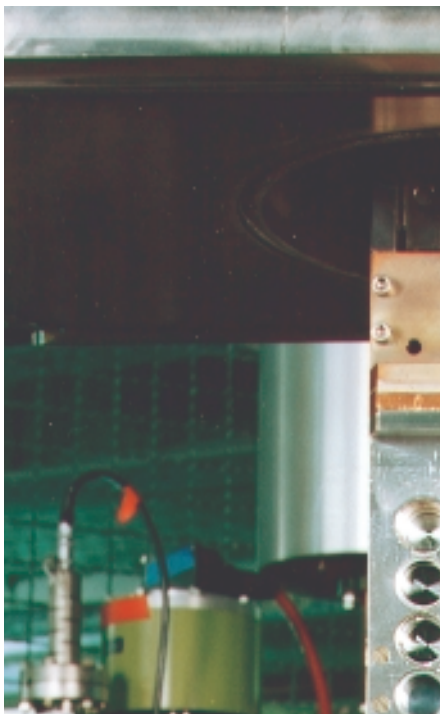


Relativistische Strahlen exotischer Kerne

Ein leistungsfähiges Werkzeug der Kernstrukturphysik

Am Eintritt des Fragmentseparators - der Targetstation - können insgesamt 75 Targets mit unterschiedlicher Dicke und Elementzusammensetzung eingebaut werden. Mit Schrittmotorsteuern kann jedes der scheibenförmigen Targets, die einen Durchmesser von zwei Zentimeter haben, millimetergenau in den Ionenstrahl gefahren werden. Der Targethalter kann, falls es notwendig ist, ferngesteuert ausgetauscht werden.



Die Erzeugung von exotischen Kernen an den Grenzen und jenseits des Gebiets der heute bekannten Kerne und das Studium ihrer Eigenschaften haben bei GSI eine lange Tradition. Das bekannteste Beispiel hierfür sind die Experimente zur Synthese der schwersten Elemente mit den Ordnungszahlen 107 bis 112. Neben der Struktur solcher exotischer Kerne stehen astrophysikalische Fragestellungen, wie zum Beispiel die Elementsynthese in den Sternen, im Mittelpunkt dieser Untersuchungen. Das wichtigste Arbeitspferd für diese Experimente ist seit der Erweiterung der GSI-Anlagen durch das Synchrotron SIS der Fragmentseparator, an dem relativistische Strahlen exotischer Kerne erzeugt und isotonenrein abgetrennt werden können. In Verbindung mit dem Experimentenspeicherring ESR und den verschiedenen Experimentiereinrichtungen in der Targethalle wurden dadurch einzigartige Forschungsmöglichkeiten für die Kernstrukturphysik eröffnet, die im Zuge des Intensitätserhöhungsprogramms noch erheblich erweitert werden. Die GSI wird damit ihre Stellung als eines der weltweit führenden Labors für radioaktive Sekundärstrahlen noch weiter ausbauen können.

In der Landschaft der Nuklide haben sogenannte „magische“ Kerne eine besondere Bedeutung. Analog zur Schalenstruktur der Elektronenhülle bilden auch die Atomkerne bei bestimmten Protonen- und Neutronenzahlen abgeschlossene Schalen, die zu besonders stabilen Konfigurationen führen, den magischen Kernen. Liegt sowohl für die Protonen als auch für die Neutronen ein Schalenabschluß vor, so spricht man von doppelt-magischen Kernen. Solche doppelt-magischen Kerne üben eine besondere Faszination auf Kernphysiker aus. So ist die richtige Vorhersage von Schalenabschlüssen ein wichtiger Prüfstein für Kernmodelle, insbesondere dann, wenn die Kerne weitab der stabilen Nuklide liegen. Darüber hinaus versprechen sich die Physiker vom Studium dieser und ihrer Nachbarkerne besonders klare Einblicke in die effektive Wechselwirkung zwischen den Nukleonen.

