

trinos könnten sich fundamentale Erkenntnisse über Entstehung und Aufbau unserer Erde und anderer Planeten gewinnen lassen.

KATHRIN A. HOCHMUTH

- [1] T. Araki et al., *Nature* **436**, 499 (2005)
- [2] B. D. Fields und K. A. Hochmuth, arXiv: hep-ph/0604001
- [3] K. A. Hochmuth et al., arXiv: hep-ph/0509136
- [4] R. de Meijer et al., *Nucl. Phys. News* **14**, no. 2, 20 (2004) und persönliche Mitteilung

Nachweis von Pentaquarks weiterhin ungesichert

Als vor zwei Jahren mehrere Kollaborationen der Teilchenphysik bekannt gaben, Pentaquarks beobachtet zu haben, war die Aufregung groß. Denn mit diesen Teilchen, die aus vier Quarks und einem Antiquark bestehen, wäre eine ganz neue Teilchensorte entdeckt. Doch nachdem inzwischen neue Daten auch von anderen Experimenten vorliegen, ist die Euphorie einer gewissen Ernüchterung gewichen. Die auf den großen Sommerkonferenzen der Hochenergiephysik in Uppsala (Lepton-Photon-Conference) [1] und Lissabon (HEP2005) [2] vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass erhebliche Zweifel am Nachweis der Pentaquarks angebracht sind.

Das große Interesse an Pentaquarks erklärt sich daraus, dass sie neue Einblicke in die Struktur der starken Wechselwirkung und die Wirkung der Bindungskräfte zwischen Quarks und Gluonen erlauben. Ihr Nachweis wäre ein direkter Beweis, dass Mesonen und normale Baryonen nicht die einzige Form hadronischer Materie sind. Die Theorie der starken Wechselwirkung ist die Quantenchromodynamik (QCD). Sie kennt drei Ladungszustände, so genannte Farben, die der SU(3)-Symmetrie gehorchen und deren Feldquanten acht farbgeladene Gluonen sind. Die starke Wechselwirkung wird durch den Austausch von Gluonen zwischen farbgeladenen Quarks vermittelt, von denen es sechs verschiedene Sorten gibt (u, d, s, c, b und t). Alle bisher bekannten stark wechselwirkenden Teilchen bestehen entweder aus einem Quark-Antiquark-Paar entgegengesetzter Farbe (Mesonen) oder aus drei Quarks unterschiedlicher Farben (Baryonen). Dies

sind die einfachsten farbneutralen Quarkkombinationen. Die bekanntesten Baryonen sind das Proton (uud) und das Neutron (ddu).

Die QCD erlaubt es im Prinzip, jedem Meson oder Baryon weitere farbneutrale Quark- und Gluonzustände hinzuzufügen und die Farbladungen intern so zu ordnen, dass das Gesamtobjekt farbneutral bleibt. Fügt man etwa einem Baryon ein Quark-Antiquark-Paar bei, so erhält man Pentaquark-Zustände aus vier Quarks und einem Antiquark. In diesem einfachen Bild sollten die Multiquarkzustände im Allgemeinen eine zu kurze Lebensdauer haben, um sie experimentell nachweisen zu können. Im Jahr 1997 haben Diakonov et al. mit Hilfe eines bewährten Solitonen-Modells der QCD jedoch für das Pentaquark, das aus zwei u-, zwei d- und einem Anti-s-Quark besteht, eine Masse von etwa 1530 MeV und eine sehr kleine Zerfallsbreite von weniger als 15 MeV vorhergesagt, die einer für hadronische Resonanzen vergleichsweise langen Lebensdauer von ca. 10^{-22} s entspricht [3]. Dieses Θ^+ genannte Pentaquark zerfällt in ein Proton und ein neutrales Kaon (pK^0 -Zerfall, $uudd\bar{s} \rightarrow uud + d\bar{s}$) oder in ein Neutron und ein positiv geladenes Kaon (nK^+ -Zerfall, $uudd\bar{s} \rightarrow udd + u\bar{s}$). Da das Antiquark von einer anderen Sorte ist als die Quarks, sind diese Zerfälle exotisch in dem Sinne, dass sie für normale Baryonen nicht möglich sind.

