Exoten auf die Waage gestellt

CERN LIBRARIES, GENEVA

PRESSCUT-95-009

Thomas Otto

Der Massenseparator ISOLDE am CERN mit seinem breiten Spektrum von Ionenstrahlen exotischer Kerne ermöglicht sowohl Massenbestimmungen an extrem kurzlebigen Atomkernen fernab der Stabilität als auch Präzisionsexperimente an langlebigeren Kernen zur Verbesserung von Kernmodellen.

Der Massendefekt eines Kernes ist der Unterschied zwischen der Kernmasse und der Summe der Nukleonmassen, aus dem er besteht – ist äquivalent zur Bindungsenergie des Kernes. Die Bindungsenergie vertrauter physikalischer Systeme kann exakt berechnet werden, so zum Beispiel beim Wasserstoffatom. Selbst Vielelektronenatome sind heutzutage mit numerischen Methoden der Berechnung zugänglich. Nicht so die Bindungsenergie der Nukleonen im Kern. Es handelt sich dabei nicht nur um ein Vielkörperproblem, zusätzlich ist auch die Wechselwirkung zwischen je zwei Nukleonen nur ungenau bekannt. Messungen der Masse möglichst vieler Kerne sind daher ein Weg,

systematische Trends aufzuspüren und sogar etwas über die Wechselwirkung der Nukleonen untereinander zu erfahren. Der Begriff „Nukleosynthese“ beschreibt die Vorgänge in Sternen und sternähnlichen Umgebungen, die zur Erzeugung der Vielzahl chemischer Elemente, die wir kennen, führten. Zur Beschreibung dieser Vorgänge im Rahmen von Modellen werden als Eingangsparameter verschiedene kernphysikalische Größen benötigt, die Masse ist dabei eine erste Informationsquelle. Der Massenunterschied zweier Kerne, die sich durch eine Massenzahl unterscheiden, ist äquivalent zur totalen Zerfallsenergie des schwereren Kernes in den leichteren. Diese Zerfallsenergie be-

stimmt unter anderem den „Weg“, den die Nukleosynthese nimmt. Viele der astrophysikalisch interessanten Kerne sind sehr weit vom Tal der β -Stabilität entfernt. Um sie zu erzeugen, muß man an speziellen Einrichtungen, wie ISOLDE, arbeiten.

Periodensystem der Elemente. In Fettdruck sind die am Massenseparator ISOLDE mit wenigstens einem Isotop produzierten Elemente hervorgehoben. Dieses breite Spektrum an Isotopen erlaubt systematische Untersuchungen der Kernmasse als Funktion von Ordnungs- und Neutronenzahl.

Kernmodelle

Die Schwierigkeit der Berechnung der Kernmasse wurde bereits angedeutet. Ab-initio-Verfahren (das sind Verfahren, die allein auf einer physikalischen Theorie ohne Zuhilfe-

Abb. 1. Energiebeiträge E zum Tropfenkernmodell des Atomkerns. Zur Volumenenergie als wichtigsten Teil kommen die Oberflächenenergie (analog zur Oberflächenspannung eines Wassertropfens) und die Coulombenergie aufgrund gegenseitiger Abstößung der Protonen im Kern hinzu. Die Deformationsenergie kann ebenfalls noch in Analogie zu einem Wassertropfen modelliert werden. Der Asymmetriebeitrag, der den Unterschied zwischen Neutronen- und Protonenzahl beschreibt, und ein weiterer Term, die Paarungsenergie, sind jedoch nur quantenmechanisch zu begründen.

nahme experimenteller Daten aufgebaut sind) sind nicht bekannt. Zur theoretischen Beschreibung der Kerne und ihrer Masse wurden vielmehr einige qualitative Modelle entwickelt, die sich an systematische Beobachtungen der Variation der Kernmasse mit Neutronen- und Protonenzahl anlehnen, die deshalb immer stark von gemessenen Kernmassen abhängen, um die freien Parameter in der „Massenformel“ zu bestimmen.

Eines der bekanntesten Modelle ist das Tropfenkernmodell von Weizsäcker [1], das bereits Ende der dreißiger Jahre entwickelt wurde (Abbildung 1). Es nutzt die Analogie des Atomkerns mit einem Flüssigkeitstropfen aus. Die „Kernmaterie“ besteht aus Neutronen und Protonen und wird als inkompressible Flüssigkeit beschrieben. Dies führt auf eine einfache Formel für die Kernmasse, die mehrere freie Parameter enthält. Diese werden an experimentelle Daten angepasst.

