

Produktion superschwerer Elemente

Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

Mathias Wegner

25.06.2010

Schaubild: Das Periodensystem

Periodensystem der Elemente

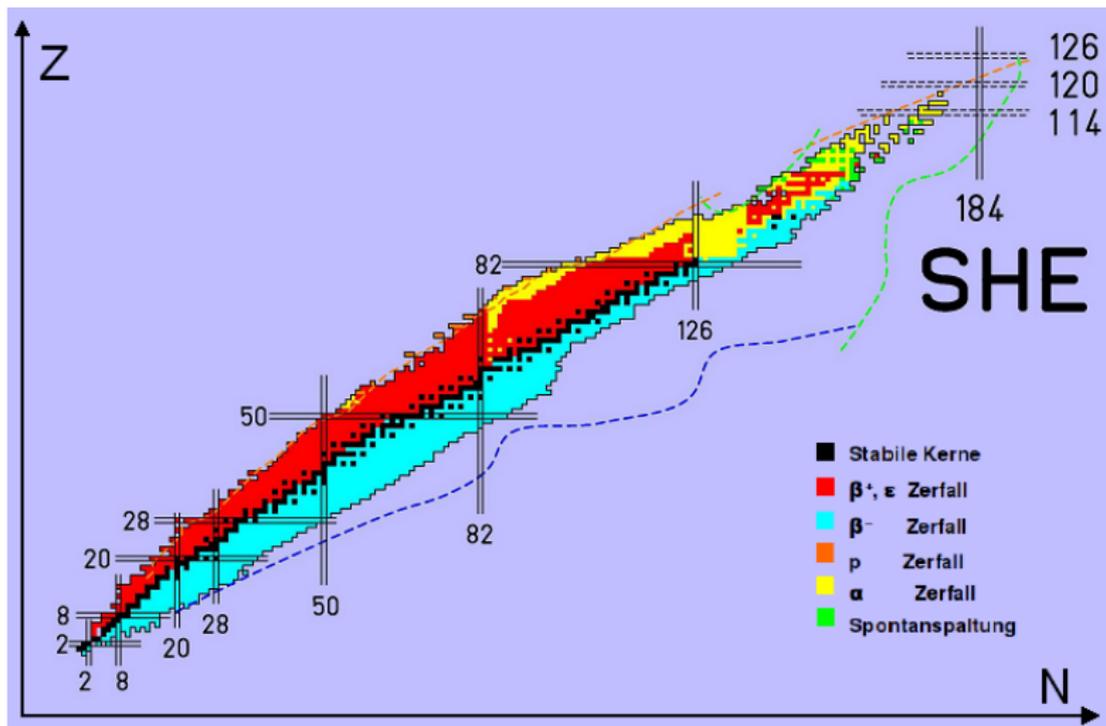
1																	18															
1	2											13	14	15	16	17	18															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18															
1	2											5	6	7	8	9	10															
3	4											13	14	15	16	17	18															
2	3	4											5	6	7	8	9	10														
3	4											13	14	15	16	17	18															
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			

Ordnungszahl: **6** **C** **Fe** — Feste Elemente
 Elementsymbol: **O** — Gasförmige Elemente
 Elementname: **Hg** — Flüssige Elemente (20°C)
 Rel. Atommasse: **12.01** **Tc** — Radioaktive Elemente

© Peter Wich - Experimentalchemie.de - Chemie erleben!

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La Lanthan 138.91	Ce Cer 140.12	Pr Praseodym 140.91	Nd Neodym 144.24	Pm Promethium (147)	Sm Samarium 150.36	Eu Europium 151.97	Gd Gadolinium 157.25	Tb Terbium 158.93	Dy Dysprosium 162.50	Ho Holmium 164.93	Er Erbium 167.26	Tm Thulium 168.93	Yb Ytterbium 173.04	Lu Lutetium 174.97
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac Actinium 227.03	Th Thorium 232.04	Pa Protactinium 231.04	U Uran 238.03	Np Neptunium (237)	Pu Plutonium (244)	Am Americium (243)	Cm Curium (247)	Bk Berkelium (247)	Cf Californium (251)	Es Einsteinium (252)	Fm Fermium (257)	Md Mendelevium (258)	No Nobelium (259)	Lr Lawrencium (262)

Schaubild: Die Nuklidkarte



Inhalt

Der heutige Vortrag behandelt

- Grundlegende Modelle über den Atomaufbau
- Möglichkeiten zur Erzeugung neuer Elemente
- Experimentelle Realisierung GSI
- Die Elemente 111 und 112

