

Einblick durch Gammaquanten

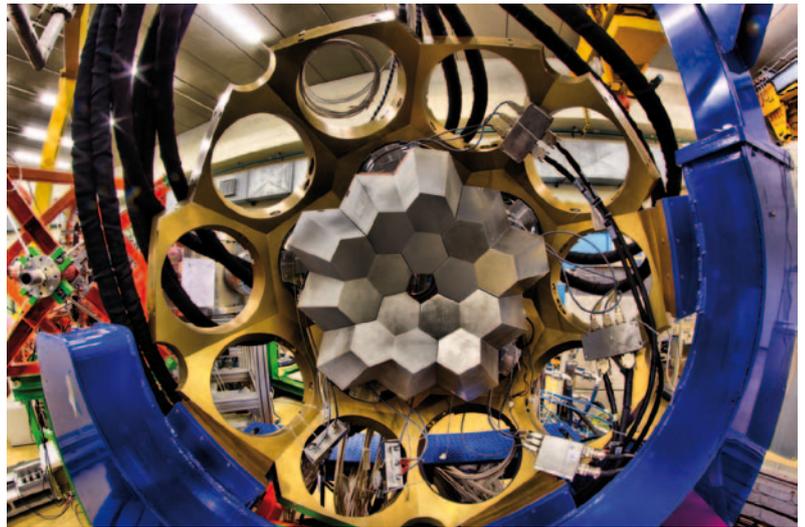
Die hochauflösende Gammaskopie mit radioaktiven Teilchenstrahlen liefert vielfältige Erkenntnisse zu exotischen Atomkernen.

Jan Jolie, Peter Reiter und Nigel Warr

Nur zehn Prozent der bekannten Atomkerne sind so stabil, dass sie in der Natur vorkommen. Vom großen Rest der instabilen Kerne kennen wir dagegen viele Eigenschaften überhaupt nicht. Da die Nukleosynthese der heute vorzufindenden Kerne, die vermutlich unter anderem in Supernovae stattfindet, gerade über sehr neutronenreiche instabile Nuklide verläuft, gilt es, deren Eigenschaften zu verstehen. Dabei stellt sich auch die grundlegende Frage, ob das Ordnungsschema der Kerne mit „magischen“ Zahlen in diesem Gebiet der Nuklidkarte gilt.

Seit den Arbeiten zum Wasserstoffatom vor rund hundert Jahren liefert die Spektroskopie von angeregten Zuständen grundlegende Einsichten in den Aufbau atomarer und subatomarer Materie. Dies gilt bis hin zu den schwersten Quarksystemen, die sich in der Kern- und Hadronenphysik spektroskopisch untersuchen lassen. Während bei der Atomspektroskopie die Energie der Photonen, die beim Zerfall der angeregten Zustände emittiert werden, im Bereich von eV liegen, erstreckt sich die Energieskala in der Kern- und Hadronenphysik bis hin zu GeV, also in den Bereich der Gammastrahlung und darüber hinaus. Bei niedrigen Anregungsenergien ermöglicht es der Nachweis der γ -Strahlung, die vielen Facetten der mesoskopischen Atomkerne zu beleuchten, die in stabilen und einer deutlich größeren Zahl von instabilen Nukliden existieren. Die möglichen Anregungen spiegeln zum einen den Aufbau der Kerne aus einzelnen Nukleonen wider, zum anderen sind sie auf kollektives Verhalten des gesamten Kerns zurückzuführen. Aktuelle Forschungsziele bestehen darin, diese unterschiedlichen Aspekte im Rahmen einer quantenmechanischen Vielkörpertheorie konsistent zu beschreiben und die verschiedenen Kernmodelle zu vereinheitlichen [1].

Heute sind rund 3000 Nuklide bekannt, von denen nur rund zehn Prozent stabil oder langlebig sind und somit in der Natur vorkommen. Bei einer Vielzahl der bekannten instabilen Kerne wissen wir wenig über die Eigenschaften (Abb. 1). Somit ist der Vergleich mit theoretischen Modellen als Funktion des Neutronen- bzw. Protonenüberschusses nicht möglich. Darüber hinaus sagt die Theorie viele weitere, noch unentdeckte Nuklide vorher. Ähnlich wie bei der Elektronenhülle der Atome gruppieren sich auch in Kernen die Orbitale, welche die Nukleonen besetzen können, in Schalen.



Dieser Detektor für Gammastrahlung, der AGATA-Demonstrator, besteht aus 15 Germanium-Kristallen (Mitte) und wird seit diesem Jahr bei der GSI eingesetzt.

Wenn eine Schale gefüllt ist, ist besonders viel Energie nötig, um ein Nukleon über den Schalenabschluss hinaus zur nächsten Schale anzuheben und somit den Kern anzuregen. Die Protonen- bzw. Neutronenzahlen, die vollen Schalen entsprechen, werden „magisch“ genannt (Abb. 1). Ob dieses Ordnungsschema auch für die noch unentdeckten Nuklide gilt oder ob andere Schalenabschlüsse auftreten, ist unbekannt. Daher sind Extrapolationen entlang der bekannten magischen Zahlen wichtig.