„Magische“ Kernphysik

Zu den bislang größten Experimentiererfolgen am Fragmentseparator gehören daher die erstmalige Erzeugung und Identifikation der „doppelt-magischen“ Kerne Zinn-100 [1] und Nickel-78 [2], die in ihrer Bedeutung durchaus mit der Synthese der schwersten Elemente verglichen werden können. Und es besteht die Chance, daß in kommenden Experimenten am Fragmentseparator ein weiterer doppelt-magischer Kern - Nickel-48 - erzeugt werden kann. Dieses Nuklid weist mit 28 Protonen und nur 20 Neutronen einen extrem hohen Protonenüberschuß auf, so daß allein der Nachweis seiner Existenz schon eine kleine wissenschaftliche Sensation wäre. Die Herstellung und Untersuchung solcher magischen Isotope und ihrer Nachbarkerne, die weit vom Tal der stabilen Kerne entfernt liegen, wird also auch weiterhin im Mittelpunkt der Experimente am Fragmentseparator stehen.

Der Fragmentseparator

GSI

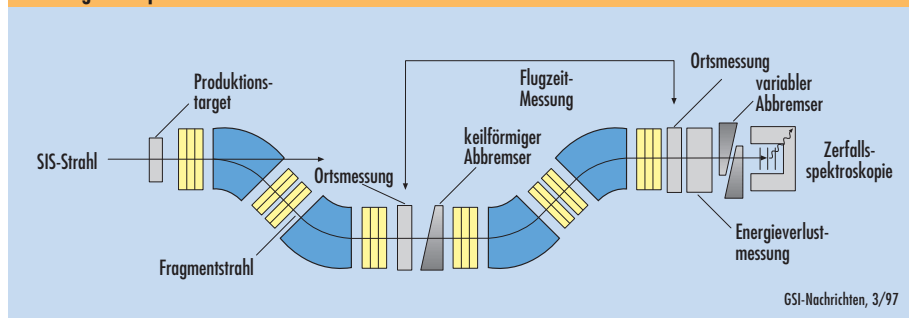


Abb. 1: Der Fragmentseparator besteht aus einer Kombination magnetischer Dipole (blau), die die Fragmente ablenken, und magnetischer Quadrupole (gelb), die zur Bündelung der Fragmentstrahlen dienen. In der Mitte kann ein sogenannter „Degradier“ (grau) - in der Praxis ein Aluminiumkeil - einge-

führt werden, in dem die Fragmente proportional zum Quadrat ihrer Kernladung abgebremst werden. Die Kombination von Impulsselektion, Energieverlust und erneuter Impulsselektion erlaubt am Ausgang des Fragmentseparators eine isotoopenreine Separation.

bilden einen sogenannten Neutronenhalo. Ein wesentlich schwächerer Halo-Effekt wurde auch für sehr protonenreiche Kerne wie zum Beispiel für Bor-8 beobachtet.

Speziell für die Astrophysik sind Informationen über neutronenreiche Isotope von großer Bedeutung. Wir wissen heute, daß die Elementsynthese im Universum über exotische Kerne erfolgt. Für die Entstehung der schweren Elemente spielen insbesondere neutronenreiche Kerne entlang des Pfads des sogenannten r-Prozesses eine wichtige Rolle. Bei diesem Prozeß erfolgt die Erzeugung schwerer Elemente im Verlauf von Supernova-Explosionen durch schnell - das r steht für rapid - aufeinanderfolgende Neutroneneinfangreaktionen mit anschließendem Betazerfall. Je besser die Eigenschaften dieser neutronenreichen Isotope bekannt sind, um so genauer können die Elementsynthese in solchen astrophysikalischen Prozessen modelliert und damit wichtige Größen wie zum Beispiel die Neutronenflußdichte in der „Elementküche“ einer Supernova-Explosion bestimmt werden. Ein wichtiges Kriterium für die Verlässlichkeit der Modelle ist dabei, wie gut die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Elemente durch die Modelle reproduziert werden können.

Im folgenden soll auf die Produktion exotischer Kernstrahlen am Fragmentseparator (FRS) näher eingegangen werden, das heißt, auf die verschiedenen Reaktionsmechanismen und die Separationstechniken, die an diesem zentralen Instrument der Kernstruktur-

physik bei GSI eingesetzt werden. Über das breitgefächerte Experimentierprogramm am und in Verbindung mit dem Fragmentseparator wurde bereits ausführlich in früheren Ausgaben der GSI-Nachrichten (4/96, 5/96, 6/96 und 1/97) berichtet.

