

■ Charmante Pentaquarks?

Die LHCb-Kollaboration hat Zustände entdeckt, bei denen es sich um Pentaquarks handeln könnte.

Die Eichfeldtheorie der starken Wechselwirkung, die Quantenchromodynamik (QCD), ist eine der faszinierendsten Errungenschaften der modernen Physik. Ein besonders prägnantes und einzigartiges Phänomen ist der Farbeinschluss der fundamentalen Bausteine der Theorie, nämlich der Quarks (Materieteilchen) und der Gluonen (Austauschteilchen). Diese lassen sich niemals als freie Teilchen, sondern nur in farbneutralen Bindungszuständen, den stark wechselwirkenden Hadronen, beobachten. Dabei entspricht die Farbe der Ladung, welche die Quarks und Gluonen tragen bzw. an welche die Gluonen koppeln, analog zur elektrischen Ladung in der Quantenfeldtheorie des Elektromagnetismus. Der Nobelpreisträger Murray Gell-Mann hat Quarks 1968 als mathematische Entitäten eingeführt, um den Teilchenzoo der Baryonen und

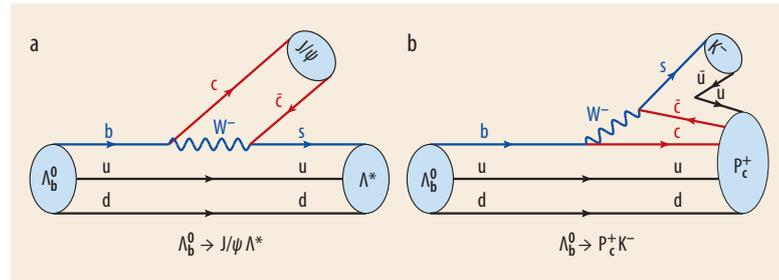


Abb. 1 Feynman-Diagramm für den Zerfall des schweren Hadrons Λ_b^0 , das in ein Charmonium J/ψ und ein angeregtes Hyperon Λ^* zerfällt (a). Die Daten lassen sich nur unter Berücksichtigung Penta-

Mesonen auf einige wenige grundlegende Bausteine zu reduzieren [1]. Dabei sind Baryonen wie das Proton aus drei Quarks aufgebaut und Mesonen wie das Pi-Meson aus einem Quark und einem Antiquark. Bereits Gell-Mann wies darauf hin, dass unter anderem auch Kombinationen aus zwei Quarks und zwei Antiquarks (Tetraquarks), aus vier Quarks und einem Antiquark (Pen-

quark-ähnlicher Zustände erklären (b). Im linken Diagramm zerfällt das Λ^* weiter in K^-p , rechts zerfällt das P_c^+ in ein $J/\psi p$. In beiden Fällen ist der Endzustand $J/\psi K^-p$.

taquarks) usw. erlaubt sind. Das heißt, dass man aus diesen Bausteinen Gesamtheiten mit ganzzahliger Ladung, ganzzahliger Baryonenzahl usw. zusammensetzen kann, wie sie in der Natur zu beobachten sind. Doch zu diesem Zeitpunkt gab es keinerlei experimentelle Hinweise auf solche Zustände.

Die Quantenchromodynamik hat diese Situation sogar noch „ver-

#) Eine wohlbekannte, aber oft nicht gültige Form ist die so genannte Breit-Wigner-Verteilung.

schlimmert“, denn sie lässt auch Bindungszustände aus Quarks und Gluonen (Hybride) oder nur aus Gluonen (Gluebälle) zu. Unklar blieb aber, warum nur konventionelle Mesonen und Baryonen zu beobachten sind. Daraufhin begann eine lange und ausdauernde Jagd auf Zustände mit vier oder mehr Quarks, ergänzt von zahlreichen theoretischen Rechnungen, von denen die meisten viele nicht-konventionelle Hadronen verschiedenster Art vorhersagten. Fast alle Hadronen sind instabil und zerfallen weiter. Daher spricht man analog zu den angeregten Zuständen im Wasserstoffatom von Resonanzen.

Erst seit einigen Jahren gibt es Hinweise auf Tetraquarks [2–4], also auf Formen der Materie jenseits der einfachsten Quark-Antiquark- und 3-Quark-Zustände. Die Natur dieser Teilchen wird heiß und kontrovers diskutiert. Aufgrund der momentanen Datenlage lässt sich nicht entscheiden, ob es sich um kompakte oder eher lose gebundene Objekte handelt, ob also deren Ausdehnung vergleichbar mit der Reichweite R der bindenden Kräfte ist oder sehr viel größer. Daher sind Untersuchungen der Linienformen, wie sie künftig der PANDA-Detektor an FAIR ermöglichen soll, unabdingbar. Die Linienform ist die Verteilung der Masse einer Resonanz als Funktion der Anregungsenergie.^{#)}