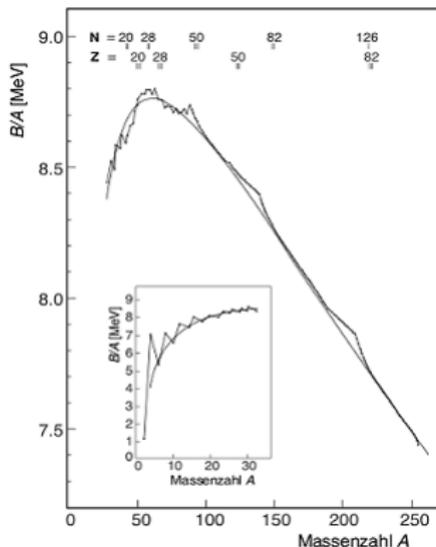
Theorie

I. Theorie

Die Bindungsenergie pro Nukleon

Stabilitätsmaß von Atomen: Bindungsenergie B pro Nukleon:

$$B(Z, A) = [Z \cdot (m_e + M_P) + (A - Z) \cdot M_N - M(A, Z)]$$

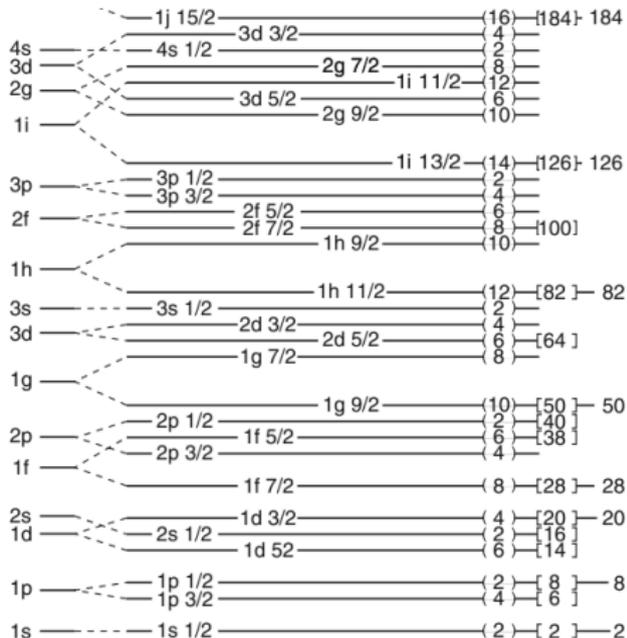


- Stabilität gegeben durch:
 - anziehendes Kernpotential
 - abstoßendes Coulombpotential
- Funktionsverlauf in Graphen mit Bethe-Weizsäcker-Formel berechnet
- Aber: Geringe Abweichungen für bestimmte 'magische Zahlen'
- Modell also nur grob gültig

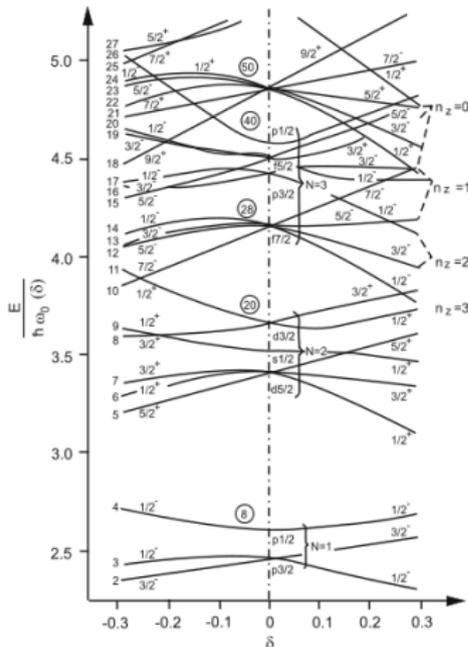
Das Schalenmodell

besonders hohe Stabilität bei Zahlen 2, 8, 20, 28, 50, 82, ...

- Model analog zu Elektronenschalenmodell
- starke Energieniveauf-spaltung durch Is-Kopplung
- volle Schalen bei großem Abstand der Energieniveaus
- magische Zahlen entsprechen gefüllte Schalen