Um exotische Kerne zu produzieren, wurden an der GSI vor dem Bau des Schwerionensynchrotrons SIS Kernreaktionen bei niedrigen Energien in der Nähe der Coulomb-Barriere verwendet. Diese am UNILAC untersuchten Reaktionen bevölkern einen relativ kleinen Ausschnitt aus der Nuklidkarte in der Umgebung des exotischen Kernes, den man synthetisieren will. Anders ist dies bei Hochenergiereaktionen, mit denen erstmals in den 70er Jahren am BEVALAC in Berkeley experimentiert wurde. Treffen relativistische, das heißt fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigte Projektile auf ein dickes Target, wird ein breites Spektrum von Kernen unterhalb der Massen- und Ladungszahl des Projektilkerns gebildet; alle diese Kerne fliegen praktisch ungebremsst weiter. Aus diesem Gemisch kann ein exotischer Kern weitgehend untergrundfrei abgetrennt werden. Dazu werden die Ionen in elektromagnetischen Feldern abgelenkt und zusätzlich in dicken Materieschichten abgebremst. Dies ist das Grundprinzip des Fragmentseparators FRS der GSI, der in Abbildung 1 schematisch dargestellt ist [3].

Fragmentation oder Spaltung

Trifft ein Projektil mit relativistischer Geschwindigkeit auf einen Targetkern, so kann man bei der Reaktion zwei geometrische Zonen unterscheiden: den Überlappungsbereich der beiden stoßenden Kerne, in dem die Kernmaterie komprimiert und aufgeheizt wird, und den „Zuschauerbereich“, der vergleichsweise unbeeinflusst bleibt. Anschaulich gesprochen wird vom Projektilkern im Stoß der „Zuschauerbe-

Die Kernphysik ist aber keineswegs nur an magischen oder doppelt magischen Kernen interessiert. Eine grundlegende Frage zum Verständnis unserer Welt ist die nach den Grenzen, innerhalb derer Materie überhaupt bestehen kann, wenn auch mit kurzer Lebensdauer. Fügt man zum Beispiel zu einem Kern immer mehr Protonen hinzu, so erreicht man irgendwann eine Grenzlinie - die sogenannte Protonenabbruchkante - jenseits derer ein weiteres Proton nicht mehr gebunden wird. Im Fall des oben erwähnten Nickel-48 ist man sich zum Beispiel nicht sicher, ob es noch diesseits der Abbruchkante liegt - und damit gebunden existieren kann - oder jenseits dieser Grenzlinie. In analoger Weise stößt man für sehr neutronenreichen Kerne an die Neutronenabbruchkante.

In der Nähe der Abbruchkanten gibt es eine Reihe von neuen und interessanten Phänomenen. So zeigen leichte Kerne mit hohem Neutronenüberschuß wie zum Beispiel Lithium-11 einen stark vergrößerten Kernradius. In diesen Kernen bewegen sich die äußeren schwach gebundenen Neutronen weit weg vom übrigen Nukleonenrumpf und

reich“ abgeschert. Dieser Projektilrest, der in die ursprüngliche Richtung mit praktisch unveränderter Geschwindigkeit weiterfliegt, muß sich neu arrangieren, wie es der verbleibenden Zahl von Neutronen bzw. Protonen entspricht. Die dabei freiwerdende Energie wird dadurch abgebaut, daß Teilchen abgedampft werden; bei schweren Kernen sind dies vornehmlich Neutronen. Daher hat die Verteilung von Fragmentationsprodukten ihren Schwerpunkt auf der neutronenarmen Seite des Stabilitätstales. Sowohl die Experimente in Berkeley als auch die systematischen Studien, die in den ersten Jahren des FRS-Betriebs bei GSI durchgeführt wurden, haben gezeigt, daß der Abfall der Bildungswahrscheinlichkeit auf der neutronenarmen Seite der Fragmentationsausbeute etwa einer Gaußkurve folgt: Pro fehlendem Neutron nimmt die Bildungswahrscheinlichkeit um etwa eine Größenordnung ab (Abbildung 2).