In den Jahren 2003 und 2004 wurde die Beobachtung vieler exotischer Resonanzen berichtet. Besonders interessant ist die Situation beim Θ^+ : Zehn Experimente sehen ein Signal, zehn andere keines. Grundsätzlich eignen sich alle Streuexperimente mit ausreichender Energie für die Suche, allerdings kann der Wirkungsquerschnitt je nach Erzeugungsmechanismus variieren. Da die QCD keine Vorhersagen über den Produktionsquerschnitt und -mechanismus macht, könnte eine vergebliche Suche weder die Existenz von Pentaquarks ausschließen noch als Test für die Gültigkeit der QCD dienen. Die ersten positiven Resultate kamen von den Fixed-Target-Experimenten der Photon-Nukleon- und Kaon-Nukleon-Streuung mit relativ niedriger Energie LEPS (Harima, Japan), DIANA (ITEP, Russland), CLAS (JLab, USA) und SAPHIR (Univ. Bonn). Später folgten Signale von Fixed-Target-Experimenten der Lep-

^{*)} Experimentell kommt erschwerend hinzu, dass man nur pK_s^0 -Zerfälle messen kann. Da das K_s^0 eine Linearkombination von K^0 und \bar{K}^0 ist, kann es sowohl s- wie Anti-s-Quarks enthalten. Daher könnte es sich bei diesen Zerfällen auch um ein unbekanntes angeregtes Σ^{*+} -Baryon (uus) handeln, auf das es allerdings nirgends sonst Hinweise gibt.

Dr. Wolfram Zeuner, DESY/ZEUS, Notkestr. 85, 22603 Hamburg

ton-Nukleon- und Nukleon-Nukleon-Streuung wie SVD (ITEP, Russland), HERMES (DESY, Hamburg) und COSY-TOF (Jülich). Auch das große Beschleunigerexperiment ZEUS am Elektron-Proton-Speicherring HERA hat ein positives Signal gemessen. Diese Messungen deuten darauf hin, dass das Θ^+ vornehmlich bei der Fragmentation eines Baryons entsteht. Die höchste Signifikanz des Signals von über 7σ meldete CLAS in der Photon-Proton-Streuung.

Je höher die Energie des Experimentes ist, umso schwieriger ist es, das Neutron aus dem nK^+ -Zerfall präzise nachzuweisen. Daher messen sowohl die Kolliderexperimente als auch die Fixed-Target-Experimente bei hoher Energie vornehmlich den pK^0 -Zerfall.^{*)} Alle gemessenen Massen sind im Rahmen ihrer Unsicherheiten miteinander verträglich. Die Θ^+ -Massen aus den pK_s^0 -Zerfällen sind aber grundsätzlich etwas niedriger als die aus den nK^+ -Zerfällen. Da die gemessenen Zerfallsbreiten von den experimentellen Auflösungen bestimmt sind, können die meisten Experimente nur obere Grenzen angeben, die um die 20 MeV liegen. Die wenigen gemessenen Zerfallsbreiten sind mit einigen MeV verträglich. Eine Analyse alter Blasenkammerdaten aus der Kaon-Neutron-Streuung ergibt als obere Grenze eine ungewöhnlich schmale Breite von wenigen MeV.

Vergeblich wurden Pentaquarks in Experimenten der hochenergetischen e^+e^- , $p\bar{p}$ - und p-Nukleon-Streuung gesucht. Darüber hinaus hat auch das H1-Experiment, das wie ZEUS bei HERA hochenergetische ep-Streuung untersucht, kein Signal gesehen. Die obere Grenze, die H1 für die Erzeugungswahrscheinlichkeit angibt, steht aber nicht im Widerspruch zu dem bei ZEUS gemessenen Wirkungsquerschnitt.

Grundsätzlich sind Pentaquarks auch mit anderem Quarkinhalt möglich. So hat das Experiment NA49 (CERN) die Beobachtung des Pentaquarks $\Xi_5^- (ddss\bar{u}) \rightarrow \Xi^- (dss) \pi^- (\bar{u}d)$ gemeldet und H1 (DESY) die des Charm-Pentaquarks $\Theta_c^0 (uudd\bar{c}) \rightarrow D^{*+} (d\bar{c}) p(uud)$. Beide Beobachtungen wurden von keinem anderen Experiment bestätigt.

Zu den Sommerkonferenzen hat die CLAS-Kollaboration vorläufige und auf wesentlich höherer Statistik basierende Ergebnisse zweier neuer Experimente der Photon-Proton-

und Photon-Deuterium-Streuung veröffentlicht. Vom Θ^+ findet sich darin keine Spur, und die jetzt gemessenen oberen Grenzen für die Erzeugungswahrscheinlichkeit sind mit den ursprünglichen Entdeckungen von CLAS und SAPHIR unvereinbar. Lediglich eine Resonanz mit einer Zerfallsbreite kleiner als etwa 1 MeV ist mit den neuen CLAS-Messungen vereinbar [4]. Eine neue Analyse der alten Deuterium-Daten von CLAS zeigt, dass der Untergrund möglicherweise unterschätzt wurde. Damit könnte eine Fluktuation von etwa 3σ als Signal von über 5σ interpretiert worden sein.

