

Hat Blei eine dicke Haut?

Die PREX-Kollaboration ermittelte für die Neutronenhaut des Isotops ^{208}Pb einen fast doppelt so großen Wert wie bisher gemessen.

Achim Schwenk

Die Frage nach der Größe der Atomkerne lässt sich bisher nicht vollständig beantworten [1]: Zwar wurden die elektrischen Ladungsverteilungen in den letzten 50 Jahren genau gemessen; die Verteilung der Neutronen ist aber nicht gut verstanden. Doch diese entscheidet nicht nur über die Größe des Kerns. Sie bestimmt auch die Anzahl der neutronenreichen Isotope eines Elements und schränkt die Größe von Neutronensternen ein.

Mit steigender Massenzahl haben stabile Atomkerne mehr Neutronen als Protonen, weil sich die geladenen Teilchen abstoßen. Der Überschuss

von Neutronen sorgt dafür, dass sich eine sogenannte Neutronenhaut um den geladenen Teil des Kerns entwickelt, die diesen um einige Zehntel Femtometer überragt. Nun hat die PREX-Kollaboration (Pb Radius EXperiment) die Dicke der Neutronenhaut von ^{208}Pb besser bestimmt [2].

Diese Dicke hängt von der starken Wechselwirkung zwischen den Nukleonen ab, die den Druck der Neutronenmaterie prägt. Dieser beruht auf dem Pauli-Prinzip und den Wechselwirkungen zwischen zwei und drei Nukleonen. Bei größerem Druck kann ein Atomkern weniger

zusätzliche Neutronen aufnehmen, und die Grenze gebundener neutronenreicher Isotope wird schneller erreicht. Der gleiche Druck verhindert, dass Neutronensterne kollabieren: Er stabilisiert sie gegen die Gravitation. Die Dicke der Neutronenhaut lässt sich aus Kernmassenmodellen ableiten oder mit sensitiven Observablen bestimmen. Ein Beispiel ist die elektrische Dipolpolarisierbarkeit [3], die angibt, wie gut die Ladungsverteilung im Innern des Kerns gegen die Neutronenverteilung polarisierbar ist.

Die schwache Wechselwirkung erlaubt es hingegen, die Neutronenverteilung direkt zu untersuchen. Die schwache Ladung der Neutronen unterscheidet sich mit $Q_w(n) = -0,990$ deutlich von derjenigen der Protonen: $Q_w(p) = 0,071$. So wie die elektromagnetische Wechselwirkung mit Photonen fast nur auf Protonen wirkt, koppelt die schwache Wechselwirkung mit Z^0 -Bosonen fast nur an Neutronen. Diese Eigenschaft nutzte die PREX-Kollaboration aus, um den Radius von ^{208}Pb durch elastische Elektronenstreuung zu messen [2, 4]. Dazu gilt es, die sehr kleinen Effekte der schwachen Wechselwirkung von denen der elektromagnetischen Wechselwirkung zu separieren. Dabei hilft, dass die schwache Wechselwirkung die Paritäts- oder Spiegel-Symmetrie, verletzt: Ein rechtshändiges Elektron, dessen Spin in Richtung

Kurzgefasst

Energier rekord gemessen

Erstmals ist es gelungen, das Spektrum der kosmischen Strahlung auf mehr als 1 PeV Energie zu erweitern. Am chinesischen Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) konnte ein Forschungsteam mit internationaler Beteiligung 530 Photonen mit mehr als 100 TeV detektieren; die höchste Energie betrug 1,4 PeV. Anhand der Teilchenschauer, die LHAASO mit drei Detektorsystemen nachgewiesen hat, konnte das Team die hochenergetischen Gammaquanten zu zwölf Quellen zurückverfolgen. Dazu gehören der Krebsnebel und das Sternentstehungsgebiet Cygnus Cocoon. Die Resultate erfordern es, die Theorie der galaktischen Beschleuniger anzupassen.