Um neutronenreiche Isotope zu produzieren, die für die oben erwähnten astrophysikalischen Fragestellungen besonders interessant sind, kann am FRS auch ein anderer Typ von Kernreaktion verwendet werden: die Projektilspaltung von relativistischen schweren Ionen. Stößt ein Projektilkern nicht direkt mit einem Targetkern zusammen, so kann keine Fragmentationsreaktion stattfinden. Fliegen die Kerne allerdings knapp aneinander vorbei, so können sie durch das Coulombfeld zwischen Projektil- und Targetkern angeregt werden. Bei schweren Projektilen wie zum Beispiel Uran kann diese Anregung dazu führen, daß der Kern spaltet. Da die stabilen Isotope schwerer Elemente relativ neutronenreich sind, entstehen auf diese Weise Spaltfragmente, die auf der neutronenreichen Seite des Stabilitätstals liegen (Abbildungen 2 und 3). Besonders beeindruckend bei diesem Verfahren ist die große Zahl neuer exotischer Kerne, die gleichzeitig produziert und identifiziert werden konnten. Unter ihnen befindet

sich auch der doppelt-magische Kern Nickel-78.

Der Fragmentstrahl des FRS enthält ein komplexes Gemisch von unterschiedlichen Ionen mit annähernd gleicher Geschwindigkeit. Um die verschiedenen Ionensorten räumlich zu trennen, verwendet man üblicherweise magnetische Dipolfelder, durch die die Ionen nach ihrem Masse-zu-Ladungsverhältnis A/Q separiert werden. Magnetische Quadrupole werden eingesetzt, um die Fragmentstrahlen zu bündeln.

Separation und Identifikation

Der FRS besteht aus insgesamt vier Gruppen von Dipol- und Quadrupolmagneten. Jeder Dipol lenkt den Strahl um einen Winkel von 30 Grad ab. Die Magnetfelder werden üblicherweise so eingestellt, daß sich am Ausgang der vierten Stufe ein „achromatischer“ Fokus ergibt, in dem die Ionen eines Masse-zu-Ladungsverhältnisses unabhängig von ihrem Winkel oder Impuls auf einem kleinen Fleck gebündelt werden.

Zur Trennung dieses Isotopengemischs nach unterschiedlichen Kernladungszahlen müssen die Ionen eine dicke Materieschicht passieren, in der sie Energie verlieren. Der Energiever-

lust hängt dabei von der Kernladungszahl des Fragments ab. Dieses Prinzip läßt sich besonders vorteilhaft bei den hohen Strahlenergien anwenden, die das Schwerionen-Synchrotron SIS liefert. Bei diesen Energien sind alle leichten und mittelschweren sowie die meisten schweren Kerne vollständig ionisiert, das heißt ihre Ionenladung ist gleich der Kernladung. Zudem ist die relative Verschmierung der Geschwindigkeit und die Winkelaufstreuung beim Durchgang durch Materie so gering, daß man massive Materieschichten von mehreren Zentimetern Dicke verwenden kann, ohne den Strahlfleck wesentlich zu vergrößern.

In der Praxis wird am FRS in der Mittelebene ein in der Dicke variabler, keilförmig geformter „Abbremsklotz“ aus Aluminium verwendet - ein sogenannter Degradier. Als Ergebnis läßt sich am Ausgang ein isotoopenreiner Strahl mit einem Durchmesser von wenigen Zentimetern erzeugen. Um die Sicherheit, mit der die Isotope identifiziert und störende Isotope abgetrennt werden können, noch weiter zu erhöhen, werden der Ort und die Flugzeit der Ionen in der zweiten Hälfte des Separators sowie ihr Energieverlust in geeigneten Detektoren gemessen. Aus diesen Daten ergeben sich sowohl die