Quantenmechanische Schalenmodelle [2], in denen die Energieniveaus eines Potentialtopfs nach und nach mit Nukleonen aufgefüllt werden, liefern eine korrekte Beschreibung der „magischen“ Nukleonenzahlen (Abbildung 2). Dies sind Zahlen von Neutronen und Pro-

Massenseparator ISOLDE

Der On-Line Massenseparator ISOLDE am CERN in Genf (Abbildung 3), dem europäischen Zentrum für Teilchenforschung, bietet einmalige Voraussetzungen zum Studium der Kernmasse: In einem Produktionszweig wird aus stabilen Ausgangsmaterialien durch β^- -Zerfall oder mit Protonen von 1 GeV kinetische Energie ein breites Spektrum exotischer Kerne erzeugt (Abbildung Seite 29). Diese werden in unterschiedlichen Prozessen mit hoher Ausbeute ionisiert und durch Anlegen eines elektrischen Feldes auf 60 keV kinetische Energie beschleunigt. In einem Sektor magneten werden die Ionen massenanalysiert und unmittelbar durch ein Strahlführungssystem zu den einzelnen Experimenten gebracht („On-Line“). Die Massenauflösung des Separators beträgt ungefähr $m/\Delta m = 2000$. Isotope nahe der β -Stabilität stehen so in sehr intensiven Strahlen von bis zu 10^{10} Ionen pro Sekunde zur Verfügung. Aber auch exotische Isotope fernab des „Stabilitätsastes“ können noch in ausreichender Menge produziert werden.

Mit welchen Methoden wird nun die Kernmasse bei ISOLDE untersucht?

Mattauch-Herzog-Massenspektrometer

In den 30er Jahren erlebte die Massenspektrometrie an stabilen und langlebigen Isotopen einen Aufschwung durch die Entwicklung des doppelfokussierenden Massenspektrometers an der Universität Wien durch Herzog und Mattauch [3]. Was war das Besondere an diesem Spektrometer? In einem einfachen magnetischen Sektorfeld können Ionenstrahlen nur dann mit hoher Auflösung massenanalysiert werden, wenn alle Ionen die gleiche Geschwindigkeit haben. Ist dies nicht der Fall, so ist der Bildpunkt des Spektrometers für jede der Geschwindigkeiten unterschiedlich, und man erhält ein unscharfes Bild der Quelle. Als Abhilfe müssen durch geeignete angebrachte Spalte die störenden Komponenten des Ionenstrahls ausgeblendet werden. $L_{\perp}$ führt zu einem signifikanten Intensitäts- und damit Empfindlichkeitsverlust der Spektrometers. Mattauchs und Herzogs Leistung liegt in der Entwicklung eines Massenspektrometers, das durch ein vorgeschaltetes elektrisches Sektorfeld geschwindigkeitsfokussierend wirkt (Abbildung 4). Es kann alle Ionen aus einer Quelle mit einer Geschwindigkeitsverteilung auf den Austrittsspalt fokussieren und ermöglicht daher die Massenbestimmung seltener Isotope, für die die Strahlintensität sehr gering ist.

Ein solches Spektrometer wurde 1976 am Massenseparator ISOLDE von einer Gruppe des Laboratoire René Bernas in Orsay, Frankreich, installiert [4]. Der Ionenstrahl von ISOLDE wurde auf eine Metallfolie gelenkt, auf der er gestoppt wurde. Die Folie wurde beheizt, dadurch verdampften die Atome wieder. Elemente der ersten beiden Hauptgruppen des Periodensystems können bei diesem Prozess ihr äußerstes Elektron an das Metall abgeben, wenn seine Bindungsenergie geringer ist als die Elektronen-Austrittsenergie (auch Workfunktion genannt) des Metalls. Man spricht dann von Oberflächenionisation. Durch Regelung einer Beschleunigungsspannung wurden diese sekundären Ionen durch die elektrischen und magnetischen Sektorfelder auf den Austrittsspalt des Spektrometers gelenkt. Die Spannung wurde so eingestellt, daß ein Maximum an Ionen den Detektor hinter dem Austrittsspalt erreichte. Durch Vergleich der Beschleunigungsspannungen eines bekannten und eines unbekannten Isotops wurde dann die Masse des unbekannten Isotops bestimmt. Diese Methode ist als Dublettmethode bekannt, sie

Abb. 4. Prinzip eines doppelfokussierenden Massenspektrometers nach Mattauch und Herzog. Eingezeichnet sind die Begrenzungen eines divergenten Strahlbündels einer festen Masse. Der Strahl von der Ionenquelle wird durch die Blenden S_1 und S_2 definiert. Abhängig von ihrer Bahn im elektrischen Sektorfeld E gewinnen die Ionen verschiedene Energiebeiträge. Ionen gleicher Energie haben in der Bildebene des elektrischen Sektors den gleichen Bildpunkt. Sie werden durch S_3 ausgewählt, Ionen gleicher Energie haben aber im folgenden magnetischen Sektor (Magnetfeld B) gleiche Bildpunkte, seine Massenauflösung wird nicht mehr durch die Geschwindigkeitsverteilung der Ionen herabgesetzt. So wird eine gleichzeitige Richtungs- und Geschwindigkeitsfokussierung der im Detektor D nachgewiesenen Ionen erzielt.

