

## Exotische Elektronen in einer Dimension

**Photoemissionsmessungen an Kohlenstoff-Nanoröhren liefern weitere Evidenz für den Zusammenbruch des Konzepts effektiv unabhängiger Elektronen in niedrigdimensionalen Festkörpern.**

In einführenden Vorlesungen zur Festkörperphysik werden Elektronen als sich voneinander unabhängig bewegende, dem Pauli-Prinzip unterworfenen quantenmechanischen Teilchen beschrieben. Eine Vielzahl von Experimenten an dreidimensionalen

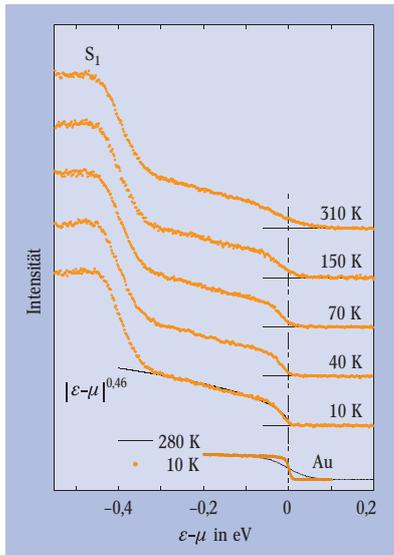
port-Eigenschaften der elektronischen Freiheitsgrade ergeben sich aus den Anregungszuständen des Vielteilchensystems. Der wesentliche Schritt zum Verständnis der obigen Beobachtung besteht in der auf Landau zurückgehenden Einsicht, dass die niederenergetischen Anregungen eines dreidimensionalen, wechselwirkenden Vielteilchensystems in einer direkten Korrespondenz zu den Anregungen des wechselwirkungsfreien Systems stehen (Fermi-Flüssigkeitstheorie). Eine bereits 1950 erschienene Arbeit von Tomonaga lieferte jedoch erste theoretische Hinweise darauf, dass die Anregungen in einem eindimensionalen Elektronensystem, in dem sich die Teilchen aufgrund äußerer Potentiale entlang nur einer Raumrichtung ausbreiten können, von grundsätzlich anderer Natur sind. Die elektronischen Eigenschaften lassen sich in diesem Fall nicht mehr mit Hilfe des Konzeptes effektiv unabhängiger Teilchen verstehen, sondern im Rahmen der Tomonaga-Luttinger-Flüssigkeitstheorie (TLFT) [1]. Eine experimentelle Bestätigung der TLFT ist aus Sicht der Grundlagenforschung von großem Interesse.

Einen direkten Weg, die elektronischen Anregungen zu untersuchen, bietet die Photoemissionsspektroskopie. Unter Einwirkung monochromatischer Photonen mit einigen 10 eV Energie treten Elektronen aus dem Festkörper aus, deren Energie  $\epsilon$  und Impuls  $\hbar k$  gemessen wird. Bis auf hier unwichtige Übergangsmatrixelemente lässt sich auf diese Weise das Spektrum der elektronischen Anregungen des Vielelektronensystems bestimmen. Man unterscheidet dabei die impulsintegrierte Spektralfunktion  $q^<(\epsilon)$  – die im Falle unabhängiger Teilchen der Zustandsdichte der besetzten Niveaus entspricht – und die impulsaufgelöste Funktion  $q^<(k, \epsilon)$ . Für effektiv unabhängige Elektronen ist die Energieabhängigkeit von  $q^<(\epsilon)$  nahe dem chemischen Potential  $\mu$  im Wesentlichen durch die Fermi-Funktion gegeben (siehe Gold-Spektren in der Abbildung), die bei Temperatur  $T=0$  K einer Stufenfunktion mit Sprung bei  $\mu$  entspricht. Nach der TLFT erwartet man dagegen bei  $T=0$  K und  $\epsilon \lesssim \mu$  einen Verlauf  $q^<(\epsilon) \sim |\epsilon - \mu|^\alpha$ , mit einem von der Wechselwirkungsstärke abhängigen Exponenten  $\alpha$  ( $\alpha=0$  im wechselwirkungsfreien Fall) [1]. Für die Temperaturabhängigkeit ergibt sich  $q^<(\mu) \sim T^\alpha$  anstelle des konstan-

ten Wertes für effektiv unabhängige Elektronen. Eine Bestätigung dieses Niederenergieverhaltens war das Ziel von Photoemissionsmessungen, die in den letzten zehn Jahren an verschiedenen eindimensionalen Metallen ausgeführt worden sind [2]. Die Messergebnisse sind konsistent mit der TLFT, jedoch lassen sich in jedem einzelnen Fall andere Gründe für das Fehlen einer scharfen Fermi-Kante nicht völlig ausschließen.

