

- [4] L.-M. Duan et al., Nature **414**, 413 (2001)  
 [5] M. Fleischhauer und M. D. Lukin, Phys. Rev. Lett. **84**, 5094 (2000); Phys. Rev A **65**, 022314 (2002)  
 [6] D. F. Phillips et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 783 (2001); C. Liu et al., Nature **409**, 490 (2001)

## Erstes „exotisches“ 5-Quark-Teilchen entdeckt

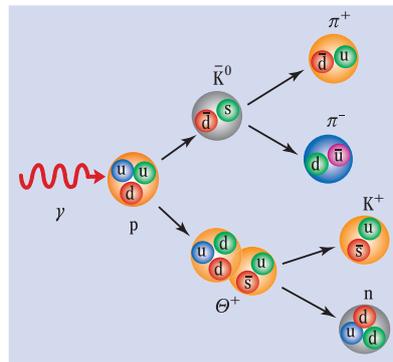
Der Fund ist eine Sensation: Seit über 40 Jahren hat man danach gesucht, jetzt wurde es von einer japanischen Arbeitsgruppe entdeckt und von weiteren Gruppen in Russland, den USA und Deutschland ebenfalls nachgewiesen: ein Baryon mit Namen  $\Theta^+$ , das nicht aus drei Quarks besteht wie das Proton und Neutron, sondern mindestens aus vier Quarks und einem Antiquark.<sup>1)</sup> Es handelt sich bei diesem „Pentaquark“ nicht nur um ein weiteres neues Teilchen unter vielen, sondern um eine neue Teilchensorte.

Die Messergebnisse bestätigen dabei die Berechnungen von Diakonov, Petrov und Polyakov, die diese gleichzeitig in St. Petersburg und Bochum durchgeführt hatten [1]. Nach ihrer Theorie musste das Teilchen ein „Soliton“ sein und aus mindestens vier Quarks und einem Antiquark bestehen. Die Idee mit dem Soliton an sich war damals nicht neu, aber niemand verwendete das Bild konsequent und berücksichtigte dabei die vielen bereits bekannten Daten „normaler“ Baryonen, um nach exotischen Baryonen zu suchen. Außer dem nun entdeckten  $\Theta^+$  sollten noch weitere exotische Teilchen mit ähnlicher Quarkstruktur vorkommen, die meisten von ihnen aber mit merklich geringerer Lebensdauer und deshalb schwieriger nachzuweisen. Bei dem  $\Theta^+$  war das anders, seine Masse konnte genau berechnet werden und seine Lebensdauer musste relativ groß sein.

Zunächst wurde die japanische Gruppe LEPS am Synchrotron-Labor Spring8 bei Osaka fündig [2]: Bei exakt der vorausgesagten Energie fanden die Forscher ein langlebiges Teilchen mit Ladung +1 und einem Anti-Strange-Quark – die Messung wurde zwei Monate später von der DIANA-Gruppe am Institut für Theoretische und Experimentelle Physik (ITEP) in Moskau bestätigt [3]. Die russischen Kollegen brauchten gar keine neue Messung, sondern werteten alte Blasenkammer-

Daten gezielt aus. Inzwischen durchforsteten auch US-amerikanische Physiker der CLAS-Kollaboration am Jefferson Laboratory ihre frisch erzeugten Daten aus der Elektronenstreuung und fanden ebenfalls das Teilchen, sogar mit noch größerer Genauigkeit [4]. Auch Physiker der HERMES-Kollaboration am Deutschen Elektron Synchrotron DESY und bei ELSA (Bonner Elektron-Stretcher Anlage) [5] konnten das  $\Theta^+$  präzise identifizieren.

Die Erkenntnis, dass Quarks fundamentale Bausteine der Materie sind, wurde von Gell-Mann und Zweig 1963 eingeführt, um die damals bekannten Baryonen zu klassifizieren und zu verstehen.<sup>2)</sup> Die



Eine der Reaktionen, bei denen das Pentaquark-Teilchen entdeckt wurde: Bei Bestrahlung von Protonen mit Photonen an ELSA entstehen  $\bar{K}^0 K^0$ -Paare. Das  $K^0$  verbindet sich mit dem Proton  $p$  zum  $\Theta^+$ .

beiden ordneten die Quarks zu einem Tripletts aus jeweils einem up-, down- und strange-Quark (u, d, s) an. Die Baryonen sollten sich durch Produkte dieser Tripletts, die sog. Multipletts (Singulets, Oktetts und Dekupletts), klassifizieren und ordnen lassen. Das bedeutete, dass die Baryonen dieser Multipletts eine Struktur aus drei Quarks haben müssten, das Proton z. B. sollte aus zwei up-Quarks und einem down-Quark bestehen (uud). Aufgrund dieses Schemas sagte damals Gell-Mann ein neues Teilchen im Dekuplett voraus, das  $\Omega^-$ , bestehend aus drei strange-Quarks (sss). Dieses berühmte  $\Omega^-$  wurde prompt entdeckt und brachte Gell-Mann den Nobelpreis ein. Alle Baryonen wurden seither in wachsendem Maße als Teilchen betrachtet, die aus drei Quarks (verschiedener „Farbladung“) bestehen. Alle Versuche, „exotische“ Teilchen mit einer anderen Quark-Anzahl zu finden, schlugen bislang ausnahmslos fehl. Diese Lage hat sich nun durch die Entdeckung von  $\Theta^+$  geändert.

