

($\sim T^{20}$), die durch die $^{14}\text{N}+\text{p}$ -Reaktion gegeben wird (Abb., oben). Der CNO-Zyklus dominiert also über die pp-Ketten, falls die Temperatur nur geringfügig höher ist als im jetzigen Sonneninneren ($T \sim 15,72 \cdot 10^6$ K). Dies ist zum Beispiel in Sternen der Fall, die etwas massereicher als die Sonne sind, und wird auch in der späteren Entwicklung der Sonne gelten, wenn der Wasserstoffvorrat im Sonneninneren zu Ende geht. Dann wird die Energieausbeute aus dem Wasserstoffbrennen für die Energiebalance der Sonne nicht mehr ausreichen und das Sonneninnere wird sich gravitativ zusammenziehen, um die Energiegewinnung durch eine höhere Temperatur zu steigern. Das Wasserstoffbrennen geht dann vom pp-Zyklus zum CNO-Zyklus über. Im Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sternentwicklung ist das durch einen markanten Abknickpunkt gekennzeichnet, an dem der Stern die Hauptreihe verlässt und in den „Roten-Riesen-Ast“ übergeht (Abb., unten). Die Leuchtstärke an diesem Punkt hat sich als ein guter Indikator für die Altersbestimmung erwiesen und wurde zum Beispiel benutzt, um das Alter von Kugelsternhaufen, den ältesten Objekten in unserer Galaxie, zu bestimmen. Durch die replizierte $^{14}\text{N}+\text{p}$ -Rate steigt das implizierte Alter dieser Kugelsternhaufen nun von ca. 13 Milliarden Jahren um etwa 0,7 bis 1 Milliarde Jahre [4, 5], da der CNO-Zyklus erst etwas später in der Sternentwicklung über den pp-Zyklus dominiert. Bei bekannter Leuchtstärke und Entfernung von Kugelsternhaufen ist das aus dem Abknickpunkt deduzierte Alter also nun größer als vorher angenommen. Da dies eine untere Schranke für das Alter unserer Milchstraße und des Universums darstellt, hat die verbesserte Altersbestimmung der Kugelsternhaufen interessante Konsequenzen für die Kosmologie und verstärkt die Notwendigkeit einer positiven kosmologischen Konstanten [4].

KARLHEINZ LANGANKE UND
MICHAEL WIESCHER

- [1] T. Kirsten, Phys. Bl. September 2001, S. 23
- [2] A. Formicola et al., (LUNA), Phys. Lett. B **591**, 61 (2004)
- [3] J. N. Bahcall und M. H. Pinsonneault, PRL **92** (2004) 121301
- [4] G. Imbriani et al., Astron. & Astrophys. **420**, 625 (2004)
- [5] S. Degl'Innocenti et al., Phys. Lett. B **590**, 13 (2004)

Der Beugung ein Schnippen schlagen

Experimente mit verschränkten Photonen und Ionen zeigen den Weg zu verbesserter Auflösung unterhalb des Beugungslimits

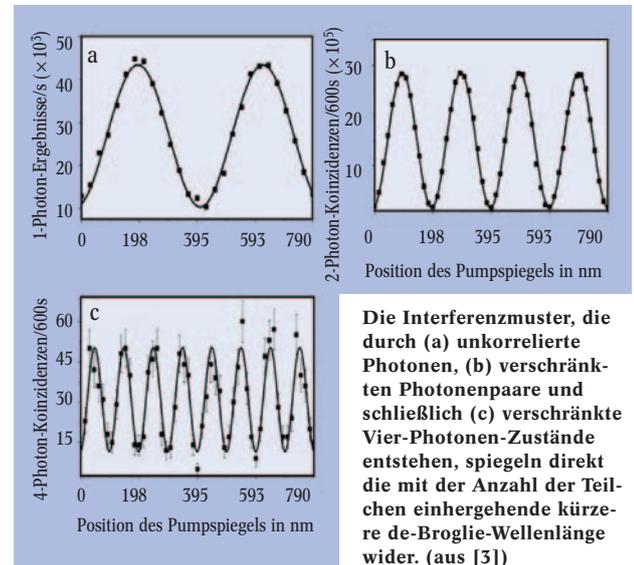
Verschränkung und Superposition bilden die Grundlage für eine Vielzahl faszinierender Effekte in der Quantenwelt, die uns in der klassischen Physik verborgen bleiben. Neben der Quanteninformation kann auch die Metrologie diese neuen Phänomene nutzen. So lässt sich bei Messungen mit verschränkten Vielteilchensystemen die Auflösungsgrenze deutlich senken und in der Präzisionspektroskopie das Signal/Rauschverhältnis wesentlich verbessern. Drei vor kurzem durchgeführte Experimente mit verschränkten Ionen [1] und Photonen [2, 3] demonstrieren dies in beeindruckender Weise.

