

■ Vorstoß zu den Grenzen der Stabilität

Jenseits der bisher vermuteten Neutronenabbruchkante wurden nun die bislang neutronenreichsten Magnesium- und Aluminium-Atomkerne entdeckt.

Das Zahlenverhältnis von Neutronen und Protonen trägt entscheidend dazu bei, dass Atomkerne existieren und stabil sind. Gemeinsam mit der Coulomb-Abstoßung legt die starke Wechselwirkung in der Vielteilchendynamik die möglichen Kombinationen von Neutronen und Protonen fest, die zu gebundenen, teilchenstabilen Kernen führen. Die Lebensdauer dieser Kerne ist jedoch durch mögliche radioaktive Zerfälle begrenzt. Kurzlebige, radioaktive Kerne weit ab vom Tal der Beta-Stabilität heißen exotische Kerne. Sie zeigen völlig neue Struktur- und Zerfalleigenschaften, die für unser grundlegendes Verständnis der Kernmaterie eine Schlüsselrolle spielen. Unklar ist allerdings bislang, ob das erfolgreiche Kernschalenmodell in seiner bekannten Form auch weitab vom Stabilitätstal noch gültig ist oder ob neue physikalische Konzepte erforderlich sind.

Eine zentrale Herausforderung der modernen Kernstrukturphysik ist es deshalb, die Grenzen der Stabilität von Atomkernen genau zu bestimmen. Diesen sog. Abbruchkanten (engl.: driplines),

kann man sich experimentell nur schrittweise nähern [1]. Erst mit den neuen leistungsstarken Beschleunigeranlagen und ausgeklügelten Nachweissystemen ist es möglich, Atomkerne mit extremen Neutronen- oder Protonenüberschüssen in Kernreaktionen zu produzieren, zu separieren und eindeutig nach ihrer Protonen- (Z) und Neutronenzahl (N) zu identifizieren, um spektroskopische Untersuchungen durchzuführen. Doch warum sind die interessanten Kerne an den Proton- und Neutronenabbruchkanten im Labor so schwer erreichbar? Das liegt hauptsächlich an den geradezu winzigen Wirkungsquerschnitten bis hinunter zu wenigen Pico-Barn (10^{-36} cm^2), mit denen diese Kerne in Reaktionen mit stabilen Projektilen entstehen. Es verwundert also nicht, dass selbst die modernsten Beschleunigeranlagen nur wenige Dripline-Kerne pro Tag erzeugen und mit aufwändigen Separations- und Identifikationssystemen nachweisen können [2].

Weltweit gibt es nur wenige Anlagen, die diese schwierige experimentelle Aufgabe bewältigen können. Die sog. In-Flight-Separatoren ermöglichen dabei den Zugang zu den kurzlebigsten Kernen mit den kleinsten Bildungsquerschnitten. Solche Experimente sind an der GSI in Darmstadt mit dem Fragmentseparator FRS möglich. In diesen Anlagen werden exotische Kerne bei relativistischen Energien in mehreren magnetischen Stufen im Flug separiert [3]. Nach dem gleichen Prinzip – wenn auch bei wesentlich niedrigeren Energien – arbeitet der A1900-Separator im National Super-Conducting Cyclotron Laboratory (NSCL) der Michigan State University in den USA. Dort wurde kürzlich ein erfolgreicher Vorstoß an die Grenzen der Stabilität in der Mg-Gegend ($Z = 12$) unternommen. Mit einem ^{48}Ca -Projektilstrahl bei einer Strahlenergie von 141 MeV/u, also einer

kinetischen Energie von knapp 7 GeV, gelang es erstmals, extrem neutronenreiche Mg- und Al-Isotope in der Nähe der $N = 28$ -Schale zu erzeugen [4].

Im Experiment werden zunächst neutronenreiche ^{48}Ca -Kerne beschleunigt, um auf ein knapp millimeterdickes Wolframplättchen zu prallen. Die dabei entstehenden Reaktionsprodukte haben am Eingang des Separators noch eine sehr hohe kinetische Energie, sodass sie sich in elektromagnetischen Feldern in weniger als 10^{-6} s isotonenrein separieren lassen und auch als Sekundärstrahlen für Kernreaktionen oder spektroskopische Studien zur Verfügung stehen. Abb. 1 zeigt die Identifikation der Isotope aus einem Experiment am A1900-Separator. Von besonderem Interesse sind die markierten extrem neutronenreichen Mg- und Al-Isotope, die vor diesem Experiment nicht als stabile Atomkerne bekannt waren. Zwar haben theoretische Arbeiten schon seit langem vorhergesagt, dass die Neutronenabbruchkante erst bei ^{40}Mg oder jenseits davon liegen sollte, doch die experimentelle Bestätigung fehlte noch.