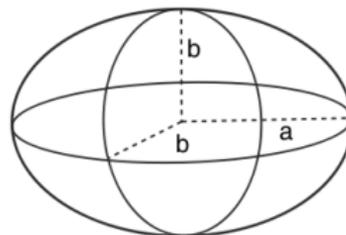


Deformierte Kerne - Das Nielsson-Model



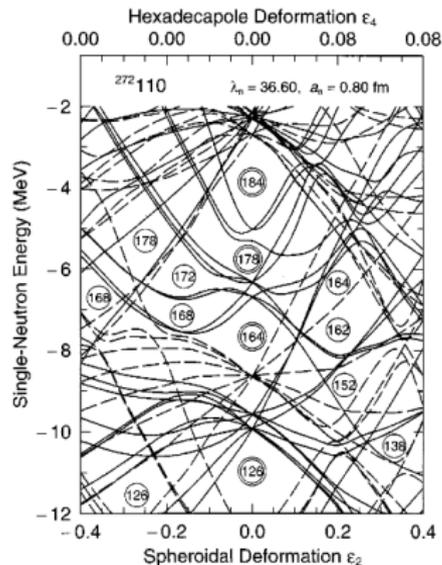
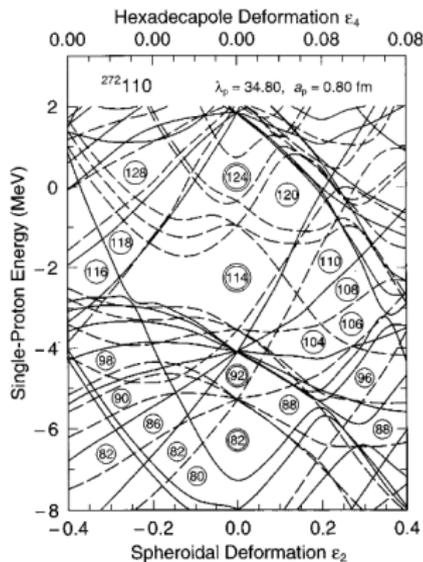
- Schalenmodell nur bei kugelsymmetrischen, nicht aber bei deformierten Kernen gültig
- Stärke der Verformung beschrieben durch:

$$\delta = \frac{b-a}{R_0} \quad \text{mit} \quad R_0 = \frac{a+b}{2}$$



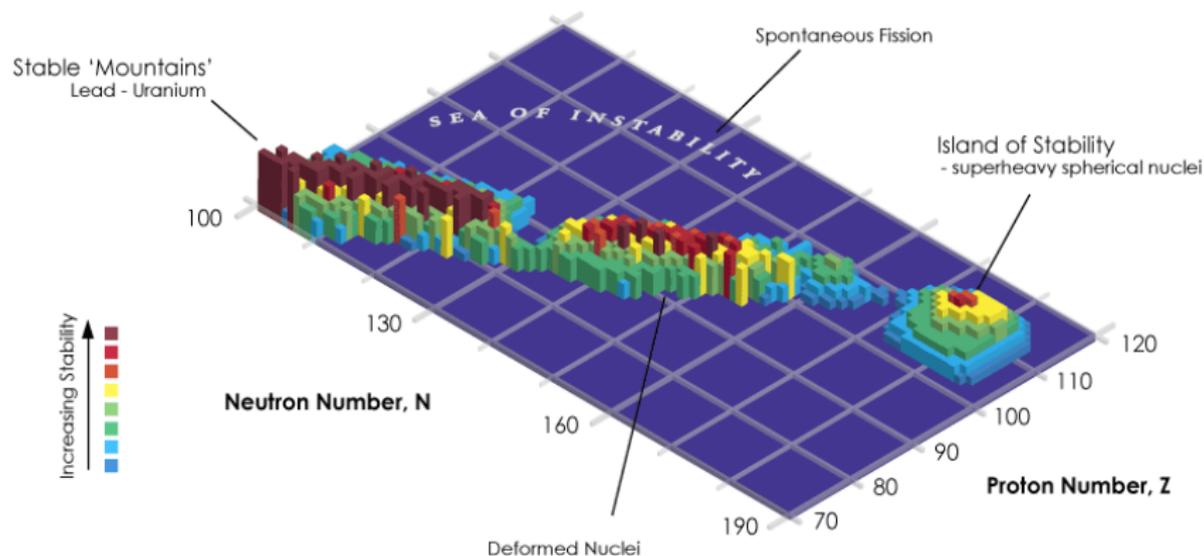
Deformierte Kerne

- nächste magische Neutron-Zahl: 184
- nächste magische Proton-Zahl unsicher (114, 120, 126)