Besonders deutlich werden die Vorteile von verschränkten Zuständen bei interferometrischen Messungen, bei denen zum Beispiel eine Positionsänderung oder eine Frequenzdifferenz durch die Messung einer Phase bestimmt wird. Jede Messung ist mit einer bestimmten Unsicherheit behaftet. Wiederholen wir die Messung N -mal oder führen sie gleich mit N unabhängigen Teilchen durch, so sinkt diese Unschärfe (Varianz) der beobachteten Phase um einen Faktor $1/\sqrt{N}$. Diesen Fall erhält man, wenn sich N Teilchen, z. B. Photonen, in einem Mach-Zehnder-Interferometer unabhängig voneinander in einer Superposition auf den Wegen A und B ausbreiten.

Gelingt es hingegen, diese N Photonen in einem verschränkten Zustand zu präparieren, in dem die Photonen entweder alle im Weg A oder alle im Weg B gefunden werden, so beobachtet man den N -fachen Phasenschub. Vereinfachend lässt sich das Verhalten dieser N verschränkten Teilchen mit einem „Molekül“ aus eben diesen N Teilchen vergleichen. Da die Phasendifferenz in einem Interferometer auch von der Wellenlänge der interferierenden Teilchen abhängt, verwendet man oft das Bild der um den Faktor $1/N$ verkürzten de Broglie-Wellenlänge. Aufgrund der N -fachen Verstärkung der Phasenänderung ist die Unschärfe um $1/N$ kleiner verglichen mit der Messung an einem einzelnen Teilchen, bzw. um den Faktor $1/\sqrt{N}$ ver-

glichen mit einer Messung an gleich vielen, unkorrelierten Teilchen.

Erste Experimente mit zwei verschränkten Photonen oder Ionen zeigten bereits die verbesserte Auflösung [4]. Die beobachtete Verbesserung der Messunschärfe hängt allerdings stark von der Qualität der Zustandspräparierung ab. Für sinkenden Verschränkungsgrad steigt die beobachtete Unschärfe



Die Interferenzmuster, die durch (a) unkorrelierte Photonen, (b) verschränkten Photonenpaare und schließlich (c) verschränkte Vier-Photonen-Zustände entstehen, spiegeln direkt die mit der Anzahl der Teilchen einhergehende kürzere de-Broglie-Wellenlänge wider. (aus [3])

sehr schnell auf die Schrotrauschgrenze an [5].

Zur Erzeugung von verschränkten Photonenpaaren mit Wellenlänge λ benötigt man obendrein einen Laser mit der halben Wellenlänge $\lambda/2$. Und damit erhält man natürlich die gleiche Auflösung wie mit dem verschränkten Photonenpaar. Daher war es das erklärte Ziel einiger Arbeitsgruppen, Experimente mit mehr als zwei Teilchen durchzuführen und so das Beugungslimit zu durchbrechen.

Durch konsequente Weiterentwicklung der experimentellen Methoden gelang es nun Mitchel et al. [2] sowie Walther et al. [3], die verkürzte de-Broglie-Wellenlänge von verschränkten Drei- bzw. Vier-Photonen-Zuständen zu demonstrieren. Im Drei-Photonen-Experiment wurde die Verschränkung in der Polarisation erzielt [2]. Die drei Photonen, die sich im gleichen Strahl ausbreiteten, hatten entweder alle horizontale oder vertikale lineare Polarisation, und ein Quarzplättchen erzeugte daher den dreifachen Phasenschub als es seiner Doppelbrechung bei der tatsächlichen Wellenlänge der Photonen von 810 nm entspricht. Das Vier-Photonen-Experiment der Wiener Gruppe erzeugt mittels gepulster parametrischer „down

