

somit die Wirkung des Strahlungsdrucks auf den Balken vortäuschen [6]. Ein historisches Beispiel dafür ist Crookes' Lichtmühle, deren Schaufeln auf einer Seite Licht absorbieren und auf der anderen Licht reflektieren. Unter Bestrahlung beginnt die Mühle, sich zu drehen – jedoch in die Richtung, für die nicht der Strahlungsdruck verantwortlich sein kann, sondern die thermischen Effekte [7].

Die Messungen am Experiment im Hochvakuum zeigen, dass sich trotz der Nanometerabmessungen des Wellenleiterbalkens thermische Gradienten über eine Zeitskala aufbauen, die sehr viel langsamer ist als die mechanische Oszillationsperiode. Durch ausreichend schnelle Modulation des Lichts konnte im Experiment also sichergestellt werden, dass die antreibende Kraft hauptsächlich durch den Gradienten des optischen Feldes hervorgerufen wird – und nicht durch thermische Effekte. Bei Frequenzen im Gigahertzbereich ließen sich thermische Effekte schließlich ganz ausschließen.

Die Beobachtung von Gradientenkräften auf einem Chip ist sehr

vielversprechend für die Nanophotonik. Die aktuelle Arbeit zeigt, dass photonische Kräfte in optischen Leitern nanomechanische Oszillationen auslösen können. Das verwendete Prinzip eröffnet eine Fülle von Möglichkeiten, um nanomechanische und nanophotonische Elemente auf einem Chip einzusetzen, und bietet zudem große Flexibilität. Außerdem weist Silizium sehr gute mechanische Eigenschaften auf, sodass daraus die bisher empfindlichsten mechanischen Resonatoren gefertigt werden konnten [8]. All das verspricht vielfältige neue photonische Funktionsweisen, z. B. einen photonisch angetriebenen Mixer [9] oder schmalbandige Radiofrequenzfilter. So könnten die Gradientenkräfte ein neues Element in der Siliziumphotonik werden.

Die wahrscheinlich größte Herausforderung ist es, die Methode zu höheren Frequenzen zu verschieben. Denn dies erfordert eine größere optische Leistung, um die mechanischen Oszillationen anzutreiben. Schon jetzt ist die dafür erforderliche Leistung hoch und liegt im Bereich einiger zehn Milliwatt.

Dies lässt sich umgehen, wenn man den Abstand zwischen Wellenleiter und Substrat verringert. Alternativ kann man integrierte Ringresonatoren aus Silizium verwenden, also nanooptomechanische Hohlraumresonatoren, welche die erforderliche Leistung um einige Größenordnungen verringern und den Weg eröffnen, den mechanischen Oszillator ganz ohne zeitveränderliche Felder anzutreiben [3].^{*)}

Tobias J. Kippenberg

- [1] A. Ashkin, *PNAS* **94**, 4853 (1997)
- [2] M. Li et al., *Nature*, **456**, 480 (2008)
- [3] T. J. Kippenberg und K. J. Vahala, *Science* **321**, 1172 (2008)
- [4] M. L. Povinelli et al., *Optics Letters* **30**, 3042 (2005)
- [5] X. M. H. Huang, C. A. Zorman, M. Mehregany und M. L. Roukes, *Nature* **421**, 496 (2003); T. Carmon und K. J. Vahala, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 123901 (2007)
- [6] C. H. Metzger und K. Karrai, *Nature* **432**, 1002 (2004); M. Zalalutdinov et al., *Appl. Phys. Lett.* **79**, 695 (2001);
- [7] A. E. Woodruff, *The Physics Teacher* **6**, 358 (1968)
- [8] D. Rugar, R. Budakian, H. J. Mamin und B. W. Chui, *Nature* **430**, 329 (2004)
- [9] M. Hossein-Zadeh und K. J. Vahala, *Phot. Tech. Lett.* **19**, 1045 (2007)

*) Dieser Text ist eine bearbeitete und gekürzte Übersetzung von „Photonics: Nanomechanics gets the shakes“, *Nature* **456**, 458 (2008)

Dr. Tobias Kippenberg, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching und Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Schweiz)

■ Supraleitung auf Knopfdruck

Die Grenzfläche zwischen zwei isolierenden Oxiden lässt sich mit einem elektrischen Feld zwischen dem supraleitenden und dem isolierenden Zustand hin- und herschalten.

