

Neutronen im Viererpack

Experimente am japanischen Forschungsinstitut RIKEN deuten auf die Beobachtung eines gebundenen, virtuellen Vier-Neutronen-Systems hin.

Ulf-G. Meißner

Protonen und Neutronen sind die elementaren Bausteine der Atomkerne, welche die uns umgebende sichtbare Materie ausmachen. Ihre Bindungszustände sind Manifestationen der starken Wechselwirkung. In großer Anzahl können Protonen und Neutronen die sogenannte Kern- oder Neutronenmaterie formen. Letztere ist in Neutronensternen realisiert, die durch die Beobachtung von Gravitationswellen in das Zentrum der Forschung gerückt sind. Beim Verschmelzen zweier solcher Neutronensterne liefert das Spektrum der Gravitationswellen Rückschlüsse auf die Zustandsgleichung, welche die Eigenschaften von Neutronensternen bestimmt.

Nun sind Neutronensterne kompakte, makroskopische Objekte, die aus etwa 10^{57} Neutronen bestehen. Viel einfacher scheint die Frage zu sein, ob es Bindungszustände aus nur wenigen Neutronen ohne Protonen gibt, also leichte, neutrale Atomkerne. Schon seit den Anfängen der Kernphysik wird diese Frage diskutiert. Grundlegend hierbei ist die bekanntermaßen attraktive Neutron-Neutron-Wechselwirkung. Ihre anziehende Wirkung reicht jedoch nicht für einen Bindungszustand aus zwei Neutronen aus ($E < 0$), sondern nur für einen virtuellen Zustand ($E > 0$) sehr nahe der Zwei-Neutronen-Schwelle. Dies lässt sich auf die große Neutron-Neutron-Streulänge von $a_{nn} \approx -18$ fm zurückführen. Diese Streulänge ist unnatürlich groß: Die charakteristische Länge der nuklearen Bindung ist durch die Compton-Wellenlänge des Pions von etwa 1,5 fm gegeben.

Daher könnte diese Anziehung zu Bindungszuständen zwischen drei oder vier Neutronen führen. Dagegen spricht allerdings das Pauli-Prinzip, das effektiv einer abstoßenden Kraft gleichkommt. Sowohl frühe experimentelle Suchen als auch Rechnungen kamen zu dem Schluss, dass keine ge-

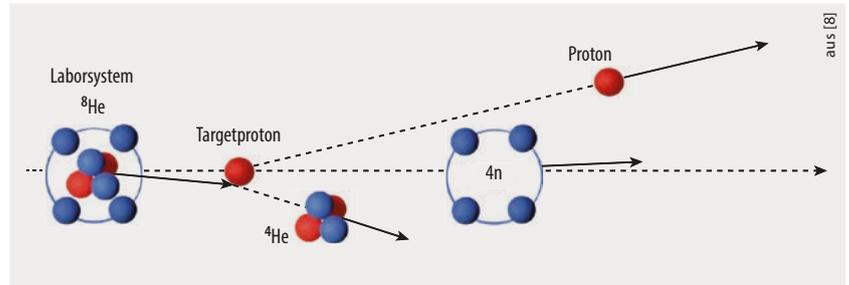


Abb. 1 Zur Beobachtung des Vier-Neutronen-Systems wurde ein hochenergetischer Strahl aus ^8He -Ionen auf ein Protonentarget geschossen. Bei dieser quasi-elastischen Streuung an einem Protonentarget im Laborsystem trennen sich der ^4He -Kern und die vier Neutronen.

bundenen Systeme aus drei oder vier Neutronen existieren. Jedoch bleibt die Möglichkeit, dass die Anziehung zweier Neutronen zu metastabilen Zuständen im Kontinuum führt, also zu Resonanzen mit der komplexen Energie $E = E_R - i\Gamma_R/2$. Hierbei bezeichnet Γ_R die Breite der Resonanz.

Eine erste Ab-initio-Rechnung führte Steve Pieper 2003 am Argonne National Laboratory in den USA durch [1], da es erste experimentelle Hinweise auf gebundene Vier-Neutronen-Systeme gab – sogenannte Tetraneutronen. Seine Rechnung zeigte allerdings, dass die erfolgreiche Beschreibung leichter Kerne basierend auf Zwei- und Drei-Nukleonen-Kräften mit einem solchen Zustand nicht verträglich ist. Allerdings fand er eine Resonanz bei $E_R \approx 2$ MeV mit unbestimmter Breite.

Die Messung der Ladungsaustauschreaktion $^4\text{He}(^8\text{He}, ^8\text{Be})4n$ am RIBF-Beschleuniger des Forschungsinstituts RIKEN in Japan, bei der 2016 eine resonante Vier-Neutronen-Struktur bei einer Energie von $E_R = (0,83 \pm 0,65_{\text{stat.}} \pm 1,25_{\text{sys.}})$ MeV mit einer Signifikanz von $4,9\sigma$ auftrat, belebte die Diskussion [2]. In der Folge gab es zahlreiche theoretische Arbeiten mit widersprüchlichen Ergebnissen. Eine Rechnung basierend auf Kräften der sehr erfolgreichen chiralen effektiven Feldtheorie fand

eine Tetraneutron-Resonanz bei vergleichbarer Energie und sagte darüber hinaus eine energetisch tieferliegende Trineutron-Resonanz voraus [3]. Exakte Kontinuumsrechnungen führen dagegen nur zu einer nichtresonanten Erhöhung der Zustandsdichte im Tri- und Tetraneukleonsystem nahe der Schwelle [5, 6]. Laut letzteren Rechnungen gibt es also einen offensichtlichen Widerspruch zwischen Theorie und Experiment [7].

