

effekt ist eine Evolution der Phase durch die Energiedifferenz der verschiedenen, an der Superposition beteiligten, Hyperfeinniveaus. Diese lässt sich durch Re-Phasing Pulse, angelehnt an NMR-Spin-Echo-Techniken, rückgängig machen. Durch Kombination dieser beiden Techniken gelang es Mansons Gruppe, die Speicherzeit in Pr:Y₂SiO₅ auf über eine Sekunde erhöhen [1]. In einer Reihe von Arbeiten haben sie damit ein Verfahren entwickelt, dass im Prinzip Speicherzeiten bis 30 s ermöglichen sollte [6].

Gespeichertes Licht für die Hosentasche wird allerdings noch etwas auf sich warten lassen. Der experimentelle Aufwand dieses Verfahrens ist enorm. Die Probe sitzt in einem Flüssigheliumkryostaten bei einer Temperatur von 1,5 K, das Biasfeld wird von drei orthogonalen supraleitenden Magneten erzeugt, eine RF-Spule generiert die Rephasing-Puls-Sequenzen und die geringe Linienbreite von 2,5 kHz des optischen Übergangs macht es nötig, einen Farbstofflaser auf unter 1 kHz zu stabilisieren.

Obwohl in dem vorliegenden Experiment nach dem Speichern bisher nur etwa 1 % der ursprünglichen Pulsenergie ausgelesen werden kann, bedingt vor allem durch die geringe optische Dichte der Probe, ist mit diesem vielversprechenden Ansatz ein wichtiger Schritt zur Entwicklung langlebiger Quantenspeicher getan.

DENNIS HEINE UND JÖRG SCHMIEDMAYER

- [1] J. J. Longdell, E. Fraval, M. J. Sellars und N. B. Manson, Phys. Rev. Lett. **95**, 063601 (2005)
- [2] M. Lukin, Rev. Mod. Phys. **75**, 457 (2003)
- [3] S. E. Harris, Physics Today, Juli 1997, S. 36
- [4] A. V. Turukhin, V. S. Sudarshanam und M. S. Shahriar, Phys. Rev. Lett. **88**, 023602 (2002)
- [5] E. Fraval, M. J. Sellars und J. J. Longdell, Phys. Rev. Lett. **92**, 077601 (2004)
- [6] E. Fraval, M. J. Sellars und J. J. Longdell, Phys. Rev. Lett. **95**, 030506 (2005)

Gleich zu gleich gesellt sich gern

Korrelationsmessungen an kalten Atomen ermöglichen neue Einsichten in fundamentale Fragen der Quantenphysik.

Vor etwa 50 Jahren untersuchten die beiden Forscher Robert Hanbury Brown und Richard Twiss (HBT) erstmals die Quantenstatistik von Photonen (s. Kap. 8 von [1]). Ihr Experiment markiert damit in gewissem Sinn den Beginn der modernen Quantenoptik; insbesondere Roy Glauber entwickelte die zugehörige Theorie und erhielt dafür eine Hälfte des Nobelpreises für Physik 2005.^{*)}

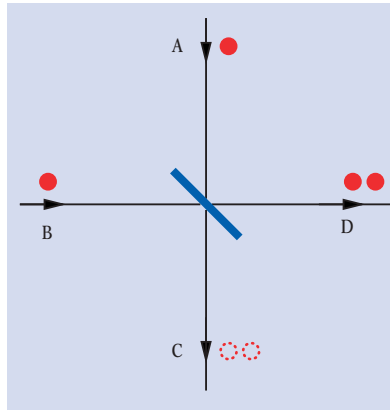
Der HBT-Effekt beruht auf der Ununterscheidbarkeit quantenmechanischer Teilchen. Klassische Teilchen mit den gleichen physikalischen Eigenschaften lassen sich im Prinzip numerieren und unterscheiden, quantenmechanische Teilchen wie Photonen oder Elektronen dagegen nicht. Quantenmechanische Teilchen fallen in zwei fundamental

Dipl.-Phys. Dennis Heine und Prof. Dr. Jörg Schmiedmayer, Physikalisches Institut, Universität Heidelberg, Philosophenweg 12, 69120 Heidelberg

vgl. hierzu S. 6 in diesem Heft.

verschiedene Klassen, sie treten als Bosonen (z. B. Photonen) oder Fermionen (z. B. Elektronen) auf und unterscheiden sich in der Symmetrie der Wellenfunktion. Beim Vertauschen von zwei Bosonen ändert sich die Wellenfunktion nicht; das Vertauschen zweier Fermionen führt zu einem Minuszeichen (Pauli-Prinzip).