Prof. Dr. Karlheinz Langanke, Institute of Physics and Astronomy, University of Aarhus, Ny Munkegade, 8000 Aarhus C, Dänemark; Prof. Dr. Michael Wiescher, Dept. of Physics, University of Notre Dame, USA

conversion“ durch Rückreflexion des Pumpstrahls ($\lambda=390$ nm) an einem Spiegel gleichzeitig vier Photonen ($\lambda=780$ nm) in zwei unterschiedlichen Richtungen [3]. Diese Änderung der eigentlichen Mach-Zehnder-Konfiguration ergibt eine effizientere Detektionsmöglichkeit und damit eine höhere Ausbeute der doch sehr seltenen Mehrphotonenergien. Eine Polarisationsanalyse unterdrückt unerwünschte Beiträge höherer Ordnung und ergibt dadurch einen sehr guten Interferenzkontrast. Eine Verschiebung des Spiegels verursacht auf Grund der kurzen Wellenlänge des daran reflektierten Lichts einen Phasenschub von 2ψ bei der Beobachtung von Photonenpaaren und damit eine Phasendifferenz von 4ψ bei Detektion aller vier Photonen. In allen Messungen werden Photonen mit einer Wellenlänge von $\lambda=790$ nm beobachtet, das Interferenzmuster jedoch spiegelt die entsprechend λ/N verkürzte de-Broglie-Wellenlänge bzw. die erhöhte Phasenempfindlichkeit wider. Für $N=4$ entspricht dies einer Wellenlänge von 197,5 nm und ist damit auch entsprechend kürzer als selbst die Wellenlänge des UV-Pumplasers bei 395 nm (Abb.).

Das Experiment von Leibfried et al. [1] verbessert die Empfindlichkeit der Ramsey-Spektroskopie. Hierbei wurden drei Ionen in einem verschränkten Zustand präpariert, bei dem entweder alle Ionen im angeregten Zustand oder im Grundzustand gefunden werden. Dank des sehr hohen Verschränkungsgrades gelang es, die Auflösung um einen Faktor 1,45 gegenüber einer Messung an vier unkorrelierten Ionen zu steigern.

Die Verschränkung lässt sich also nutzen, um die Empfindlichkeit und Auflösung in interferometrischen Messungen zu erhöhen. Bei verschränkten Ionen, die man mittlerweile mithilfe der ersten Quantengatter kontrolliert erzeugen kann, ist eine deutlich verbesserte Präzisionspektroskopie bereits für relativ wenige Ionen zu erwarten. Im Prinzip lassen sich auch die Interferenzexperimente mit Photonen auf mehr Teilchen erweitern. Notwendig hierfür sind aber vor allem effizientere Detektoren und Quellen. Damit wäre es auch möglich, Phasen- und Positionsmessungen mit verschränkten Photonen wesentlich genauer durchzuführen als mit herkömmlicher Interferometrie.

HARALD WEINFURTER

- [1] D. Leibfried et al., *Science* **304**, 1476 (2004)
- [2] M. W. Mitchell et al., *Nature* **429**, 161 (2004)
- [3] Ph. Walther et al., *Nature* **429**, 158 (2004)
- [4] J. G. Rarity et al., *Phys. Rev. Lett.* **65**, 1348 (1990); Z. Y. Ou et al., *Phys. Rev. A* **42**, 2957 (1990); V. Meyer et al., *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5870 (2001)
- [5] S. Huelga et al., *Phys. Rev. Lett.* **79**, 3865 (1997)

Komplexe Kompositionen

Neue Ergebnisse zum fraktionalem Quanten-Hall-Effekt lassen vermuten, dass Composite Fermions – aus Ladungen und Flussquanten zusammengesetzte Quasiteilchen – komplexere Eigenschaften besitzen als zunächst angenommen.

Der ganzzahlige Quanten-Hall-Effekt (QHE) und insbesondere seine gebrochenzahlige Variante, der fraktionale Quanten-Hall-Effekt (FQHE), haben sich in den vergangenen zwei Jahrzehnten zu einem zentralen Thema der Festkörperphysik entwickelt. Beiden Effekten liegen die Eigenschaften von Elektronen zugrunde, die sich unter dem Einfluss eines Magnetfelds in zwei Raumdimensionen bewegen. Obwohl bereits bekannt war, dass es in zwei Dimensionen eine Klasse von Quantenstatistiken gibt, die zwischen der Bose- und der Fermi-Statistik interpolieren und höchst merkwürdige Konsequenzen be-

sitzen, waren die Komplexität und Vielfalt dieser Quantenwelt von niemandem vorhergesagt worden.

