

verschmelzender Neutronensterne. Das ist ein Meilenstein in der Erforschung der Gammastrahlenausbrüche. Kurze Bursts wurden in Regionen mit geringer Sternentstehungsrate (z. B. im Halo einer elliptischen Galaxie wie im Falle von GRB 050709) entdeckt, während lange Bursts immer mit hohen Sternentstehungsraten verbunden sind. Das ist konsistent damit, dass kurze Bursts von alten Populationen verschmelzender Doppelsterne herrühren, während lange Bursts im Endstadium kurzlebiger massereicher Sterne auftreten.<sup>6)</sup>

Die Thematik der kurzen Bursts ist physikalisch außerordentlich interessant und verspricht weitere spannende Entdeckungen. Das derzeit favorisierte Szenario hat zudem bedeutende unmittelbare Implikationen für die Gravitationswellendetektoren der nächsten Generation, die primär das Verschmelzen von Neutronensternen nachweisen dürften. Denn wenn die Reichweite der Detektoren bis in Entfernungen jenseits des Virgo-Haufens vorstößt, dann erreichen sie Gebiete, wo die ersten Vertreter

der Burster-Population auftauchen sollten. Die Ortungsgenauigkeit der Gravitationswellendetektoren wird jedoch vergleichsweise gering sein. Sollten solche Verschmelzungen aber zugleich im Gammaband als GRB detektierbar sind, dann ließe sich die Quelle durch das zeitgleiche Auftreten eines kurzen Bursts und eines Gravitations-Signals letztlich exakt am Himmel lokalisieren. Das würde der gesamten Theorie starker Gravitationsfelder sehr wahrscheinlich einen merklichen Schub verleihen.

DIETER H. HARTMANN

- [1] C. Kouveliotou et al., *Astrophys. J.* **413**, L101 (1993)
- [2] S. E. Woosley, *Astrophys. J.* **405**, 273 (1993)
- [3] S. Klose et al., *Astron. J.* **128**, 1942 (2004)
- [4] N. Kawai et al., *GCN Circular No.* **3937** (2005)
- [5] M. Ruffert und H.-Th. Janka, *Astron. Astrophys.* **380**, 544 (2001)
- [6] N. Gehrels, et al., *Nature* **437**, 851 (2005)
- [7] D. B. Fox et al., *Nature* **437**, 845 (2005)
- [8] J. Hjorth et al., *Nature* **437**, 859 (2005)

## Spin statt Ladung

### *Neue Ergebnisse zum Spintransport in Kohlenstoff-Nanoröhrchen und zweidimensionalen Elektronengasen untermauern das Potenzial der Spintronik.*

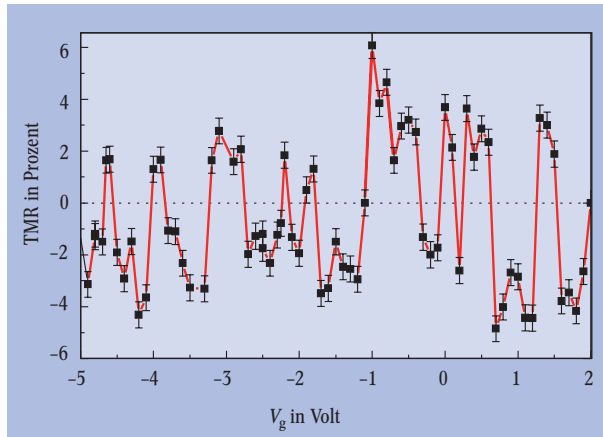
Während die konventionelle Elektronik nur von der Ladung der Elektronen Gebrauch macht, zielt die Spintronik darauf ab, sich auch den Spin der Elektronen dienstbar zu machen, um neue oder auch effizientere Wege zur Informationsverarbeitung zu entwickeln [1]. Auf diesem Weg haben Sangeeta Sahoo und Mitarbeiter an der Universität Basel jetzt einen Spin-Feldeffekttransistor vorgestellt [2], bei dem spinpolarisierte Elektronen durch ein Kohlenstoff-Nanoröhrchen wandern. Mit einem elektrischen Feld können sie den Spintransport durch das Nanoröhrchen derart verändern, dass sie abwechselnd einen positiven und einen negativen Tunnelmagnetowiderstand erhalten. Auf diese Weise haben sie ein Spintronik-Bauelement realisiert, beim dem das Eingangssignal an einem

6) Die Szenarien für beide Arten von Bursts sind zudem im Einklang mit den Daten des ehemaligen Weltraum-Gamma-Teleskops BATSE (Burst and Transient Source Experiment), aus denen sich die Rate von 0,1 bis 1 Ereignissen pro Jahr und Kubik-Gigaparsec abschätzen lässt.

