

tron (udd) zu schießen mit solchen kinematischen Bedingungen, dass sie sich zum Θ^+ (uudd \bar{s}) verbinden. Weil das Θ^+ jedoch eine so geringe Masse³⁾ hat, muss man dazu ganz langsame K-Mesonen verwenden, die jedoch nicht zur Verfügung stehen. Man muss die K-Mesonen also indirekt erzeugen, wie es die oben genannten experimentellen Gruppen auch getan haben. Bei ELSA z. B. wird dafür direkt ein Photon auf das Proton eines Wasserstoff-Targets geschossen (Abb.). Ähnliche Reaktionen verlaufen bei HERMES am DESY, wo schnelle Elektronen mit Deuteronen reagieren. Der Nachweis des Θ^+ geschieht immer über seinen Zerfall in ein Teilchenpaar Proton- K^0 bzw. Neutron- K^+ . Sind Energie und Lebensdauer des Θ^+ bekannt, dann sind noch viele weitere Reaktionen denkbar, bei denen dieses Teilchen auftaucht und nachgewiesen werden kann. Da Θ^+ Teil eines Anti-Dekupletts ist, haben Theoretiker und Experimentatoren jetzt die Aufgabe, dessen andere Mitglieder zu berechnen und zu identifizieren.

Das neue Teilchen hat eine Tür aufgestoßen zu einem besseren Verständnis der Baryonen und damit auch des Protons und Neutrons. Das ist nicht nur für die Kern- und Teilchenphysik wichtig, sondern für die Physik insgesamt, denn schließlich besteht die Masse der gesamten sichtbaren Materie im Universums aus Protonen und Neutronen.

KLAUS GOEKE UND
MAXIM POLYAKOV

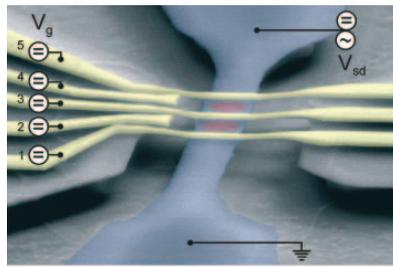
- [1] D. Diakonov, V. Petrov und M. Polyakov, Z. Phys. A 359, 305 (1997)
- [2] T. Nakano et al., Phys. Rev. Lett. 91/012002 (2003)
- [3] V. V. Barmin et al., hep-ex/0304040 (2003)
- [4] S. Stepanyan et al. (CLAS-collaboration), hep-ex/0307018 (2003)
- [5] J. Barth et al., hep-ex/0307083 (2003)

Mechanische Unschärfe

Lassen sich Nullpunktsschwingungen eines mechanischen Resonators nachweisen?

Betrachtet man die Mechanik makroskopischer Körper, so ist ein Einfluss der Quantenmechanik im Allgemeinen nicht auszumachen. Werden jedoch die Abmessungen des Testkörpers und damit seine Masse reduziert, sollte der Über-

gang zu einem quantenmechanischen Zustand bestimmbar sein. Der Einfluss der Quantenmechanik muss sich in zweierlei Hinsicht bemerkbar machen: Betrachtet man zunächst die mechanische Schwingungsenergie eines Teilchens $E_m = hf$ und vergleicht sie mit der thermischen Energie $E_{th} = k_B T$, so sollte sich das Teilchen nicht-klassisch verhalten, sobald $E_m > E_{th}$ erfüllt ist. Anhand dieser Abschätzung lässt sich sofort festhalten, dass mechanische Eigenfrequenzen der Größenordnung 1 GHz vonnöten sind, sodass bei Temperaturen um 50 mK quantenmechanisches Ver-



Mit ähnlichen Strukturen wie dieser aus freitragenden Quantenpunkten lässt sich die Auslenkung eines mechanischen Resonators durch kapazitive Ankopplung an einen Einzelelektronentransistor messen.

halten auftritt. Weiterhin folgt aus der Unschärferelation, dass die Messung an einem nano-mechanischen Resonator dessen quantenmechanischen Zustand verändert. Damit sollten sich Effekte des Messprozesses selbst bemerkbar machen, die auch als *back-action* bezeichnet werden. Mit anderen Worten ergibt sich aufgrund des Messprozesses eine Rückwirkung auf die gemessene Größe, sodass beispielsweise eine genaue Messung der Auslenkung, d. h. der Ortskoordinate des Resonators zu einer Unschärfe in der Impulsordinate und damit zu einer Schwingungsänderung führen muss.

