

im Lichte der TLFT interpretiert, obwohl der Einfluss der Kontakte und Zuleitungen theoretisch noch nicht vollständig verstanden ist.

Eine kürzlich erschienene Arbeit berichtet über Photoemissionsmessungen an SWNT [3]. Die Autoren verwenden Bündel von SWNT, da für derartige Messungen größere Proben erforderlich sind. Die Bündel bestehen aus SWNT mit verschiedenen Durchmessern und Aufrollwinkeln und enthalten somit metallische wie halbleitende SWNT. Um mit den theoretischen Vorhersagen vergleichen zu können, ist eine Mittelung über eine angenommene Verteilung der Aufrollwinkel erforderlich. Die Autoren belegen zunächst den eindimensionalen Charakter der elektronischen Freiheitsgrade in SWNT. Im Vergleich zum zweidimensionalen Graphit beobachten sie in den Spektren der SWNT zusätzliche Strukturen (z.B. S_1 in der Abbildung) und ordnen sie Bandkanten-Singularitäten in $q^<(\epsilon)$ zu, wie sie für eindimensionale Elektronenbänder typisch sind.^{*)} Für

$\epsilon - \mu < -0,3$ eV lassen sich die Spektren im Bild effektiv unabhängiger Elektronen verstehen. In der Nähe des chemischen Potentials ergibt sich dagegen die in der Abbildung dargestellte deutliche Unterdrückung der Spektralfunktion, die für sehr kleine T erstaunlich gut dem erwarteten Potenzgesetz $|\epsilon - \mu|^{\alpha_1}$ mit $\alpha_1 = 0,46 \pm 0,10$ folgt. Für das Temperaturverhalten finden die Autoren $q^<(\mu) \sim T^{\alpha_2}$ mit $\alpha_2 = 0,48 \pm 0,08$. Beide Ergebnisse sind konsistent mit der TLFT, wenn eine starke Elektron-Elektron-Wechselwirkung angenommen wird, und liegen nahe den Werten aus Transportmessungen (die zwischen 0,26 und 0,43 liegen), wenn sie auch nicht perfekt mit diesen übereinstimmen. Mit recht überzeugenden Argumenten werden einige alternative Ursachen für die Form von $q^<(\epsilon)$ ausgeschlossen. Aufgrund der geringen Dichte metallischer SWNT in den untersuchten Bündeln ist speziell die Wechselwirkung zwischen Elektronen auf verschiedenen benachbarten metallischen SWNT, durch die sich eine Energielücke bei μ ergeben kann, als Mechanismus unwahrscheinlich. Unklar ist allerdings, inwieweit Defekte und endliche Längen der SWNT hier eine Rolle spielen, die zu einem der Coulomb-Blockade verwandten Effekt und somit ebenfalls zu einer Intensitätsunterdrückung führen können [4].

Eine alternative Möglichkeit, charakteristische Vorhersagen der TLFT mit Hilfe der Photoemission zu untersuchen, bieten impuls aufgelöste Messungen. Für $q^<(k, \epsilon)$ erwartet man aufgrund einer Entkopplung der elektronischen Spin- und Ladungsfreiheitsgrade im Vielteilchenanregungsspektrum zwei dispergierende „Peaks“ anstelle des einen „Quasi-Teilchen-Peaks“ der Fermi-Flüssigkeitstheorie [1]. Für verschiedene eindimensionale Metalle wurden solche Experimente bereits ausgeführt [5], und es wäre interessant, sie an SWNT zu wiederholen.

Neben den rein grundlagenphysikalischen Aspekten dieser Ergebnisse ist ein Verständnis elektronischer Korrelationseffekte in reduzierten Geometrien auch für mögliche nanotechnologische Anwendungen eindimensionaler Bauelemente von großer Wichtigkeit.