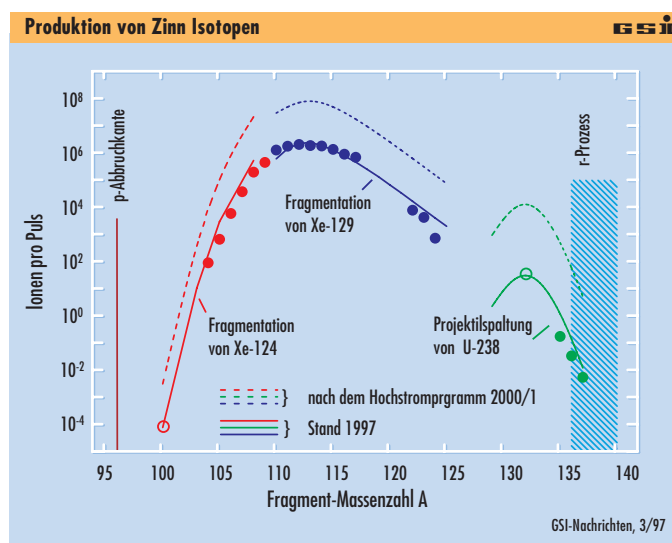


Abb. 2: Ausbeute für Zinn Isotope nach Fragmentation von $^{124,129}\text{Xe}$ (rote und blaue Punkte) und nach Projektilspaltung von ^{238}U (grüne Punkte). Die gestrichelten Linien geben die nach Inbetriebnahme des Hochstroms erwarteten Isotopenausbeuten an. Der senkrechte Strich auf der linken Seite markiert die Protonenabbruchkante. Rechts ist der Bereich gekennzeichnet, in dem die für den r-Prozeß relevanten Isotope liegen.

Kernladung als auch die Masse der Ionen. Auf diese Weise lassen sich die beobachteten Ionen einzeln identifizieren, so daß auch extrem seltene Kerne - ähnlich der Nadel im Heuhaufen - aufgespürt werden können.

Die Effizienz des Verfahrens ist sehr hoch. Die Transmission durch den Fragmentseparator liegt für Ionenstrahlen exotischer Kerne, die durch Projektilfragmentation entstehen, bei über 90%. Entscheidend ist dabei, daß die Fragmente sowohl Richtung als auch Geschwindigkeit des ursprünglichen Ionenstrahls im wesentlichen beibehalten. Im Gegensatz dazu wird bei der Projektilspaltung von Uran Energie frei, die auf die Bruchstücke übertragen wird und deren Geschwindigkeit und Richtung verändert. Die Transmission durch den Fragmentseparator ist dadurch auf etwa 10% beschränkt. Andererseits führt dieser Umstand auch zu einem Vorteil bei der Separa-

tion: Wählt man durch die Einstellung des FRS nur solche Kerne aus, deren Geschwindigkeit größer ist als die der auf das Target treffenden Ionen, so stellt man sicher, daß ausschließlich durch Spaltung gebildete Kerne ausgewählt werden.

Das am FRS eingesetzte Verfahren hat im Vergleich zur on-line Massenseparation mit konventionellen Ionenquellen den Vorteil, daß die chemischen Eigenschaften der produzierten Isotope keine Rolle spielen. So lassen sich zum Beispiel die Isotope des schwer verdampfenden Elements Wolfram in ähnlicher Weise produzieren wie die des flüchtigen Quecksilbers.

Diese Vorzüge des Fragmentationsverfahrens, sehr gute Separation und Identifikation, hohe Effizienz und Universalität, waren die Grundlage für die eingangs erwähnten großen Erfolge. So konnten im Rahmen der Experimente zum erstmaligen Nachweis von Zinn-

