

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  $2\psi$  bei der Beobachtung von Photonenpaaren und damit eine Phasendifferenz von  $4\psi$  bei Detektion aller vier Photonen. In allen Messungen werden Photonen mit einer Wellenlänge von  $\lambda=790$  nm beobachtet, das Interferenzmuster jedoch spiegelt die entsprechend  $\lambda/N$  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  $\nu$  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

ner Ladung  $e$ , die eine geschlossene Bahn um eine Linie des magnetischen Flusses der Stärke  $\phi = ah/e$  beschreibt, einen Phasenfaktor  $e^{2\pi i \alpha}$ . Das sieht man, indem man eine Eichtransformation  $\psi(r) \rightarrow \psi(r) e^{i\alpha\varphi(r-r_0)}$  ( $\varphi$  azimuthaler Winkel) ausführt, die den Hamilton-Operator einer Ladung am Ort  $r$  im Vektorpotential der Flusslinie am Ort  $r_0$  in den Hamilton-Operator einer freien Ladung überführt. Die Eichtransformation inkorporiert somit die Flusslinie in die Ladung.

Für ein System aus  $N$  Ladungen stellt man sich vor, dass an jede Ladung eine solche Flusslinie angeheftet wird. Die Vielteilchen-Wellenfunktion besitzt dann die Form  $\psi(1 \dots N) = \psi(1 \dots N) \prod_{n < m} e^{i\alpha\varphi(r_n - r_m)}$ , an der man sofort erkennt, dass die statistischen Eigenschaften der Teilchen-Flusslinien-Komplexe von  $\alpha$  abhängen. Bei geradzahligem  $\alpha$  stimmt die Statistik der zusammengesetzten Teilchen mit derjenigen der Ausgangsteilchen überein. Ungeradzahliges  $\alpha$  macht jedoch aus Fermionen Bosonen und umgekehrt, da der Phasenfaktor beim Vertauschen zweier Teilchen einen Vorzeichenwechsel bewirkt. Nicht ganzzahliges  $\alpha$  interpoliert zwischen Fermion- und Boson-Statistik.

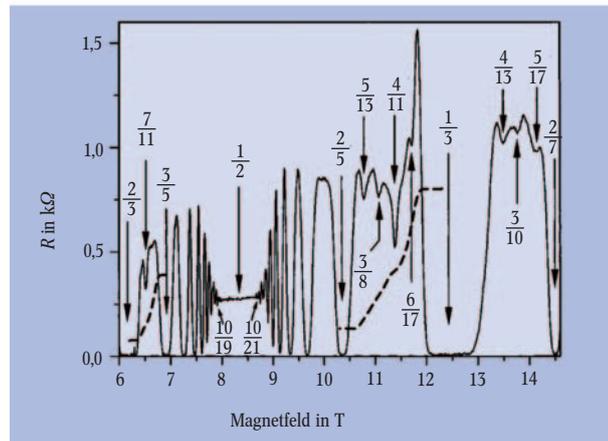
Intuitiv sehr einleuchtend, ermöglicht es das fiktive Eichfeld nun, den fraktionalen Quanten-Hall-Effekt der Elektronen abzubilden auf den ganzzahligen Quanten-Hall-Effekt von zusammengesetzten Teilchen aus Elektron und Flusslinien, die sich in einem effektiven Magnetfeld befinden [3]. Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass bei  $\nu = 1/2$  die Magnetowiderstandoszillationen verschwinden. Man führt zunächst mit der Eichtransformation ein räumlich fluktuierendes Eichfeld ein, das entgegengesetzt zum äußeren Magnetfeld gerichtet ist. Es besteht aus den Flusslinien, die an den Elektronen hängen. Die zugehörige Eichflussdichte ist proportional zur Elektronendichteverteilung. Mittelt man über alle Konfigurationen, so kann man das mittlere Eichfeld  $b = 2\pi\alpha\phi n_e$  benutzen, um das äußere Feld zu kompensieren. Wählt man z. B.  $\alpha = 1/\nu = 2$ , so wird das äußere Feld gerade bei  $\nu = 1/2$  kompensiert,  $b = B_{1/2}$ . Die zusammengesetzten Teilchen aus Elektron und Flusslinie sind dann Fermionen („Composite Fermions“) und sehen im Mittel kein Magnetfeld. Mehr noch, ersetzt man in der Coulomb-Wechselwirkungsenergie der Elektronen die Elektro-

nendichten durch die mittlere Eichflussdichte, so wird der Wechselwirkungsterm eine Konstante.