Insbesondere neutronenreiche Kerne sind sehr schwer zugänglich, und bis heute liegen dazu nur wenige spektroskopische Ergebnisse vor. Dieser Daten-

KOMPAKT

- Experimente, bei denen beschleunigte stabile Kerne auf ein Target treffen, erlauben nur den Zugang zu einem kleinen Teil der interessanten instabilen Nuklide.
- Daher wurden zwei Methoden entwickelt, um Experimente mit Strahlen aus instabilen Nukliden zu ermöglichen.
- Diese unter anderem an der GSI und am CERN durchgeführten Experimente stellen besondere Anforderungen an die Detektoren, welche die von angeregten Kernen emittierte Gammastrahlung nachweisen.
- Gleichzeitig laufen die Vorbereitungen für Experimente an der künftigen FAIR-Anlage in Darmstadt.

Prof. Dr. Jan Jolie,
Prof. Dr. Peter Reiter,
Dr. Nigel Warr,
Institut für Kernphysik,
Universität zu Köln, Zülpicher
Str. 77, 50937 Köln

mangel bereitet auch den Astrophysikern Probleme, da der so genannte r-Prozess (r steht für *rapid*) über den Bereich von neutronenreichen Kernen fernab der Stabilität verläuft: Dieser Prozess findet vermutlich in Supernovae statt und soll einen großen Anteil der natürlichen Isotopenhäufigkeiten dadurch erklären, dass über den schnellen Neutroneneinfang instabile neutronenreiche Kerne entstehen, die rasch zu den beobachteten Isotopen zerfallen. Folglich sind kernphysikalische Modelle nötig, die es erlauben, aus den Eigenschaften von bekannten Kernen verlässliche Vorhersagen zu treffen. Die weitere Extrapolation zu noch exotischeren Kernen fernab der Stabilität geht davon aus, dass keine bisher unbekanntene Effekte auftreten. Doch die Frage stellt sich, inwieweit dies begründet ist.

Das starke Interesse an der Spektroskopie von exotischen Atomkernen geht jedoch einher mit der Tatsache, dass sich mit konventionellen Beschleunigerexperimenten, bei denen ein Strahl aus stabilen Nukliden auf ein Target prallt, nur ein Bruchteil der möglichen Isotope untersuchen lässt. Daher wurden Anlagen entwickelt, die Strahlen radioaktiver Teilchen für Experimente erzeugen. Dazu werden zunächst hochintensive Primärstrahlen aus stabilen Nukliden auf ein Target geschossen. Die Produkte dieser Reaktion werden zu einem sekundären Ionenstrahl geformt und ionenoptisch auf ein zweites Target gelenkt. Dabei unterscheidet man zwei komplementäre Methoden: Bei der In-Flight-Methode entstehen die sekundären Teilchen bereits mit hoher kinetischer Energie, sodass sie „nur“ selektiert werden müssen, wie an der GSI mithilfe des Fragmentseparators FRS. Beim ISOL-Verfahren (Isotope Separation On Line) entstehen die sekundären Teilchen hingegen nur mit thermischer Energie. Sie müssen daher nach der Selektion noch beschleunigt werden, wie an der REX-ISOLDE-Anlage am CERN.

Im Vergleich zu stabilen Ionenstrahlen sind die Strahlintensitäten der sekundären radioaktiven Strahlen um viele Größenordnungen kleiner. Außerdem

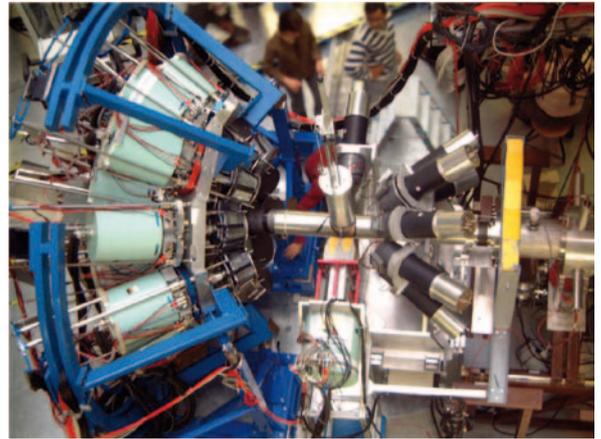


Abb. 2 Beim RISING-Experiment bei der GSI trifft der von rechts kommende Strahl das Target in der Mitte. In Vorwärtsrichtung (links) befinden sich die Ge-Halbleiterdetektoren, die mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden. Daher sind deutlich die zylinderförmigen Dewar-Gefäße zu sehen.

sind die Rollen von Strahl- und Targetkernen vertauscht: Während bei den früheren Experimenten mit Strahlen aus stabilen Kernen meist die Targetkerne oder ihre Reaktionsprodukte untersucht wurden, liegt das Interesse bei den Strahlen aus kurzlebigen, radioaktiven Kernen auf den Strahlteilchen und den damit ausgelösten sekundären Reaktionen. Im Extremfall bedeutet das, dass die exotischen Kerne mit hoher, relativistischer Energie auf ein Target mit leichten Kernen wie Protonen oder Deuteronen prallen. Die angeregten Reaktionsprodukte bewegen sich schnell und emittieren dabei γ -Quanten. Für die γ -Spektroskopie impliziert dies eine extreme Doppler-Verschiebung und -Verbreiterung. Die winzigen Strahlintensitäten erfordern gleichzeitig einen hocheffizienten Nachweis, der sich am besten mit großvolumigen Germanium-Detektoren erzielen lässt, die sich sehr nahe am sekundären Target befinden und den Raumwinkel vollständig abdecken. Die damit verbundenen Öffnungswinkel verursachen jedoch die größte Doppler-Verbreiterung, sodass die intrinsisch sehr hohe Auflösung der Halb-

