

■ Kernkräfte auf dem Prüfstand

Mithilfe einer Penning-Falle ließen sich die Massen von neutronenreichen Kalium- und Calciumisotopen mit bislang unerreichter Präzision messen.

Die Masse eines Atomkerns ist wie der Fingerabdruck eines Menschen: einzigartig. Atome lassen sich nicht nur zweifelsfrei über diese Größe identifizieren, die Masse erlaubt außerdem Rückschlüsse auf das Wechselspiel der Kernkräfte zwischen den Kernbausteinen – Neutronen und Protonen – und auf das Anregungsverhalten der Atomkerne. Der Grund liegt in Albert Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$, welche die Äquivalenz von Energie und Masse zum Ausdruck bringt.

Die heute genaueste Methode zum Wiegen von Atomkernen ist die Massenspektrometrie mit Penning-Fallen [1], bei der geladene Teilchen in einer Überlagerung aus einem starken Magnetfeld und einem schwachen elektrischen Feld gespeichert sind. Die Ionen vollführen dabei charakteristische Schwingungsbewegungen, aus denen sich die Zyklotronfrequenz und damit, bei Kenntnis der Magnetfeldstärke, direkt die Masse des gespeicherten Teilchens ableiten lässt. Dies gelingt mit höchster Präzision sogar bei exotischen Kernen, die nur wenige Millisekunden leben [2] und von denen pro Sekunde deutlich weniger als ein Ion erzeugt wird [3]. Daher ist es möglich, relative Massengenauigkeiten von 10^{-8} selbst bei

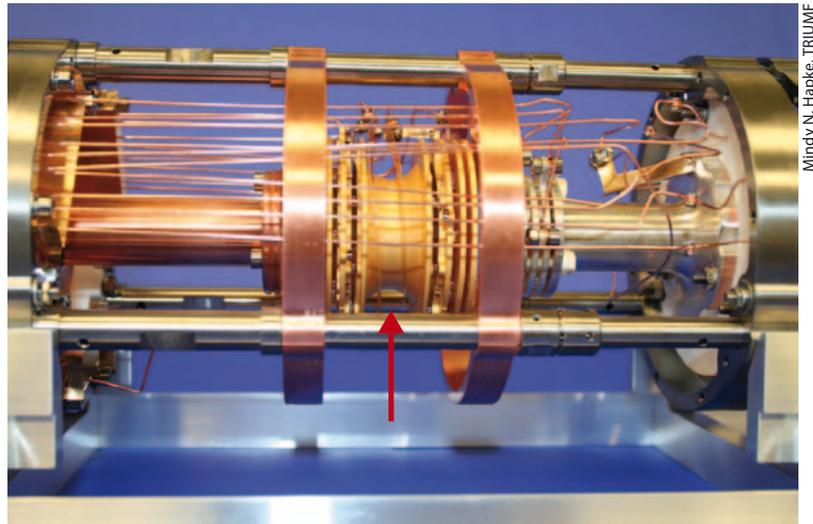


Abb. 1 Die TITAN-Penning-Falle, in der die Zyklotronfrequenzen und damit die Massen der gespeicherten exotischen

$^{51,52}\text{Ca}$ -Ionen gemessen wurden, besteht aus vergoldeten hyperbolisch geformten Kupferelektroden (roter Pfeil).

kurzlebigen Nukliden zu erreichen. Dies hat zu einer Renaissance in der Kernphysik geführt, weil es erstmals möglich war, neue Effekte in der Kernstruktur zu beobachten bzw. Vorhersagen detailliert zu überprüfen. Dazu zählt beispielsweise die Untersuchung von Schaleneffekten fernab der stabilen Nuklide, bei denen die „magischen Zahlen“, d. h. die Neutronen- und Protonenzahlen, bei denen Schalen komplett gefüllt sind, ihre Stabilität und damit „Magie“ verlieren und neue Strukturen auftreten. Ein besseres Verständnis dieser Schalen-

stabilität ist von großer Bedeutung für die Vorhersage der Grenzen der Kernlandschaft [4], wo Neutronen oder Protonen nicht mehr durch die Kernkraft zusammengehalten werden, und für die Vorhersagekraft von Massenmodellen für die nukleare Astrophysik.