In den Achtzigerjahren beschäftigten sich zwei junge Post-Docs bei IBM Yorktown Heights, New York, bzw. an der Universität Genf unabhängig voneinander mit den erst seit wenigen Jahren bekannten Hochtemperatur-Supraleitern. Sie untersuchten die Kopplung zwischen zwei Supraleitern, die eine Nanometer-dünne isolierende Barriere voneinander trennt. Zwanzig Jahre später haben Jochen Mannhart und Jean-Marc Triscone, inzwischen Professoren in Augsburg bzw. Genf, ihre Kräfte vereint und die Dinge auf den Kopf gestellt. Anstelle dünner Barrieren zwischen Supraleitern untersuchten sie mit ihren Mitarbeitern Andrea Caviglia, Nicolas Reyren und Stefan Thiel nun

die Nanometer-dünnen supraleitenden Schichten, die spontan an der Grenzfläche zwischen zwei isolierenden Verbindungen entstehen [1]. Dabei ist es ihnen gelungen, diese Grenzfläche mit einem äußeren elektrischen Feld von dem supraleitenden in den isolierenden Zustand zu schalten [2]. Diese außergewöhnliche Leistung lässt weitere aufregende Ergebnisse erwarten.

Die Eigenschaften von Grenzschichten zwischen komplexen Oxiden wie die untersuchten Isolatoren SrTiO₃ und LaAlO₃ hängen entscheidend von der atomaren Anordnung ab. Dies lässt sich am besten erläutern, wenn man diese Materialien nicht auf traditionelle Weise aus Einheitszellen aufgebaut

betrachtet, sondern als Stapel von SrO- und TiO₂-Schichten bzw. von LaO- und AlO₂-Schichten. Beim Zusammenfügen dieser Materialien zu einer kristallinen Heterostruktur gibt es aufgrund ihrer Perowskit-Struktur zwei mögliche Grenzflächen: Entweder eine TiO₂-Schicht des SrTiO₃ trifft auf eine LaO-Schicht des LaAlO₃ (Abb. 1) oder das Paar SrO-AlO₂ entsteht. Um das Auftreten einer Variante zu erzwingen und somit eine wohl definierte Grenzfläche zu erhalten, ist es unerlässlich, die Herstellung der Oxid-Heterostrukturen auf atomarem Niveau zu kontrollieren. Dank verschiedener Fortschritte aus jüngerer Zeit ist es heute möglich, Schichtstapel aus Perowskit-Oxiden

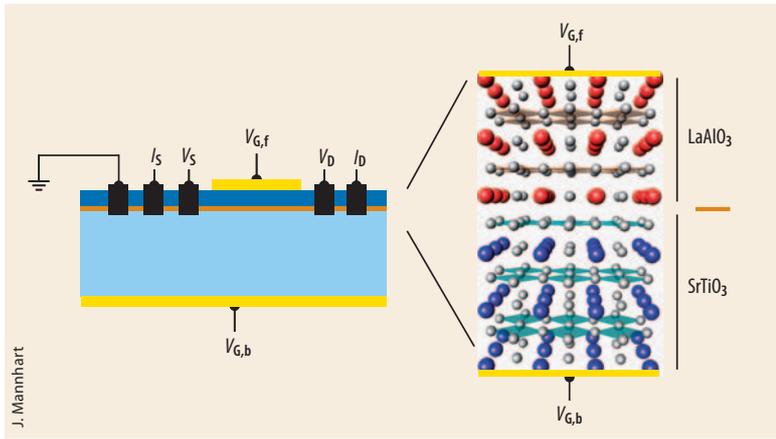


Abb. 1 Mithilfe einer Feldeffekt-Struktur (links) lässt sich die Grenzschicht zwischen den Isolatoren SrTiO₃ und LaAlO₃ (rechts) vom supraleitenden in den iso-

lierenden Zustand umschalten, indem man ein elektrisches Feld an eine der Gate-Elektroden anlegt.

mit einer Präzision zu wachsen, die derjenigen von z. B. AlGaAs-GaAs-Multischichten ähnelt [3].