VOLKER MEDEN UND
RALPH CLAESSEN

[1] K. Schönhammer, Phys. Blätter, Dezember 1995, S. 1173

- [2] M. Gioni und J. Voit, in „Electron Spectroscopies Applied to Low-Dimensional Materials“, Vol. 1, hrsg. von H. Starnberg und H. Hughes, Kluwer, Dordrecht (2000)
- [3] H. Ishii et al., Nature **426**, 540 (2003)
- [4] P. Starowicz et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 256402 (2002)
- [5] J. Denlinger et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 2540 (1999); R. Claessen et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 096402 (2002)

Kosmische Zündfunken?

Rückgekoppelte Lawinen von stark beschleunigten Elektronen könnten in Gewitterwolken hochenergetische Strahlung emittieren und Blitze auslösen.

Bei der Entstehung und Entladung von Gewittern werden immer wieder neue Phänomene entdeckt, die das Verständnis von Physikern herausfordern. In den letzten Jahren war das zum Beispiel hochenergetische Strahlung von Blitzen. Jetzt wurde ein neuer physikalischer Pro-



Abb. 1: Strahlung hoher Energie könnte der Schlüssel zur Blitzentstehung sein. (Foto: C. Clark / NOAA)

zess vorgeschlagen, der die elektrischen Felder in Gewitterwolken, die gemessene hochenergetische Strahlung und die Entstehung von Blitzen gleichzeitig erklären könnte [1].

Die Vorgänge in einer Gewitterwolke finden auf einer Vielzahl von Längen- und Zeitskalen statt. Anfangs steigt feuchte und warme Luft auf. Die damit einhergehende Abkühlung führt zur Kondensation von Wassertropfen, wobei latente Wärme frei wird, welche die Konvektion beschleunigt. Schließlich ist eine Höhe erreicht, in der Wassertropfen auszufrieren beginnen. In dieser gemischten Phase können Wasser und Eis koexistieren, sodass bei Kollisionen von Wassertropfen mit reifendem Graupel elektrische

■ Fest und doch superfluide?

Nicht nur der gasförmige und flüssige, sondern auch der feste Materiezustand kann superfluides Verhalten zeigen. Darauf deutet zumindest ein Experiment von Physikern der Pennsylvania State University hin. Sie ließen kristallines Helium-4, eingeschlossen in den extrem feinen Poren von so genanntem Vycor-Glas, in einem Torsionsoszillator rotieren und kühlten es von 2 Kelvin weiter ab. Bei etwa 0,1 Kelvin änderte sich plötzlich die Rotationsgeschwindigkeit. Die Forscher gehen davon aus, dass die dicht gepackten Helium-4-Teilchen bei der extrem tiefen Temperatur nicht mehr an die Vycor-Poren gebunden sind, weil das Helium-4 superfluide wird.

(E. Kim und M. H. W. Chan, Nature **427**, 225, 2004)

■ Schwergewichtige Linse

Ein internationales Astronomen-Team hat die bislang größte Gravitationslinse entdeckt. Bei dem neuen Rekordhalter beugt das Gravitationsfeld eines 6,2 Mrd. Lichtjahre entfernten Galaxienhaufens das Licht eines fast 10 Mrd. Lichtjahre entfernten Quasars so, dass vier Bilder des Quasars entstehen. Diese stehen bis zu 14,62 Bogensekunden auseinander, weiter als bei jeder bislang beobachteten Gravitationslinse. Nach einer ersten Schätzung beträgt die Masse der „Linse“ etwa 2 Billionen Sonnenmassen, das ist das Hundertfache der Masse unserer Galaxis. Die große Aufspaltung der einzelnen Bilder weist nach derzeitigen kosmologischen Modellen auf hohe Anteile Dunkler Materie an der Masse des Galaxienhaufens hin.

