

aus Cambridge haben dieses Problem sehr elegant überwunden: Sie nutzten die Tatsache aus, dass die Laserintensität hauptsächlich bei niedrigen Frequenzen fluktuiert (bis zum Kilohertzbereich). Sie modulierten den Anregungsstrahl bei 5 MHz und bewirkten damit eine gleichartige Modulation des Lichtsignals der stimulierten Emission. Diese ließ sich elektronisch verstärken und nachweisen.

Verschiedene Anwendungen stellten die Brauchbarkeit dieses Verfahrens unter Beweis. So analysierten die Wissenschaftler damit die Verteilung bestimmter Chromoproteine in Bakterien. Sie verwendeten dabei je nach nachzuweisendem Chromophor Anregungswellenlängen zwischen 590 und 680 nm. Die Wellenlängen für die stimulierte Emission lagen etwa 70 bis 80 nm darüber. Hierbei kamen zwei optisch parametrische Oszillatoren mit einer Pulsdauer von 200 fs zum Einsatz, die durch einen Titan-Saphirlaser gepumpt wurden.

Zudem untersuchten die Forscher, wie sich das Arzneimittel TBO (Toluidin-blau O) aus der photodynamischen Therapie in der Haut verteilt. Verwendet wurden Laserleistungen von 0,1 bis 1 mW, die zu Fokusintensitäten unterhalb 1 MW/cm² führten. Um ein Bild zu erzeugen, wurden die zellulären Objekte mit diesen stark fokussierten gekoppelten Laserstrahlen rastermikroskopisch abgetastet. Elektronisch lassen sich die ortskodierten Signale der stimulierten Emission, die proportional zur Anregungs- und Stimulationsintensität sind, zu einem Bild zusammensetzen. Oberhalb und unterhalb der Fokusebene ist die stimulierte Emission gering. Daher sind dreidimensionale Bilder von intrazellulären Chromophoren möglich, deren Fluoreszenz konventionell nicht detektierbar ist.

Die Arbeit von Wei Min et al. zeigt eindrucksvoll, wie physikalisches Know-how zu wesentlichen Fortschritten in den Lebenswissenschaften und der zellulären Bio-

physik führen kann. Die stimulierte Emissions-Mikroskopie weist selbst einzelne Moleküle nach (< 5 Moleküle im Laserfokus). Die optische Auflösung ist dagegen vergleichbar mit konventionellen Methoden. Für viele biophysikalische und biomedizinische Anwendungen reicht sie jedoch nicht aus. Der nächste Schritt könnte daher sein, die bereits existierenden Methoden der supraauflösenden Mikroskopie [4, 5] so zu erweitern, dass sie auch Moleküle mit sehr schwacher oder nicht detektierbarer Fluoreszenz messen können. Dies würde den Blick auf dunkle Moleküle mit bislang unerreichter Auflösung eröffnen.

Christoph Cremer

Prof. Dr. Christoph Cremer, Kirchhoff Institut für Physik, Im Neuenheimer Feld 227, 69120 Heidelberg

- [1] J. B. Pawley (Hrsg.), Handbook of Biological Confocal Microscopy, 3. Aufl., Springer, Berlin (2006)
- [2] W. Min et al. Nature **461**, 1105 (2009)
- [3] A. Einstein, Phys. Z. **18**, 121 (1917); C. E. Hamilton et al., Annu. Rev. Phys. Chem. **37**, 493 (1986)
- [4] S. W. Hell, Science **316**, 1153 (2007); vgl. Physik Journal, Dezember 2007, S. 47
- [5] P. Lemmer et al., J. of Microscopy **235**, 163 (2009)

■ Solide Verschränkung

Supraleitende Nanostrukturen ebnen den Weg zur Erzeugung verschränkter Elektronenspins.

