

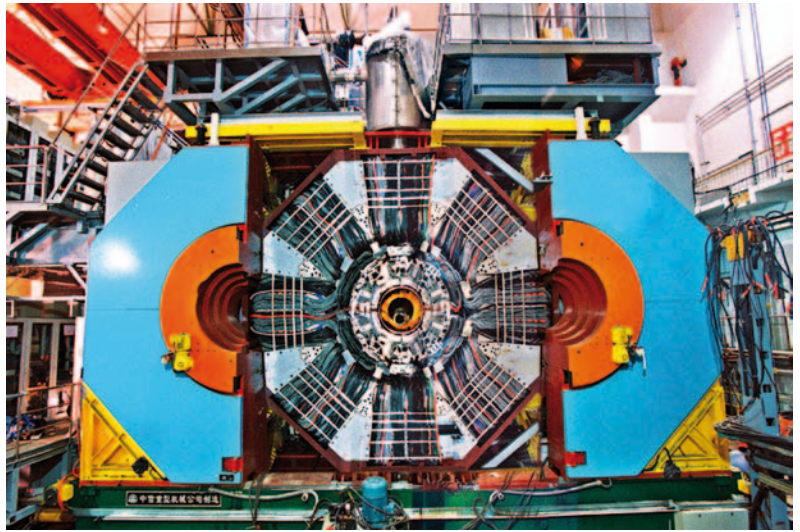
## ■ Quarks im Viererpack

Neue Beobachtungen deuten auf die Existenz exotischer Bausteine der hadronischen Materie.

In seiner wegweisenden Arbeit von 1964 führte Murray Gell-Mann erstmals Quarks mit nicht natürlichen Ladungen  $-1/3 e$  und  $+2/3 e$  als Grundbausteine der Materie ein. Die Theorie der starken Wechselwirkung, die Quantenchromodynamik (QCD), beschreibt die Bindung von Quarks durch den Austausch von Gluonen. Quarks und Gluonen besitzen Quantenzahlen der exakten lokalen Symmetriegruppe  $SU_c(3)$ , die man oft als deren „Farbe“ bezeichnet. Quarks sind keine freien Teilchen; nur in einem farbneutralen Zustand („Farb-Singulett“) existieren sie als Hadronen. Bisher kennen wir zwei Typen von Hadronen, die Mesonen aus Quark und Antiquark,  $q\bar{q}$ , und die Baryonen aus drei Quarks,  $qqq$ . In den vergangenen fünf Jahrzehnten haben Experimente mit großer Genauigkeit die Existenz der Quarks bestätigt und zu unserem heutigen Verständnis der atomaren Bausteine, der Neutronen und Protonen, und ihren schwereren Partnern geführt.

Gell-Mann schlug allerdings auch vor, nach so genannten Diquarks zu suchen. Diese bestehen aus zwei Quarks und sind seit langem das Studienobjekt der Theoretiker [1]. Obwohl Diquarks als freie Teilchen nicht möglich sind, können sie mit den Anti-Diquarks einen farbneutralen Viel-Quark-Zustand bilden. Die einfachste Realisierung ist die Bindung von Diquark und Anti-Diquark. Neben diesen Tetraquarks gibt es auch „hadronische Moleküle“ (Abb. 1), die ebenfalls aus vier Quarks bestehen, aber komplett anderer Natur sind. Dabei handelt es sich um den gebundenen Zustand aus zwei gewöhnlichen Mesonen, die Pionenaustausch zusammenhält – ein Mechanismus, der als Kernkraft das Proton und Neutron in einem Deuteron bindet.