**Prof. Dr. Dieter H. Hartmann, Department of Physics and Astronomy, Clemson University, South Carolina, USA**

Kontakt das Ausgangssignal an den anderen beiden Kontakte steuert. Damit steht die Grundfunktion eines Transistors zur Verfügung, sodass dieses Bauelement den Weg zu komplexeren Einheiten weisen kann.

Wie funktioniert der Spintransistor von Sahoo? Elektronen bewegen sich als Welle durch den Festkörper. An einem Hindernis (z. B. Einfach- oder Doppelbarriere,



**Abb. 1:** Bei einem Transistor, der aus einem Kohlenstoff-Nanoröhrchen zwischen zwei ferromagnetischen PdNi-Kontakten besteht, lässt sich der Tunnelmagnetowiderstand über die angelegte Gate-Spannung steuern (nach [2]).

Fabry-Perot-Resonator) interferiert die transmittierte mit der reflektierten Elektronenwelle. Konstruktive Interferenz ergibt einen großen Transmissionskoeffizienten, destruktive Interferenz verringert die Transmission. Deshalb oszilliert der Transmissionskoeffizient, wenn man entweder die Wellenlänge der einfallenden Elektronen oder die Form des Hindernisses verändert. In metallischen Kontakten lässt sich das Fermi-Niveau, welches die Wellenlänge der einfallenden Elektronen festlegt, nicht beeinflussen. Doch wenn das Hindernis durch einen Halbleiter oder ein Kohlenstoff-Nanoröhrchen gebildet wird, so lässt sich dessen Form und Höhe mit einem Gate-Kontakt variieren, sodass der Transmissionskoeffizient mit der Gatespannung durchgestimmt werden kann. Diese Fabry-Perot-Interferenzen sind in Nanostrukturen ein intensiv untersuchtes Forschungsgebiet.

Wenn wir Streuprozesse vernachlässigen, sind in dieser Anordnung die Elektronen mit Spin up bzw. Spin down entkoppelt, sodass die Spinorientierung der Elektronen erhalten bleibt, wenn sie durch das Bauelement wandern. Dies trifft auch dann zu, wenn es sich bei den Kontakten links und rechts von der Barriere um Ferromagneten handelt. Die Koppelung der Barriere an die Kontakte hängt in diesem Fall allerdings von der Spinorientierung der Elektronen ab. Wenn die Majoritäts-Elektronenspins in den beiden Kontakten parallel zueinander ausgerichtet sind, sodass Majoritäts-

spins wieder in ein Majoritätsband hinüberwandern, erhalten wir einen anderen Transmissionskoeffizienten als bei antiparallel ausgerichteten Elektronenspins, die vom Majoritäts- in das Minoritätsband übergehen. Dieser Effekt ist als Tunnelmagnetowiderstand bekannt. Der verwandte Riesenmagnetowiderstand wird in den Leseköpfen moderner Computerfestplatten ausgenutzt und hat auf diesem Gebiet eine große technologische Bedeutung erlangt.

Sahoo und Mitarbeiter haben als Barriere zwischen zwei ferromagnetischen PdNi-Kontakten ein Kohlenstoff-Nanoröhrchen eingebaut. Mithilfe einer Gatespannung können sie diese Barriere derart verändern, dass sie abwechselnd für die parallele bzw. antiparallele Spinkonfiguration den größeren Transmissionskoeffizienten erhalten. Abbildung 1 zeigt den von ihnen gemessenen Tunnelmagnetowiderstand, der als Funktion der Gatespannung oszilliert. Dieser nun von Sahoo beobachtete Effekt war zuerst von Thomas Schäpers (Forschungszentrum Jülich) und Mitarbeitern vorhergesagt worden [3].

In Sahoos Experiment ähnelt der Spintransport durch das Kohlenstoff-Nanoröhrchen dem Ladungstransport durch einen elektrischen Leiter. Im Allgemeinen verhält sich ein Spinstrom aber grundsätzlich anders als ein Ladungsstrom, wie Christopher Weber und Mitarbeiter

an der Universität von Kalifornien in Berkeley gezeigt haben [4]. Sie beobachten, dass eine räumlich lokalisierte Spinpolarisation in zweidimensionalen Elektronengasen in GaAs-Quantentrögen wesentlich langsamer diffundiert als eine räumlich lokalisierte Ladungsverteilung, obwohl in beiden Fällen Elektronen das Medium bilden, das die Diffusion vermittelt.

