



Foto: Achim Zschau, GSI

Abb. 1: Blick in das Innere des UNILAC Beschleunigers bei der GSI. In dem 120 Meter langen UNILAC können die Ionen bis auf 18 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.

Eine Reise mit SHIP zu den schwersten Atomkernen

Roentgenium – ein neues chemisches Element bekommt seinen Namen

Von Wolfgang Plafß und Hans Geissel

Das bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt entdeckte neue chemische Element mit der Ordnungszahl 111 ist in das Periodensystem eingegliedert worden und soll zu Ehren des Physikers und Nobelpreisträgers Wilhelm Conrad Röntgen den Namen "Roentgenium" (Rg) erhalten. In den zurückliegenden 20 Jahren sind bei der GSI die sechs schwersten derzeit bekannten Elemente mit den Ordnungszahlen 107 bis 112 hergestellt worden. Sie sind sehr viel schwerer als das schwerste in der Natur vorkommende Element Uran mit der Ordnungszahl 92. Diese neuen chemischen Elemente wurden mit dem Geschwindigkeitsfilter SHIP (Separator for Heavy Ion Reaction Products) entdeckt. Dieser Separator wurde von Mitgliedern des II. Physikalischen Instituts der Justus-Liebig-Universität Gießen entwickelt und gemeinsam mit Wissenschaftlern der GSI aufgebaut.

Die Synthese neuer Elemente im Labor, besonders die Herstellung von Gold, war ein alter Traum der Alchemisten. Ihre Versuche blieben jedoch ohne Erfolg. Erst heute, mit den Methoden der modernen Kernphysik, ist dieser Menschheitstraum wahr geworden. Die Synthese neuer Elemente erfolgt durch Fusion, das heißt durch Zusammenfügen zweier leichter Atomkerne zu einem neuen schweren Kern. Atomkerne bestehen aus elektrisch positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen. Dabei bestimmt die Anzahl der Protonen die chemischen Eigenschaften eines Atoms und seine Ordnungszahl, mit der es im Periodensystem der Elemente einsortiert ist (Abbildung 3). Beim vollständigen Verschmelzen zweier Atomkerne enthält der Fusionskern alle Protonen der Fusionspartner, und damit addieren sich deren Ordnungszahlen. Somit ist ein neues schweres Element geboren.

Mit der Möglichkeit, auch künstliche Elemente jenseits des Urans (Ordnungszahl 92) herzustellen, stellte sich die fundamentale Frage, ob die Anzahl der chemischen Elemente begrenzt ist und wo diese Grenze liegt. Die erste schlüssige Antwort gaben Lise Meitner und Otto Robert Frisch unmittelbar nach der Entdeckung der Kernspaltung durch Otto Hahn und Fritz Strassmann: Die Zahl der chemischen Elemente sei begrenzt durch die Kernspaltung, meinten sie. Die Grenze lag nach ihren Abschätzungen bei dem Element mit der Ordnungszahl 100. Meitner und Frisch berechneten diese Grenze mit dem Modell des geladenen Kerntropfchens, welches zerplatze, wenn es zu viele Protonen enthält. Diese stoßen sich gegenseitig ab, so dass der Atomkern zerstört werde, wenn er zu viele davon enthalte.

Heute wissen wir, dass Atomkerne

eine Schalenstruktur aufweisen, welche sie stabilisiert, ähnlich wie wir es aus der Chemie von den Edelgasen kennen. Die Theoretiker – unter ihnen der Gießener Physiker Ulrich Mosel – sagten die Existenz von „superschweren Elementen“ weit oberhalb des Urans voraus, die allein durch ihre Schalen-



Abb. 2: Wilhelm Conrad Röntgen wurde am 27. März 1845 geboren. Er lehrte und forschte von 1879 bis 1888 in Gießen. In dieser Zeit gelang es ihm, den von der Maxwellschen Theorie vorausgesagten Verschiebungsstrom experimentell nachzuweisen. Später war er Professor in Würzburg und in München. Seine bekannteste wissenschaftliche Entdeckung, die nach ihm benannten Strahlen, sind eine charakteristische Signatur für die Struktur-Atome und finden als kurzwellige elektromagnetische Diagnostikstrahlen weltweit Anwendung. Röntgen erhielt für diese grundlegende Entdeckung mit ihren vielseitigen Anwendungen in den Naturwissenschaften und der Medizin 1901 den ersten Nobelpreis für Physik. Er starb am 10. Februar 1923. Die enge wissenschaftliche und persönliche Verbundenheit Röntgens mit Gießen ist auch über seinen Tod hinaus geblieben. Sein Grab befindet sich in Gießen auf dem „Alten Friedhof“ an der Licher Straße.