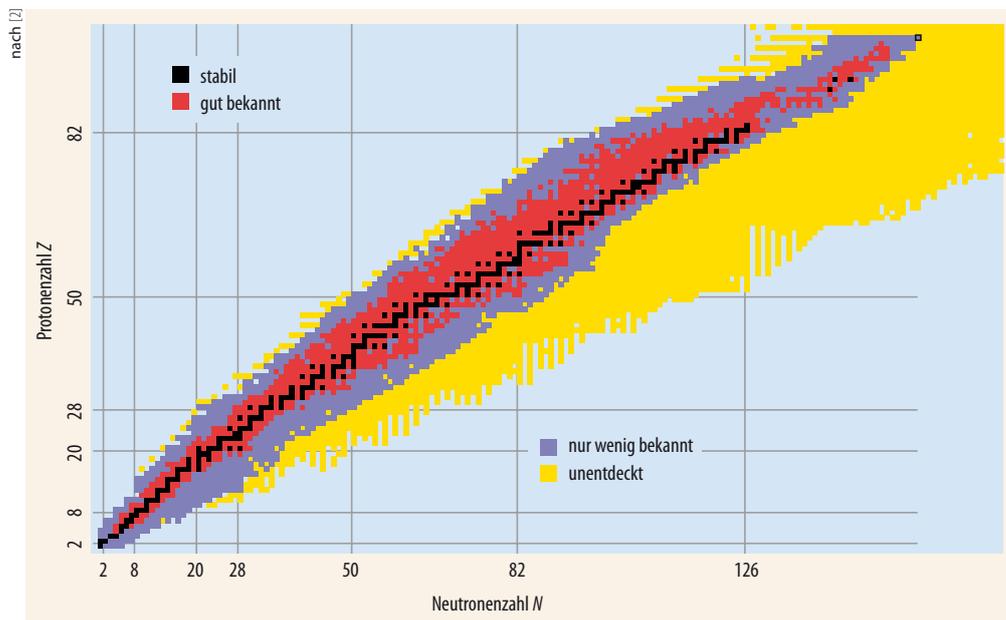


Abb. 1 Nuklidkarte der bekannten und vorhergesagten Atomkerne (gelb). Das Schalenmodell sagt voraus, dass Kerne mit 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 Neutronen bzw. Protonen besonders stark gebunden sind. Ob diese magischen Zahlen auch in der „terra incognita“ gelten, ist Gegenstand aktueller Forschung.

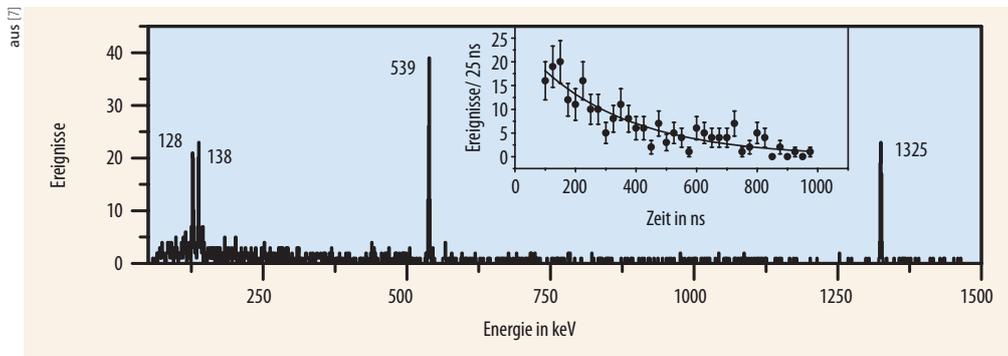


Abb. 3 Gammaspektrum vom Zerfall des langlebigen 8^+ -Zustands in ^{130}Cd . Dieser angeregte Zustand (ein Isomer) zerfällt in einer Kaskade über drei angeregte Zwischenzustände in den 0^+ -Grundzustand, wobei jeweils γ -Quanten emittiert werden (vier diskrete Linien im Spektrum). Aus dem Zeitspektrum (Inset) ergibt sich die Halbwertszeit des Isomers zu 220(30) ns.

leiterdetektoren ungenutzt bleibt und die schwachen Linien im Untergrund verschwinden. Um dieses Problem zu lösen, wurden ab Ende der Neunzigerjahre ortsempfindliche Ge-Detektoren mit segmentierten äußeren Kontakten entwickelt. Diese erlauben es, den Wechselwirkungsort des γ -Quants im Inneren des Detektors und somit den Emissionswinkel zu bestimmen, sodass eine Doppler-Korrektur möglich ist. Der ideale Detektor für hochauflösende γ -Spektroskopie ist eine Kugelschale aus reinem Germanium, das sich als Halbleitermaterial mit kleiner Bandlücke und einer Ladungszahl von 32 am besten eignet. Dabei werden die Wechselwirkungsorte und die Energien der einzelnen einfallenden Quanten bestimmt. Dieses ambitionierte Ziel verfolgt das AGATA-Projekt (Advanced GAMMA Tracking Array).