Die Beobachtung von ^{40}Mg und den noch schwereren Aluminium-Isotopen $^{42,43}\text{Al}$ überrascht in mehrfacher Hinsicht sehr. Aus der erzeugenden Reaktion lässt sich erkennen, dass z. B. für die Bildung von ^{40}Mg aus dem ^{48}Ca -Projektil acht Protonen so herauszulösen sind, dass der Endkern nicht genügend Anregungsenergie hat, um Neutronen bei der Abregung zu evaporieren. Noch komplizierter und entsprechend unwahrscheinlicher ist die Erzeugung der $^{42,43}\text{Al}$ -Ionen, denn diese können nur durch Projektilfragmentation in Kombination mit Neutronentransfer entstanden sein. Bei der gewählten Projektilenergie sollten solche Produktionsmechanismen stark unterdrückt sein. Die NSCL-Messungen sind sehr interessant für zukünftige Experimente auch bei noch höheren

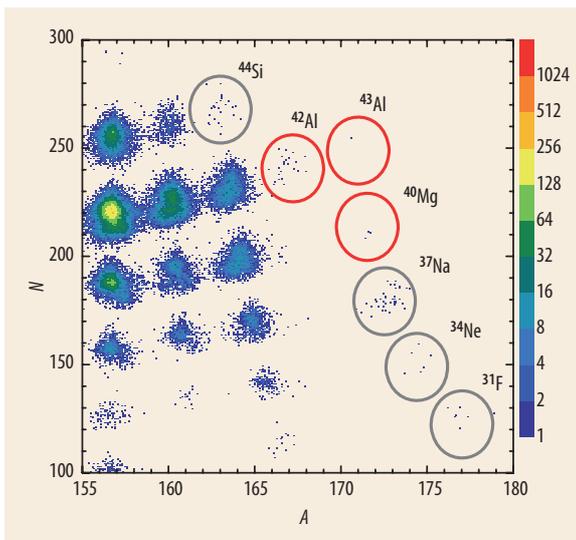


Abb. 1 Die Kerne, die durch Fragmentation von ^{48}Ca -Ionen erzeugt werden, lassen sich anhand von Messgrößen wie Flugzeit oder die Energiedeposition in einem dünnen Halbleiterdetektor identifizieren. Die neu entdeckten Kerne sind durch rote Ringe hervorgehoben, die Farbskala rechts gibt die Häufigkeit der jeweiligen Isotope an [4].

Energien wie an der GSI, denn diese Art von Reaktionen scheint sich für die Entdeckung von sehr exotischen Nukliden besonders gut zu eignen. Um die Dynamik dieser Reaktionen zu verstehen, sind weitere Experimente unbedingt erforderlich.

Aus den existierenden Rechnungen ergab sich bisher kein einheitliches Bild zur Lage der Neutronenabbruchkante in der Massengegend zwischen Sauerstoff und Nickel [5–7]. Die NSCL-Daten sind ein wichtiger Hinweis, dass die Abbruchkanten möglicherweise bei sehr viel größeren Neutronenzahlen zu finden sind, als man bisher angenommen hatte. Entsprechende theoretische Ergebnisse für die Separationsenergien (Hartree-Fock-Bogoljubow-Modellrechnungen, HFG) sagen voraus, dass die Stabilitätsgrenze erst bei ^{44}Mg erreicht wird [8, 9]. Die Ursache dafür ist das Zusammen-

spiel des nuklearen mittleren Potentials und die Restwechselwirkung zwischen Paaren von Nukleonen, aus denen die Valenznukleonen eine geringe, aber entscheidende zusätzliche Bindung erfahren. Ein wichtiger Mechanismus scheinen die virtuellen Anregungen zu sein, in denen Valenzteilchen kurzzeitig in das Einteilchenkontinuum gestreut werden, dem System also den Charakter eines offenen Quantensystems verleihen. Eine solche Dynamik kann offensichtlich erst dann auftreten, wenn die Energielücke zwischen Fermi-Kante und Kontinuumsschwelle kleiner ist als das typische Restwechselwirkungsmatrixelement. Diese Voraussetzung wird in Atomkernen nur in unmittelbarer Nähe der Abbruchkanten erreicht. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen für die Mg-Isotope ergeben entsprechende HFB-Rechnungen für Aluminium, dass die Abbruchkante bei ^{45}Al

erreicht wird, also für einen Kern mit einem zusätzlichen Proton, aber der gleichen Anzahl von Neutronen wie bei ^{44}Mg . Aus Sicht der Kernstrukturphysik sind die neuen Experimente am NSCL Signale zum Aufbruch zu neuen Ufern.