Die Experimente BaBar (SLAC, USA) und Belle (KEK, Japan), die keine Anzeichen für die Existenz des Θ^+ in e^+e^- -Annihilationen finden konnten, verfügen über exzellente Möglichkeiten der Teilchenidentifikation und über hohe Statistik. Dies erlaubt die Θ^+ -Suche mit dem Material des Detektors als Target. Als Strahl dienen aus dem ursprünglichen Strahl gestreute Elektronen oder Hadronen aus der e^+e^- -Wechselwirkung. Beide Experimente sehen keine Pentaquarks. Auf der anderen Seite gibt es aber auch neue Hinweise auf deren Existenz: SVD hat zusätzliche Daten neu analysiert und die Signifikanz des ursprünglichen Signals erheblich gesteigert. Bei LEPS und STAR (BNL, USA) gibt es ebenfalls neue, vorläufige positive Ergebnisse für Θ^+ und Θ^{++} .

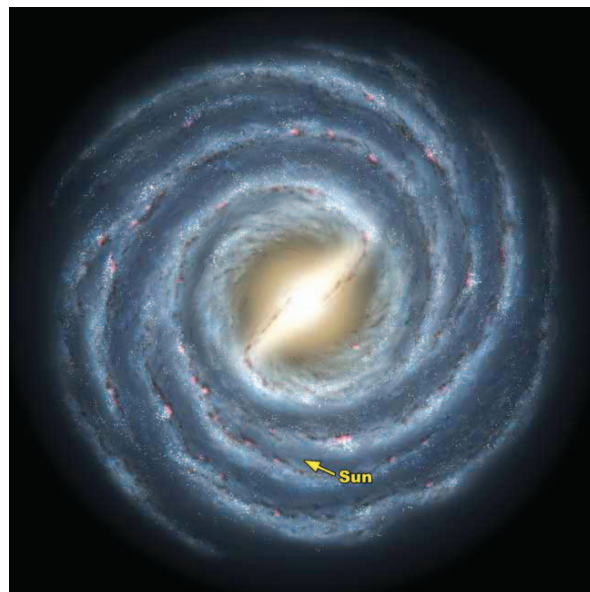
Auch wenn erhebliche Zweifel am Nachweis des Θ^+ -Pentaquarks angebracht sind, kann er bisher

nicht ausgeschlossen werden. Wenn das Θ^+ mit einer Breite, die den Nachweis erlaubt, existieren sollte, ist es am wahrscheinlichsten, dass es sich um eine extrem schmale Resonanz handelt, die vornehmlich in der Baryonfragmentation erzeugt wird. Die Suche nach Pentaquarks wird weitergehen, mehrere Experimente haben verbesserte Analysen angekündigt. Neue Fixed-Target-Experimente sind in Japan und den USA geplant. Die e^+e^- -Experimente Babar und Belle nehmen mit sehr großer Luminosität Daten und werden ihre Analysen mit höherer Statistik aktualisieren. HERA wird bis Mitte 2007 mit hoher Luminosität betrieben, sodass H1, ZEUS und HERMES neue Analysen mit deutlich höherer Statistik durchführen können. Die Suche nach Pentaquarks bleibt daher spannend. Es kann aber noch Jahre dauern bis feststehen wird, ob das Θ^+ mit den diskutierten Eigenschaften existiert oder nicht.

WOLFRAM ZEUNER

- [1] <http://lp2005.tsl.uu.se/~lp2005/>; Vortrag von Volker D. Burkert vom Jefferson Lab. USA
 - [2] www.lip.pt/events/2005/hep2005/; Vorträge in der Parallelsitzung Hadronic Physics
 - [3] D. Diakonov, V. Petrov und M. V. Polyakov, Z. Phys. A359, 305 (1997)
 - [4] W. Roberts, Phys. Rev. C 70, 065209 (2004)
- Eine detaillierte und kritische Diskussion fast aller experimentellen Pentaquarksuchen hat K. H. Hicks im April 2005 veröffentlicht – hep-ex/0504027.

Ein neues Bild der Milchstraße



Die Milchstraße ist keine gewöhnliche Spiralgalaxis, sondern weist im Zentrum einen 27000 Lichtjahre langen Sternbalken auf, wie in dieser Illustration gezeigt. Zu diesem Schluss kamen Astronomen, nachdem sie mit dem Spitzer Space Telescope der NASA die räumliche Verteilung von rund 30 Millionen Sterne in der Galaxis analysiert haben (Quelle: NASA/JPL-Caltech)