Der Transport elektrischer Ladung gehorcht der Kontinuitätsgleichung, wonach es für die Ladung wie auch bei einem Massenstrom keine Quellen und Senken geben kann. Stöße aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung zwischen den Elektronen wirken sich nur auf die Relativbewegung der Ladungsträger aus. Der Ladungstransport hängt dagegen nur von der Schwerpunktsbewegung der Elektronen ab, die deshalb durch die Coulomb-Wechselwirkung nicht beeinflusst wird.

Nun könnte man vermuten, dass der Spintransport mit Elektronen den gleichen Gesetzen gehorcht wie der Ladungstransport. Weil der Spin aber zwei Einstellungen einnehmen kann, folgt er tatsächlich eigenen Regeln. Wenn sich beispielsweise Elektronen mit Spin up nach links bewegen und die gleiche Anzahl mit Spin down nach rechts, so haben wir einen Spinstrom, obwohl netto kein elektrischer Strom fließt. Nun wirkt die Coulomb-Wechselwirkung natürlich auch zwischen Elektronen mit umgekehrtem Spin, sodass Stöße zwischen Elektronen in den gegenläufigen Spinströmen den

## KURZGEFASST...

### ■ Elektronen ohne Masse

Monolagen aus Graphit, Graphen genannt, sind Leiter mit bemerkenswerten Eigenschaften: Im Gegensatz zu gewöhnlichen zweidimensionalen Halbleiterstrukturen, in denen sich die Elektronen mithilfe einer effektiven Masse beschreiben lassen, verhalten sich Elektronen in Graphen, als seien sie masselose relativistische Teilchen. Dieser Unterschied manifestiert sich, wie kürzlich von zwei Arbeitsgruppen gezeigt, u. a. in der Lage der Plateaus beim Quanten-Hall-Effekt und könnte für elektronische Anwendungen von Graphen wichtig sein. *K. S. Novoselov et al., Nature 438, 197 (2005) und Y. Zhang et al, ibid. 201*

### ■ Hyper-verschränkte Photonen

Amerikanischen Physikern ist es gelungen, Photonenpaare zu erzeugen, die in allen Freiheitsgraden verschränkt sind. Dazu beleuchten sie mit einem Laser zwei aneinandergefügte Bariumborat-Kristalle unterschiedlicher Orientierung. In diesen nichtlinearen optischen Kristallen kann aus

einem Laserphoton ( $\lambda = 351$  nm) ein Photonenpaar der doppelten Wellenlänge  $\lambda$  (702 nm) entstehen. Wie die Autoren zeigen, sind diese Photonenpaare sowohl im Spin als auch im Bahndrehimpuls und in der Energie verschränkt. In der Quantenkommunikation wäre es damit möglich, mit einem Photonenpaar mehrere Quantenbits zu übertragen. *J. T. Barreiro et al., erscheint in Phys. Rev. Lett.*

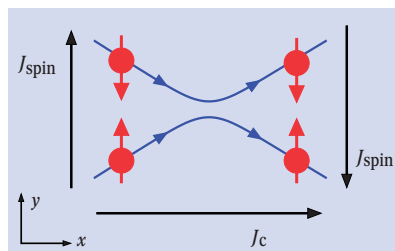
### ■ Erdbeben mit Gedächtnis

Hat in einem erdbebengefährdeten Gebiet schon länger kein Beben mehr stattgefunden, so erwartet man intuitiv, dass das nächste Beben allmählich „überfällig“ wird. Wie deutsche und israelische Physiker nun gezeigt haben, trifft diese Vorstellung nicht zu. Die Auswertung von weltweit stattgefundenen Beben mit der Stärke 2 bis 5,5 hat stattdessen einen „Gedächtniseffekt“ offenbart: Wenn der zeitliche Abstand zwischen zwei Beben gleicher Stärke lang war, so wird demnach auch das nächste Beben wieder lang auf sich warten lassen. *V. Livina et al., Phys. Rev. Lett. 95, 208501 (2005)*

Prof. Dr. Roland Winkler, Department of Physics, Northern Illinois University

Gesamtspinstrom reduzieren (Abb. 2). Ein Spinstrom hängt deshalb im Allgemeinen von der Coulomb-Wechselwirkung ab und kann nicht durch eine einfache „Spin-Kontinuitätsgleichung“ beschrieben werden.