Die Insel der Stabilität

Hoffnung: Stabilität superschwerer Elemente durch Schaleneffekte



Neutroneneinfang

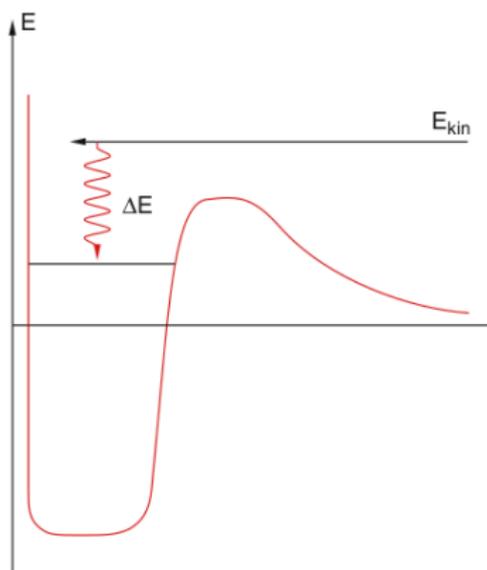
- Schwerstes, stabiles, natürlich vorkommendes Element: ${}_{92}^{238}\text{U}$
- Erzeugung neuer, schwerer Elemente durch Neutroneneinfang mit anschließendem β -Zerfall:



- Möglich bis ${}_{100}^{257}\text{Fm}$, danach spontane Spaltung und α -Zerfall dominant
- Schwerere Elemente ab $Z = 100$ verlangen andere Methode

Kernfusion

$Z > 100$: Kernfusion



Herausforderungen:

- Überwindung der Coloumbarriere
- Vermeidung spontaner Spaltung
- kleiner Wirkungsquerschnitt

Heiße Fusion:

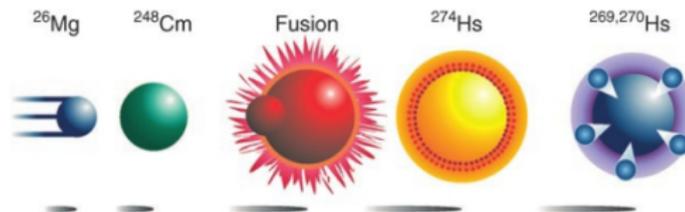
- Leichte Projektile, schwere Targets
- Produkt stark angeregt: 40-50 MeV
- Abdampfen von 4-5 Neutronen

Kalte Fusion

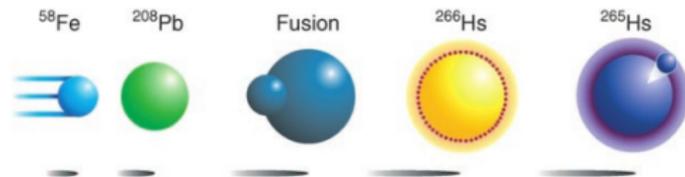
- mittelschwere Projektile und Targets
- Produkt schwach angeregt: 10-15 MeV
- Abdampfen von 1 Neutron

Kernfusion

- Heiße Fusion: $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{269}\text{Hs} + 5n$

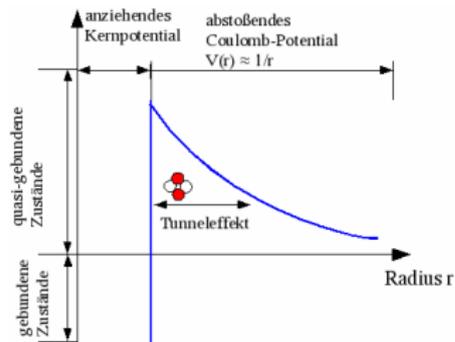
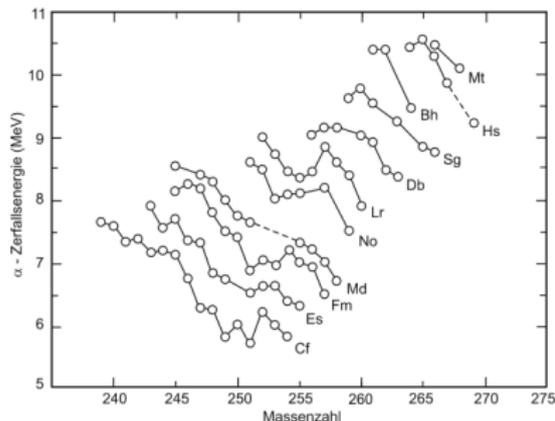


- Kalte Fusion: $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{265}\text{Hs} + 1n$



Der α -Zerfall

- α -Zerfall quantenmechanisch durch Tunnelvorgang möglich
- Zerfall ab $A=165$ möglich:
 $m(^4\text{He}) + m(^{A-4}\text{X}) < m(^A\text{X})$



- Superschwere Elemente sind α -Emitter
- Energie des Heliumkerns charakteristisch für Zerfallsprodukt