Ein Durchbruch auf dem Gebiet der Kernphysik ist kürzlich Jens Dilling und seinem Team mit der TITAN-Penning-Falle am TRIUMF-Forschungszentrum für radioaktive Teilchenstrahlen in Vancouver (Kanada) gelungen, unterstützt durch die theoretischen Arbeiten der Gruppe um Achim Schwenk von der Technischen Universität Darmstadt [5]. In einer Penning-Falle (Abb. 1) wurden die Massen von extrem neutronenreichen Kalium- und Calciumisotopen in der Nähe der Neutronenzahl $N = 32$ hochpräzise gemessen und mit Vorhersagen moderner Kernstrukturrechnungen verglichen. Die Massen für $^{51,52}\text{Ca}$ sind damit um bis zu eine Größenordnung genauer bekannt. Die Ergebnisse weichen außerdem um fünf bzw. drei Standardabweichungen von früheren indirekten Messungen ab (Abb. 2). Insbesondere ist das Nuklid ^{52}Ca um fast 2 MeV stärker gebunden und damit von der gleichen Größenordnung wie

KURZGEFASST

■ Maser bei Raumtemperatur

Ein Maser ist nichts anderes als ein Laser, der Mikrowellenstrahlung aussendet. Allerdings funktioniert er gewöhnlich nur bei sehr kalten Temperaturen. Kürzlich ist es britischen Forschern gelungen, einen Maser bei Raumtemperatur zu realisieren, der bei 1,45 GHz emittiert. Dazu dotierten sie einen Kristall aus der organischen Substanz p-Terphenyl mit Pentazen-Molekülen, die sie mit gelbem Laserlicht anregten. Noch ist die Intensität der emittierten Strahlung gering und das Frequenzspektrum zu schmal für mögliche Anwendungen.

M. Oxborrow et al., Nature **488**, 353 (2012)

■ Erfolgreiche Suche

Ausschließen lässt sich der neutrinolose doppelte Betazerfall nicht, falls er aber stattfindet, dann im Fall von Xenon-136 mit der unvorstellbaren Halbwertszeit von einer Milliarde mal einer Million mal dem Alter des Universums. Das Experiment EXO-200 in New Mexico (USA) hat diesen Kernzerfall bislang vergeblich gesucht. Gelänge der Nachweis, wären Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen (sog. Majorana-Neutrinos). Damit wäre die Leptonenzahl anders als im Standardmodell der Teilchenphysik allerdings keine Erhaltungsgröße mehr.

M. Auger et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 032505 (2012)

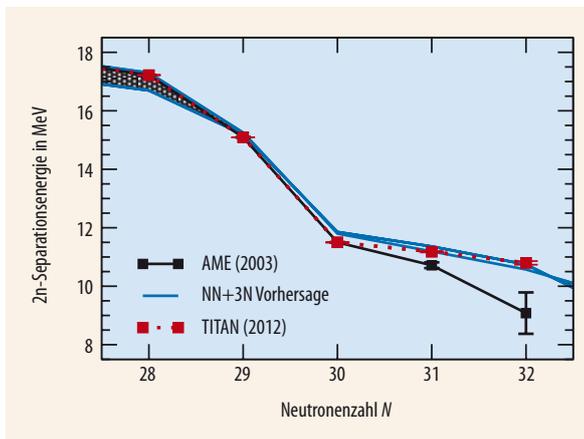


Abb. 2 Die Zweineutronen-Separationsenergie, d. h. die Bindungsenergie, mit der die letzten beiden Neutronen im Kern gebunden sind, nimmt als Funktion der Neutronenzahl ab. In schwarz sind die früheren experimentellen Ergebnisse aufgetragen. Die roten Datenpunkte stammen aus den jüngsten TITAN-Messungen. Die theoretischen Vorhersagen basierend auf Zwei- und Dreiteilchenkräften (NN+3N) sind in blau gezeigt. Das schwarze Band gibt eine erste Abschätzung der theoretischen Unsicherheit in der Vielteilchenrechnung.

die gesamte ^3H -Bindungsenergie.

Sehr interessant dabei ist, dass die neutronenreichen Calciumisotope sensitiv auf neue Aspekte der Kernkräfte sind. Theoretische Rechnungen hatten die höhere Bindungsenergie von $^{51,52}\text{Ca}$ vorhergesagt und dabei zum ersten Mal Dreiteilchenkräfte berücksichtigt [5,6]. Die chirale effektive Feldtheorie sagt die Form dieser Kräfte, die zwischen Neutronen- und/oder Protonen-Tripeln wirken, vorher [7]. Die Beiträge von Dreiteilchenkräften, bei denen drei Nukleonen direkt miteinander wechselwirken, treten nur in Drei- und Vielteilchensystemen auf und nehmen mit wachsender Teilchenzahl und damit wachsender Dichte zu. Sie sind daher besonders wichtig zur Beschreibung von Kernen, die relativ zu den stabilen $^{40,48}\text{Ca}$ -Isotopen neutronenreich sind. Damit ist

es gelungen, moderne Methoden der Berechnung von Kernkräften auf den Prüfstand zu stellen und neue Einblicke in die Kernwechselwirkungen zu erhalten. In Kürze wird es sogar möglich sein, die theoretischen Vorhersagen noch eingehender zu prüfen, denn jüngst ließen sich mit dem ISOLTRAP-Penning-Fallen-Massenspektrometer an der ISOLDE/CERN-Anlage für radioaktive Ionenstrahlen die Massen der kurzlebigen $^{53,54}\text{Ca}$ -Kerne erstmalig bestimmen – also noch zwei Neutronen weiter von der Stabilitätslinie entfernt.