Auf den ersten Blick scheinen die Isolatoren SrTiO₃ und LaAlO₃ recht vergleichbar zu sein, ihre innere Ladungsverteilung unterscheidet sich aber stark. Die Sr²⁺O²⁻ und Ti⁴⁺(O²⁻)₂-Schichten sind nämlich ladungsneutral – im Gegensatz zu den La³⁺O²⁻ und Al³⁺(O²⁻)₂-Schichten. Grundlegende Betrachtungen der Elektrostatik zeigen, dass polare Grenzflächen wie in LaAlO₃ instabil sind. Normalerweise ordnen sich die Atome daher um. Eine solche Rekonstruktion tritt z. B. an den Grenzflächen des polaren Halbleiters GaAs auf. Bei den Oxiden existiert jedoch eine interessante

zusätzliche Möglichkeit: Die Multivalenz der Übergangsmetallionen wie Ti, das die Ladungszustände 3+ oder 4+ annehmen kann, ermöglicht eine „elektronische Rekonstruktion“, die von einem Ladungstransfer vom LaAlO₃ zum SrTiO₃ begleitet wird [4]. Die abgegebenen Elektronen sind beweglich, sodass die Grenzschicht leitet – eine Situation ähnlich der Leitfähigkeit in chemisch dotiertem SrTiO₃. Genau über LaAlO₃ und (dotiertes) SrTiO₃ sind letztlich J. Georg Bednorz und K. Alex Müller zu ihrer mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung in den eng verwandten Kuprat-Perowskiten gelangt [5].

Die leitenden „Blätter“ zwischen SrTiO₃ und LaAlO₃ haben reges Interesse hervorgerufen, nicht zuletzt aufgrund der sehr hohen Ladungsträgerbeweglichkeit von mehr als 10⁴ cm² V⁻¹ s⁻¹, die bei 4,2 K gemessen wurden [4]. Zahlreiche Gruppen weltweit haben dieses Ergebnis bestätigt und die Eigenschaften der Grenzschichten im Detail untersucht. Wir wissen jetzt, dass diese extremen Beweglichkeiten auftreten, wenn der Sauerstoff-Partialdruck während der Abscheidung geringer als 10⁻⁶ mbar ist. Dann sind Sauerstoff-Leerstellen zu erwarten, und die Leitfähigkeit ist wahrscheinlich nicht auf die Grenzfläche begrenzt. Bei höherem Sauerstoff-Partialdruck reduziert sich die Zahl der Leerstellen, sodass die Leitfähigkeit der Proben geringer sein sollte. Dies gilt in der Tat

bei den meisten Temperaturen für Grenzflächen, die bei 10⁻⁵ bis 10⁻⁴ mbar abgeschieden wurden. Unterhalb von 300 mK werden diese Proben aber zur großen Überraschung supraleitend, wobei die Supraleitung wirklich auf die zweidimensionale Grenzfläche beschränkt ist [1].

Wie eine Gruppe in Twente gezeigt hat, verschwindet die Supraleitung bei höheren Sauerstoff-Drücken (10⁻³ mbar) wieder. Stattdessen lassen sich Signaturen von magnetischem Verhalten beobachten [6]. Die genaue Rolle der Sauerstoff-Leerstellen oder anderer Kristalldefekte wird derzeit noch untersucht, aber es ist bereits klar, dass diese Grenzflächen ein sehr reiches Phasendiagramm aufweisen.

Durch das Anlegen elektrischer Felder an die Grenzfläche (Abb. 1) lässt sich die kritische Temperatur ändern und sogar der quantenkritische Punkt am Übergang zwischen Supraleiter und Isolator „überschreiten“ (Abb. 2). Dieses kontrollierbare Schalten eines Supraleiters in den isolierenden Zustand durch moderate elektrische Felder war ein seit lange gehegter Traum der Forscher. Während bislang nur eine recht bescheidene Reduzierung von T_c bzw. der Leitfähigkeit gelungen war, eröffnen die neuen Ergebnisse Perspektiven für elektronische Schaltkreise, die auf supraleitenden Transistoren beruhen. Aber nicht nur das Schalten der Supraleitung bei tiefen Temperaturen ist von Interesse. Mit den gleichen Strukturen lassen sich auch Dioden- und Transistor-ähnliche Bauelemente herstellen, die bei Raumtemperatur im dissipativen Regime arbeiten und aus ansonsten isolierenden und optisch transparenten Verbindungen bestehen. Darüber hinaus ist es einer Gruppe in Pittsburg kürzlich gelungen, mithilfe der Spitze eines Rasterkraftmikroskops leitende Linien zu schreiben – also nanoskopische Abmessungen in allen drei Dimensionen zu erzielen [7].