Gammaspektroskopie im Flug

Am Helmholtz-Zentrum für Schwerionenforschung GSI in Darmstadt untersucht die RISING-Kollaboration (Rare Isotopes Spectroscopic Investigations at GSI) exotische Atomkerne. Dabei prallen intensive, relativistische Schwerionenstrahlen des SIS-Beschleunigers auf ein primäres Produktionstarget, in dem über Fragmentationsreaktionen oder Spaltungen die exotischen Atomkerne mit kinetischen Energien im Bereich von mehreren hundert MeV/Nukleon entstehen. Der FRS selektiert und identifiziert die individuellen Ionen des sekundären Strahls und fokussiert diese auf das sekundäre Target, in dem die Ionen durch die Coulomb-Wechselwirkung oder periphere Kernreaktionen angeregt werden (Abb. 2) [3]. Da die einlaufenden Ionen noch immer relativistische Energien besitzen, werden die Gammaquanten im Laborsystem bevorzugt in Vorwärtsrichtung emittiert und mit den dort platzierten 105 Ge-Detektoren nachgewiesen.

Auf diese Weise gelang es in einem der Experimente, mithilfe eines Sekundärstrahls aus ^{68}Ni -Ionen die „Pygmy-Resonanz“ zu untersuchen [4]. Diese kollektive Schwingung der „Neutronenhaut“, geformt aus den $N-Z$ äußeren Neutronen, gegenüber den $2Z$ inneren Nukleonen liefert wichtige Daten zur Zustandsgleichung von Kernmaterie und zur Beschreibung von Neutronensternen. Die ungleiche räumliche Verteilung von Protonen und Neutronen an der Kernoberfläche entsteht aufgrund des Pauli-Prinzips. Für exotischere,

neutronenreichere Kerne sagt die Theorie eine anwachsende Asymmetrie vorher, welche die Resonanzen erheblich verschieben oder verstärken könnte. Das Experiment wurde mit einer Strahlenergie von 40 GeV durchgeführt – die Ionen bewegen sich mit fast 80 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, sodass der Dopplereffekt sehr groß ist. In ^{68}Ni wurde die Pygmy-Resonanz bei einer Anregungsenergie von 11 MeV gefunden, dies stimmt gut mit Vorhersagen von relativistischen Random-Phase-Modellen überein.

Nach einer kurzen Kampagne zur Messung von magnetischen Momenten, bei der es zum ersten Mal gelang, den g -Faktor von relativistischen Spaltfragmenten zu bestimmen [5], begann 2006 die sehr erfolgreiche RISING-Messreihe mit gestoppten Strahlen (bis 2010). Hierbei ließen sich isomere Kernzustände mit Lebensdauern von 100 ns bis 100 s untersuchen, die bereits in der Produktionsreaktion entstehen und am Ende des FRS abgebremst und gestoppt werden, sodass der Dopplereffekt keine Rolle spielt. Die Gammazerfälle werden mit 15 kugelförmig angeordneten Cluster-Detektoren nachgewiesen [6]. Mithilfe eines aktiven Stopp-Detektors, der aus einer Reihe von segmentierten Si-Halbleiterdetektoren bestand, ließ sich diese Technik verbessern. Die Si-Detektoren erlauben es, die einzelnen implantierten Ionen sowie die Elektronen der anschließenden β -Zerfälle ortsaufgelöst nachzuweisen und miteinander zu korrelieren.

Bei einem der etwa zwanzig Experimente ging es um den Schalenabschluss für Neutronen bei $N = 82$ bei $Z < 50$ in der Nähe des instabilen doppelt magischen Kernes ^{132}Sn . Da in dieser Region der astrophysikalische r -Prozess zur Entstehung der schweren Elemente verläuft, sind die Eigenschaften dieser Atomkerne sehr wichtig. Aus der Beobachtung eines hochangeregten, langlebigen Zustands mit Spinquantenzahl und Parität 8^+ gelang es erstmals, die ersten vier angeregten Zustände im neutronenreichen Nuklid ^{130}Cd zu vermessen (Abb. 3). Daraus ergab sich, im Gegensatz zu theoretischen Vorhersagen, keine Evidenz für eine Änderung des Schalenabschlusses bei $N = 82$ [7]. Auf der neutronenarmen Seite der Nuklidkarte gelang es, bis zum doppelt-magischen ^{100}Sn zu gelangen [8] und ein 16^+ -Isomer in ^{96}Cd über seinen β -Zerfall zu identifizieren [9]. Der Unterschied von 34 Neutronen zwischen den beiden Cd-Isotopen verdeutlicht die Vielfalt der exotischen Atomkerne, die sich bei der GSI erzeugen lassen.