Zhen Cao et al., Nature 594, 33 (2021)

Symmetrisch ausgelöscht

Quantenteilchen müssen nicht ununterscheidbar sein, um sich gegenseitig auszulöschen. Das haben österreichische, deutsche und schweizerische Physiker gezeigt. Dazu nutzten sie eine optische Wellenleiterstruktur mit sieben Ein- und Ausgängen, um die Amplituden eingespeister Photonen zu überlagern. Treffen die Photonen gleichzeitig ein, interferieren sie am Ausgang. Sind die Kanäle 1, 3, 5 und 7 belegt und ununterscheidbare Photonen paarweise symmetrisch verteilt (z. B. Kanal 1–7 und 3–5), löschen sich alle aus. Das reduziert den maximal möglichen Übertragungsweg in der Quanteninformationsverarbeitung.

J. Münzberg et al., PRX Quantum 2, 020326 (2021)

◀ **Abb. 1** Um die hauchdünne Neutronenhaut des Atomkerns ^{208}Pb zu bestimmen, ist ein riesiger Aufbau in der Experimentierhalle A des Jefferson Lab in Virginia nötig.

seines Impulses zeigt, wechselwirkt etwas stärker mit Neutronen als ein linkshändiges. Aus dem Vergleich der entsprechenden Messergebnisse leitet sich der Einfluss der schwachen Wechselwirkung ab.

Das PREX-Experiment befindet sich am Jefferson Lab in Virginia, USA (**Abb. 1**). Es nutzt einen Strahl longitudinal polarisierter Elektronen mit 935 MeV Energie, dessen Polarisation mit 240 Hz wechselt. Die Elektronen streuen an einem Bleitarget und werden mit zwei hochauflösenden Spektrometern detektiert. Der Impulsübertrag bei der Streuung betrug $Q^2 = 0,00616 \text{ GeV}^2$, um besonders sensitiv auf den Radius der Neutronenverteilung zu sein. Dennoch war eine integrierte Messdauer von knapp 19 Tagen nötig. Für rechts- und linkshändige Elektronen ergeben sich für Millionen von Streueignissen leicht unterschiedliche Wirkungsquerschnitte σ_R und σ_L . Daraus lässt sich die paritätsverletzende Asymmetrie berechnen: $A_{PV} = (\sigma_R - \sigma_L) / (\sigma_R + \sigma_L)$. Aus dieser folgt die schwache La-

dungsverteilung, aus der sich die Neutronenverteilung ableitet – in Analogie zur elektrischen Ladungsverteilung der Protonen.

Bereits vor neun Jahren veröffentlichte die PREX-Kollaboration erste Ergebnisse zur paritätsverletzenden Asymmetrie A_{PV} [4]. Allerdings waren diese noch mit einer großen Unsicherheit von etwa zehn Prozent behaftet. Die nun vorliegenden Daten aus dem Run PREX-2 verbessern die Genauigkeit um einen Faktor zwei: Die Asymmetrie beträgt $(550 \pm 16^{\text{stat}} \pm 8^{\text{sys}})$ ppb [2]. In Kernmodellen hängt sie vom schwachen Ladungsradius R_W ab. Beim Vergleich mit diesen Vorhersagen resultiert aus den gemessenen Daten ein Wert von $R_W = (5,800 \pm 0,075) \text{ fm}$. Mit dem elektrischen Ladungsradius $R_{ch} = 5,503 \text{ fm}$ folgt für die Dicke der Neutronenhaut: $(R_n - R_p) = (0,283 \pm 0,071) \text{ fm}$ (**Abb. 2**). Die Unsicherheit dieses Wertes hängt nicht nur von den experimentellen Daten ab, sondern auch von den Kernmodellen. Weitere Messungen mit anderen Impulsüberträgen Q^2 könnten die Präzision der Resultate verbessern, sind aber sehr zeitaufwändig. Die Dicke der Neutronenhaut fällt unerwartet hoch aus: Experimente, die den Wert aus der elektrischen Dipolpolarisierbarkeit ableiteten, kamen auf 0,13 bis 0,19 fm [3]. Im

Rahmen der Unsicherheiten sind die Werte aber noch verträglich.