Korrelationen sind ein alltägliches Phänomen: Greift man sich z. B. aus einem Karton, der ein Paar Schuhe enthält, zufällig einen Schuh heraus und stellt fest, dass es der linke ist, dann weiß man ohne hineinzusehen, dass sich in der Schachtel ein rechter Schuh befindet. Klassisch betrachtet ist dies eine maximale Korrelation. Interessanterweise erlaubt aber die Quantenmechanik Formen noch stärkerer Korrelation. In ihrer berühmten Arbeit von 1935 kamen Einstein, Podolski und Rosen (EPR) aufgrund solcher seltsamen Korrelationen zum Schluss, dass die quantenmechanische Wellenfunktion zweier Teilchen (EPR Paar) nicht die gesamte Information über einen Zustand enthalte. Schrödinger kam nicht zum selben Schluss und führte in seiner Antwort auf den EPR-Artikel das Konzept der

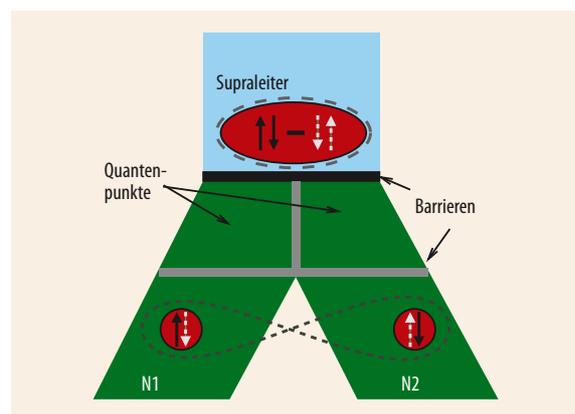


Abb. 1 In drei neuen Experimenten lassen sich spinverschränkte Cooper-Paare trennen und so in den beiden normalen Kontakten N1 und N2 als EPR-Paar nutzen. Dabei werden Quantenpunkte zur effizienten Trennung verwendet [1, 2]. Diese zusätzlichen Barrieren sind im dritten Experiment [3] nicht vorhanden.

Verschränkung ein. Während in der Diskussion zwischen Einstein und Schrödinger die Grundlagen der Quantenmechanik im Mittelpunkt standen, wurden in der Pionierphase der Quanteninformation zu Beginn der 90er-Jahre die ersten Theorien dazu aufgestellt, wie sich diese seltsamen Quantenkorrelation zweier verschränkter Teil-

chen nutzen lassen könnten, um z. B. Daten effizient zu versenden oder zu verschlüsseln. Wenige Jahre später gelang es, diese Ideen mithilfe verschränkter Photonen experimentell umzusetzen. Weil sich Photonen über weite Strecken frei bewegen können, eignen sie sich ausgezeichnet zur Herstellung nichtlokaler EPR-Paare. Deshalb

gelang der Nachweis verschränkter Photonen über die Verletzung der Bell-Ungleichungen bereits in den 80er-Jahren.

EPR-Paare könnten als „Datenbus“ entfernte Quantenbits (z. B. Elektronenspins) in einem Quantencomputer koppeln. Dazu ist aber eine ausreichend starke Wechselwirkung erforderlich, die viel eher zwischen Elektronen als zwischen Photonen möglich ist. Verschränkte Elektronen in einem Festkörper wären aber auch schon deshalb interessant, weil sich bisher noch nie Verschränkung massiver Teilchen in einem Festkörper beobachten ließ. In drei neuen experimentellen Arbeiten sind nun wichtige Schritte in diese Richtung gelungen [1-3]. In allen drei Experimenten dient ein Supraleiter als Quelle verschränkter Elektronenpaare. Tatsächlich ist nämlich Verschränkung in Festkörpern keine Seltenheit: Die Elektronen in einem konventionellen Supraleiter formieren sich zu Cooper-Paaren, deren Spins sich in einem Spin-Singulett-Zustand befinden:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle). \quad (1)$$

Dieser Zustand ist verschränkt, da er sich nicht als Produkt der Wellenfunktionen der einzelnen Teilchen darstellen lässt. Die Kunst besteht nun darin, einzelne Cooper-Paare räumlich zu trennen, indem die beiden Elektronen in verschiedene Kontakte geleitet werden [4] (Abb. 1). Der Nachweis dieser Trennung ist die wesentliche Errungenschaft der neuen Experimente.

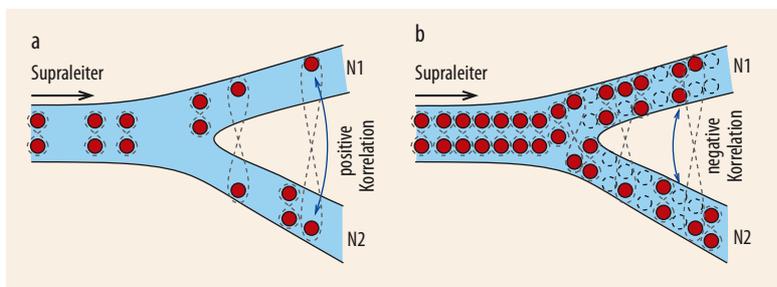


Abb. 2 Ein direkter Nachweis der Cooper-Paar-Trennung ist durch Messung der positiven Korrelationen in Tunnelkontakten möglich (a). Bei klassischer Aufteilung sind hingegen negative

Korrelationen zu erwarten (b): Ein Elektron (rot), das in eine der Zuleitungen tunnelt, fehlt in der anderen, hier angedeutet durch die gestrichelten Kreise.