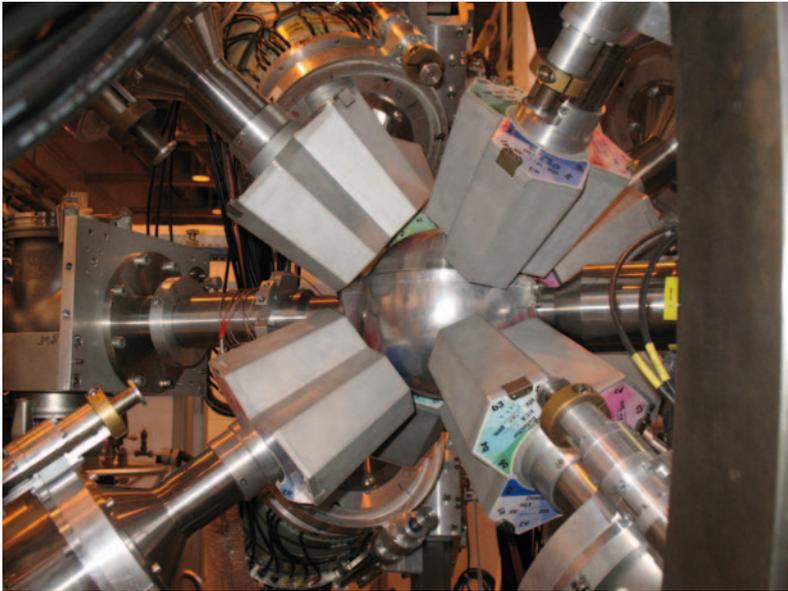


Abb. 4 Die 24 Germanium-Detektoren von MINIBALL befinden sich in acht Tripel-Kryostaten. Diese umgeben die Targetkammer mit Abständen zum Target von rund zehn Zentimetern.

Als Nachfolgerin von RISING wurde 2010 die PRE-SPEC-Kollaboration gegründet. Diese wird die Zeit nutzen, bis der SuperFRS als leistungsfähigerer Separator für die Produktion von exotischen Kernen bei der neuen Beschleunigeranlage FAIR [10] zur Verfügung steht, und die dafür vorgesehene Instrumentierung bereits am FRS einsetzen und erproben. So wurden der AGATA-Demonstrator und der Detektor für den Nachweis der auslaufenden Reaktionsprodukte, das neue Lund-York-Cologne-Calorimeter (LYCCA), bereits in Betrieb genommen.

Pionierarbeit mit MINIBALL

Neben der In-flight-Methode lassen sich instabile Kerne auch mit dem ISOL-Verfahren produzieren. Am CERN liefert dazu der PS-Booster einen hochenerge-

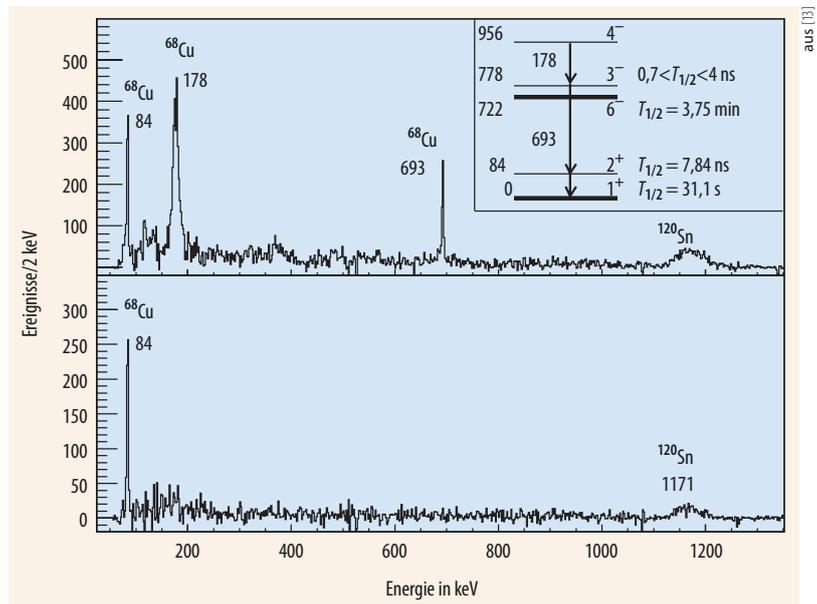
tischen 1,4-GeV-Protonenstrahl, der auf ein Produktionstarget geschossen und in diesem gestoppt wird. Als Ergebnis von Fragmentations- und Spallationsreaktionen sowie Spaltungen entstehen instabile Kerne, die sich mit thermischen Energien im ausgedehnten Produktionstarget bewegen. Nach Diffusion aus dem Targetmaterial und Ionisation mit elementspezifischen Techniken lassen sich Ionen aus den Targets mit keV-Energien extrahieren. Seit Ende der 60er-Jahre ist dazu die ISOLDE-Anlage am CERN in Betrieb.

Mit einem geeigneten Beschleuniger, wie er seit Ende 2001 zur Verfügung steht, lassen sich diese Ionen beschleunigen und als Sekundärstrahlen für die Spektroskopie nutzen (Radioactive beam EXperiments at ISOLDE, REX-ISOLDE [11]). Dazu werden die zunächst einfach geladenen Ionen durch Elektronenbeschuss innerhalb von Millisekunden vielfach geladen, bevor sie ein Linearbeschleuniger auf etwa 3 MeV pro Nukleon beschleunigt.

Das innovative Beschleunigerkonzept hat in den letzten Jahren exotische Kerne über den gesamten Massenbereich – von leichten Kernen bis zu den Aktiniden – zur Verfügung gestellt. Die Strahlintensitäten variieren bei ISOLDE über neun Größenordnungen und betragen für die exotischsten Kerne typischerweise nur noch 10^4 bis 10^6 Teilchen pro Sekunde. Dies erfordert für die Experimente sehr effiziente und empfindliche Spektrometer. Auch bei diesen Messungen gilt es, die Doppler-Verbreiterung zu minimieren (die Teilchen fliegen mit etwa 5 % der Lichtgeschwindigkeit), um die hohe Auflösung der Ge-Detektoren zu nutzen.