Experimente an der GSI

II. Experimente an der GSI

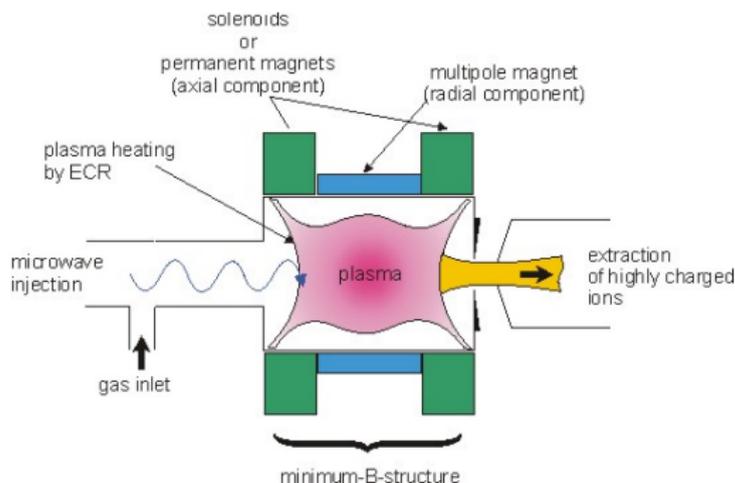
Übersicht über die GSI

Gründung	1969
Personal	1050 Mitarbeiter, davon 300 Wissenschaftler
Budget	108 Millionen Euro im Jahr 2010
Mission	Bau und Betrieb von Beschleunigeranlagen und Forschung mit schweren beschleunigten Ionen.



UNiversal Linear ACcelerator

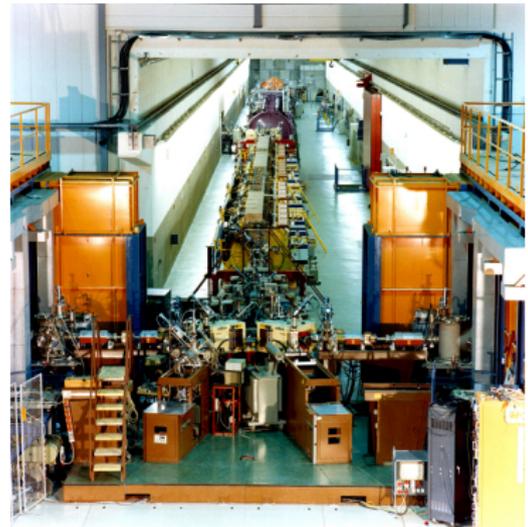
- Ionenstrahl: Elektron-Zyklotron-Resonanz-Ionenquelle
 - Bestrahlung von Plasma mit Mikrowellen
 - herausgelöste Elektronen wegen Magnetfeld auf Kreisbahnen
 - nach und nach sukzessive Einfachionisation



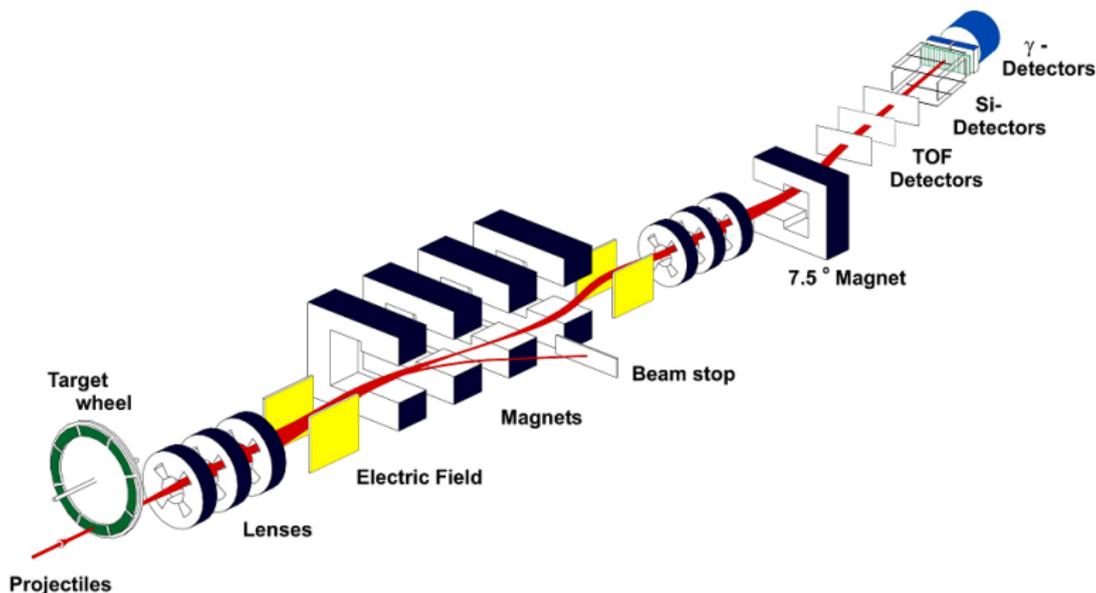
- Schwere Ionen im Plasma bleiben thermisch
- Extraktion der entkommenden Ionen per Hochspannung
- erzeugte Ionen: $^{58}\text{Fe}^{8+}$, $^{70}\text{Zn}^{10+}$, $^{82}\text{Se}^{12+}$, ...