Ein neues Kapitel in diesem hochinteressanten Gebiet der starken Wechselwirkung hat die LHCb-Kollaboration am Large Hadron Collider aufgeschlagen: In Zerfällen des schweren Λ_b^0 -Hadrons, das aus einem Up-, einem Down- und einem Beauty-Quark aufgebaut und ungeladen ist, beobachteten die Wissenschaftler Zustände, die Pentaquarks ähneln [5]. Bei jeder hochenergetischen Proton-Proton-Kollision am LHC entsteht eine immense Anzahl von Teilchen. Um nach unkonventionellen Zuständen zu suchen, war es essenziell, das schwere Λ_b^0 -Hadron zu identifizieren und auszusortieren. Von den zahlreichen Zerfallskanälen des Λ_b^0 wurden der Zerfall in ein Charmonium J/ψ (ein

gebundener Zustand aus einem c - und einem \bar{c} -Quark) sowie ein angeregtes Hyperon Λ^* (uds) gemessen (Abb. 1a). Dieses angeregte Λ^* zerfällt weiter in ein Proton und ein negativ geladenes Kaon. Interessanterweise suchte die Kollaboration eigentlich nach anderen, eher konventionellen Aspekten. Zur großen Überraschung ließen sich die Daten aber nur beschreiben, wenn man außer allen bekannten Teilchen zwei Pentaquarks P_c^+ hinzunahm, und zwar $P_c(4380)^+$ und $P_c(4450)^+$. Hierbei gibt die Zahl in Klammern die Masse des Teilchens in Megaelektronenvolt (MeV) an; ein Proton beispielsweise wiegt 938 MeV. Die Zerfallsbreite dieser Teilchen beträgt 205 MeV bzw. 39 MeV, der leichtere Zustand ist also relativ „breit“, sein schwerer Partner sehr „eng“. Da diese Teilchen P_c^+ in den Endzustand J/ψ plus Proton zerfallen, muss es sich um Fünf-Quark-Zustände der Form $c\bar{c}uud$ handeln (Abb. 1b), also ein Paar „charmanter Pentaquarks“. In beiden diskutierten Fällen ist der gemessene Endzustand derselbe, nämlich $J/\psi K^- p$. Aber haben wir es wirklich mit solchen unkonventionellen Zuständen zu tun? Eine Warnung sollte uns die Geschichte des Pentaquarks Θ^+ ($uuds\bar{s}$) sein, das nach einer anfänglichen Phase der Sichtung in vielen verschiedenen Experimenten wieder in der Versenkung verschwand [6].

Was sagt die Theorie zu den neuen Beobachtungen? Kurz nach dem Erscheinen des Preprints auf dem arXiv-Server gab es innerhalb kürzester Zeit etwa 20 Publikationen, die mögliche Erklärungen zur Natur dieser Zustände gaben: als hadronische Moleküle, eng gebundene fünf Quark-Zustände oder stark korrelierte Diquark-Triquark-Zustände. Die einzige Vorhersage von Teilchen in diesem Massengebiet lieferte vor fünf Jahren eine chinesisch-spanische Arbeitsgruppe in Form dynamisch generierter Resonanzen aus D-Mesonen und Charm-Hyperonen [7]. Eine interessante Beobachtung ist, dass das $P_c(4450)^+$ weniger als ein Megaelektronenvolt von der χ_{c1} -Proton-Schwelle entfernt

ist [8], wobei es sich bei χ_{c1} um einen weiteren wohlbekannten Charmonium-Bindungszustand handelt. Schwelle bedeutet hier, dass gerade genug Energie vorhanden ist, um das Proton und das χ_{c1} zu erzeugen. Die extreme Nähe zu der Schwelle lässt vermuten, dass $P_c(4450)^+$ keine Resonanz, sondern ein kinematischer Schwelleneffekt sein könnte. Dieser Effekt ist aus der elementaren Streutheorie als „Wigner-Cusp“ bekannt: Öffnet sich ein neuer Kanal, kann sich der Wirkungsquerschnitt abrupt ändern, ähnlich wie bei einer Resonanz. Zusätzliche Messungen des Kanals $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c1} p K^-$ werden es erlauben, einen solchen Schwelleneffekt auszuschließen, da es in diesem Kanal einen solchen Effekt nicht geben kann. Weitere Einsicht in die Natur der vermuteten Pentaquarks können Photoproduktionsexperimente liefern – in naher Zukunft beispielsweise am Jefferson Laboratory mit den GlueX- und CLAS12-Experimenten [9, 10, 11].

Die Ergebnisse der LHCb-Kollaboration sind von großer Wichtigkeit, aber auch Beleg dafür, dass wir die Erzeugung aller möglichen Formen der stark wechselwirkenden Teilchen aus der QCD noch nicht wirklich verstehen. Die künftigen Proton-Antiproton-Experimente an FAIR könnten wichtige weitere Informationen liefern, um die Natur dieser Zustände aufzudecken.

Ulf-G. Meißner

Prof. Dr. Ulf-G. Meißner, Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik und Bethe Center for Theoretical Physics, Universität Bonn, 53115 Bonn sowie Institut für Kernphysik und Institute for Advanced Simulation, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich

- [1] M. Gell-Mann, Phys. Lett. **8**, 214 (1964)
- [2] S.-K. Choi et al. (Belle-Coll.) Phys. Rev. Lett. **100**, 142001 (2008)
- [3] M. Ablikim et al. (BESIII-Coll.), Phys. Rev. Lett. **110**, 252001 (2013)
- [4] R. Aaij et al. (LHCb-Coll.), Phys. Rev. Lett. **112**, 222002 (2014)
- [5] R. Aaij et al. (LHCb-Coll.), Phys. Rev. Lett. **115**, 072001 (2015)
- [6] K. H. Hicks, Eur. Phys. J. H **37**, 1 (2012)
- [7] J. J. Wu, R. Molina, E. Oset und B. S. Zou, Phys. Rev. Lett. **105**, 232001 (2010)
- [8] F. K. Guo, U.-G. Meißner, W. Wang und Z. Yang, arXiv:1507.04950 [hep-ph]
- [9] Q. Wang, X. H. Liu und Q. Zhao, Phys. Rev. D **92**, 034022 (2015)
- [10] V. Kubarovskiy und M. B. Voloshin, Phys. Rev. D **92**, 031502 (2015)
- [11] M. Karliner und J. L. Rosner, arXiv:1508.01496 [hep-ph]