Ende der Neunzigerjahre wurde erkannt, dass sich sowohl eine möglichst hohe Effizienz durch große Raumwinkelabdeckung als auch eine gute Energieauflösung bei kleiner Doppler-Verbreiterung mit segmentierten, ortsempfindlichen Ge-Detektoren erzielen lässt. Das erste Spektrometer, das diese Methode eingesetzt hat, ist MINIBALL [12]. Es besteht aus 24 gekapselten hochreinen Ge-Detektoren, deren äußere

Abb. 5 Ausgehend vom 1^+ -Grundzustand von ^{68}Cu lässt sich durch Coulomb-Anregung nur der 2^+ -Zustand bei 84 keV erreichen. Das Doppler-korrigierte Gammaspektrum zeigt das entsprechende γ -Quant, das beim Übergang zurück in den Grundzustand emittiert wird (unten). Die Doppler-verbreiterte Linie bei 1171 keV stammt vom Sekundärtarget ^{120}Sn und illustriert die Notwendigkeit einer sehr guten Korrektur. Geht man hingegen vom isomeren 6^- -Zustand bei 722 keV aus, wird durch Coulomb-Anregung ein 4^- -Zustand bei 956 keV bevölkert, der über eine Kaskade von drei Gamma-Übergängen zerfällt (oben).



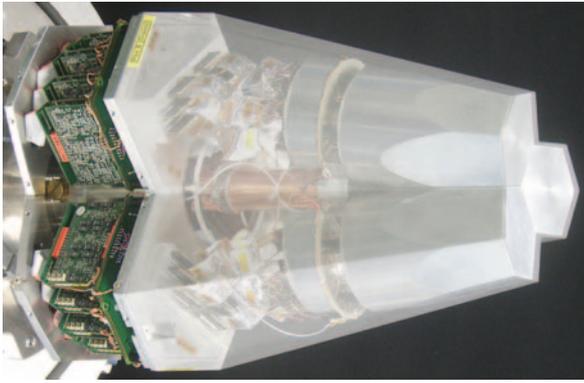


Abb. 6 Die drei gekapselten, 36-fach segmentierten Ge-Detektoren eines AGATA-Tripels befinden sich unter einer semitransparenten Vakuumendkappe. Die kalte Vorverstärkerelektronik befindet sich nahe an den Ge-Kristallen unter Vakuum und wird mit flüssigem Stickstoff über den zentralen Kupferstab gekühlt. Die warmen Vorverstärkerkanäle befinden sich zwischen der kalten Endkappe und dem Dewar-Gefäß.

Elektrode elektrisch segmentiert ist (Abb. 4). Die Pulsform der Signale hängt dadurch vom Ort innerhalb des Ge-Kristalls ab, an dem ein γ -Quant Ladungsträger erzeugt hat, sodass es mithilfe einer Pulsformanalyse möglich ist, den Wechselwirkungsort zu bestimmen und daraus den Winkel für eine Doppler-Korrektur zu berechnen. MINIBALL hat zum einen die neuen Spektroskopie-Experimente mit den REX-ISOLDE-Strahlen ermöglicht und zum anderen wichtige Grundlagen für die Entwicklung von noch empfindlicheren Detektoren gelegt.

Der Extraktion der spezifischen Elemente aus dem ISOLDE-Target kommt eine besondere Bedeutung zu. Der selektivste Weg dafür beruht auf resonanter Laserionisation. Dafür dient typischerweise ein dreistufiges Verfahren: Mit zwei Lasern besetzt man durch Resonanz und über einen elementspezifischen Zwischenzustand einen hoch angeregten atomaren Zustand im gewünschten Element. Der dritte Laser bewirkt eine Anregung ins Kontinuum und hinterlässt somit das Atom einfach ionisiert. Da seine Energie nicht ausreicht, um den Grundzustand zu ionisieren, werden selektiv nur die Atome ionisiert, die bereits von den ersten beiden Lasern angeregt wurden.

Dieses Ionisationsverfahren lässt sich für Kerne mit geeigneter Nukleonenzahl durch die Hyperfeinstrukturaufspaltung verfeinern. Liegen nach der protoneninduzierten Produktion die ausgewählten Atomkerne sowohl im Grundzustand als auch in einem langlebigen isomeren Zustand vor, so lässt sich mit einem spezifischen Anregungsschema, d. h. leicht unterschiedlichen Laserfrequenzen, gezielt der jeweilige Anteil für die Spektroskopie zur Verfügung stellen. Im neutronenreichen Kupferkern ^{68}Cu kam dieses Vorgehen erstmals zum Einsatz, um Isomere gezielt zu ionisieren. Das ermöglichte es, die Übergangswahrscheinlichkeiten sowohl vom Grundzustand als auch vom Isomer zu angeregten Zuständen zu messen (Abb. 5) [13].