(N. Inada et al., Nature **426**, 810, 2003)

Ladungen lokal getrennt werden. Transportprozesse in der Gewitterwolke führen dann zu einer großräumigen Trennung der Ladungsträger, sodass elektrische Felder bis zu vielen hunderttausend Volt pro Meter erreicht werden können, die mit Ballonaufstiegen innerhalb von Gewitterwolken nachgewiesen wurden [2]. Wird eine kritische Spannung überschritten, so entsteht ein

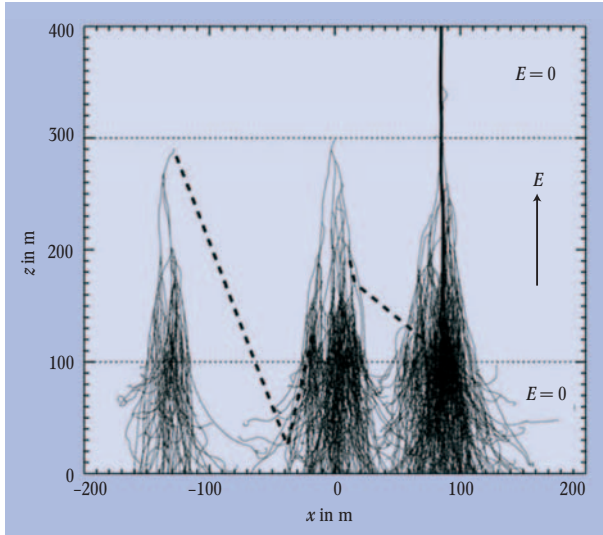


Abb. 2: In der Simulation laufen Photonen (gestrichelt) und Positronen (dicke schwarze Linie) gegen die durch das vorherrschende elektrische Feld definierte Lawinenrichtung und lösen so zusätzliche Lawinen energiereicher Elektronen aus. Gewitterwolken bilden sich meist in einer Höhe von 4–5 km, dabei erstreckt sich das hohe elektrische Feld, das sich schließlich im Blitz entlädt, typisch über einige hundert Meter (aus [1]).

Blitz, der einen Ladungsausgleich in der Gewitterwolke herstellt. In der allerersten Phase der Blitzgenese wird hochenergetische Strahlung emittiert, die sich am Erdboden messen lässt [3]. Hierbei ließ sich jedoch bislang nur darauf schließen, dass es sich um Strahlung mit einer Energie von über 10 keV handeln muss. Ob es sich dabei jedoch um Röntgen-, Gammastrahlung oder um relativistische Elektronen handelt, konnte mit dem verwendeten Detektor (NaI(Tl)-Szintillationsdetektor) nicht unterschieden werden. Präzise Messungen an Blitzen in Gewittern sind natürlich relativ schwierig. In Ref. [3] wurde der Blitz künstlich durch eine Rakete ausgelöst.

Die theoretische Beschreibung der Blitzgenese, die Joseph Dwyer vom Florida Institute of Technology gerade vorgeschlagen hat [1], könnte drei Beobachtungen kausal miteinander verknüpfen: das maximal gemessene elektrische Feld im Innern einer Gewitterwolke, die beobachtete hochenergetische Strahlung und die Entstehung des Blitzes. Der

vorgeschlagene Mechanismus ist eine Erweiterung des Konzepts der so genannten Runaway-Elektronen, das im letzten Jahrzehnt von russischen Wissenschaftlern ausgearbeitet und auf Blitze angewendet wurde [4]. Dabei handelt es sich um Elektronen, die so hohe Energien haben, dass trotz fortwährender Stöße mit dem Neutralgas die Wahrscheinlichkeit für die Stoßionisierung eines neutralen Moleküls wieder sehr klein wird. Die Elektronen werden darum im hinreichend starken elektrischen Feld immer weiter beschleunigt und können dann eine Lawine von schnellen Elektronen mit Energien im MeV-Bereich erzeugen. Ein einziges hochenergetisches kosmisches Teilchen, das in ein Gebiet mit einem hohen elektrischen Feld im Innern der Gewitterwolke eintritt, kann eine Lawine aus Runaway-Elektronen auslösen, die sich entweder direkt oder durch ihre Bremsstrahlung als energetische Strahlung nachweisen lassen. Der Mechanismus legt daher einen direkten Zusammenhang zwischen kosmischer Strahlung und der Entstehung von Blitzen nahe.