struktur stabilisiert sind. Theoretisch sollte es eine Insel von langlebigen superschweren Kernen geben, die von sehr kurzlebigen, leicht spaltbaren Nukliden umgeben sind. Damit wurde die Frage nach dem oberen Ende des Periodensystems besonders spannend, und eine Jagd nach den schwersten Elementen begann zwischen Laboren in den USA, in Russland und bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Deutschland.

Das neue Element Roentgenium

Das schwerste chemische Element, dessen Entdeckung bis jetzt offiziell durch die International Union for Pure and Applied Physics (IUPAC) anerkannt worden ist, ist das Element mit der Ordnungszahl 111. Die Anerkennung fand am 18. Mai dieses Jahres statt. Die Entdecker sind die Forscher der SHIP-Gruppe der GSI unter der Leitung von Sigurd Hofmann. Zu Ehren von Wilhelm Conrad Röntgen (Abbildung 2), der übrigens von 1879 bis 1888 an der Universität Gießen lehrte und forschte, schlugen sie als Namen für dieses schwerste chemische Element "Roentgenium" mit dem chemischen Symbol Rg vor. In den zurückliegenden 20 Jahren sind an der GSI insgesamt sechs neue Elemente mit den Ordnungszahlen 107 bis 112 entdeckt worden. Zuletzt war am 2. Dezember 2003 das Element mit der Ordnungszahl 110 von Bundesministerin Edelgard Bulmahn und Darmstadts Oberbürgermeister Peter Benz auf den Namen "Darmstadtium" (Ds) getauft worden.

Die erfolgreiche Synthese neuer Elemente hat ihre Wurzeln in einer gemeinsamen erfolgreichen Spitzenforschung zwischen der Justus-Liebig-Universität (JLU) und der GSI. Die GSI ist ein Großfor-



Hans Geissel, Jahrgang 1950, Physikstudium 1971 bis 1977 in Gießen, Abschluss mit einer experimentellen Diplomarbeit zum Aufbau des SHIP unter der Leitung von Prof. Gottfried Münzenberg. Externe Doktorarbeit 1982 bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt (GSI) mit Experimenten zur Abbremsung von Schwerionen (Betreuer: Prof. Peter Armbruster, Prof. Heinz Ewald). Zwei Jahre als Gastwissenschaftler am Institut für Festkörperphysik in Chalk River, Kanada. Seit 1985 Wissenschaftler bei der GSI, Konzeption und Aufbau des Fragmentseparators FRS. Experimente zur atomaren und nuklearen Wechselwirkung von relativistischen Ionen mit Materie und deren Anwendungen. Leiter der FRS-Gruppe bei der GSI seit 1996. Seit 2002 apl. Professor an der Universität Gießen, Leiter der IONAS-Gruppe im II. Physikalischen Institut.

1																		13										14										15										16										17										18											
1	2																																																																			2											
3	4																	5										6										7										8										9										10										10	
11	12	3																13										14										15										16										17										18											
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																										
87	88	89-103	104	105	106	107	108											109	110	111	112	113	114	115	116											118																																											
Lanthanoide																		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																																															
Actinoide																		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																																															

Abb. 3: Neuester Stand des Periodensystems der Elemente gemäß IUPAC. Im Periodensystem sind alle chemischen Elemente nach ihrer Ordnungszahl sortiert. Die Ordnungszahl repräsentiert die Anzahl der Protonen im Atom. Die schwersten bislang eindeutig identifizierten Elemente mit den Ordnungszahlen 107 bis 112 wurden bei der GSI entdeckt. Im Dezember 2003 wurde das Element 110 auf den Namen "Darmstadtium" (Ds) getauft. Element 111 soll auf Vorschlag der Entdecker und auf Empfehlung der IUPAC vom 18. Mai 2004 den Namen "Roentgenium" (Rg) erhalten.

schungszentrum, das 1969 auf Initiative der umliegenden Universitäten in Darmstadt gegründet wurde. Von Gießen aus war insbesondere Heinz Ewald, der damalige Direktor des II. Physikalischen Instituts, aktiv beteiligt. Ein zentrales Forschungsziel für den Aufbau der GSI war die Suche nach den vorausgesagten superschweren Kernen.