Tetraquarks sind zwar aus Symmetriegründen erlaubt, stießen aber aus dynamischen Gründen auf Skepsis: Aufgrund ihrer Wellen-



Daten des chinesischen BESIII-Experiments bereichern die Quantenchromodynamik um eine ganz neue Facette.

funktionen sollten die Tetraquarks zu schnell in Mesonen zerfallen, um von einem gebundenen Zustand sprechen zu können. Dieses Mantra der Theoretiker hat sich bis heute gehalten. Langsam jedoch wandelt sich diese Überzeugung. So konnte Steven Weinberg kürzlich zeigen, dass der Zerfall eines Tetraquarks nicht zwingend diesem Muster folgen muss und mindestens eine bestimmte Klasse Tetraquarks genügend lang für einen Nachweis lebt [2].

Tatsächlich tauchen seit 2003 an verschiedenen Experimenten zusehends neue Exoten auf, die vorläufig mit X, Y und Z bezeichnet werden und von denen mittlerweile über 20 existieren. Dazu gehören auch bottom- und charm-artige Zustände, die kürzlich nachgewiesen wurden und den lange gesuchten unwiderlegbaren Beweis für die Existenz der Tetraquarks liefern könnten.

2012 gelang es der Belle-Kollaboration am KEK in Japan, die bottom-artigen geladenen Teilchen  $Z_b(10610)$  und  $Z_b(10650)$  nachzuweisen [3]. Dabei bezeichnen die in Klammern stehenden Zahlen die Masse der Teilchen in Einheiten von  $\text{MeV}/c^2$ . Am KEK werden Elektronen und Positronen auf mehrere GeV beschleunigt und zur Kollision gebracht. Dabei entstehen über

Zwischenzustände zunächst  $Z_b^+ \pi^+$  bzw.  $Z_b^+ \pi^-$ . Die  $Z_b^+$  lassen sich über die Zerfälle  $\pi^+ Y(nS)$  ( $n = 1, 2, 3$ ) und  $\pi^+ h_b(mP)$  ( $m = 1, 2$ ) nachweisen. Dabei sind  $Y(nS)$  die Spin-1-Grundzustände von Bottom- und Anti-bottom-Quarks ( $b\bar{b}$ ) bzw.  $h_b(mP)$  die angeregten P-Wellen-Zustände mit Spin 0. Offensichtlich besitzen beide  $Z_b$ -Teilchen mindestens vier Quarks: Um die große Masse zu erklären, müssen sie ein neutrales  $b\bar{b}$ -Paar besitzen. Und ihre Ladung setzt wenigstens zwei zusätzliche Quarks  $u\bar{d}$  ( $\bar{u}d$ ) für die positiven (negativen)  $Z_b$  voraus.

Belle hat diese Teilchen als hadronische Moleküle interpretiert. Derzeit ist unklar, über welche Zwischenzustände die  $Z_b$ -Zustände eigentlich entstehen: Zum einen könnten sie das Zerfallsprodukt eines gewöhnlichen  $Y(5S)$ -Zustandes sein, zum anderen das eines exotischen Zustandes mit Namen  $Y_b(10890)$ , für den Belle ebenfalls Indizien gefunden hat. Alle drei Zustände,  $Y_b(10890)$ ,  $Z_b(10610)$  und  $Z_b(10650)$  lassen sich aber auch als Tetraquarks erklären (siehe z. B. [4]). Da Belle das einzige Experiment ist, das die  $Z_b$ -Zustände nachweisen konnte, und nicht mehr in Betrieb ist, wird es wohl noch einige Jahre dauern, bevor sich die Beobachtungen durch das Nachfolgeexperiment Belle II in

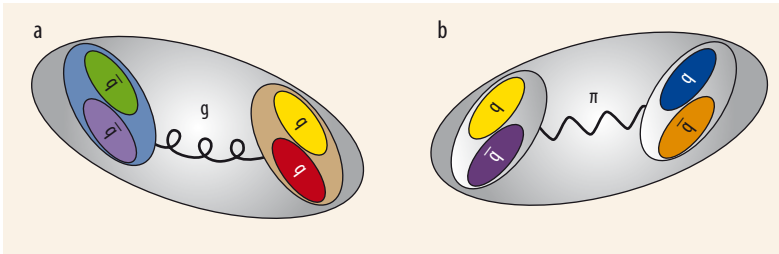


Abb. 1 Tetraquarks bestehen aus zwei nicht-farbneutralen Diquarks (a). Hadronische Moleküle aus zwei farbneutralen Mesonen (b) bedürfen nicht der Existenz

von Diquarks und daher auch keiner neuen Form quarkonischer Materie. Sie sind zwar Exoten im Teilchenzoo, jedoch weniger exotisch als Tetraquarks.