Da für Anwendungen die Schaltgeschwindigkeit entscheidend ist und die hohen Mobilitäten in sauerstoffarmen Proben auftraten, wird es interessant sein zu sehen, ob sich die Sauerstoff-Stöchiometrie

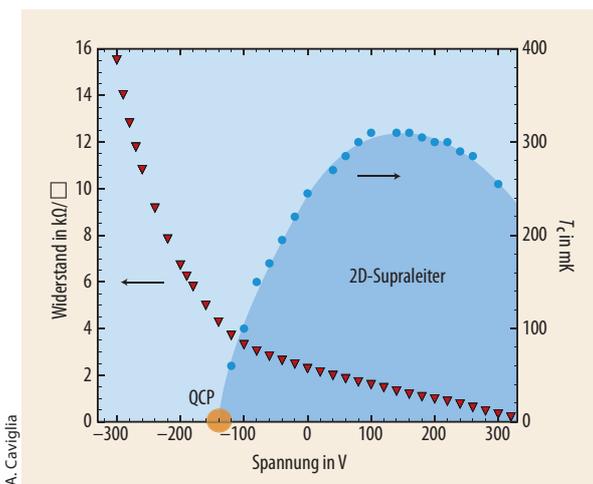


Abb. 2 Bei 400 mK sinkt der gemessene Widerstand (Dreiecke) der Grenzschicht kontinuierlich, wenn die elektrische Spannung steigt. Die „kuppelförmige“ funktionelle Abhängigkeit der kritischen Temperatur von der Spannung (Kreise) erinnert an Nb-dotiertes SrTiO₃ und ist auch eine der charakteristischen Eigenschaften der Hochtemperatur-Supraleiter. Der quantenkritische Punkt QCP trennt supraleitendes und isolierendes Regime.

an der Grenzfläche so optimieren lässt, dass der zweidimensionale Charakter bei höherer Geschwindigkeit erhalten bleibt. Mit der Chemie der Grenzfläche zu spielen wird ebenso ein weiterer Schritt sein wie Untersuchungen zur zeitlichen Stabilität sowie zur möglichen Elektromigration.

Über das gegenwärtige Paar von SrTiO_3 und LaAlO_3 hinaus kann man sich ein breites Spektrum von anderen Materialkombinationen ausmalen und sich dabei die

herausragenden Eigenschaften der Oxidperowskite zunutze machen – wie die Hochtemperatur-Supraleitung, den kolossalen Magnetowiderstand, Ferroelektrizität usw. Die Forschungsarbeiten an SrTiO_3 und LaAlO_3 haben Bednorz und Müller die wunderbare Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung beschert. Wer weiß, welche Überraschungen die Grenzflächen, an denen sich diese Materialien treffen, noch bereit halten?

Hans Hilgenkamp

- [1] N. Reyren et al., *Science* **317**, 1196 (2007)
- [2] A. D. Caviglia et al., *Nature* **456**, 624 (2008)
- [3] G. Rijnders und D. H. A. Blank, *Nature* **433**, 369 (2005)
- [4] A. Ohtomo und H. Y. Hwang, *Nature* **427**, 423 (2004)
- [5] J. G. Bednorz und K. A. Müller, Nobel Lecture 1987, *Rev. Mod. Phys.* **60**, 585 (1988)
- [6] A. Brinkman et al., *Nature Materials* **6**, 493 (2007)
- [7] C. Cen et al., *Nature Materials* **7**, 298 (2008)

Prof. Dr. Hans Hilgenkamp, Condensed Matter Physics and Devices, Faculty of Science and Technology and MESA+ Institute for Nanotechnology, University of Twente, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, Niederlande