Aus einer dicken Neutronenhaut wie aus den PREX-Daten folgt ein hoher Druck neutronenreicher Kernmaterie [5]. Dieser Druck korreliert mit dem Radius eines Neutronensterns, der typischerweise etwa 1,4-mal so schwer ist wie unsere Sonne. Auf Basis der PREX-Daten könnten Neutronensterne im Mittel größere Radien besitzen, als von dem Gravitationswellensignal GW170817 beim Verschmelzen zweier Neutronensterne abgeleitet wurde [6]. Auch die Beobachtungen von Neutronensternen mit dem NICER-Teleskop auf der International Space Station sind eher mit dem bisher angenommenen Druck kompatibel [7]. Allerdings ist das Ergebnis der PREX-Kollaboration aufgrund seiner Unsicherheit immer noch konsistent mit den astrophysikalischen Beobachtungen im Rahmen der Fehler [8].

Um die Neutronenverteilung im Atomkern besser zu verstehen, soll die paritätsverletzende Elektronenstreuung auch auf andere Kerne angewandt werden. Am Jefferson Lab wird gerade das Experiment CREX zur Streuung an ^{48}Ca ausgewertet. Dieser leichtere Atomkern lässt sich im Gegensatz zu ^{208}Pb ab initio berechnen [1]. Darüber hinaus ist es am neuen MESA-Beschleuniger in Mainz geplant, die paritätsverletzende Streuung an Kernen im Rahmen des Exzellenzclusters PRISMA+ zu untersuchen [9].

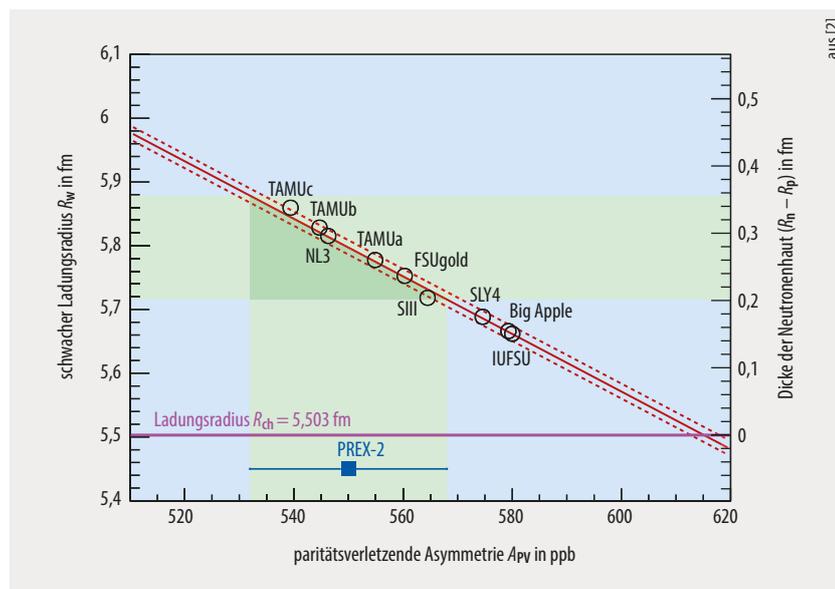


Abb. 2 Aus der gemessenen paritätsverletzenden Asymmetrie A_{PV} (blau) ergeben sich Wertebereiche für den Radius der schwachen Ladungsverteilung R_W und die Dicke der Neutronenhaut $(R_n - R_p)$. Dies folgt aus der Korrelation (Fit, rot) basierend auf verschiedenen Kernmodellen (schwarz). Der Ladungsradius R_{ch} (lila) ist zum Vergleich angegeben.

[1] G. Hagen et al., Nat. Phys. **12**, 186 (2016)
 [2] D. Adhikari et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 172502 (2021)
 [3] A. Tamii et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 062502 (2011)
 [4] S. Abrahamyan et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 112502 (2012)
 [5] B. T. Reed et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 172503 (2021)
 [6] B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **121**, 161101 (2018)
 [7] G. Raaijmakers et al., ApJL, im Druck (2021), arXiv:2105.06981
 [8] R. Essick et al., arXiv:2102.10074 (2021)
 [9] M. Neubert und H. Wittig, Physik Journal, April 2021, S. 35

Der Autor

Prof. Achim Schwenk, Ph.D., Institut für Kernphysik – Theoriezentrum, TU Darmstadt, Schlossgartenstr. 2, 64289 Darmstadt