Die quantenmechanischen Energieniveaus von Elektronen in einem Magnetfeld B sind die Landau-Niveaus $E=(n+1/2)\hbar eB/m$, wobei m die effektive Masse der Elektronen und n eine natürliche Zahl ist. Unter dem ganzzahligen Quanten-Hall-Effekt versteht man das Auftreten von Plateaus im Hall-Widerstand R_{xy} , wenn eine ganze Zahl j von Landau-Niveaus mit Elektronen besetzt ist. Den Plateaus entsprechen die Hall-Leitwerte je^2/h . Die Hall-Plateaus sind von ausgeprägten Minima im Magnetowiderstand R_{xx} begleitet (Abb.). Beim fraktionalem Quanten-Hall-Effekt treten Plateaus auf, wenn ein rationaler Bruchteil $\nu=p/q$ der Zustände mit Elektronen besetzt ist (p und q ganzzahlig, q ungerade). Der Füllfaktor ν ist das Verhältnis von Elektronenzahldichte n_e und der Dichte der Flussquanten $n_B=eB/h$ des äußeren Magnetfelds. In der Nähe von $\nu=1/2$ oszilliert der Magnetowiderstand als Funktion von B mit verschwindender Amplitude. Diese Plateaus lassen sich im Gegensatz zum QHE ohne eine Berücksichtigung der Coulomb-Wechselwirkung zwischen den Elektronen nicht erklären. Robert B. Laughlin war der erste, der mit seiner „inkompressiblen Elektronenflüssigkeit“ einen Weg zum physikalischen Verständnis aufzeigte [2].

Ein anderer Zugang beruht auf dem Aharonov-Bohm-Effekt. Demnach erhält die Wellenfunktion ei-

KURZGEFASST...

Quantenteleportation mit Atomen

Zwei Arbeitsgruppen von der Uni Innsbruck bzw. vom NIST in Boulder (Colorado, USA) ist es erstmals gelungen, Quantenzustände nicht nur zwischen Photonen, sondern auch zwischen Atomen zu teleportieren. Die Physiker erzeugten eine Superposition zweier Zustände eines einzelnen Ions in einer Falle. Diesen Zustand teleportierten sie – mit jeweils unterschiedlichen Techniken – zu einem zweiten Ion (B) mit Hilfe eines dritten „Hilfs-Ions“ (A), das mit B verschränkt war.

M. Riebe et al., *Nature* **429**, 734 (2004);
M. D. Barrett et al., *Nature* **429**, 737 (2004)

Umschaltbare Nanoröhrchen

Halbleitende Kohlenstoff-Nanoröhrchen lassen sich im Magnetfeld, verursacht durch den Aharonov-Bohm-Effekt, metallisch machen und umgekehrt. Das berichten zwei amerikanische Physiker-Teams: Die Arbeitsgruppe um J. Kono entdeckte, dass im Gegensatz zu gewöhnlichen Halbleitern

bei Nanoröhrchen die Bandlücke zwischen Leitungs- und Valenzband mit steigendem Magnetfeld schrumpft. A. Bezryadin und Kollegen zeigten, dass sich bei mehrwandigen metallischen Nanoröhrchen die Bandlücke mit steigendem Magnetfeld von zunächst Null an ausdehnt und ab einer gewissen Feldstärke wieder verschwindet.

S. Zaric et al., *Science* **304**, 1129 (2004);
U. C. Coskun et al., *Science*, **304**, 1132 (2004)

Genauere Top-Quark-Masse

Die internationale DZero-Kollaboration am amerikanischen Fermilab hat die Masse des Top-Quarks M_t mit noch größerer Präzision bestimmt. Demnach beträgt der Mittelwert von M_t nun $178,0 \pm 4,3$ GeV/ c^2 . M_t schränkt den Wert für die Masse des hypothetischen Higgs-Bosons ein. Der wahrscheinlichste Wert hierfür liegt nun bei 96 bis 117 GeV/ c^2 , die Obergrenze verschiebt sich von 219 auf 251 GeV/ c^2 .

V. M. Abazov et al. (DØ Collaboration), *Nature* **429**, 638 (2004)

Prof. Dr. Harald Weinfurter, Sektion Physik, Ludwig-Maximilians-Universität, Schellingstraße 4/III, 80799 München