Coulomb-Streuung beeinflusst nicht nur Drift-Spinströme, die durch spinabhängige Potentialdifferenzen getrieben werden, sondern auch den diffusiven Spintransport,



**Abb. 2:** Ein Stoß zwischen zwei Elektronen, die sich hier in  $x$ -Richtung bewegen, kann die Richtung des Spinstroms  $J_{\text{spin}}$  umkehren, obwohl der elektrische Strom  $J_c$  unverändert bleibt.

der durch Konzentrationsgefälle hervorgerufen wird. In zeitaufgelösten optischen Messungen haben Weber und Mitarbeiter die Spindiffusion in zweidimensionalen (2D) Elektronengasen in GaAs-Quantentrögen untersucht [3]. Sie lassen zwei nahezu parallele, aber zueinander senkrecht polarisierte Lichtpulse derart miteinander interferieren, dass im 2D-Elektronengas ein Spingitter entsteht, bei dem sich Streifen mit Elektronenspin up und down regelmäßig abwechseln. Mithilfe des Kerr-Effekts haben Weber und Mitarbeiter dann beobachtet, wie die Spinpolarisation aufgrund von Spindiffusion und -relaxation langsam wieder abklingt. Im Vergleich zur Ladungsdiffusion erhalten sie für die ausgerichteten Spins wesentlich kleinere Diffusionskoeffizienten. Die Messwerte stimmen mit theoretischen Vorhersagen von Irene D'Amico und Giovanni Vignale gut überein [5].

Die vorgestellten Arbeiten illustrieren einerseits das bemerkenswerte Potenzial der Spintronik. Sahoo und Mitarbeiter haben einen Spin-Feldeffekttransistor vorgestellt, der den Grundbaustein für komplexere Funktionen einer spinbasierten Informationsverarbeitung bilden kann. Andererseits macht Webers Arbeit die grundlegend andersartigen Merkmale einer spinbasierten Technologie deutlich.

ROLAND WINKLER

- [1] R. Winkler und M. Oestreich, *Physik Journal*, November 2004, S. 39
- [2] S. Sahoo et al., *Nature Phys.* **1**, 99 (2005)
- [3] Th. Schäpers et al., *Phys. Rev. B* **64**, 125314 (2001)
- [4] C. P. Weber et al., *Nature* **437**, 1330 (2005)
- [5] I. D'Amico und G. Vignale, *Europhys. Lett.* **55**, 566 (2001)

## ■ C<sub>60</sub> aus der Nähe betrachtet

**Mittels einer Kombination aus Rastertunnelspektroskopie und theoretischen Rechnungen ist es gelungen, die Jahn-Teller-Verzerrung geladener Fullerenmoleküle direkt zu beobachten.**

Nicht zuletzt wegen seiner hohen Symmetrie ist das Fulleren C<sub>60</sub> eines der faszinierendsten Moleküle. Die 60 Kohlenstoffatome bilden ein kugelförmiges Molekül, das mit seinen 12 Fünf- und 20 Sechsringen das molekulare Ebenbild eines Fußballs ist. Die außerordentliche Symmetrie des Moleküls spiegelt sich natürlich auch in seiner elektronischen Struktur wider: Die Energieniveaus sind hochgradig entartet. So weist etwa das niedrigste unbesetzte Orbital, das  $t_{1u}$ -Orbital, eine dreifache Entartung auf, es kann also bis zu sechs Elektronen fassen. Und weil C<sub>60</sub> sehr elektronegativer Natur ist, nimmt dieses Orbital auch begierig Elektronen auf. Die so entstehenden C<sub>60</sub>-Anionen mit teilweise gefülltem  $t_{1u}$ -Niveau scheinen also einen entarteten Grundzustand zu besitzen.

Bereits 1937 haben sich Hermann Jahn und Edward Teller mit genau solchen Situationen beschäftigt [1]. Sie sagten voraus, dass ein entarteter Grundzustand in der Regel nicht stabil ist. Um ihr Argument zu verstehen, stellen wir uns vor, dass wir die Symmetrie des C<sub>60</sub>-Moleküls reduzieren, etwa indem wir den „Fußball“ zusammendrücken. Die Entartung des  $t_{1u}$ -Orbitals wird dann bereits in erster Ordnung Störungstheorie gebrochen. Betrachten wir beispielsweise das C<sub>60</sub><sup>4-</sup>-Ion, so werden dann die vier zusätzlichen Elektronen die beiden niedrigsten Orbitale auffüllen. Sind diese gegenüber dem entarteten  $t_{1u}$ -Niveau abgesenkt, so sinkt die elektronische Energie linear mit der Deformation ab. Andererseits kostet die Verformung des Moleküls elastische Energie, die quadratisch mit der Deformation ansteigt. Im Grundzustand wird das Molekül-Ion also eine endliche Deformation