UNiversal Linear ACcelerator

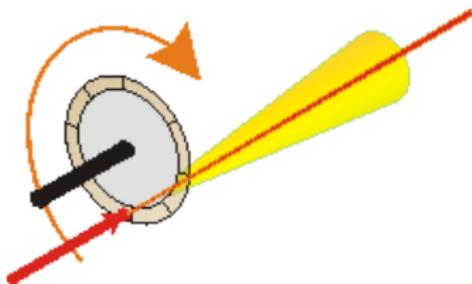
- Beschleuniger: Radio-Frequency Quadrupole
 - sinuswellenförmige Pole: Ständige Ab- und Zunahme der Feldstärke
 - Zusammenrücken der Ionen zu Paketen
- Länge: 120m
- Teilchen von Protonen bis Uranatome mit 11.4 MeV/u
- Teilchenfluss ca. 10^{13} pro Sekunde



Separator for Heavy Ion reaction Products

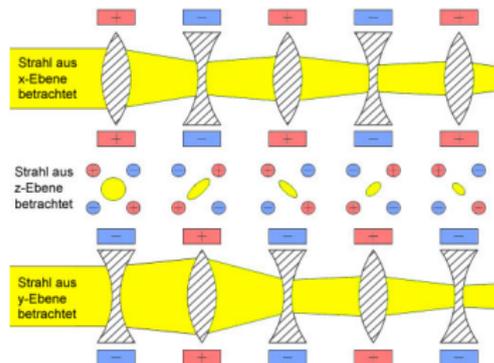
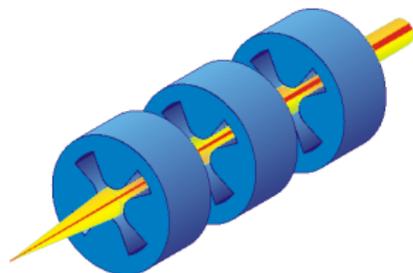


Target-Scheibe



- Target: Dünne Folien mit $(0.1-1) \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$
 - einheitliche Geschwindigkeit der entstehenden Fusionsprodukte
 - Bsp. Blei: Dicke = $(0,1-1) \mu\text{m}$
- Durchmesser Projektilstrahl: 5mm
- Durchmesser Targetscheibe: 31cm
- Funktionsweise der Scheibe
 - Targetwechsler
 - Dauerrotator gegen Erhitzung
- Target-Überwachung per Video und Infrarotkamera

Quadrupolmagnete



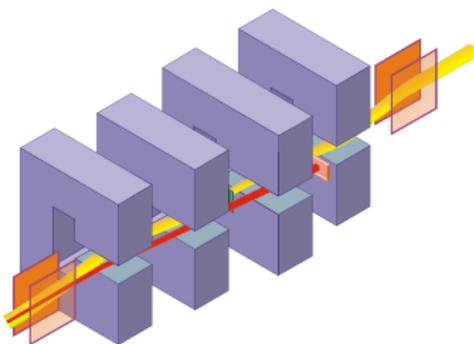
- 2 x 3 Fokussierlinsen
- Durchmesser: 15cm
- $B_{\max} = 0.7T$
- Anordnung von 4 Polen, Nord- und Südpol gegenseitig gegenüberliegend
- Magnetfeldgradient Richtung Zentrum immer schwächer

Geschwindigkeitsfilter

- Geschwindigkeit des Produkts gegeben durch Impulserhaltung:

$$v_P = \frac{m_P}{m_{P_r} + m_{T_a}} \cdot v_{P_r}$$

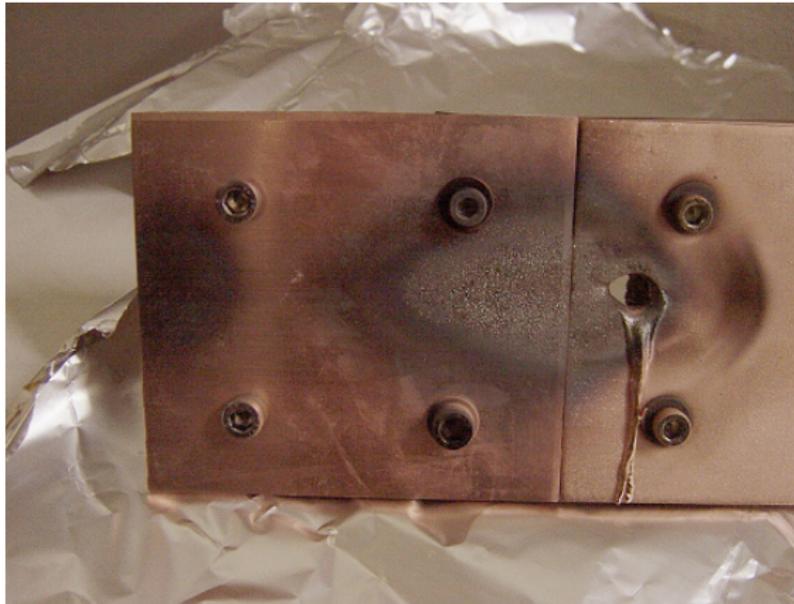
- Filtervorgang unabhängig von Ladung und Masse



- Wienfilter: $F_C = F_L \rightarrow v = \frac{E}{B}$
- Feldstärken automatisch einstellbar
 - $B_{\max} = 0.7\text{T}$
 - $E_{\max} = \frac{620\text{kV}}{0,15\text{m}} = 4,13 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$
- Strahlstopper für schnelle Projektilteilchen

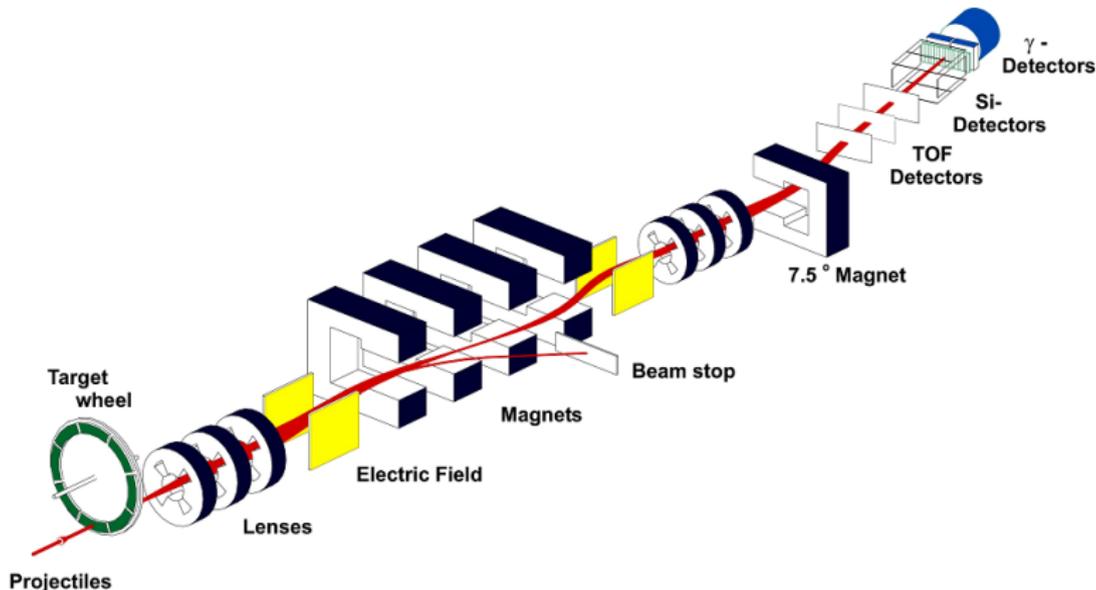
Strahlstopper

- Projektileilchen nicht ungefährlich



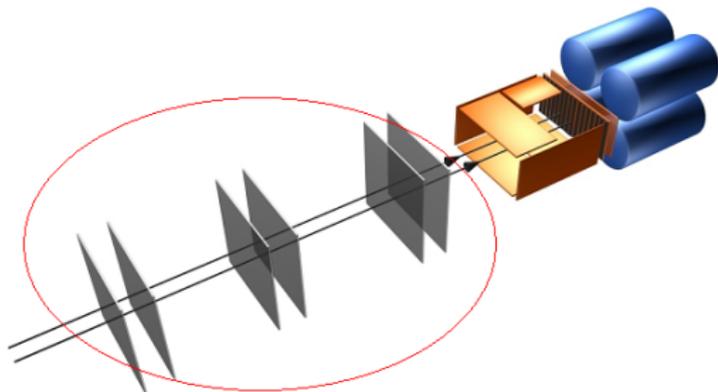
Separator for Heavy Ion reaction Products