Für das Soliton-Modell, auf dem die Voraussagen beruhen, ist das Vakuum nicht einfach ein leerer Raum wie im etablierten 3-Quark-Modell, sondern seinerseits ein kompletter See aus Quarks mit negativer Energie, eine zunächst überraschende Idee, die auf Dirac in den 30er-Jahren zurückgeht, im Rahmen der modernen Quantenfeldtheorie jedoch ihren etablierten Platz hat. Das Vakuum hat Baryonenquantenzahl  $B=0$ , ein Baryon hat  $B=1$ , was bedeutet, dass zum Vakuum drei (eng beieinander liegende) Quarks (jeweils  $B=1/3$ ) hinzugefügt werden müssen, um ein Baryon zu konstruieren. Diese drei Quarks wechselwirken mit den Quarks des Dirac-Sees, wodurch um sie im Vakuum eine Art „weiche Luftblase“ entsteht, die ihrerseits die drei Quarks beieinander hält und sie zu einem Baryon bindet. Diese „Luftblase“ nennt man Polarisation des Dirac-Sees.

Theoretisch lässt sich ihre Bildung so beschreiben, dass aus dem ungestörten Dirac-See in wachsendem Maße Quarks negativer Energie entfernt und auf positive Energiezustände gehoben werden, wobei jeweils ein Loch im Dirac-See (d. h. ein Anti-Quark) zurückbleibt. Die drei Saat-Quarks umgeben sich also mit einer Wolke aus Quark-Antiquark-Paaren, und diese Wolke stellt die „Luftblase“ und den polarisierten Dirac-See dar. Das Baryon besteht also aus drei Quarks plus dem polarisierten Dirac-See, beide Strukturen lassen sich nicht voneinander trennen und tragen zu den Quantenzahlen (Drehimpuls, Parität, Strangeness, etc.) des resultierenden gesamten Baryons bei. Das geht soweit, dass es Baryonen gibt, deren Quantenzahlen von den drei Saat-Quarks nicht aufgebracht werden können, also ohne die Polarisation des Dirac-Sees gar nicht möglich wären.

Ein solches „exotisches“ Baryon ist das  $\Theta^+$ . Bei ihm ist die Polarisation des Dirac-Sees so stark, dass sie sogar ein strange-Quark aus dem Dirac-See entfernt, es in einen positiven Energiezustand befördert und gleichzeitig in ein down-Quark umwandelt. Somit hat  $\Theta^+$  als wichtigste Komponente zwei up-Quarks und zwei down-Quarks kombiniert mit Anti-strange-Quark: uudd $\bar{s}$ .

Die einfachste Art ein  $\Theta^+$  herzustellen, besteht im Prinzip darin, ein positiv geladenes K-Meson  $K^+$  mit Quarkstruktur  $u\bar{s}$  auf ein Neu-

1) „Theta“, weil alle Baryonen außer dem Proton und Neutron mit großen griechischen Buchstaben bezeichnet werden, und „+“, weil es eine positive Elementarladung trägt. Die weitere wichtige Eigenschaft, dass es nämlich neben zwei up- und zwei down-Quarks noch ein strange-Antiquark enthält, findet sich nicht im Namen wieder.

2) Die Familie der Baryonen besteht aus den Nukleonen, d. h. Protonen und Neutronen, und vielen anderen „schweren“ Teilchen.

3) Diese entspricht 1530 MeV im Vergleich zum Proton mit 938 MeV und zum K-Meson mit 493 MeV.



tron (udd) zu schießen mit solchen kinematischen Bedingungen, dass sie sich zum  $\Theta^+$  (uudd $\bar{s}$ ) verbinden. Weil das  $\Theta^+$  jedoch eine so geringe Masse<sup>3)</sup> 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  $\Theta^+$  geschieht immer über seinen Zerfall in ein Teilchenpaar Proton- $K^0$  bzw. Neutron- $K^+$ . Sind Energie und Lebensdauer des  $\Theta^+$  bekannt, dann sind noch viele weitere Reaktionen denkbar, bei denen dieses Teilchen auftaucht und nachgewiesen werden kann. Da  $\Theta^+$  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

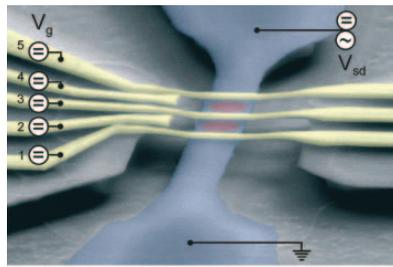
- [1] D. Diakonov, V. Petrov und M. Polyakov, Z. Phys. A 359, 305 (1997)
- [2] T. Nakano et al., Phys. Rev. Lett. 91/012002 (2003)
- [3] V. V. Barmin et al., hep-ex/0304040 (2003)
- [4] S. Stepanyan et al. (CLAS-collaboration), hep-ex/0307018 (2003)
- [5] J. Barth et al., hep-ex/0307083 (2003)

## 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 Impulskoordinate 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