Ein neues Experiment am japanischen RIBF-Beschleuniger liefert nun eine Evidenz für eine $4n$ -Resonanz bei $E_R = (2,37 \pm 0,38_{\text{stat.}} \pm 0,44_{\text{sys.}})$ MeV mit einer Breite von $\Gamma = (1,75 \pm 0,22_{\text{stat.}} \pm 0,30_{\text{sys.}})$ MeV [8], die einer Lebensdauer von $(3,8 \pm 0,8) \cdot 10^{-22}$ s entspricht. Die Signifikanz dieser Struktur liegt deutlich über 5σ . Hierbei wurde ein hochenergetischer Strahl aus ^8He -Ionen, bestehend aus zwei Protonen und sechs Neutronen, auf ein Protonentarget geschossen. Dadurch trennen sich der ^4He -Kern und die vier Neutronen, wobei sich Letztere rückstoßfrei in Strahlrichtung bewegen (**Abb. 1**). Durch genaue Vermessung des gestreuten Protons und des ^4He -Kerns gelang es, die fehlende Masse des Vier-Neutronen-Systems präzise zu rekonstruieren. Diese zeigt eine deutliche Erhöhung knapp oberhalb der Vier-Neutronen-Schwelle. Der

Fit einer Breit-Wigner-Verteilung an diese Daten führt auf die genannten Parameter.

Diese Untersuchung ist Teil einer neuen Generation von Experimenten, die Teilchenbeschleuniger weltweit nutzen, um Strahlen neutronenreicher Kerne zu produzieren. Diese wiederum dienen dazu, Multi-Neutronen-Systeme zu studieren und die Grenze der nuklearen Stabilität (Neutronen-Tropflinie) zu erkunden.

Ist nun die Frage nach der Existenz des Tetraneutrons beantwortet? Aus theoretischer Sicht braucht es Rechnungen zu dieser Reaktion unter Einbeziehung des Kontinuums, um mögliche Effekte der anderen Reaktionsprodukte auf das Vier-Neutronen-System gänzlich auszuschließen. Dazu bedarf es weiterer Entwicklungen in der Ab-initio-Kerntheorie, etwa basierend auf Gittermethoden [9]. Tatsächlich zeigt eine aktuelle Rechnung basierend auf einem verein-

fachten Reaktionsmodell, dass die gemessene Erhöhung nahe der Vier-Neutronen-Schwelle auch durch die Endzustandswechselwirkung des ^4He -Kerns mit den vier Neutronen zustande kommen kann [10]. Darüber hinaus widerspricht eine solche Resonanz der konformen Symmetrie, die in niederenergetischen Systemen mit unnatürlich großen Streulängen in guter Näherung gilt [11]. Auch von experimenteller Seite wäre eine Bestätigung wertvoll. Allerdings erscheint es herausfordernd, ein analoges System aus vier neutralen Teilchen mit einer Kontinuumsresonanz zu erzeugen. Eine Möglichkeit könnten Quantensimulationen mit kalten Atomen nahe einer Feshbach-Resonanz bieten, da sich Systeme mit unnatürlich großen Streulängen so einfach simulieren lassen.

[1] S. C. Pieper, Phys. Rev. Lett. **90**, 252501 (2003)

- [2] K. Kisamori et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 052501 (2016)
 [3] E. Epelbaum, H. W. Hammer und U.-G. Meißner, Rev. Mod. Phys. **81**, 1773 (2009)
 [4] S. Gandolfi et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 232501 (2017)
 [5] A. Deltuva, Phys. Lett. B **782**, 238 (2018)
 [6] M. D. Higgins et al., Phys. Rev. Lett. **125**, 052501 (2020)
 [7] F. M. Marqués und J. Carbonell, Eur. Phys. J. A **57**, 105 (2021)
 [8] M. Duer et al., Nature **606**, 678 (2022)
 [9] S. Elhatisari et al., Nature **528**, 111 (2015)
 [10] R. Lazauskas, E. Hiyama und J. Carbonell, arXiv:2207.07575v1 (2022)
 [11] H. W. Hammer und D. T. Son, Proc. Nat. Acad. Sci. **118**, e2108716118 (2021)

Der Autor

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

Kosmische Tiefenschärfe

Der wissenschaftliche Betrieb des James-Webb-Weltraumteleskops hat begonnen.

„Die Mondlandung der Astronomie“, so fasste ESA-Wissenschaftsdirektor Günther Hasinger ein Projekt zusammen, das wie kein anderes immer wieder auf der Kippe stand: Das James Webb Space Telescope (JWST), das nach über zwanzig Jahren Entwicklung, Bau und ausgiebigen Tests am 25. Dezember 2021 ins Weltall gestartet ist. Rund ein halbes Jahr dauerte es, um das JWST zu justieren und in Betrieb zu nehmen. Mit den ersten Farbbildern und Spektren

startete am 12. Juli sein wissenschaftlicher Betrieb. Die Premier-Bilder, aufgenommen im Infrarot-Bereich und für die Präsentation aufwändig aufbereitet, enthüllen beispielsweise erstmals den zweiten Stern im Zentrum des Südlichen Ringnebels (1). Die Deep-Field-Aufnahme (2), die US-Präsident Joe Biden bereits einen Tag vorab enthüllen durfte, lässt noch tiefer in die Vergangenheit des Universums blicken, als dies mit dem Hubble-Weltraumteleskop möglich

ist. Der visuellen Galaxien-Gruppe „Stephans-Quintett“ (3) und dem jungen Sternentstehungsgebiet NGC 3324 im Carina-Nebel (4) entlockt das JWST bislang ungesehene Details und lässt zukünftig weitere faszinierende Entdeckungen erwarten. Mehr auf [webb.nasa.gov](https://www.nasa.gov). (AP)