Mit gängigen Methoden der Mikrostrukturierung gelingt es mittlerweile, mechanische Resonatoren mit Abmessungen im Sub-Mikrometerbereich zu realisieren, die Eigenfrequenzen bis zu 1 GHz aufweisen [1] und die sich bis in den 10 mK-Bereich abkühlen lassen. Zum Nachweis des quantenmechanischen Charakters dieser mechanischen Systeme bedarf es allerdings einer entsprechend empfindlichen Messapparatur, die eine Ortsauflösung der mechanischen Schwingungen gestattet. Dies ist kürzlich von Knobel und Cleland von der University of California at Santa Barba-

ra [2] und unabhängig von Kirschbaum et al. an der Ludwig-Maximilians-Universität in München [3] gezeigt worden.

Die Entwicklung dieser nanoelektromechanischen Systeme (NEMS) zielt in den durchgeführten Experimenten auf die Detektion extrem kleiner Auslenkungen und damit Kräfte, wie sie beispielsweise in der Rasterkraftmikroskopie auftreten. Die detektierbaren Auslenkungen betragen dabei weniger als der Durchmesser eines Atoms. Im Experiment von Knobel und Cleland wurde eine Auflösung von $2,3 \times 10^{-14}$ m erreicht [2]. Für ihre Messungen verwendeten die Autoren einen mikroskaligen mechanischen Resonator, dessen Auslenkung bei 30 mK durch kapazitive Kopplung an einen benachbarten Einzelelektronen-Transistor aus Aluminium untersucht wurde.

Prinzipiell beruht die von Knobel und Cleland vorgeschlagene quantenmechanische Auslenkungsmessung auf der Verschiebung des Transistor-Arbeitspunktes über die kapazitive Ankopplung des Resonators. Der Resonator besitzt mit einer Länge von $3 \mu\text{m}$ und Seitenabmessungen von $250 \text{ nm} \times 200 \text{ nm}$ eine mechanische Eigenfrequenz von 117 MHz. Zur Anregung der Eigenschwingungen derartiger Systeme stehen mehrere Antriebsmechanismen zur Verfügung [4]. In der beschriebenen Arbeit erfolgte die Anregung über die Lorentz-Kraft, die auf einen von einem hochfrequenten Wechselstrom durchflossenen Balken in einem senkrechten Magnetfeld wirkt. Stimmt die anregende Radiofrequenz mit der mechanischen Eigenfrequenz überein, gerät das System in Resonanz und der Balken beginnt mit Amplituden im nm-Bereich zu schwingen. Die dadurch verursachte Auslenkung des Balkens bewirkt eine Variation der Kapazität zwischen Resonator und der im Abstand von 250 nm angebrachten Seitenelektrode des Einzelelektronen-Transistors. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit von Einzelelektronen-Transistoren als Elektrometer führt die Auslenkung des Balkens zu einer messbaren Veränderung des Stromflusses durch den Transistor. Die Auflösung lässt sich weiter steigern, wenn statt eines metallischen Einzelelektronen-Transistors ein Quantenpunkt verwendet wird [3].

Aufgrund der hohen Widerstände dieser Transistoren und der un-

Prof. Dr. Klaus Goeke, Dr. Maxim Polyakov (Kovalevska-Forscherguppe), Institut für Theoretische Physik II, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum

Dipl.-Phys. Eva M. Hübner, Center for NanoScience und Sektion Physik, Ludwig-Maximilians-Universität, Geschwister-Scholl-Platz 1, 80539 München; Prof. Dr. Robert H. Blick, Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1415 Engineering Drive, Madison WI, USA

vermeidbaren Streukapazitäten besitzen die beschriebenen Bauteile in der Regel eine schlechte RC -Konstante, die den Betrieb auf niedrige Frequenzen beschränkt. Hinzu kommt noch der Einfluss des $1/f$ -Rauschens, das die Auflösung begrenzt. In der Arbeit von Knobel und Cleland wurde der Einzelelektronen-Transistor daher als Mischer eingesetzt [2], was Messungen bei hohen Frequenzen mit großer Bandbreite erlaubt. Bei diesem Verfahren wird der Resonator bei seiner Eigenfrequenz von 117 MHz betrieben, während gleichzeitig eine Oszillatorspannung an die Gatterelektrode angelegt wird, deren Frequenz um etwa 1 kHz verschoben ist. Messgröße ist der Spannungsabfall am Einzelelektronen-Transistor bei der Differenzfrequenz im kHz-Bereich, dessen Verlauf die Resonanz des Balkens bei 117 MHz abbildet.