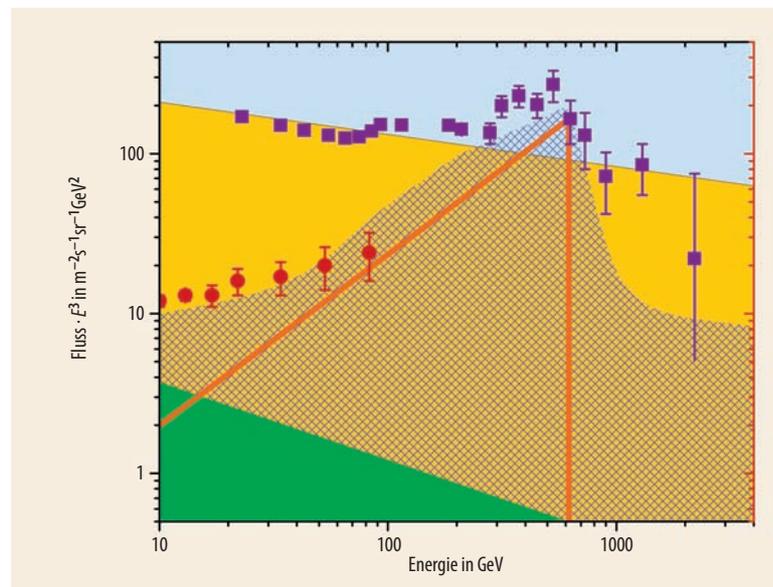
■ Anomalie im Kosmos

Die PAMELA-Kollaboration hat in der Kosmischen Strahlung Positronen bis zu Energien von 100 GeV detektiert und findet dabei einen überraschenden Überschuss.

Die Kosmische Strahlung, die ständig auf die Erde einprasselt, besteht überwiegend aus Protonen und α -Teilchen, aber in geringerem Umfang auch aus Elektronen. Die Häufigkeit dieser Teilchen nimmt als Funktion der Energie mit einem Potenzgesetz steil ab. Zu einem äußerst geringen Anteil enthält die Kosmische Strahlung auch Antiteilchen – diese entstehen lediglich durch die Wechselwirkung der primären Teilchen mit dem interstellaren Gas oder durch exotische Prozesse wie die Paarvernichtung von bisher unbekanntem Teilchen der Dunklen Materie. Bei Energien von 10 GeV sollte das Verhältnis zwischen Positronen und Elektronen daher nur 1:50 betragen [1]. Das internationale Satellitenexperiment PAMELA, an dessen Aufbau auch Manfred Simon von der Universität Siegen beteiligt war, hat nun jedoch bei der Analyse der zwischen Juli 2006 und Februar 2008 aufgezeichneten Daten ein unerwartet starkes Ansteigen des Positronenflusses relativ zum Gesamtfluss aus Elektronen und Positronen bei Energien zwischen 1,5 und 100 GeV gefunden [2]. Bereits im November 2008 hatte das Ballonexperiment ATIC in fast 40 Kilometer Höhe spektakuläre Hinweise auf eine weitere Anomalie bei noch höheren Energien

geliefert [3]. Die auffällige Schulter im ATIC-Spektrum, das allerdings nicht zwischen Elektronen und Positronen unterscheidet, lässt sich als Fortsetzung des PAMELA-Positronenspektrums interpretieren (Abb.). In diesem Fall würde der Positronenanteil im Maximum der ATIC-Schulter bei 620 GeV nahe am Maximalwert von 50 Prozent für ein reines Paarplasma liegen.

Grundsätzlich ist wohl einige Vorsicht im Umgang mit Daten angebracht, die mit schwer kontrollierbaren systematischen Fehlern behaftet sein können. Die rasch einsetzende Lawine von Publikationen zeigt jedoch schon jetzt einige weitreichende Konsequenzen auf, die vor allem den möglichen Zusammenhang mit dem Problem der Dunklen Materie



Als Funktion der Energie sollte der Fluss der primären Elektronen und der sekundären Positronen der Kosmischen Strahlung abfallen (gelbe bzw. grüne Kontur). Sowohl der von ATIC gemessene Gesamtfluss von Elektronen und Positronen (violette Quadrate) als auch der von PAMELA gemessene Positronenfluss (rote

Kreise) weichen davon jedoch ab. Als Erklärung der Anomalie werden die Anihilation von Kaluza-Klein-Teilchen mit einer Ruhemasse von 620 GeV im geklumpten Dunkelmateriehalo der Milchstraße (orange Linie) oder relativistische Elektronen und Positronen aus nahen Pulsaren diskutiert (blaue Schraffur).