Im Mittel hat man dann Fermionen, die aus je einem Elektron und zwei Flussquanten bestehen und die *nicht* miteinander in Wechselwirkung stehen. Die Vermutung ist, dass sich ein solches System wie eine gewöhnliche Fermi-Flüssigkeit aus Elektronen verhalten sollte. Wenn das äußere Magnetfeld von dem mittleren Eichfeld abweicht, sollten sich also Landau-Niveaus bei Energien  $(n+1/2)\hbar e B^*/m^*$  ausbilden. Hier ist  $B^* = B - B_{1/2}$  das effektive Magnetfeld und  $m^*$  die effektive Masse der Composite Fermions. Letztere hängt von  $B^*$  ab und ist das einzige, was von der Wechselwirkung bleibt. Die Shubnikov-de-Haas-Oszillationen, die sich bei normalen Elektronen für  $B \rightarrow 0$  im Magnetowiderstand zeigen, müssten dann für  $B \rightarrow B_{1/2}$  auftauchen – und das sieht man tatsächlich bei  $B_{1/2}$  im Experiment (Abb). Bei größerem  $B^*$  sollten die Composite Fermions dann den ganzzahligen Quanten-Hall-Effekt zeigen, immer dann, wenn eine ganze Zahl  $p$  von Landau-Niveaus mit ihnen besetzt ist. Auf der ursprünglichen Magnetfeldskala entsprechen den ganzzahligen  $p$  rationale Füllfaktoren  $\nu = p/(ap+1) = 1/3, 2/5$  etc. Dies sind in der Tat diejenigen Werte, bei denen einige der prominentesten Widerstandsminima beobachtet werden (Abb).

So einleuchtend dies alles auf den ersten Blick ist und obwohl zahlreiche experimentelle Befunde das Bild von Elektron-Flusslinien-Komplexen mit Teilcheneigenschaften stützen [4], gibt es doch eine Reihe von Problemen, die das Modell der Fermi-Flüssigkeit zumindest ergänzungsbedürftig machen. Da ist zum einen die effektive Masse, die formal durch die *Eichfeldfluktuationen* entsteht und die für Energien in der Nähe der Fermi-Energie logarithmisch divergiert. Das macht die Fermi-Flüssigkeitstheorie zumindest problematisch [5]. Weiter gibt es Experimente zur Spinpolarisation der Grundzustände [6], die man ohne Wechselwirkungen zwischen den Composite Fermions kaum verstehen kann [7]. Und schließlich lehrt ein genauerer Blick auf die experimentellen Daten, dass es neben den Widerstandsminima bei den obigen ganzzahligen Füllfaktoren  $p$  eine Reihe weiterer ausgeprägter Minima gibt. Wenn es nun Wechselwirkun-

gen zwischen den Composite Fermions gibt – und das ist eigentlich ziemlich sicher – so sollte man auch ein Composite-Fermion-Analogon zum fraktionalen Quanten-Hall-Effekt der „normalen“ Elektronen erwarten. Nimmt man einmal an, dass dies bei Composite-Fermion-Füllfaktoren  $\nu^* = 1 + m/(2m \pm 1)$  ( $m$  ganzzahlig) der Fall wäre, dann würde dies zu Widerstandsminima bei Elektronenfüllfaktoren



Das Plateau bei Füllfaktor  $\nu = 1/2$  sowie die Minima bei z. B.  $1/3$  und  $2/5$  im Magnetowiderstand  $R_{xx}$  einer Elektroneninversionsschicht in einem AlGaAs/GaAs-Quanten-Hall-System lassen sich verstehen als ganzzahliger Quanten-Hall-Effekt von Composite Fermions aus Elektron und zwei Flussquanten. Die Minima bei z. B.  $7/11$  und  $4/11$  entsprechen hingegen dem fraktionalen QHE dieser Composite Fermions. Die gestrichelten Kurven zeigen den Hall-Widerstand  $R_{xy}$  in der Nähe dieser Werte. (nach [1]).

$\nu = (3m \pm 1)/(8m \pm 3)$  führen, von denen einige in der Abb. zu sehen sind ( $4/11, 5/13$ ). Erste numerische Rechnungen scheinen diese Hypothese zu unterstützen [8]. Falls sich dies bewahrheitet, ist das Experiment von Pan et al. [1] der bisher deutlichste Hinweis darauf, dass Composite Fermions ebenso wie Elektronen in zwei Raumdimensionen sehr wahrscheinlich *keine* Fermi-Flüssigkeit bilden.

BERNHARD KRAMER

[1] W. Pan et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 016801 (2003)  
 [2] R. B. Laughlin, Phys. Rev. Lett. **50**, 1395 (1983)  
 [3] J. K. Jain, Phys. Rev. Lett. **63**, 199 (1989)  
 [4] R. L. Willett, Adv. Phys. **46**, 447 (1997)  
 [5] B. I. Halperin, P. A. Lee und N. Read, Phys. Rev. B **47**, 7312 (1993)  
 [6] I. V. Kukushkin, K. v. Klitzing und K. Eberl, Phys. Rev. Lett. **82**, 3665 (1999)  
 [7] E. Mariani et al., Phys. Rev. B **66**, R241303 (2002); E. Mariani et al., Ann. Phys. (Leipzig) **11**, 926 (2002)  
 [8] C.-C. Chang und J.K. Jain, Phys. Rev. Lett. **92**, 196806 (2004)

Prof. Dr. Bernhard Kramer, I. Institut für Theoretische Physik, Universität Hamburg, Jungiusstraße 9, 20355 Hamburg