Aus den inzwischen über 40 Experimenten mit MINIBALL stellen wir im Folgenden nur ein weiteres aktuelles Ergebnis vor. Eine wichtige Frage in

der Kernphysik ist die Entstehung und Ursache von Deformation in Kernen. Manche Kerne, insbesondere in der Nähe der magischen Zahlen von Protonen und Neutronen, sind kugelförmig. Aber wenn sich Protonen- und Neutronenzahl von den magischen Zahlen entfernen, treten deformierte Kerne auf. Ändert sich die Schalenstruktur aufgrund von Wechselwirkungen, die von der Besetzung der Schale abhängen, können sich die Lücken zwischen den Schalen schließen und neue entstehen. Demnach sind die magischen Zahlen eventuell nur im bekannten Bereich der Nuklidkarte gültig, und in dem noch unerforschten Bereich können neue Schalenabschlüsse vorkommen.

Bei Zirkon ($Z = 40$) ist die Energielücke zwischen den Orbitalen schwach ausgeprägt, und schon lange ist bekannt, dass die Zirkon-Kerne ihre Struktur um $N = 60$ dramatisch ändern und schlagartig (in einem Quantenphasenübergang) von einer sphärischen in eine stark deformierte Form übergehen. Für den Kern ^{96}Kr ($Z = 36$) gab es Hinweise auf eine Deformation mit einem ersten angeregten Zustand bei nur 241 keV; Massenmessungen waren damit allerdings nicht im Einklang. Daher wurden mit MINIBALL die Anregungsenergie, das Quadrupolmoment des ersten 2^+ -Zustands und die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen diesem Zustand und dem Grundzustand in ^{96}Kr gemessen. Demnach liegt der erste angeregte Zustand bei 551 statt 241 keV, und es ergab sich kein Hinweis auf eine starke Deformation. Der bei Zirkon deutlich ausgeprägte Effekt verschwindet im Krypton-Isotop fast vollständig durch die Abschwächung der Unterschale $Z = 40$ [14].

Der ultimative Detektor

Das AGATA-Spektrometer soll aus einer Kugelschale aus hochreinen Ge-Detektoren bestehen und γ -Strahlung mit Energien von wenigen zehn keV bis zu 20 MeV nachweisen [15]. Erstmals wird AGATA den vollständigen Raumwinkel mit Germanium abdecken und somit die größtmögliche Effizienz für hochauflösende Spektroskopie erreichen. Sein Grundkonzept besteht darin, alle individuellen Wechselwirkungsorte der γ -Strahlung im Detektor ortsempfindlich nachzuweisen und den Streupfad der einzelnen Quanten zu rekonstruieren.

Dieses „ γ -ray tracking“ nutzt die sehr guten Eigenschaften von Ge-Halbleiterdetektoren für die Energie- und Zeitbestimmung. Da die Außenelektroden der Einzeldetektoren 36-fach elektrisch segmentiert sind, ergeben sich die Pulsformen der Segmente und der Hauptelektrode eindeutig für jeden Wechselwirkungsort der γ -Quanten im Detektor. Das Verfahren berücksichtigt auch transiente Signale von Segmenten, in denen keine Ladungsträger entstehen, die stark unterschiedlichen, anisotropen Driftgeschwindigkeiten der Elektronen und Löcher im Ge-Halbleiter, die Kristallachsenorientierung und die Verunreinigungskonzentration des Ge-Kristalls. Ein schneller Such-

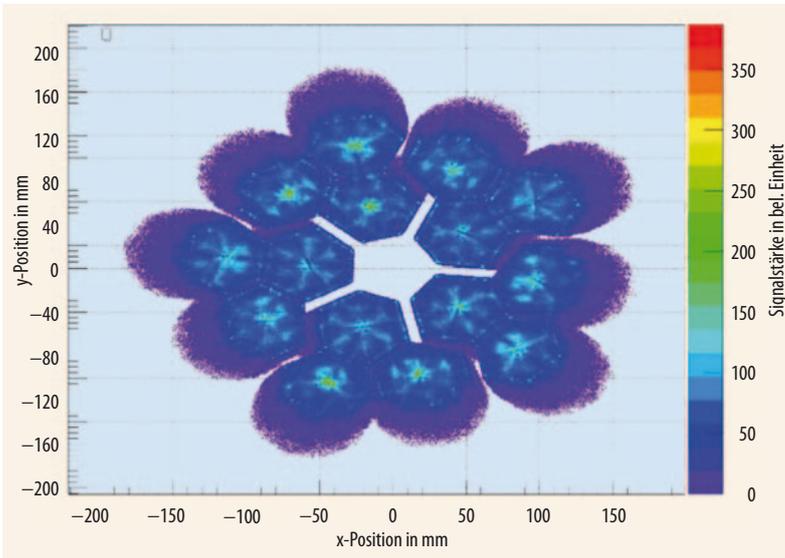


Abb. 7 Die Wechselwirkungspunkte der 15 Kristalle des AGATA-Demonstrators verdeutlichen die Ortsempfindlichkeit der Ge-Detektoren.

algorithmus vergleicht die gemessenen Signalformen mit bekannten, ortskalibrierten Signalen und bestimmt damit bereits während der Messung in weniger als einer Millisekunde die Interaktionspunkte innerhalb eines Kristalls [15]. Die dreidimensionale Ortsauflösung beträgt bereits weniger als vier Millimeter.

Aus den gemessenen Energiedepositionen und deren Ortskoordinaten lassen sich mit einem Tracking-Algorithmus alle γ -Quanten eines Ereignisses rekonstruieren. Man erhält somit den Vierer-Impuls im Laborsystem und kann damit eine sehr präzise Doppler-Korrektur durchführen. Das ermöglicht deutlich bessere Experimente, um mit relativistischen Schwerionen-Strahlen sehr kurzlebige Kerne zu untersuchen.