Diese neuen Entwicklungen machen noch neutronenreichere Kerne – wie sie sich zukünftig beispielsweise bei der Forschungsanlage FAIR in Darmstadt erzeugen und untersuchen lassen – äußerst interessant für ein besseres Verständnis der fundamentalen Wech-

selwirkungen und ihrer Symmetrien. Das ist essenziell für die Entwicklung von Massenvorhersagen für eine große Bandbreite von Kernen, z. B. für die Nukleosynthese, sowie für die Modellierung von Neutronensternen, in denen dieselben Dreiteilchenkräfte wirken [8].

Klaus Blaum

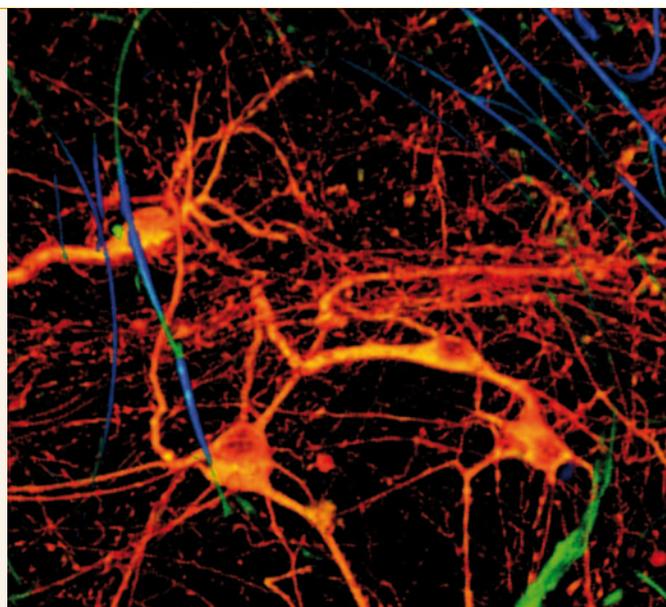
- [1] K. Blaum, Yu. N. Novikov und G. Werth, *Contemp. Phys.* **51**, 149 (2010)
- [2] M. Smith et al., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 202501 (2008)
- [3] E. Minaya Ramirez et al., *Science Express*, DOI: 10.1126/science.1225636
- [4] J. Erler et al., *Nature* **486**, 509 (2012)
- [5] A. T. Gallant et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 032506 (2012)
- [6] J. D. Holt et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **39**, 085111 (2012)
- [7] E. Epelbaum et al., *Rev. Mod. Phys.* **81**, 1773 (2009)
- [8] K. Hebeler et al., *Phys. Rev. Lett.* **105**, 161102 (2010)

Prof. Dr. Klaus Blaum, Saupfercheckweg 1, Max-Planck-Institut für Kernphysik, 69117 Heidelberg

ELEKTRONIK GEHT UNTER DIE HAUT

Elektronische Schaltkreise in menschliches Gewebe zu integrieren klingt eher nach Science Fiction als nach echter Wissenschaft. Forscher der Harvard University, vom MIT und vom Kinderkrankenhaus Boston haben nun den Weg geebnet, elektronische Sensoren in lebendes Gewebe zu integrieren. Sie beteten Feldeffekt-Transistoren (FET) aus Silizium, die aus 30 nm dünnen Nanodrähten aufgebaut waren, sowie die verbindenden Schaltkreise (blau und grün in der Abbildung) in eine poröse, biokompatible 3D-Matrix ein. Darauf kultivierten sie Nervenzellen (rot), die ein feines Netzwerk mit den FETs bildeten. Um den Nutzen ihrer Technik zu zeigen, verfolgten die Wissenschaftler den Einfluss von Noradrenalin auf die Zellen. Die neue Technologie könnte insbesondere interessant sein, um künstliches Gewebe (z. B. Muskeln oder Nervenzellen) herzustellen, deren Funktion auf elektrischen Signalen beruht.

B. Tian et al., *Nature Mat.*, DOI:10.1038/NMAT3404 (2012)



Charles Lieber und Daniel Kohane