Ähnlich schwierig wie verschränkte Elektronen zu erzeugen, ist deren Nachweis. Die experimentellen Herausforderungen für direkte Koinzidenzmessungen sind bei Elektronen erheblich größer als bei Photonen. Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit, die Spin-Verschränkung durch Verletzung der Bell-Ungleichungen oder mittels Zweiteilchen-Interferenz nachzuweisen [5]. Solche Experimente sind jedoch sehr schwierig. Ein erster Schritt besteht aber darin, zunächst mithilfe einer nichtlokalen Korrelation die Trennung der Elektronenladungen nachzuweisen. Ein direkter Nachweis kann z. B. über eine Messung der Kreuzkorrelationen der Stromfluktuationen in den verschiedenen normalen Zuleitungen erfolgen: Das Vorzeichen dieser Größe kann im Prinzip Auskunft über die Art des korrelierten Ladungstransfers geben [6]. Sind diese Kreuzkorrelationen positiv, kommen die beiden Elektronen aus dem Supraleiter und sind daher

Teile eines EPR-Paares (Abb. 2a). Negative Korrelationen der Ladungen in beiden normalen Zuleitungen entsprechen hingegen eher einer klassischen Aufteilung (Abb. 2b): Eine Ladung, die in eine der Zuleitungen tunnelt, fehlt in der anderen und führt damit zu einer negativen Korrelation (vgl. das Beispiel mit den Schuhen). Natürlich gibt es auch indirekte Nachweise der Korrelation über Strommessungen, in denen der Leitwert in Abhängigkeit von äußeren Parametern gemessen wird. Aufgrund der Modellabhängigkeit sind quantitative Aussagen über die Effizienz bei Messungen des Leitwerts schwieriger als bei Korrelationsmessungen.

Korrelierte Fluktuationen

Hofstetter und Kollegen brachten einen supraleitenden Kontakt auf einen Halbleiter-Quantendraht auf [1]. In diesem wird mittels zweier Elektroden auf jeder Seite ein Quantenpunkt erzeugt, welcher seinerseits an eine externe Zuleitung angeschlossen ist (vgl. Abb. 1). Durch Anlegen von Gatterspannungen V_{g1} und V_{g2} an die beiden Quantenpunkte können lokal die Leitwerte G_1 und G_2 durch die entsprechenden normalleitenden Kontakte gesteuert werden. Der Leitwert G_1 hängt aber auch schwach von V_{g2} ab. Dies ist das „nichtlokale“ Signal, das einen indirekten Nachweis der Korrelationen ermöglicht. Aufgrund einer Änderung von V_{g2} ließ sich dabei z. B. messen, wie das nichtlokale Signal G_1 stärker wurde, wenn gleichzeitig auch der lokale Leitwert G_2 anstieg. Diese positive Korrelation zwischen den beiden Leitwerten ist ein Nachweis dafür,

KURZGEFASST

■ Schneller gehts nicht

In der Laserspektroskopie sind immer kürzere Pulse gefragt, um immer schnellere Prozesse aufzulösen. Forscher der TU Wien und des MPI für Kernphysik in Heidelberg haben eine Methode vorgeschlagen, die es erlauben könnte, Yoktosekundenpulse ($1 \text{ ys} = 10^{-24} \text{ s}$) zu erzeugen. Sie simulierten dazu die Kollision schwerer Ionen, die nahezu Lichtgeschwindigkeit haben. Dabei entsteht ein Quark-Gluon-Plasma, das Strahlung in Form eines Doppelpulses in Stoßrichtung aussendet. Mit diesem könnte man Prozesse innerhalb des Atomkerns untersuchen. A. Ipp et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 152301 (2009)