Das AGATA-Spektrometer wird in seiner endgültigen Ausbaustufe aus 180 asymmetrischen hochreinen Ge-Detektoren bestehen, von denen sich jeweils drei einen Kryostaten teilen (Abb. 6). In dieser Konfiguration bilden die Detektoren eine 9 cm dicke Ge-Kugelschale mit einem freien Innenradius von 23 cm, die den Raumwinkel zu 82 Prozent abdeckt. Aus fünf Tripel-Detektoren, die am IKP der Universität zu Köln aufgebaut und getestet wurden, wurde inzwischen am Laboratori Nazionali di Legnaro bei Padua in Italien der AGATA-Demonstrator realisiert [16] (Abb. auf S. 37 und Abb. 7). Die Leistungsfähigkeit der neuen Detektoren hat sich bereits in einer ersten Serie von Experimenten gezeigt. In Zukunft soll AGATA an den großen europäischen Kernphysiklaboren zum Einsatz kommen und dabei die spezifischen Möglichkeiten und Vorteile der unterschiedlichen Strahlen und Ausstattungen nutzen. Seit dem Sommer 2012 kommt AGATA am FRS bei der GSI zum Einsatz, wo die inzwischen verbesserten Experimentierbedingungen sowie die Leistungsfähigkeit der AGATA-Detektoren eine höhere Sensitivität als die RISING-Messungen ermöglichen. Während der Bauphase von FAIR wird AGATA am französischen Labor GANIL genutzt. Gleichzeitig wird das Spektrometer kontinuierlich mit neuen Detektoren ausgebaut, um den Raumwinkel unter Vorwärtswinkeln besser abzu-

decken. Wenn schließlich der Raumwinkel vollständig abgedeckt ist, wird das optimale Spektrometer für Experimente mit radioaktiven Strahlen an den neuen Beschleunigern bei FAIR, SPIRAL2 und HIE-ISOLDE zur Verfügung stehen.

Zusammenfassung

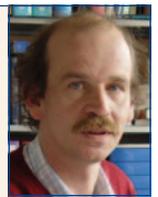
Für die spektroskopische Untersuchung der mikroskopischen Struktur und kollektiver Anregungsmechanismen exotischer Kerne ist die hochauflösende Gammaspektroskopie ein unabdingbares Werkzeug. Insbesondere durch die notwendige Durchführung von Experimenten in inverser Kinematik mit Strahlgeschwindigkeiten zwischen 5 und 80 % der Lichtgeschwindigkeit kommt es zu sehr großen Doppler-Verschiebungen der Gammastrahlung, deren Effekt nur durch einen ortsempfindlichen Nachweis der Gammastrahlung korrigiert werden kann.

Literatur

- [1] A. Faessler und J. Wambach, Physik Journal, Oktober 2011, S. 35
- [2] S. Goriely et al., Phys. Rev. C **75**, 064312 (2007)
- [3] H. J. Wollersheim et al., Nucl. Instr. Meth. A **537**, 637 (2005)
- [4] O. Wieland et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 092502 (2009)
- [5] G. Ilie et al., Phys. Lett. B **687**, 305 (2010)
- [6] S. Pietri et al., Nucl. Instr. Meth. B **261**, 1079 (2007)
- [7] A. Jungclaus et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 132501 (2007)
- [8] C. B. Hinke et al., Nature **486**, 7403 (2012)
- [9] B. S. Nara Singh et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 172502 (2011)
- [10] O. Kester et al., Physik Journal, Januar 2012, S. 31
- [11] O. Kester et al., Nucl. Instr. Meth. B **204**, 20 (2003)
- [12] J. Eberth et al., Prog. Part. Nucl. Phys., **46**, 389 (2001)
- [13] I. Stefanescu et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 122701 (2007)
- [14] M. Albers et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 062701 (2012)
- [15] S. Akkoyun, et al., Nucl. Instr. Meth. A **668**, 26 (2012)
- [16] A. Gadea et al., Nucl. Instr. Meth. A **654**, 88 (2011)

DIE AUTOREN

Jan Jolie (FV Hadronen und Kerne, Massenspektrometrie) hat 1986 an der Rijksuniversiteit Gent promoviert und arbeitete danach bis 2000 am Institut Laue Langevin und der Universität Freiburg (CH) als Postdoc bzw. Privatdozent. Von 2004 bis 2006 war er Sprecher der RISING-Kollaboration.



Peter Reiter (FV Hadronen und Kerne) hat seine Doktorarbeit 1993 an der Universität Heidelberg abgeschlossen. Danach war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPI für Kernphysik, bevor er 1996 für zwei Jahre an das Argonne National Laboratory bei Chicago ging. Anschließend habilitierte er an der LMU München und wechselte 2002 an die Universität zu Köln. Er ist hauptverantwortlich für die AGATA-Detektorentwicklung und ist seit 2010 Sprecher der MINIBALL-Kollaboration.



Nigel Warr studierte in Cambridge, England, und wurde an der Universität Freiburg (CH) promoviert. Nach einem zweijährigen Postdoc-Aufenthalt an der University of Kentucky kam er 2000 an die Universität zu Köln. Er betreut seit 2001 das MINIBALL-Spektrometer.