Theoretische Überlegungen zeigen, dass einwandige Kohlenstoff-Nanoröhren („single-wall carbon nanotubes“; SWNT) mit einem Durchmesser im Nanometer-Bereich als ideale eindimensionale Systeme betrachtet werden können. In ihrer Struktur entsprechen SWNT einlagigen, aufgerollten Graphitstreifen. Abhängig vom Winkel zwischen den Basisvektoren des Graphitgitters und der Aufrollrichtung ergeben sich metallische oder halbleitende „Nanodrähte“. Transportmessungen an einzelnen metallischen SWNT, deren Länge einige Mikrometer beträgt, wurden

\*) Die Zustandsdichte eindimensionaler, wechselwirkungsfreier Elektronen divergiert an Bandkanten mit einem inversen Wurzelgesetz.



**Abb. 1:** Photoemissionsspektren eines Bündels von Kohlenstoff-Nanoröhren (obere fünf Kurven) und von Gold (untere zwei Kurven) bei verschiedenen Temperaturen. Die Energie  $\epsilon - \mu$  ist relativ zum chemischen Potential gemessen. Die Gold-Spektren zeigen eine der Fermi-Funktion folgende Einsatzkante, wie sie für konventionelle dreidimensionale Metalle typisch ist. Die Spektren der Nanoröhren zeigen dagegen bei tiefer Temperatur ein Potenzverhalten mit Exponent  $0,46 \pm 0,10$  (durchgezogene Linie). Die Struktur  $S_1$  wird im Text erklärt (aus [3]).

nalen Metallen zeigt, dass die dabei vernachlässigte Coulomb-Wechselwirkung zwischen den Elektronen tatsächlich nur zu quantitativen Veränderungen führt. Qualitativ verhält sich ein solches Metall wie ein wechselwirkungsfreies Elektronensystem mit allerdings mehr oder weniger stark renormierten Eigenschaften. Als Beispiel sei der vergrößerte Sommerfeld-Koeffizient in der linearen Temperaturabhängigkeit des elektronischen Beitrags zur spezifischen Wärme genannt. Die thermodynamischen und Trans-

## KURZGEFASST...

### Unempfindlicher Atomlaser

Physiker um Martin Weitz von der Universität Tübingen haben einen rein optischen Atomlaser realisiert, dessen Strahl sich nicht wie bisher durch Magnetfelder stören lässt. Dafür sperrten sie zunächst Rubidium-Atome in eine Dipolfalle, erzeugt durch einen eng fokussierten CO<sub>2</sub>-Lasersstrahl. Damit bekamen sie auch diejenigen Zustände (Zeeman-Zustände mit  $m_f = 0$ ) zu fassen, die gegenüber Magnetfeldern unempfindlich sind. Mit Hilfe eines magnetischen Gradientenfeldes entfernten die Physiker nun alle magnetfeldempfindlichen Zeeman-Zustände ( $m_f = \pm 1$ ) aus dem Bose-Einstein-Kondensat. Anschließend ließ sich nun ein kohärenter Atomstrahl entnehmen, der nicht mehr durch Magnetfelder gestört wird. (G. Cennini et al., Phys. Rev. Lett. 91, 240408, 2003)

### Licht im Stillstand

Ein amerikanisch-russisches Physikerteam hat Licht regelrecht „eingefroren“. Bislang war es bereits gelungen, die Eigenschaften eines Lichtpulses auf die Spins von Atomen zu übertragen. Die Transparenz des Atomgases lässt sich dabei mit einem Kontrollstrahl steuern, sodass sich der Lichtstrahl wieder freisetzen lässt. Diese Methode war auch Ausgangspunkt für das Experiment von Bajcsy und Kollegen. Sie verwendeten jedoch ein Paar gegenläufiger Laserstrahlen, die im Medium (Rubidium-Gas) ein periodisches Hell-Dunkel-Muster erzeugten, das den freigesetzten Lichtpuls wie zwischen zwei Spiegeln gefangen hält. (M. Bajcsy, A. S. Zibrov und M. D. Lukin, Nature 426, 638, 2003)

Juniorprof. Dr. Volker Meden, Institut für Theoretische Physik, Universität Göttingen, Tammannstr. 1, 37077 Göttingen; Prof. Dr. Ralph Claessen, Experimentalphysik II, Universität Augsburg, Universitätsstr. 1, 86159 Augsburg

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  $q^<(\varepsilon)$  zu, wie sie für eindimensionale Elektronenbänder typisch sind.<sup>\*)</sup> Für

$\varepsilon - \mu < -0,3$  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  $|\varepsilon - \mu|^{\alpha_1}$  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  $q^<(\varepsilon)$  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  $\mu$  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  $q^<(k, \varepsilon)$  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)