

## ■ Magische Zahlen in Kalzium

Das exotische Isotop Kalzium-54 zeigt eine neue magische Neutronenzahl.

Atomkerne mit „magischen“ Neutronen- und Protonenzahlen 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 sind besonders stabil und bilden wichtige Ankerpunkte im Verständnis der Kernkräfte. Die magischen Zahlen entsprechen abgeschlossenen Schalen im Schalenmodell, für das Maria Goeppert-Mayer und Hans Jensen vor fünfzig Jahren den Physik-Nobelpreis erhielten.

Nach heutigem Stand wurden bislang nur die Hälfte der Atomkerne, die von der starken Wechselwirkung zusammengehalten werden, entdeckt [1]. Die Mehrzahl der unbekannt, exotischen Kerne sind extrem neutronreiche Isotope, die nur für kurze Zeit oder bei extremen Bedingungen existieren, wie in der Kruste von Neutronensternen. Die Vorhersage von magischen Zahlen für exotische Kerne ist von großer Bedeutung für die Entstehung der Elemente im Universum, da deren Nukleosynthese aufgrund der höheren Bindungsenergie bevorzugt entlang magischer Neutronenzahlen verläuft.

Eine besonders interessante Region bei der Erforschung der Schalenstruktur stellt die Kette der Kalzium-Isotope dar. Mit magischer Protonenzahl  $Z = 20$  umfasst sie zwei der wenigen doppelt-magischen Kerne:  $^{40}\text{Ca}$  und  $^{48}\text{Ca}$  mit  $N = 20$  bzw. 28. Der Schalenabschluss spiegelt sich in einer hohen Anregungsenergie und hohen Ein- und Zwei-Neutronen-Separationsenergien wider. Das



Abb. 1 Der Superconducting Ring Cyclotron an der Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) in Japan beschleunigt Primär-Teilchenstrahlen aus Zink-70-Ionen. Nach Fragmentation wurden

Strahlen aus Scandium-55 und Titan-56 mit Hilfe des BigRIPS-Separators selektiert, aus denen nach Herausschlagen von ein bzw. zwei Protonen schließlich Kalzium-54 erzeugt wird.

heißt, der Kern ist inert gegen Anregungen und die Abtrennung von Neutronen. So fällt die Anregungsenergie von 3,8 auf 1,0 MeV von  $^{48}\text{Ca}$  zu  $^{50}\text{Ca}$ , mit einem ähnlichen Abfall in der Zwei-Neutronen-Separationsenergie. Außerdem sind die Kalzium-Isotope besonders interessant, da neue theoretische Rechnungen zeigen, dass Dreiteilchenkräfte zwischen Neutronen und Protonen essenziell sind für die Entstehung „magischer“ Zahlen [2, 3]. Dreiteilchenkräfte werden in effektiven Feldtheorien der Quantenchromodynamik vorhergesagt und spielen auch in anderen stark wechselwirkenden Quantensystemen eine wichtige Rolle [4].

In der Untersuchung magischer Strukturen sind dieses Jahr zwei Meilensteine bei den Kalzium-Isotopen gelungen [5, 6]. An der Isotopenfabrik ISOLDE am CERN ließen sich erstmals die Massen und damit, gemäß  $E = mc^2$ , die Bindungsenergien der Kalzium-Isotope  $^{53}\text{Ca}$  und  $^{54}\text{Ca}$  bestimmen [5]. Dazu haben Wissenschaftler der ISOLTRAP-Kollaboration ein Multireflexions-Flugzeit-Massenspektrometer zur Untersuchung

exotischer Kerne eingesetzt. Bei der Flugzeitmessung werden Ionen unterschiedlicher Masse auf verschiedene Geschwindigkeiten beschleunigt und nach Durchlaufen einer Driftstrecke separiert. Das neue Massenspektrometer benutzt außerdem den Trick, Ionen hin und her zu reflektieren, sodass kilometerlange Driftstrecken mit dem metergroßen Präzisionsexperiment möglich sind. Die erstmals bestimmten Massen führen zu einer Zwei-Neutronen-Separationsenergie und zu einem Schalenabschluss, der in  $^{52}\text{Ca}$  ähnlich stark ist wie in  $^{48}\text{Ca}$ . Dies stimmt sehr gut mit theoretischen Vorhersagen mit Dreiteilchenkräften überein und zeigt eindeutig die doppelt-magische Struktur des exotischen  $^{52}\text{Ca}$ .