Man kann den HBT-Effekt grob an folgender Anordnung illustrieren: Wenn wir zwei identische Quantenteilchen *gleichzeitig* von zwei Seiten A, B auf einen halbdurchlässigen Spiegel mit Transparenz $T = 1/2$ senden (Abb.), gibt es *klassisch* vier Möglichkeiten, die Teilchen in den Detektoren C, D zu finden, nämlich (2, 0), (1, 1) [tritt zweimal auf bei unterscheidbaren Teilchen] und (0, 2). Für nicht-wechselwirkende Teilchen sind alle vier gleich wahrscheinlich. Zwei der vier Möglichkeiten führen zu jeweils einem Teilchen in einen Detektor, also ist $P(1, 1) = 1/2$. Unter Berücksichtigung der Unitarität der Streumatrix sagt die Quantenstatistik dagegen im Fall von Bosonen voraus, dass beide Teilchen im *gleichen* Endzustand sein müssen; also ist $P(1, 1) = 0$ und damit $P(2, 0) = P(0, 2) = 1/2$ erhöht im Vergleich zum klassischen Fall (s. Anhang 4 von [1]). Für Fermionen kommt hier das Pauli-Prinzip zum Tragen, sodass die beiden Teilchen



Treffen zwei identische Bosonen von den Seiten A und B auf einen Strahlteiler, so müssen sich anschließend beide Teilchen im gleichen Ausgang C bzw. D befinden.

immer in verschiedene Ausgänge gestreut werden, $P(1, 1) = 1$. Die Erhöhung der Streuwahrscheinlichkeit in den gleichen Arm für Bosonen wird „Bündelung“ oder *bunching* genannt. Zum Nachweis der Korrelationen genügt es auch, wenn die Teilchen bei A und B der gleichen Quelle entstammen und C und D durch *einen* Detektor ersetzt werden, der einzelne Teilchen nachweisen kann. Das Bunching äußert sich dann in zeitlichen Korrelationen der Detektionsereignisse.

Eine genauere Betrachtung zeigt, dass ein Laser nicht zum Nachweis des Bunching geeignet ist. Vielmehr weist eine kohärente Laserquelle *unkorreliertes* Photonenrauschen

auf – das sog. Poisson-Rauschen. Eine thermische Photonenquelle führt dagegen zu der beschriebenen Bündelung. Sie wurde im HBT-Experiment für Photonen nachgewiesen. In zwei etwa gleichzeitig durchgeführten Experimenten gelang es kürzlich nun auch, den Hanbury Brown und Twiss-Effekt mit bosonischen kalten Atomen nachzuweisen [2, 3].

Das Experiment der Gruppe um T. Esslinger (ETH Zürich) [2] geht von einer gefangenen Wolke von (bosonischen) Rubidium-87-Atomen aus. Die Atome wurden aus der Falle ausgekoppelt und dann durch einen optischen Mikroresonator geschickt. Weil sich die Resonanzfrequenz der Kavität durch die Anwesenheit eines Atoms ändert, ist es möglich, *einzelne* Atome zu zählen und direkt die Verteilung der innerhalb einer Zeit T auftretenden Atomzahl zu bestimmen. In der Korrelationsfunktion zweiter Ordnung $g^{(2)}(\tau)$, d. h., der bedingten Wahrscheinlichkeit dafür, ein Atom zur Zeit τ zu messen, wenn eins zur Zeit 0 gemessen worden ist, wird das Bunching für eine *thermische* Wolke als Erhöhung von $g^{(2)}$ für kleine Zeiten sichtbar. Dagegen erwartet man bei einem Bose-Einstein-Kondensat (Atomlaser) eine konstante $g^{(2)}$ -Funktion, d. h. keinerlei Korrelation zwischen aufeinanderfolgenden Atomen. A. Öttl und Kollegen haben nun genau diese Erwartung experimentell bestätigt, was eine Poisson-Verteilung der Atomzahl pro Zeiteinheit vermuten lässt. Um den Effekt einer thermischen Quelle zu simulieren, wurde zum Auskoppeln ein rauschbehaftetes breitbandiges Mikrowellenfeld verwendet, was experimentell zu einem Maximum von $g^{(2)}$ bei $\tau = 0$ und damit zu einer gebündelten Verteilung führte. Bemerkenswerterweise ergaben sich für höhere Korrelationsfunktionen Abweichungen von der erwarteten Statistik – eine vollständige Erklärung steht hier allerdings noch aus.