Das einzigartige Werkzeug der Forschung bei der GSI ist der Linearbeschleuniger UNILAC (Abbildung 1). Er liefert intensive Strahlen energiereicher Ionen, welche die Voraussetzung für die Synthese

neuer Elemente sind. Die Ionen (Projektile) werden auf eine Materieschicht (Target) geschossen, wobei Fusionsreaktionen zwischen Projektil-Kernen und Target-Kernen stattfinden können. Das Problem ist, dass diese Prozesse nur sehr selten passieren. Beispielsweise wurde bei den Experimenten zur Fusion von Element 111 nur etwa ein Atom pro Woche identifiziert. Eine weitere Schwierigkeit ist, dass die neuen Atomkerne nur Bruchteile von Sekunden leben. Ihr Nachweis war ein experimentelles Problem, für das es bei der Gründung der GSI noch keine Lösung gab.

Diese experimentelle Herausforderung wurde vom II. Physikalischen Institut der JLU angenommen, und unter Leitung von Heinz Ewald begann Anfang der 70-er Jahre eine junge, motivierte Gruppe um Gottfried Münzenberg über ein geeignetes Separationsverfahren nachzudenken. Schnell stand fest, dass eine Separation basierend auf einer Trennung im Fluge wohl die best geeignete Methode für die Synthese der schwersten Elemente

sei. Dabei werden die Reaktionsprodukte nach Passieren des relativ dünnen Targets mit Hilfe von elektromagnetischen Feldern im Durchflug getrennt. Somit ist nur die Flugzeit von wenigen Millionsteln einer Sekunde die untere Grenze für die Beobachtung von kurzlebigen Kernen. Diese Separationszeit für die Reaktionsprodukte ist völlig ausreichend, da sie viel kleiner als die erwartete Lebensdauer der interessanten superschweren Elemente ist.

Von der ionenoptisch erfahrenen Gießener Gruppe, die schon vorher erfolgreich einige Massenspektrometer aufgebaut hatte, wurde der Bau eines zweistufigen Geschwindigkeitsfilters mit räumlich getrennten elektrischen und magnetischen Feldern vorgeschlagen und unter mehreren konkurrierenden Vorschlägen aus anderen Universitäten und Instituten für die Realisierung ausgewählt. Unter dem Namen SHIP (Separator for Heavy Ion Reaction Products) wurde das Gießener Geschwindigkeitsfilter bei der GSI dann aufgebaut und in Betrieb

genommen. Die „Schiffsreise“ zu den schwersten Atomkernen konnte beginnen.

In Abbildung 5 ist das Funktionsschema des SHIP dargestellt, wie es auch zur Entdeckung des Elementes Roentgenium eingesetzt wurde. In einer Fusionsreaktion mit $3 \cdot 10^{12}$ Nickel (^{64}Ni) Projektilen pro Sekunde wurde ein rotierendes Bismut (^{209}Bi) Target-Rad Tag und Nacht über mehrere Wochen beschossen, bevor drei Atome des Elements im Detektorsystem am SHIP-Ausgang eindeutig nachgewiesen wurden.

Der Nachweis des neuen Elementes erfolgte sehr raffiniert in einem ortsempfindlichen Halbleiter-Detektor-Aufbau, in dem die Fusionsprodukte über ihre Alpha-Zerfallsketten eindeutig dem neuen Element Roentgenium zugeordnet wurden. Alpha-Zerfall ist die Zerfallsart von schweren Kernen, bei der spontan ein zweifach positiv geladener Heliumkern (Alpha-Teilchen) emittiert wird. Jedes Isotop ist durch die beim Alpha-Zerfall frei werdende Energie und seine Lebensdauer charakterisiert. Wenn man nun die Alpha-Zerfallsketten bis in den Bereich der schon bekannten Isotope nachverfolgen kann, ist die eindeutige Identifikation der Massen- und Ordnungszahl des neuen Elementes gesichert. Als Beispiel einer solchen Lebensgeschichte wird in Abbildung 5 eine gemessene Alphakette eines Roentgenium ^{272}Rg -Kerns mit Zerfallsenergien und Zerfallszeiten gezeigt.

