

■ Universell im Zickzack

Das komplexe Verhalten von Kernladungsradien lässt sich nur schwer theoretisch erklären. Neue Ansätze beschreiben erstmals auch Ergebnisse der jüngsten laserspektroskopischen Experimente.

Die Struktur exotischer Atomkerne zeigt eine Fülle beobachtbarer Phänomene, die nur in komplexen theoretischen Modellen zugänglich sind. Ziel heutiger kernphysikalischer Forschung ist es daher, eine umfassende Beschreibung zu entwickeln, wie Protonen und Neutronen über die gesamte Nuklidkarte hinweg in Atomkernen gebunden sind. Dieses Vielteilchenproblem – beispielsweise besteht das Blei-Isotop ^{208}Pb aus 82 Protonen und 126 Neutronen – ist aus zwei Gründen herausfordernd. Einerseits gilt es, die starke Wechselwirkung auf die in diesem Energiebereich relevanten Freiheitsgrade von Protonen, Neutronen und Pionen zu übertragen. Andererseits müssen die theoretischen Methoden konsistent sein für alle Kerne, also auch für mehrere hundert Nukleonen. Mittelschwere Kerne mit Massenzahlen von $A \approx 50$ spielen hier eine besondere Rolle: Sie bilden die Brücke von Vielteilchenansätzen wie Dichtefunktionaltheorien zu Wenig-Teilchentheorien wie ab initio-Methoden, die Kernkräfte mit effektiven Feldtheorien zur Quantenchromodynamik verbinden [1].

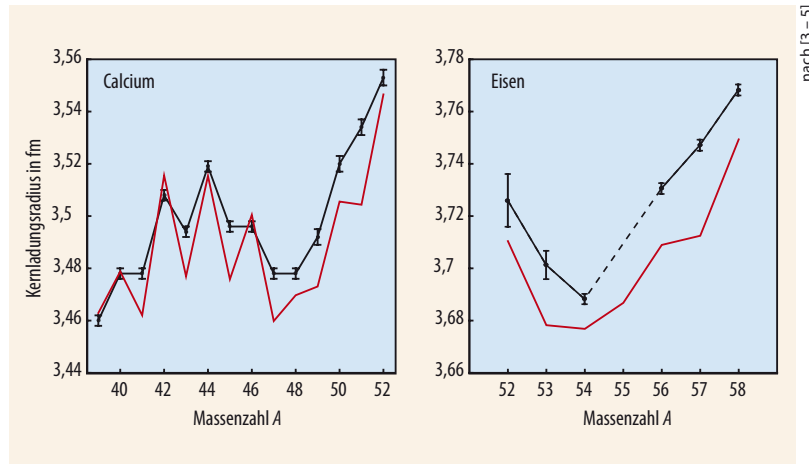


Abb. 1 In der Massenregion um $A = 50$ ergeben sich aus Dichtefunktionaltheorien mit Fayans-Funktionalen (rot) Kern-

ladungsradien, die sehr gut mit den experimentellen Werten übereinstimmen (schwarz).

Heutige Kernforschungsanlagen erlauben es, auch kurzlebige Atomkerne zu untersuchen, in Massenbereichen weit jenseits der Kernstabilität. Dort liegt eine hohe Asymmetrie zwischen Protonen- und Neutronenzahl vor – ein guter experimenteller Test für theoretische Modelle. Insbesondere die Kernladungsradien R_c lassen sich präzise mit Hilfe von Laserspektroskopie bestimmen [2]. Diese löst selbst die kleinen Unterschiede zwischen Isotopen eines chemischen Elements auf: Trotz der gleichen

Protonenzahl variiert R_c , weil die unterschiedliche Neutronenzahl die Verteilung der Protonen im Kern beeinflusst.

Daher ist die theoretische Beschreibung der Kernladungsradien für das Verständnis der Kernstruktur sehr bedeutend – und gleichzeitig sehr anspruchsvoll. Beispielsweise wird ein weitläufig beobachtetes Zickzack-Muster in R_c zwischen geraden und ungeraden Neutronenzahlen in einer Isotopenkette qualitativ mit der Bildung von Nukleonenpaaren assoziiert, ist aber mikroskopisch nicht vollständig verstanden. Ein weiteres Beispiel sind die Ladungsradien der Calcium-Isotope. Ab initio-Rechnungen stimmen bis ^{49}Ca gut mit den experimentellen Resultaten überein, können aber den schnellen Anstieg von R_c für $A \geq 50$ nicht vollständig erklären [3]. Neueste Dichtefunktionaltheorien, die auf so genannten Fayans-Funktionalen basieren, berücksichtigen einen Dichtegradienten im Paarungsterm [4]. Dieser Ansatz beschreibt sowohl das Zickzack-Muster in R_c für die Calcium-Isotope als auch den starken Anstieg von ^{49}Ca zu ^{52}Ca (Abb. 1). Außerdem gibt er das globale Verhalten der Kernladungsradien von Eisen-Isotopen wieder – inklusive der