Abb. 5. Veranschaulichung des Betazerfalls. (a) Der Mutterkern M mit Z Protonen und $A-Z$ Neutronen. (b) Ein Neutron zerfällt in ein Proton und sendet dabei ein Elektron e^- und ein Antineutrino $\bar{\nu}$ aus. Diese beiden teilen sich die zur Verfügung stehende Energie. Es bleibt der angeregte Tochterkern T mit $Z+1$ Protonen zurück. (c) Der Tochterkern gibt seine Anregungsenergie durch Aussendung eines oder mehrerer Gammaquanten γ ab und gelangt dadurch in den Grundzustand. Der Q -Wert (Gesamtzerfallsenergie = Massenunterschied zwischen Mutter- und Tochterkern) ergibt sich durch Addition der Energien von Elektron, Neutrino und Gammaquant(en).

moderne, verfeinerte Techniken aufgedeckt werden können.

Aus dem Bereich der Kernspektroskopie stammt die nächste Methode.

Massenbestimmung aus der β -Zerfallsenergie

Der β -Zerfall ist die Umwandlung eines Kernneutrons in ein Proton unter Aussendung eines Elektrons und eines Antineutrinos oder der umgekehrte Vorgang mit Emission eines Positrons und eines Neutrinos. Der Massenunterschied zwischen Mutter- und Tochterkern wird als Zerfallsenergie frei, man spricht in diesem Zusammenhang auch vom Q -Wert (Abbildung 5). Diese Bezeichnung stammt aus der Anfangszeit der Kernphysik, als in Kalorimetern die „Wärmemenge“ einer Kernreaktion gemessen wurde. Die Messung der totalen Zerfallsenergie ermöglicht die Berechnung der Masse des Mutterkerns, durch Summation mehrerer Q -Werte können so Kernmassen weitab des Stabilitätsastes ermittelt werden.

bei oberflächenionisiert wird. Dies geschieht in der ersten von zwei Penningfallen. Die Ionenwolke wird in ihr durch Stöße mit einem Puffergas gekühlt und dann als Puls ausgeschossen. Dieser Puls kann in der zweiten Falle, der Präzisionsfalle, dynamisch eingefangen werden, ungefähr wie in einer Mausefalle. Die Ionenbewegung in der Präzisionsfalle wird durch ein Wechselfeld in der Nähe der Zyklotronfrequenz ω_c angeregt. Die Energieaufnahme der Ionen ist dann am größten, wenn die Anregungsfrequenz mit der Zyklotronfrequenz übereinstimmt, das heißt, mit ihr in Resonanz ist (Abbildung 10). Dieser Energiezuwachs wird durch ein Flugzeitverfahren nachgewiesen: Die Ionen werden aus der Falle in Richtung auf einen Detektor ausgeschossen. Erfüllte das angelegte Wechselfeld die Resonanzbedingung, so erreichen sie den Detektor schneller, weil sie Energie aufgenommen haben. Die Kalibrierung der Daten erfolgt durch die Messung der Zyklotronfrequenz eines stabilen Isotops mit bekannter Masse auf die gleiche Weise. Es handelt sich also wieder um eine Dublettmethode. Die Massenauflösung ist umgekehrt proportional zur Wechselwirkungszeit des Anregungsfeldes mit dem gespeicherten Ion. Sie ist so hoch, daß es gelang, die Zyklotronfrequenzen des Grundzustandes und eines isomeren Zustandes in ^{84}Rb zu trennen (Abbildung 10). Die Fehler der Massenbestimmung liegen aufgrund von Kalibrationsunsicherheiten ungefähr bei 10^{-7} , das entspricht etwa 10 keV bei Massenzahl 100. Es gibt keine Aufsummierung von Fehlern, da alle Frequenzen direkt mit der des stabilen Kalibrierungskerns verglichen werden.