Die Vorhersage der Produktionswahrscheinlichkeiten für die schwersten Elemente ist auch heute noch eine große Herausforderung in der Theorie und wird deshalb weiterhin aktiv im Institut für Theoretische Physik der JLU von der Gruppe von Werner Scheid bearbeitet. Experimente zur Synthese der schwersten Elemente sind Forschungsschwerpunkte in mehreren internationalen Beschleunigerlaboratorien. Gegenwärtig sind neben der GSI das Flerov Institute for Nuclear Research in Dubna (Russland) und das Forschungszentrum RIKEN bei Tokyo (Japan) besonders aktiv und erfolgreich. Obwohl viele Experimentbedingungen in den verschiedenen Instituten variiert werden, benutzen doch alle die effiziente und universelle experi-

mentelle Methode der Separation im Fluge. Inzwischen gibt es auch schon Anzeichen für die Entdeckung der Elemente mit den Ordnungszahlen 113 bis 116, jedoch ist die eindeutige Identifikation experimentell noch nicht erbracht worden.

IONAS und die künftige Zusammenarbeit von JLU und GSI auf dem Gebiet exotischer Atomkerne

Die Entwicklung und der Aufbau des Geschwindigkeitsfilters SHIP war der Auftakt für eine sehr erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen der JLU und der GSI, die sich nicht nur auf die Erforschung neuer Elemente be-



Foto: Gabriele Otto, GSI

Abb. 4: Geschwindigkeitsfilter SHIP bei der GSI in Darmstadt mit dem Leiter der Roentgenium-Experimente Prof. Dr. Sigurd Hofmann.



Wolfgang Plaß, Jahrgang 1971, Physikstudium 1992 bis 1997 in Gießen, Diplomarbeit zur Flugzeitmassenspektrometrie unter der Leitung von Prof. Hermann Wollnik. Dreijähriger Aufenthalt an der Purdue University, USA, bei Prof. R. Graham Cooks. Promotion 2001 in Gießen bei Prof. Hermann Wollnik mit einer Arbeit auf dem Gebiet der RF-Ionenfallen-Massenspektrometrie. Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der IONAS-Gruppe von Prof. Hans Geissel in Gießen, Entwicklungen und Experimente zur Massenmessung von kurzlebigen Kernen an der Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt. Seit 2004 Leiter der Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppe "Experimente mit gespeicherten exotischen Kernen" am II. Physikalischen Institut der Universität Gießen.