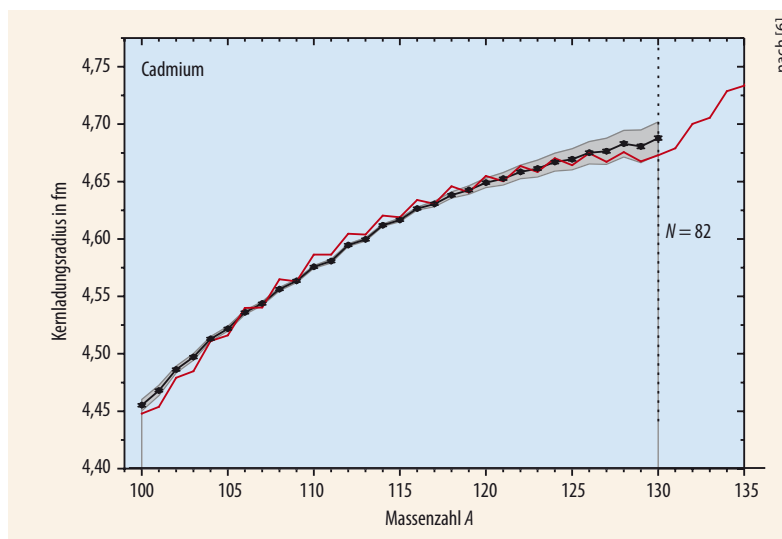


Abb. 2 Auch für Cadmium-Isotope liefern die Fayans-Funktionale (rot) eine gute Beschreibung der experimentell

bestimmten Ladungsradien (schwarz). Systematische Unsicherheiten (grau) entstehen um den Referenzpunkt ^{144}Cd .

kürzlich untersuchten Isotope ^{52}Fe und ^{53}Fe [5].

Um eine universelle Beschreibung der Kernladungsradien speziell bei schwereren Massen zu erreichen, sind die Fayans-Funktionale weiter anzupassen [4]. Dabei ist der Dichtegradient im Paarungsterm von zentraler Bedeutung. Das untermauern neueste Ergebnisse zu Cadmium-Isotopen. Mittels Laserspektroskopie gelang es an der ISOLDE-Anlage am CERN, die Ladungsradien für $A = 100$ bis 130 zu bestimmen [6]. Das umfasst beinahe die gesamte Neutronenschale zwischen den magischen Neutronenzahlen $N = 50$ und $N = 128$ – ein Bereich, der nur in wenigen Elementen experimentell vollständig zugänglich ist.

An der COLLAPS-Apparatur lassen sich die schnellen Ionen- und Atomstrahlen von ISOLDE in kollinear Geometrie mit einem Laserstrahl überlagern [2]. Der Laser regt die Ionen oder Atome an, sodass in Resonanz mit dem ausgewählten optischen Übergang Fluoreszenzphotonen in einer Nachweisregion registriert werden. Die Photonenzahl in Abhängigkeit der Laserfrequenz zeigt eine Hyperfeinstruktur im detektierten Spektrum. Aus den Differenzen der Schwerpunkte in den Spektren unterschiedlicher Cd-Isotope ergeben sich die Isotopieverschiebungen. Diese winzigen Unterschiede beruhen auf den leicht verschobenen elektronischen Zuständen, für die unter anderem die verschiedenen Kernladungsradien der Cd-Isotope verantwortlich sind. Die nun präzise bekannten R_c sowie deren Zickzack-Muster lassen sich überraschend gut von den Fayans-Funktionalen beschreiben, die schon bei den Ca- und Fe-Isotopen erfolgreich waren (Abb. 2). Es ist bemerkenswert, dass sich ein Modell – ursprünglich ausgezeichnet für die Beschreibung von Kernen mit Massenzahlen um $A = 50$ – erfolgreich auf die mehr als doppelt so schweren Cd-Isotope anwenden lässt. Entscheidend dafür ist es, den Dichtegradienten in der Neutronenpaarung zu berücksichtigen. Mit den nun gefundenen Fayans-

Funktionalen scheint dies im genau richtigen Maß zu gelingen.