■ Und sie ist doch konstant

Eine wichtige Vorhersage Albert Einsteins war die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Photonenenergie. Messungen mit dem Fermi-Teleskop haben nun gezeigt, dass dies selbst bei einer Energie von $1,2 E_{\text{Planck}}$ noch gilt ($E_{\text{Planck}} = 1,22 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$). Bei der Analyse eines entfernten Gammablitzes fanden die Wissenschaftler keinen Hinweis auf eine Verletzung der Lorentz-Invarianz. Diese Ergebnisse widersprechen Theorien, nach denen die Quantennatur der Raum-Zeit bei sehr kleinen Längen bzw. hohen Energien ($\sim E_{\text{Planck}}$) die Lichtgeschwindigkeit verändert. A. A. Abdo et al., Nature **462**, 331 (2009)

dass sich die Cooper-Paare aufspalten und räumlich trennen, und somit ein sehr wichtiger erster Schritt, um verschränkte Elektronenspins im Festkörper erzeugen und nachweisen zu können.

In der Arbeit von Herrmann et al. [2] ist ein Kohlenstoff-Nanoröhrchen, ebenfalls über zwei Quantenpunkte, mit einer supraleitenden Zuleitung kontaktiert. Auch in dieser Arbeit werden Leitwerte in Abhängigkeit der Gatterspannungen gemessen. Durch Vergleich mit einer Theorie wird der Anteil des nichtlokalen Stroms extrahiert. Auf diesem indirekten Weg konnte man sogar auf einen relativ hohen Anteil der nicht-lokal aufgespalteten Cooper-Paare von bis zu 50 % schließen.

Das neueste der drei Experimente, von Wei und Chandrasekhar [3], geht insofern noch einen Schritt weiter, als diese direkt die Kreuzkorrelationen der Stromfluktuationen gemessen haben. Die normalleitenden Kupferkontakte sind in diesem Experiment

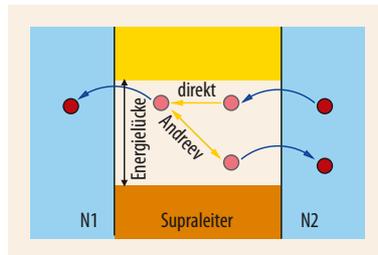


Abb. 3 Die Trennung von Cooper-Paaren durch Andreev-Reflexion und das direkte Tunneln von Elektronen durch die Energiegitter des Supraleiters sind konkurrierende Prozesse.

direkt über Tunnelbarrieren (ohne Quantenpunkt) am Supraleiter angeschlossen. Dabei ist zu beachten, dass ein Strom, der über den Supraleiter von einem in den anderen Normalleiter fließt (direktes Tunneln) eine negative Kreuzkorrelation hervorruft, die den Effekt der Cooper-Paar-Aufspaltung (nicht-lokales Andreev Tunneln) kompensieren kann (**Abb. 3**). In der Tat finden die Autoren dieser Arbeit, dass geeignete Spannungseinstellungen direktes Tunneln unterdrücken. Die Messung ergibt dann positive Kreuzkorrelationen, also einen

direkten Nachweis für die Aufspaltung der Cooper-Paare.

Die neuen Experimente zeigen, dass sich Cooper-Paare in Festkörper-Nanostrukturen räumlich aufspalten lassen. Gemäß der Theorie sollten die Spins der beiden dabei hervorgegangenen Elektronen ihre Verschränkung wie in Gleichung (1) beibehalten, und somit ein EPR-Paar darstellen. Eine Herausforderung für zukünftige Experimente wird beispielsweise die spinabhängige Stromkorrelationsmessung zum Nachweis der Spin-Verschränkung mittels Verletzung der Bell-Ungleichungen sein.

Wolfgang Belzig und Guido Burkard

- [1] L. Hofstetter, S. Csonka, J. Nygard und C. Schönberger, *Nature* **461**, 960 (2009)
- [2] L. G. Herrmann et al., *Phys. Rev. Lett.*, im Druck (2010) (arXiv:0909.3243)
- [3] J. Wei und V. Chandrasekhar, arXiv:0910.5558 (2009)
- [4] P. Recher, E. V. Sukhorukov und D. Loss, *Phys. Rev. B* **63**, 165314 (2001)
- [5] G. Burkard, *J. Phys.: Condens. Matter* **19**, 233202 (2007)
- [6] J. Börlin, W. Belzig und C. Bruder, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 197001 (2002)

Prof. Dr. Wolfgang Belzig, Prof. Dr. Guido Burkard, Fachbereich Physik, Universität Konstanz, 78457 Konstanz