Allerdings ist die Ausbeute der Lawine pro kosmisches Teilchen dadurch beschränkt, dass das hohe elektrische Feld sich nur über einige hundert Meter ausdehnt, sodass die Anzahl der Generationen von energiereichen Elektronen begrenzt bleibt. Die neue Arbeit schlägt nun vor, dass die primäre Lawine weitere Lawinen erzeugt, und so die lokale Plasmadichte sehr schnell weiter zunimmt: Dazu sollen Photonen und/oder Positronen gegen die durch das Feld definierte Lawinenrichtung laufen und so weitere Lawinen energiereicher Elektronen auslösen (Abb. 2). Dabei könnten die Positronen durch Paarbildung aus energiereichen Photonen entstehen, während die Photonen aus der Bremsstrahlung der Elektronen in Materie hervorgehen. Mit diesem sehr schnellen und lokal begrenzten Prozess ließe sich die beobachtete hochenergetische Strahlung erklären, ebenso die Erzeugung des Plasmakeims für den späteren Durchschlag eines Blitzes. Diese mögliche Quelle hochenergetischer Strahlung von Blitzen würde somit auch zu einer neuen Bewertung früherer Beobachtungen führen. Satelliten beobachten hin und wieder hochenergetische Strahlungsimpulse terrestrischen Ursprungs, die ursprünglich „Sprites“ zugeschrieben wurden [5].

Sprites sind kurzzeitige, rot-bläuliche Leuchterscheinungen oberhalb von Gewitterwolken, die bis zur Ionosphäre hinaufreichen können und von außergewöhnlich starken Blitzen in Gewittern ausgelöst werden. Sie wurden erst 1990 in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben und werden seither vielfältig untersucht. Aber sind Sprites wirklich nötig für die Erklärung der von Satelliten beobachteten hochenergetischen Strahlung? Oder könnte die Wolke selbst zum Zeitpunkt der Blitzentstehung durch den vorgeschlagenen Mechanismus wesentlich stärker strahlen als bislang angenommen? Eine experimentelle Überprüfung des vorgeschlagenen neuen Prozesses zur hochenergetischen Strahlung und Entstehung von Blitzen ist daher sicher genauso wünschenswert, wie eine ausführlichere Beschreibung der verwendeten numerischen Modellrechnungen und Parametrisierungen.

MARTIN FÜLLEKRUG UND
UTE EBERT

- [1] J. R. Dwyer, *Geophys. Res. Lett.* **30**, 2055 (2003)
- [2] T. C. Marshall, M. P. McCarthy und W. D. Rust, *Journal of Geophysical Research* **100**, 7097 (1995)
- [3] J. R. Dwyer et al., *Science* **299**, 694 (2003)
- [4] A. V. Gurevich und K. P. Zybin, *Physics Uspekhi* **44**, 1119 (2001)
- [5] G. J. Fishman et al., *Science* **264**, 1313 (1994)

Mikrolaser mit Potenzial

Seit der ersten Realisierung im Jahr 1962 [1] haben Halbleiterlaser einen weitreichenden Siegeszug in zahlreiche Bereiche des täglichen Lebens angetreten, von der Unterhaltungselektronik über die Telekommunikation bis zur optischen Sensorik. Gegenüber anderen Laserarten zeichnen sich Halbleiterlaser durch mehrere anwendungsrelevante Vorteile aus. Hierzu gehört einerseits die Möglichkeit, elektrischen Strom direkt in kohärente Lichtemission umzuwandeln. Gleichzeitig ist die Verstärkung pro Länge in diesen Festkörperlasern sehr groß, sodass schon kleine, nur Bruchteile eines Millimeters große Bauelemente ausreichen, um Leistungen von vielen hundert mW zu erzeugen. Die Kombination sehr kompakter Geometrien mit einer hohen Konversions-effizienz von elektrischer zu

Priv.-Doz. Dr.
Martin Füllekrug,
Institut für Meteorologie und Geophysik, Feldbergstr. 47, 60323 Frankfurt am Main;
Prof. Dr. Ute Ebert,
Centrum voor Wiskunde en Informatica, P.O.Box 94079, NL-1090 GB Amsterdam, Niederlande