Der Gruppe von A. Aspect (Orsay) gelang es, die räumlichen Korrelationen in einer Atomwolke direkt auszumessen und damit das Bunching in einer thermischen Wolke nachzuweisen [3]. Die verwendete Methode ist sehr elegant: Die Atomwolke fällt im Gravitationsfeld auf einen Mikrokanalplattendetektor und wird dort mit einer Ortsauflösung von $250 \mu\text{m}$ in xy -Richtung und 2 nm in z -Richtung detektiert,

Prof. Dr. Wolfgang Belzig, Fachbereich Physik, Universität Konstanz, 78457 Konstanz; Prof. Dr. Christoph Bruder, Department Physik und Astronomie, Universität Basel, Klingelbergstraße 82, CH-4056 Basel

KURZGEFASST...

■ Bose-Einstein-Kondensation im Festkörper

Zehn Jahre nach der ersten Erzeugung eines Bose-Einstein-Kondensats (BEK) in einem Atomgas und nach vielen Versuchen, einen solchen makroskopischen Quantenzustand auch in einem Festkörper nachzuweisen, haben Physiker aus Dresden gemeinsam mit Kollegen aus Russland, England und Polen nun ein BEK von Magnonen in der Verbindung Cs_2CuCl_4 nachgewiesen. Bei einem Magnetfeld von rund $8,5 \text{ T}$ macht sich die Kondensation dieser magnetischen Spinwellen in einer kleinen Änderung der spezifischen Wärme bemerkbar, die die Autoren bei Temperaturen im Millikelvin-Bereich gemessen haben. T. Radu et al., Phys. Rev. Lett. 95, 127202 (2005)

■ Rekord in der Falle

Physikern am Max-Planck-Institut für Quantenoptik ist es gelungen, einzelne Rubidium-Atome in einer Falle 17 Sekunden lang zu speichern – das ist neuer Rekord. Gerhard Rempe und seine Mitarbeiter haben dazu einen Mikroresonator hoher Güte kombiniert mit einem ausgeklügelten Arrangement von Lasern zum Einfangen und Kühlen einzelner Atome. Damit ist es

möglich, die Wechselwirkung einzelner Atome mit einzelnen Photonen noch präziser zu kontrollieren – ein wichtiger Fortschritt im Hinblick auf die Quanteninformationsverarbeitung.

S. Nußmann et al., Nature Physics (2005), DOI 10.1038/nphys

■ Hall-Effekt mit Phononen

Beim gewöhnlichen Hall-Effekt führt ein Magnetfeld, das senkrecht zu einem elektrischen Strom wirkt, aufgrund der Lorentz-Kraft zu einer elektrischen Hall-Spannung senkrecht zu Magnetfeld und Stromrichtung. Wissenschaftler am Hochfeldmagnetlabor in Grenoble haben nun gezeigt, dass ein analoger Effekt auch für Phononen, die Vibrationsmoden eines Festkörpers, existiert. Sie legten dazu einen Temperaturgradienten an einen Kristall der paramagnetischen Verbindung $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ und senkrecht dazu ein Magnetfeld. Aufgrund der Kopplung von ausgewählten Phononen an das Magnetfeld entsteht dabei eine Temperaturdifferenz von bis zu $200 \mu\text{K}$ senkrecht zu Magnetfeld und äußerem Temperaturgradienten.