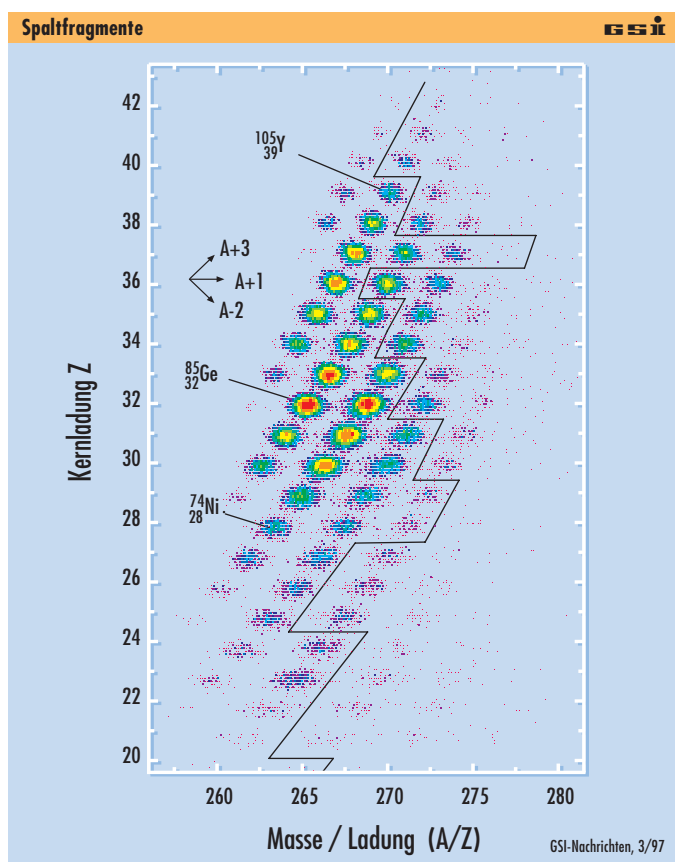
100 und Nickel-78 einige wenige der gesuchten Kerne in einem Untergrund von mehr als 10^{12} anderen Kernen identifiziert werden.

Nach der Intensitätserhöhung

Von der geplanten Intensitätserhöhung für das Schwerionensynchrotron SIS werden insbesondere die Experimente am Fragmentseparator profitieren. Kerne, die bisher nur in sehr geringen Raten verfügbar sind, können dann so zahlreich produziert werden, daß an ihnen Massenmessungen im ESR und andere spektroskopische Untersuchungen durchgeführt werden können. Derartige Experimente sind insbesondere für Zinn-100 sowie für die astrophysikalisch interessanten Kerne um Nickel-78 geplant.

Mit der Intensitätserhöhung sind aber auch höhere technische Anforderungen an die Infrastruktur und den Experimentbetrieb am Fragmentseparator verbunden, zum Beispiel im Bereich der Targetstation aufgrund der größeren radioaktiven Aktivierung, oder bei der Datenaufnahme durch die wesentlich höheren Datenraten. Die entsprechenden Anpassungen werden zur Zeit durchgeführt, so daß die ab Mitte nächsten Jahres einsetzenden Intensitätssteigerungen voll ausgeschöpft werden können (s. nächster Artikel in diesem Heft). In Verbindung mit dem Speicherring und den Experimentieraufbauten in der Targethalle wird es auf diese Weise möglich sein, die führende Rolle der GSI als Labor für relativistische radioaktive Sekundärstrahlen zu festigen und noch weiter auszubauen. ■

Abb. 3: Dargestellt ist eine am Fragmentseparator aufgenommene Isotopenverteilung von Uran-Spaltfragmenten. Um die Kerne eindeutig zu identifizieren, trägt man den Energieverlust, den die Kerne in speziellen Detektoren erfahren, gegen deren Flugzeit auf. Während der Energieverlust abhängig von der Kernladungszahl ist, ist die Flugzeit ein Maß für die Masse des Korns. In der Abbildung sind etwa 300000 Ereignisse dargestellt, die in nur 10 Stunden Meßzeit aufgenommen wurden. Alle Kerne, die rechts der durchgezogenen Linie liegen, wurden in diesem Experiment zum ersten Mal nachgewiesen. Insgesamt konnten über Projektilspaltung am Fragmentseparator über hundert neue Isotope nachgewiesen werden.



LITERATUR

- [1] R. Schneider et al.: Z. Phys. **A348** (1994) 221 und Physica Scripta **T56** (1995) 67
- [2] Ch. Engelmann et al.: Z. Phys. **A352** (1995) 351
- [3] H. Geissel et al.: Nucl. Instr. Meth. **B70** (1992) 286
- [4] M. Bernas et al.: Phys. Lett. **B331** (1994) 19