Damit ist es erstmals gelungen, eine mechanische Schwingungsanregung im Ausgangssignal des Transistors zu beobachten. Die von Knobel und Cleland erreichte Auflösung liegt bislang zwei Größenordnungen über dem erwarteten Übergang ins quantenmechanische Regime. Wie die Autoren bemerken, könnten jedoch ähnliche Resonatoren bei entsprechend hohen Eigenfrequenzen und sehr tiefen Temperaturen in einer optimierten Anordnung den Übergang von der klassischen Mechanik in das Regime der Quantenmechanik zeigen. Der experimentelle Nachweis der Nullpunktschwingung eines mechanischen Systems rückt damit erstmals in den Bereich des Möglichen.

EVA M. HÖHBERGER UND
ROBERT H. BLICK

- [1] R. H. Blick et al., Phys. Blätter, Januar 2000, S. 31; X. M. H. Huang et al., Nature **421**, 496 (2003)
- [2] R. G. Knobel und A. N. Cleland, Nature **424**, 291 (2003)
- [3] J. Kirschbaum et al., Appl. Phys. Lett. **81**, 280 (2002); E. M. Höhberger et al., Appl. Phys. Lett. **82**, 4160 (2003)
- [4] F. W. Beil et al., Nanotechnology **14**, 799 (2003)

Missing Link

Erstmals gelang es, die Verbindung zwischen einem kosmischen Gammastrahlenausbruch und einer Supernova nachzuweisen.

Am 29. März 2003 – um 11:37:14.70 Uhr Weltzeit – entdeckte der amerikanische Satellit HETE-II einen der hellsten Gammastrahlenausbrüche (Gamma Ray Burst, GRB) im All, der je beobachtet wurde.¹⁾ GRBs sind kurzzeitig am Himmel aufleuchtende, sehr helle Strahlungsquellen im Gamma-Band. Überraschend schnell stellte sich der Ursprung von GRB030329, so die offizielle Bezeichnung, heraus. Zunächst ließ sich am Very Large Telescope (VLT) der ESO in Chile mit dem UVES-Instrument die Rotverschiebung der Spektrallinien zu $z=0,1685$ bestimmen. Bei einer flachen Kosmologie (kosmologische Konstante $\Omega_{\Lambda}=0,7$) entspricht dies einer Leuchtkraft-Entfernung von ungefähr 800 Mpc. Unter Annahme einer isotropen Ausstrahlung ergibt sich damit eine Gesamtenergie von ca. 9×10^{44} J. Zum Vergleich: Beim Kollaps eines massereichen Sternes wird eine Bindungsenergie E_{SN} von über 10^{46} J frei – zu 99 % in Form von Neutrinos, sodass nur etwa 10^{44} J für die kinetische Energie der ausgestoßenen Materie übrig bleiben. Das optische Feuerwerk einer Supernova benötigt dagegen gerade einmal 10^{42} J!

Sehr rasch nach der Entdeckung verfolgten die Astronomen jede Nacht, über Tage und Wochen, das Nachglühen („afterglow“) des Bursts. Die Helligkeit im R-Band (720 ± 100 nm Wellenlänge) betrug während der ersten Beobachtungen etwa 12 mag – vermutlich war der GRB in den ersten Minuten sogar mit bloßem Auge sichtbar.

Beobachtungen innerhalb der ersten zwölf Stunden zeigten einen mittleren Abfall des Flusses proportional zu $t^{-\alpha}$ mit $\alpha \sim 1$ und signifikante Variationen auf Zeitskalen von Stunden. Da Messungen innerhalb der ersten Minuten und Stunden selten sind, ließen die Beobachtungen von Uemura et al. und Price et al. [1] neue Erkenntnisse erwarten.

Erste Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Gamma Ray Bursts und Supernovae lieferten GRB980425 und die Typ-Ic-Supernova SN1998bw [5]. Bei GRB030329 schien es nun möglich,