C. Strohm, G. L. J. A. Rikken und P. Wyder, Phys. Rev. Lett. 95, 155901 (2005)

wobei die z -Richtung durch die unterschiedlichen Fallzeiten identifiziert wird. Bei hohen Temperaturen, d. h. im thermischen Fall, beobachten die Autoren erhöhte Koinzidenzwahrscheinlichkeiten bei kleinen Abständen. Bei einem Bose-Einstein-Kondensat finden Schellekens et al. in Übereinstimmung mit dem Experiment der Esslinger-Gruppe eine konstante Korrelationsfunktion zweiter Ordnung.

Diese Experimente sind zusammen mit [4, 5] die ersten Vorboten von Korrelationsmessungen an einer Reihe von hochinteressanten Materiezuständen, die wir in naher Zukunft erwarten dürfen. Wie in der Quantenoptik [1] und der elektronischen mesoskopischen Physik [6] werden Fluktuationen und Korrelationen höherer Ordnung zur wichtigen Informationsquelle werden, die es erlaubt, Quantenzustände ultrakalter bosonischer oder fermionischer Atome besser zu verstehen. Auch für fundamentale

Fragen der Quantenphysik, wie beispielsweise die kontrollierte Verschränkung vieler Teilchen, eröffnen diese Korrelationsexperimente neue Wege.

WOLFGANG BELZIG UND
CHRISTOPH BRUDER

- [1] H. Paul, Photonen, Teubner, Stuttgart (1999)
- [2] A. Öttl, S. Ritter, M. Köhl und T. Esslinger, Phys. Rev. Lett. **95**, 090404 (2005)
- [3] M. Schellekens, R. Hoppeler, A. Perrin, J. Viana Gomes, D. Boiron, A. Aspect und C.I. Westbrook, Science Express (2005), DOI 10.1126/science.1118024
- [4] S. Fölling, F. Gerbier, A. Widera, O. Mandel, T. Gericke und I. Bloch, Nature **434**, 481 (2005)
- [5] M. Greiner, C. A. Regal, J. T. Stewart und D. S. Jin, Phys. Rev. Lett. **94**, 110401 (2005)
- [6] Yu. V. Nazarov (Hrsg.), Quantum Noise in Mesoscopic Physics, Kluwer, Dordrecht (2003)

Das Geheimnis des Perlmutter

Perlmutter beeindruckt nicht nur aufgrund seines schillernden Farbspiels, sondern auch, weil es äußerst bruchfest ist. Verschiedene Muscheln und Schnecken bilden dieses Material, das zu 97 % aus Kalk besteht, aber eine tausend Mal höhere Bruchfestigkeit aufweist als dieser. Diese Eigenschaft verdankt es einem schichtförmigen Aufbau aus weichen organischen Schichten und harten, nicht einmal μm dünnen Plättchen aus Aragonit, einer rhombischen Modifikation von Kalk (CaCO_3). Während man bisher angenommen hatte, dass die Kristallisation dieser Plättchen durch geordnete Eiweißschichten bestimmt wird, haben Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung sowie der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung nun gezeigt, dass diese

Vorstellung nicht zutrifft.^{*)} Unter dem hochauflösenden Transmissionselektronenmikroskop (TEM) erkannten sie stattdessen, dass die Plättchen von einer nur 5 nm dünnen Schicht aus amorphem CaCO_3 umgeben sind, deren Entstehung und Funktion noch ungeklärt sind.

Die Abbildung zeigt eine Schale der Muschel *Haleotis laevigata* sowie mikroskopische Aufnahmen mit von links nach rechts wachsender Auflösung. Im rechten Teilbild, das einen in natura ca. 15 nm großen Ausschnitt zeigt, ist die

kristalline Struktur des Plättchens mit der amorphen Schicht (oben) zu erkennen. Gelänge es, das Bauprinzip zu kopieren, so würde dies die Entwicklung neuartiger Baumaterialien revolutionieren. (Quelle: MPG)

^{*)} N. Nassif et al., PNAS **102**, 12653 (2005)

