die sich realisieren lassen, indem man in einer optischen Falle ein Gas von fermionischen Atomen abkühlt, die sich alle im selben Hyperfeinzustand befinden. Ein eindimensionales Gitter entsteht mithilfe einer stehenden Welle aus Laserlicht. Da diese an das Dipolmoment der Atome koppelt, bilden die Amplitudenmaxima Potentialtöpfe für die Fermionen. Der wichtige nächste Schritt besteht darin, die Paarung des topologischen Supraleiters zu implementieren (**Abb. 1**). Weitere Laser dienen dazu, die Fermionen resonant an ein Hilfsgitter zu koppeln (in der **Abb.** nicht gezeigt), das um einen halben Gitterplatz verschoben ist, sodass sich dessen Minima zwischen zwei Gitterplätzen des ersten Gitters befinden. Ein Bose-Einstein-Kondensat kühlt dieses System dissipativ in den gewünschten Zustand. Wenn zusätzliche Laser die Kette scharf abscheiden, resultieren an den Enden zwei Majorana-Fermionen.

Durch die dissipative Kopplung an das Bad umgehen die Autoren das Problem, dass ultrakalte atomare Systeme trotz der niedrigen Temperaturen zu viel Entropie haben, um exotische Grundzustände zu realisieren: Das Bose-Einstein-Kondensat entzieht den Fermionen Energie, sodass diese in den gewünschten Zustand gelangen. Der große Vorteil der Realisierung durch quantenoptische Mittel ist die Reinheit und Kontrollierbarkeit des Systems. Im Gegensatz dazu haben die in Festkörpern allgegen-

wärtigen Defekte es bisher verhindert, darin Majorana-Fermionen zu beobachten. Der Vorschlag von Sebastian Diehl und seinen Koautoren ist ein Meisterstück der Quantenoptik. Die experimentellen Anforderungen sind extrem hoch, insbesondere an die Kontrolle und Adressierung des optischen Gitters. Aber es gibt keine prinzipiellen Hindernisse, sodass dies einer der vielversprechendsten Wege ist, ein Majorana-Fermion zu realisieren.

Während das Rätsel um das Verschwinden von Ettore Majorana wohl für immer ungelöst bleibt, stehen die Chancen gut, in naher Zukunft ein Majorana-Fermion zu sehen. Offen ist nur noch, ob es Neutrinos sein werden, Quasiteilchen in Quanten-Hall-Systemen, Anregungen in Supraleitern oder die hier vorgeschlagene Realisierung in Quantengasen. Falls Majorana-Fermionen in letzterem System auftauchen, wäre dies die erste Realisierung eines neuen Teilchentyps in einem quantenoptischen System.

Matthias Troyer

- [1] *E. Majorana*, Nuovo Cimento **5**, 171 (1937)
- [2] *S. Diehl, E. Rico, M. A. Baranov und P. Zoller*, Nature Physics **7**, 971 (2011)
- [3] *A. Kitaev*, Ann. Phys. **303**, 2 (2003); *C. Nayak et al.*, Rev. Mod. Phys. **80**, 1083 (2008)
- [4] *G. Moore und N. Read*, Nucl. Phys. B **360**, 362 (1991)
- [5] *A. Y. Kitaev*, Phys. Usp. **44**, 131 (2001)
- [6] *N. Read und D. Green*, Phys. Rev. B **61**, 10267 (2000)
- [7] *L. Fu und C. L. Kane*, Phys. Rev. Lett. **100**, 096407 (2008)
- [8] *J. D. Sau et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 040502 (2010)
- [9] *J. Alicea*, Phys. Rev. B **81**, 125318 (2010)

Prof. Dr. Matthias Troyer, Institut für Theoretische Physik, ETH Zürich, Wolfgang-Pauli-Str. 27, 8093 Zürich, Schweiz