Japan oder am LHC bestätigen oder widerlegen lassen.

Die BESIII-Kollaboration am Beijing Electron Positron Collider konnte 2013 den charm-artigen Zustand  $Z_c(3900)$  beobachten [5], den Belle innerhalb einer Woche bestätigte [6]. BESIII konzentrierte sich bei der Datennahme auf eine Schwerpunktsenergie von  $4260 \text{ MeV}/c^2$ , bei welcher der bereits bekannte exotische Zustand  $Y(4260)$  liegt, den mehrere Experimente gesehen haben. Die Identität von  $Y(4260)$  ist ebenfalls rätselhaft: Erklärungen reichen von gebundenen Charm-Anticharm- und Gluon-Zuständen, den so genannten Hybriden, über P-Wellen-Tetraquark-Zustände  $[cq][\bar{c}\bar{q}]$  bis hin zu hadronischen Molekülen aus  $D_1\bar{D}$ . Unter Verwendung ihrer Vielzahl an Daten konnte BESIII in dem Zerfall dieses Zustandes das  $Z_c(3900)$  in der Reaktionskette  $e^+e^- \rightarrow Y_c(4260) \rightarrow \pi^+ Z_c^-(3900)$ ,  $\pi^- Z_c^+(3900) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$  nachweisen. Durch den Nachweis zweier unabhängiger Experimente ist dies die erste bestätigte Beobachtung eines Vier-Quark-Zustandes – eine historische Entdeckung, denn damit erweitert sich der Teilchenzoo um ein neues exotisches Mitglied.

So wegweisend diese Entdeckung auch ist, wurde sie aus phänomenologischen Gründen jedoch bereits erwartet. Die Interpretation der Zustände  $Y_b(10680)$ ,  $Z_b(10610)$  und  $Z_b(10650)$  als Tetraquarks legte die Suche nach den korrespondierenden charm-artigen Zuständen  $Z_c$  mit den Massen  $3750 \text{ MeV}/c^2$  bzw.  $3820 \text{ MeV}/c^2$  in der Zerfallskette  $Y(4260) \rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$  in [4] nahe. Die Daten von BESIII stimmen mit der vorgeschlagenen Interpre-

tation überein, wenn der schwerere der vorhergesagten Zustände als  $Z_c(3900)$  gedeutet wird.

Da für die hadronischen Moleküle die Energieschwellen für die Erzeugung von Mesonen eine bestimmende Rolle in der Dynamik spielen und  $Z_c(3900)$  nahe an der  $D\bar{D}^*$ -Schwelle liegt, ist in diesem Bild ein weiterer Zustand mit einer Energie von ca.  $4010 \text{ MeV}/c^2$  zu erwarten. Die gemessene Dominanz der Zerfallskette  $Z_c^+(3900) \rightarrow J/\psi \pi^+$  überrascht, denn  $Z_c^+(3900) \rightarrow D\bar{D}^*$  wäre zu erwarten gewesen, wurde jedoch nicht beobachtet. Derzeit hat es eher den Anschein, dass die Eigenschaften eines Tetraquarks die Daten besser erklären. Allerdings ist es bei der momentanen Datennlage schwierig, endgültig darauf zu schließen, was das  $Z_c(3900)$  im Innersten zusammenhält. Mittlerweile konnte BESIII Zustände in den Reaktionsketten  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- h_c(1P)$  und

$e^+e^- \rightarrow \pi^+(D^*\bar{D}^*)^-$  bei Massen von  $4020 \text{ MeV}/c^2$  nachweisen [7]. Hier fehlt allerdings noch ein abschließender Befund. So ist es bisher noch nicht klar, ob es sich dabei um einen oder zwei Zustände handelt.