Den zweiten Durchbruch erzielten nun Wissenschaftler der Universität Tokyo und dem RIKEN Nishina Center in Japan [6]. Ihnen gelang es erstmals, die Anregungsenergie von  $^{54}\text{Ca}$  zu bestimmen. An der Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF, Abb. 1) erzeugten sie schnelle Teilchenstrahlen von  $^{55}\text{Sc}$ - und  $^{56}\text{Ti}$ -Isotopen, mit einem bzw. zwei Protonen mehr als  $^{54}\text{Ca}$ . Durch



Abb. 2 Blick in den DALI2 Gamma-Ray Detector Array, mit dem die Anregungsenergie von Kalzium-54 gemessen wurde.

Beschuss eines Beryllium-Targets kann das eine bzw. beide Protonen aus dem Kern herausgeschlagen werden. Das angeregte  $^{54}\text{Ca}$  zerfällt im Flug, seine Anregungsenergie ergibt sich aus der Energie des emittierten Gammaquants in Koinzidenz mit dem  $^{54}\text{Ca}$ -Isotop (Abb. 2).

Die Struktur von  $^{54}\text{Ca}$  galt lange als Herausforderung in der Physik exotischer Kerne, da unterschiedliche Theorien Anregungsenergien vorhersagten, die von keinem bis zu einem starken Schalenabschluss reichten. Im Vergleich zur doppelt-magischen Struktur von  $^{52}\text{Ca}$  deutet die gemessene  $^{54}\text{Ca}$ -Anregungsenergie von 2,043(19) MeV nun darauf hin, dass es sich in der Kalziumkette auch bei  $N = 34$  um eine magische Zahl handelt, wobei diese sehr auf die Kalzium-Isotope lokalisiert ist (Abb. 3).

Die Phänomene der starken Wechselwirkung in der Kalzium-Isotopenkette zeigen eine beeindruckende Vielfalt. Sie reicht von vier magischen Zahlen über die kleinste Paarungsenergie in Kernen überhaupt [7] bis hin zu  $^{62}\text{Ca}$  als möglichem „Halokern“, der zwei weit vom Rest des Kerns entfernte Neutronen besitzen könnte [8]. Experimentelle Fortschritte machen es

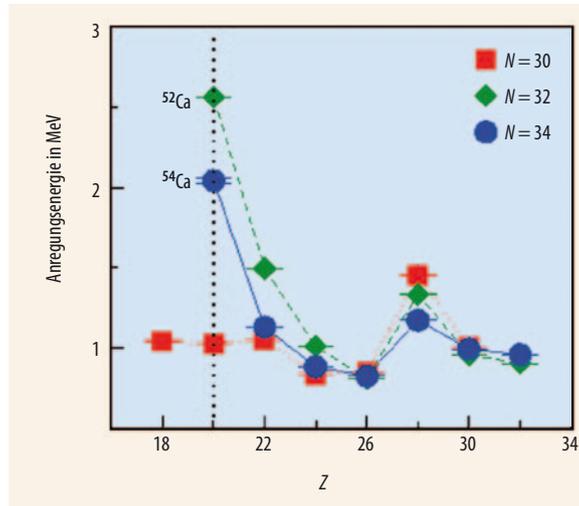


Abb. 3 Bei den Anregungsenergien der Kerne mit Neutronenzahl  $N = 30, 32, 34$  zeigt sich als Funktion der Protonenzahl ein erhöhter Wert bei Kalzium-54 [2], ähnlich wie in Kalzium-52. Das ist ein Hinweis auf die neue magische Zahl  $N = 34$  in den Kalzium-Isotopen.

möglich, die Kette in naher Zukunft weiter zu erforschen. Dabei ist eine Massenmessung von  $^{56}\text{Ca}$  für die Zwei-Neutronen-Separationsenergie zur Bestätigung der neuen magischen Zahl  $N = 34$  wichtig. Wir wissen, dass Kalzium-Isotope bis mindestens  $^{58}\text{Ca}$  existieren und damit Teil der rund 4000 unerforschten Isotope sind. Es wird enorm spannend sein, mit der zukünftigen Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) in Darmstadt und Rare Isotope Beam Facilities weltweit in diese Regionen vorzudringen.