Hans Geissel und Horst Lenske

Prof. Dr. Hans Geissel, 2. Physikalisches Institut, Universität Giessen und GSI Darmstadt; Prof. Dr. Horst Lenske, Institut für Theoretische Physik, Universität Giessen und GSI Darmstadt

- [1] M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. **67**, 1187 (2004), B. Jonson, Phys. Rep. **389**, 1 (2004)
- [2] R. Schneider et al., Z. Phys. **A348**, 241 (1994)
- [3] H. Geissel et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **70**, 286 (1992); ibid. B **204**, 71 (2003)
- [4] T. Baumann et al. Nature **449**, 1022 (2007)
- [5] E. Caurier et al., Phys. Rev. C **58**, 2033 (1998)
- [6] D. Lunney, J. M. Pearson und C. Thibault, Rev. Mod. Phys. **75**, 1021 (2003)
- [7] M. Samyn et al., Phys. Rev. C **70**, 044309 (2004)
- [8] F. Hofmann und H. Lenske, Phys. Rev. C **57**, 2281 (1998)
- [9] H. Lenske, F. Hofmann und C. M. Keil, Rep. Prog. Nucl. Part. Phys. **46**, 187

■ Kandidatenkür für kosmische Beschleuniger

Die Pierre-Auger-Kollaboration findet Hinweise darauf, dass Aktive Galaktische Kerne kosmische Teilchen auf höchste Energien beschleunigen.

Seit bald hundert Jahren kennt die wissenschaftliche Welt die „kosmische Strahlung“ und untersucht in einem weit verzweigten Forschungsfeld seither die vielfältigen Aspekte dieses natürlichen Phänomens. Von besonderem Interesse sind die „kosmischen“ Teilchen höchster Energie bis etwa 10^{20} eV – das ist das Zehnmillionenfache der Energie, die sich in Beschleunigerlabors erreichen lässt. Im Jahr 1962 hat John Linsley in einem Pionierexperiment erstmals ein Teilchen mit einer Energie jenseits von 10^{20} eV beobachtet, indem er auf dem Erdboden Sekundärteilchen des Teilchenschauers registrierte, den das primäre Teilchen beim Stoß mit Molekülen in der Atmosphäre erzeugt. Trotz großer Fortschritte sind einige wichtige Fragen noch immer unbeantwortet, insbesondere die Frage nach den kosmischen Beschleunigern, die die Teilchen auf diese enorme Energie

bringen. Kürzlich hat nun die Pierre-Auger-Kollaboration Evidenz dafür vorgelegt, dass der Ursprung dieser höchstenergetischen Teilchen in sog. Aktiven Galaktischen Kernen liegen könnte [1].

Bereits unmittelbar nach Linsleys Beobachtung wurden größere Detektorfelder in Angriff genommen, bei denen Wassertanks oder Szintillationszähler über eine möglichst große Fläche verteilt sind und das von den Sekundärteilchen erzeugte Cherenkov-Licht detektiert wird. Mit einer instrumentierten Fläche von zehn Quadratkilometern war das japanische AGASA-Experiment bis vor kurzem das größte solche Detektorfeld. Eine parallel dazu entwickelte andere Nachweisteknik beruht darauf, die Fluoreszenz zu detektieren, zu der die Sekundärteilchen die Stickstoffmoleküle in der Atmosphäre anregen. Die Fluoreszenzphotonen bilden einen leuchtenden „Strich“

am Himmel. Dieser lässt sich mit „Teleskopen“ aus Photomultipliern, die wie ein Fliegenauge angeordnet sind, registrieren. Diese Technik hat den großen Vorteil, dass der ganze Teilchenschauer und seine detaillierte Entwicklung zu sehen sind und sich damit recht direkt die Energie des einfallenden Teilchens bestimmen lässt. Außerdem erlaubt sie es, ein großes Luftvolumen zu erfassen. Mit mindestens zwei „Fliegenaugen“ wie beim HiRes-Projekt in Utah ist auch der räumliche Verlauf des Schauers rekonstruierbar.

Nach der allgemeinen Maxime, dass das nächste Experiment nur Erfolg haben kann, wenn es seine Vorgänger in Qualität und Sensitivität um mindestens eine Größenordnung übertrifft, wird derzeit das Auger-Experiment in der argentinischen Pampa auf etwa 1500 Meter Höhe realisiert. Die Kollaboration, der rund 370 Mitglieder aus 104