In Zukunft: noch vielseitiger, noch kurzlebiger

Wie geht es weiter mit der Massenspektrometrie an ISOLDE? Von den beschriebenen Experimenten ist nur das letzte noch aktiv. Es befindet sich im Augenblick (1994) in einer Umbauphase. Die erste der zwei Penningfallen wird gegen eine Neukonstruktion ausgetauscht, die es erlauben wird, auch Ionen, die mittels kurzer Laserpulse erzeugt wurden, einzufangen, zu kühlen und in die Präzisionsfalle weiterzutransportieren [8]. In den bisherigen Experimenten war die Technik auf oberflächenionisierbare Elemente der ersten beiden Hauptgruppen des Periodensystems beschränkt. Durch die Erweiterung mit einer Laserdesorptions-Ionenquelle wird es nicht nur möglich, eine Vielzahl von den bei ISOLDE verfügbaren Isotopen der Messung

zugänglich zu machen. Durch die Erzeugung und Massenbestimmung von Kohlenstoffclustern als Referenz werden dann auch absolute Massenbestimmungen möglich, da Kohlenstoff die Basis des Kernmassensystems darstellt.

Die einzige Einschränkung bildet die Lebensdauer der Atomkerne: je kürzer diese ist, desto geringer kann aufgrund der Unschärferelevation nur die maximal erreichbare Frequenzauflösung und damit die Meßgenauigkeit sein. Schließlich kann die Wechselwirkung zwischen Anregungsfeld und gespeichertem Ion nicht länger als dessen Lebensdauer sein. Außerdem dauert auch die Präparation der Ionen für die eigentliche Messung in der Falle eine gewisse Zeitspanne in der Größenordnung von einer Sekunde, so daß diese Zahl, außer für Spezialfälle, die untere Grenze der Lebensdauer für „Routinekerne“ darstellen dürfte.

Eine französische Kollaboration schlug kürzlich den Einstz eines Smith-Massenspektrometers [9] vor. In diesem Spektrometer, das ursprünglich für die Untersuchung der Antiprotonenmasse konstruiert wurde, wird mit einem zur Penningfalle alternativen Verfahren die Zyklotronfrequenz von Ionen im magnetischen Feld bestimmt. Im Smith-Spektrometer geschieht das bei einer einzigen Passage der Ionen durch ein homogenes Magnetfeld, die nur Mikrosekunden dauert. Um trotzdem eine hohe Auflösung zu erzielen, funktioniert der Nachweis bei einer sehr hohen Harmonischen von ω_c . Die Präzision des Spektrometers wird für leichte Elemente vorraussichtlich bei der der Penningfalle liegen. Gerade in dieser Massenregion liegen die Halbwertszeiten exotischer Kerne deutlich unter einer Sekunde, sie sind daher nicht gut geeignet für die Untersuchung in einer Penningfalle. Die Installation des Smith-Spektrometers würde deshalb eine wertvolle Ergänzung des massenspektrometrischen Forschungsprogramms an ISOLDE darstellen.

Literatur

- [1] C.F. v. Weizsäcker, Z. Phys. 96, 431 (1935)
- [2] M. Mayer, Phys. Rev. 75, 1969 (1949)
- [3] J. Mattauch, R. Herzog, Z. Phys. 89, 736 (1934)
- [4] M. Epherre, G. Audi, C. Thibault, R. Klapisch, G. Huber, F. Touchard und H.

Wollnik, Phys. Rev. C19, 1504 (1979)

[5] M. Graefenstedt, U. Keyser, F. Münnich und F. Schreiber, Nucl. Phys. A491, 373 (1989)

[6] G. Bollen und C. Carlberg (Ed.), 'Workshop on Physics with Penning Traps', Physica Scripta 46, 255 (1992), Physica Scripta 46, 544 (1992), Physica Scripta 47, 470 (1993)

[7] H. Stolzenberg, St. Becker, G. Bollen, F. Kern, H.-J. Kluge, Th. Otto, G. Savard, G. Audi, B. Moore and the ISOLDE Collaboration, Phys. Rev. Lett. 65, 3104 (1990)

T. Otto, G. Bollen, G. Savard, L. Schweikhard, H. Stolzenberg, G. Audi, R.B. Moore, G. Rouleau, J. Szerypo, Z. Patyk and the ISOLDE Collaboration, Nucl. Phys. A567, 281 (1994)

[8] G. Bollen, H. Hartmann, H.-J. Kluge, M. König, Th. Otto, G. Savard, H. Stolzenberg and the ISOLDE Collaboration, Physica Scripta 46, 581 (1992)

[9] L.G. Smith, Phys. Rev. C4, 22 (1971)

Der Autor:

Thomas Otto, Jahrgang 1962, arbeitete nach seinem Diplom in Kernspektroskopie am ISOLTRAP-Massenspektrometer am CERN. Promotion 1993 an der Universität Mainz, Postdoc an der Pennsylvania State University, zur Zeit wissenschaftlicher Assistent am Institut de physique nucléaire.

Anschrift:

Dr. Thomas Otto, Institut de physique nucléaire, Chemin de Cyclotron 2, B-1348 Louvain-La-Neuve, Belgien.