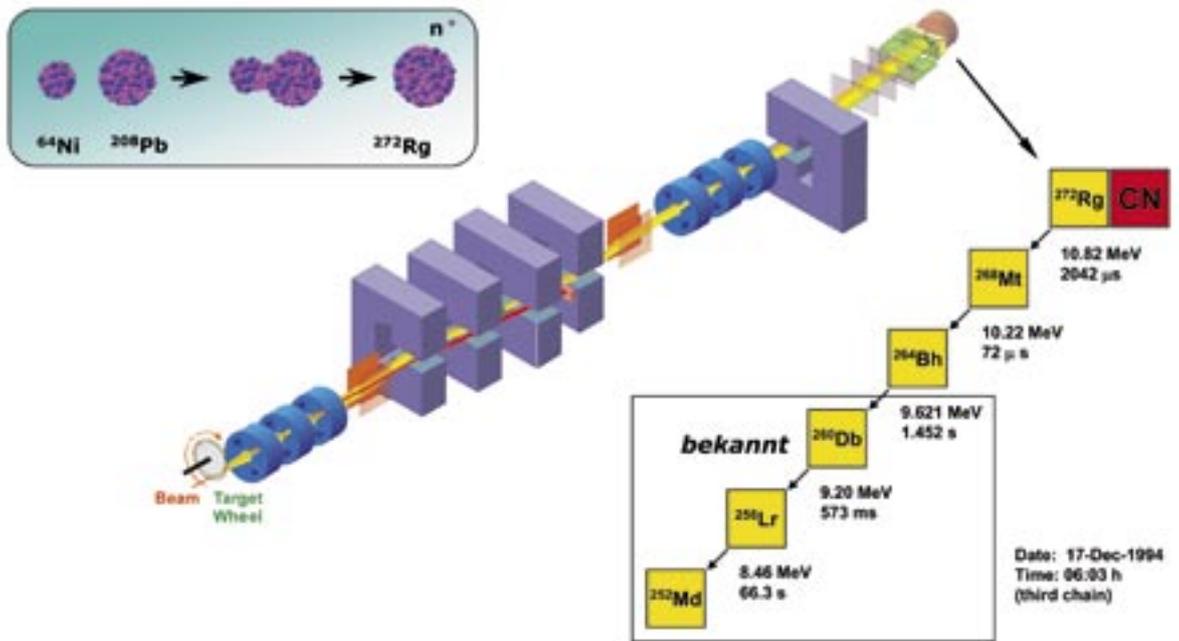


Abb. 5: Schema des Geschwindigkeitsfilters SHIP. Der Strahl der Projektionen trifft auf das rotierende Target-Rad. Die in Fusionsreaktionen gebildeten schweren Kerne werden mit Hilfe von elektrischen und magnetischen Feldern vom Primärstrahl getrennt und in einem Alpha-Detektor-Array nachgewiesen. Links oben: Schema der Fusion eines ^{272}Rg -Kerns aus ^{64}Ni und ^{208}Pb . Rechts unten: Alpha-Zerfallskette des dritten an der GSI synthetisierten Roentgenium-Kerns. Ausgehend vom Compoundkern (CN) wird der Roentgenium-Kern unter Abgabe eines Neutrons gebildet und zerfällt durch Emissionen von schnellen Heliumkernen sukzessive in die in der Kette angegebenen Kerne. Die Zahlen an den die Zerfälle kennzeichnenden Pfeilen geben die gemessenen Alpha-Energien und Zeitabstände zwischen den Zerfällen an. Die im Rahmen angegebenen Zerfälle sind bereits bekannt, so dass der Roentgenium-Kern eindeutig identifiziert werden kann.

schränkt. Zur Zeit werden die erfolgreichen Gießener Pionierarbeiten mit kurzlebigen, seltenen (exotischen) Kernen von der IONAS-Gruppe an der JLU fortgesetzt. Der Gruppenname IONAS steht für Ion Optics, Nuclear Astrophysics and Structure. Unter anderem werden Entwicklungen für das Zukunftsprojekt FAIR der GSI am geplanten Super-FRS durchführt. Dieses neue Projekt hat schon die ersten Genehmigungshürden erfolgreich genommen und verspricht nach der Real-

sierung durch neue internationale Experimente auch starke Impulse für Forschung und Lehre an der JLU Gießen.

Als jüngster Spross in dieser Tradition mit dem Ziel der weiteren Stärkung der Zusammenarbeit zwischen der JLU und der GSI auf dem Gebiet der Erforschung der Struktur exotischer Kerne und der nuklearen Astrophysik wurde kürzlich eine Nachwuchsgruppe unter der Leitung von Wolfgang Plaß in der IONAS-Arbeitsgruppe eingerichtet. Sie wird finanziell von der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) über einen Zeitraum von drei Jahren gefördert. Das vorgeschlagene wissenschaftliche und technische Programm der Nachwuchsgruppe beinhaltet auch die Untersuchung von am SHIP produzierten Atomkernen. Hierzu werden die Ionen nach Durchlaufen des Geschwindigkeitsfilters in einer mit Helium gefüllten Stoppzelle abgebremst, so dass sie Präzisionsmessungen in Ionenfallen zu-

geführt werden können. In diesem SHIPTRAP-Projekt, das in Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen der GSI und der umliegenden Universitäten durchgeführt wird, sollen Massenmessungen, spektroskopische Messungen und die Untersuchung der chemischen Eigenschaften von schweren Atomkernen vorgenommen werden. •

LITERATUR

- W.C. Röntgen, Nature 53 (1896) 274
- S. Hofmann et al. Z. Phys. A 350 (1995) 281
- G. Münzenberg et al., Nucl. Instr. Meth. 161 (1979) 65
- G. Münzenberg, M. Schädel, Moderne Alchemie - Die Jagd nach den schwersten Elementen, Vieweg, Braunschweig, 1996
- S. Hofmann, On Beyond Uranium: Journey to the End of the Periodic Table, Taylor and Francis, London, 2003
- Conceptual Design Report for an International Accelerator Facility for Research with Ions and Antiprotons, GSI 2001, siehe auch http://www-new.gsi.de/zukunftsprojekt/index_e.html

JUSTUS-LIEBIG-
UNIVERSITÄT
GIESSEN

Dr. Wolfgang Plaß

II. Physikalisches Institut
Heinrich-Buff-Ring 16
35392 Gießen
Tel.: 0641/99-33253
Fax: 0641/99-33239
E-Mail: Wolfgang.R.Plass@exp2.physik.uni-giessen.de