Achim Schwenk

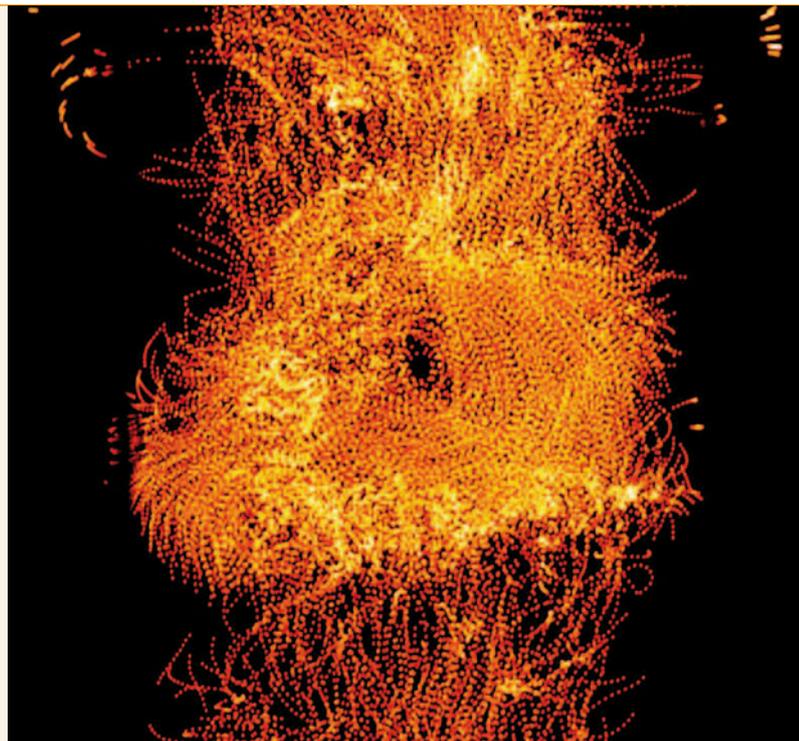
- [1] J. Erler et al., Nature **486**, 509 (2012)
- [2] J. D. Holt et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **39**, 085111 (2012)
- [3] G. Hagen et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 032502 (2012)
- [4] H.-W. Hammer et al., Rev. Mod. Phys. **85**, 197 (2013)
- [5] F. Wienholtz et al., Nature **498**, 346 (2013)
- [6] D. Steppenbeck et al., Nature **502**, 207 (2013)
- [7] B. A. Brown, Phys. Rev. Lett. **111**, 162502 (2013)
- [8] G. Hagen et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 132501 (2013)

Prof. Achim Schwenk, Ph.D., Institut für Kernphysik und ExtreMe Matter Institute EMMI, Technische Universität Darmstadt, Schlossgartenstr. 2, 64289 Darmstadt

SCHWARM IN PHASE

Kollektive Bewegungen von Partikeln lassen sich durch Kollisionen und hydrodynamische Effekte erklären, stellte ein französisches Forscherteam mit Experimenten fest. Einfache Physik reicht demnach aus, um große Partikelmengen in eine gleichförmige und gerichtete Bewegung zu versetzen, wie bei den rechts gezeigten Mikrokügelchen. Mit zunehmender Dichte bilden sich aus den rotierenden Kügelchen selbstorganisierte Schwärme aus, bei denen alle Partikel gleich schnell in eine Richtung strömen. Verantwortlich ist ein fast vergessener physikalischer Effekt, den Georg Quincke bereits 1896 entdeckt hatte: Nichtleitende Partikel in einer Flüssigkeit beginnen unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes zu rotieren. Ursache sind instabile Ladungsverteilungen auf den Oberflächen der Mikrokugeln. Bei genügend hoher Teilchendichte ergibt sich daraus ein geordneter Partikelstrom, eine „polare Flüssigkeit“.

A. Bricard et al., Nature **503**, 95 (2013)



D. Bartolo, A. Bricard & N. Desreumaux