In jedem Fall eröffnen die Entdeckungen ein neues Kapitel der Hadronenphysik und konfrontieren Physiker mit der faszinierenden Herausforderung, die mysteriösen Beobachtungen zu erklären. Von der Entdeckung der Zustände  $Z_b(10610)$ ,  $Z_b(10650)$  und  $Z_c(3900)$  bis zu einer endgültigen theoretischen Beschreibung ist es noch ein langer Weg. Vorstellbar ist aber durchaus, dass sich die von Gell-Mann prophezeiten Diquarks als Bausteine der hadronischen Materie endgültig experimentell etablieren.

Ahmed Ali, Christian Hambrock und Wei Wang

Prof. Dr. Ahmed Ali, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Notkestraße 85, 22603 Hamburg; Dr. Christian Hambrock, Fachbereich Physik, AG Hochenergie- und Teilchentheorie, TU Dortmund, 44221 Dortmund; Dr. Wei Wang, Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik und Bethe Center for Theoretical Physics, Universität Bonn, 53115 Bonn

- [1] R. L. Jaffe, Phys. Rev. D **15**, 267(1977); D. Strotmann, Phys. Rev. D **20**, 748 (1979)
- [2] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **110**, 261601 (2013)
- [3] A. Bondar et al. [Belle Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 122001 (2012)
- [4] A. Ali, C. Hambrock und W. Wang, Phys. Rev. D **85**, 054011 (2012)
- [5] M. Ablikim et al. [BESIII Collaboration], Phys. Rev. Lett. **110**, 252001 (2013)
- [6] Z. Q. Liu et al. [Belle Collaboration], Phys. Rev. Lett. **110**, 252002 (2013)
- [7] Changzheng Yuan [BESIII Collaboration], in: 26th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, San Francisco, USA, June 25, 2013 (www-conf.slac.stanford.edu/lp13)

KURZGEFASST

■ Ernie und Bert im ewigen Eis

Die internationale IceCube-Kollaboration hat mithilfe des gleichnamigen Detektors im Eis der Antarktis zwei extrem energiereiche Ereignisse nachgewiesen (genannt Ernie und Bert). Aus den sekundären Teilchenschauern ergab sich eine Energie von  $1,04 \pm 0,16$  und  $1,14 \pm 0,17 \text{ PeV}$ . Dies könnte ein Hinweis auf einen extrem energiereichen Neutrinofluss aus dem Weltall sein. Die Signifikanz liegt allerdings erst bei 2,8 Sigma. M. G. Aartsen et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 021103 (2013)

■ Kein Zerfall

Falls Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind, könnte bei einigen Kernen der neutrinolose Doppelbetazerfall auftreten. Eine neue Grenze für diesen Zerfall hat nun die GERDA-Kollaboration durch Messungen an dem Germani-

um-Isotop  $^{76}\text{Ge}$  gesetzt, bei dem der normale Betazerfall verboten ist. Aus der Tatsache, dass im Gran-Sasso-Untergroundlabor in Italien kein Signal für den neutrinolosen Doppelbetazerfall auftrat, folgt, dass die Lebensdauer von  $^{76}\text{Ge}$  hinsichtlich dieses Zerfalls mindestens  $2,1 \times 10^{25}$  Jahre beträgt. M. Agostini et al., arXiv:1307.4720v1 (2013), erscheint in Phys. Rev. Lett.

■ Eingefrorenes Licht

Forschern der TU Darmstadt ist es mithilfe der elektromagnetisch induzierten Transparenz (EIT) in einem Festkörper gelungen, Licht zu stoppen und ein Bild für eine Minute zu speichern. Die Forscher nutzten einen Praseodym-dotierten  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ -Kristall als kohärentes optisches Speichermedium. G. Heinze et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 033601 (2013)