Die Paarbildung von Nukleonen entlang der Isotopenketten muss in diesen unterschiedlichen Massenbereichen durch die gleichen Merkmale geprägt sein. Im Umkehrschluss sollten sich die Fayans-Funktionale oder andere Dichtefunktionaltheorien mit Hilfe der experimentellen Kernladungsradien so eingrenzen und verbessern lassen, dass sie beispielsweise eine bessere Extrapolation zu Neutronenmaterie – und damit einhergehend für die Radien von Neutronensternen – erlauben. Dafür bleibt zu klären, bis zu welchem Grad der Ansatz mit Fayans-Funktionalen auch andere Isotopenketten gut beschreibt beziehungsweise für welche Kerne zusätzliche Bestandteile für eine universelle theoretische Betrachtung von Kernladungsradien notwendig sind.

Ein umfassendes Verständnis der Struktur exotischer Atomkerne kann nur aus der engen Zusammenarbeit von Theorie und Experiment entstehen. Aus experimenteller Sicht tragen dazu sicher die Fortschritte bei hochsensitiven

Techniken für noch kurzlebigere Isotope bei, beispielsweise die kollineare Resonanzlaserionisation oder auf Ionenfallen basierende Methoden. Auch aufseiten der Produktionsmethoden gibt es neue vielversprechende Zugänge, welche für die Laserspektroskopie bisher unerschlossene Isotopenketten erreichen könnten. Die Methoden könnten sich an den im Aufbau befindlichen Beschleunigeranlagen ARIEL (TRIUMF, Kanada), FRIB (Michigan State University, USA) oder FAIR in Darmstadt realisieren lassen.

Stephan Malbrunot-Ettenauer
und Jens Dilling

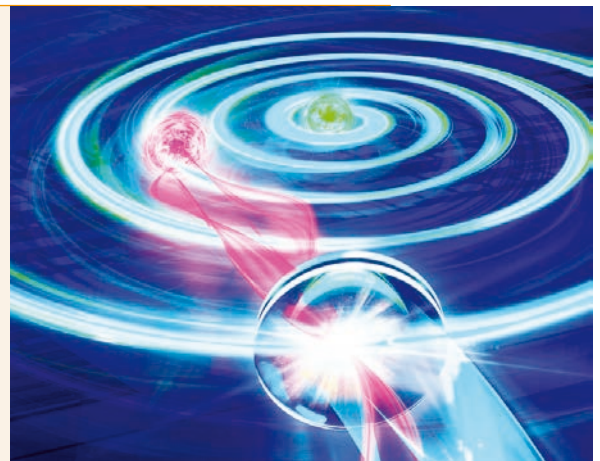
Dr. Stephan Malbrunot-Ettenauer, CERN, Schweiz, und Prof. Dr. Jens Dilling, TRIUMF und University of British Columbia, Kanada

- [1] G. Hagen et al., Nat. Phys. **12**, 186 (2016)
- [2] W. Nörtershäuser, Physik Journal, Mai 2018, S. 33
- [3] R. Garcia Ruiz et al., Nat. Phys. **12**, 594 (2016)
- [4] P.-G. Reinhard und W. Nazarewicz, Phys. Rev. C **95**, 064328 (2017)
- [5] K. Minamisono et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 252501 (2016)
- [6] M. Hammen et al., Phys. Rev. Lett. **121**, 102501 (2018)

AM FALSCHEN ORT

Ein Forscherteam der TU Wien, der Universität Innsbruck und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften hat erstmals einen Welleneffekt nachgewiesen, den der Physiker Charles G. Darwin – ein Enkel des bekannten Naturforschers Charles Darwin – vor über 80 Jahren vorhergesagt hat und der zu Messfehlern bei der optischen Positionsbestimmung von Objekten führen kann. Den Physikern gelang es zu zeigen, dass es zu einem systematischen Messfehler kommen kann, wenn die Position eines Objekts bestimmt wird, das elliptisch polarisiertes Licht ausstrahlt. Die Experimente führten sie durch mit einem einzelnen Bariumatom in einer Ionenfalle bzw. einem 100 nm kleinen Goldkügelchen.

Die elliptische Polarisation erzeugt eine spiralförmige Wellenfront des Lichts, die leicht schief auf die Abbildungsoptik fällt. Dadurch entsteht der Eindruck, die Quelle des Lichts liege etwas abseits seiner tatsächlichen Position. Relevant könnte dies zum Beispiel in der biomedizinischen Forschung



10001 Innsbruck / H. Ritsch

sein, wo fluoreszierende Proteine oder Nanoteilchen als Marker dienen, um biologische Strukturen zu bestimmen. Der nun nachgewiesene Effekt würde hier zu einem verzerrten Abbild der tatsächlichen Strukturen führen. (U Innsbruck)

G. Araneda et al., Nature Physics (2018), DOI: 10.1038/s41567-018-0301-y