- 7,5°-Magnet: Filtern ungeladener Teilchen / restlicher Projektile



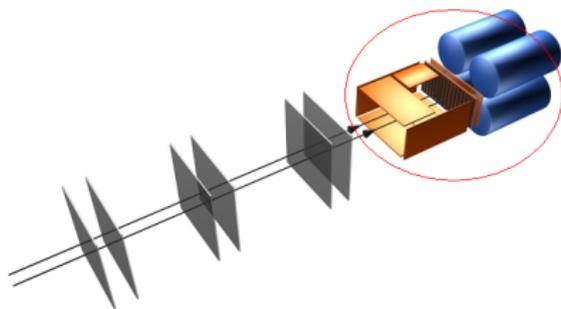
Das Detektorsystem

Time-Of-Flight-Dektoren:



- sehr dünne Folien aus Kohlenstoff → 100% Transmission
- Elektrisches Potential saugt herausgeschlagene Elektronen ab
- höhere Masse → höhere Ladung → größeres Signal
- TOF-Detektoren liefern Start-Signal der Messung

Das Detektorsystem



Silizium-Detektoren (Streifenzähler):

- 80% von 2π abgedeckt
- Identifikation von Kernen und Zerfallsprodukten
- Energieauflösung mit 40 keV sehr gut

Germaniumdetektor:

- Messen von Anregungszuständen über Gamma-Strahlen

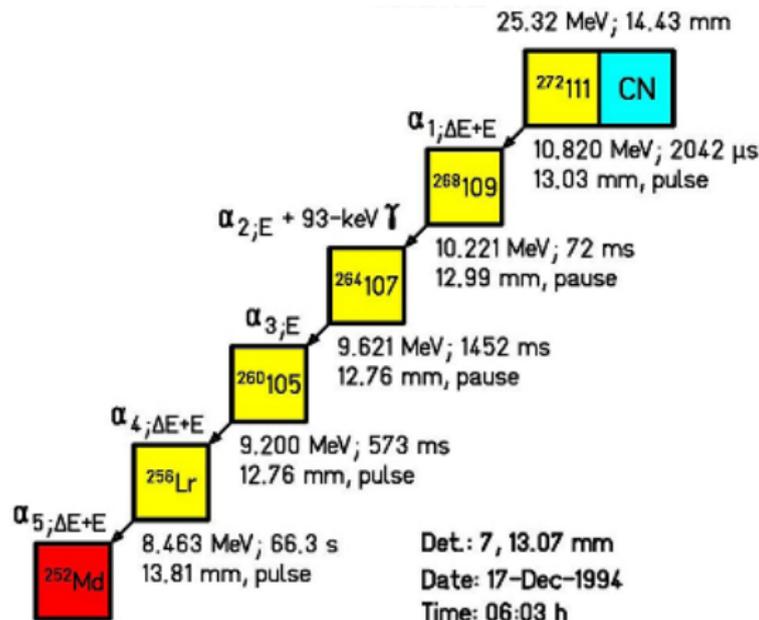
Die Elemente 111 und 112

III. Die Elemente 111 und 112

Element 111

• Fusionsprozess: $^{64}\text{Ni} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{272}111 + n$

• Zerfallsprozess:

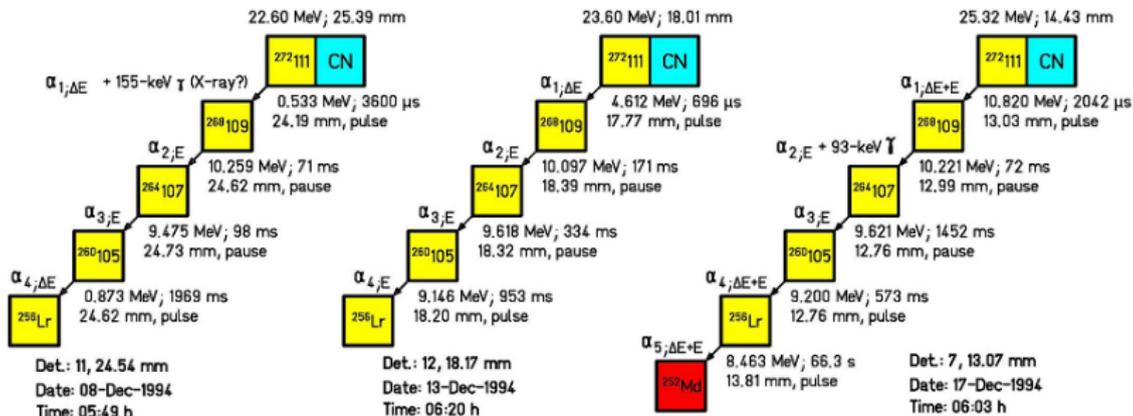


Element 111

Fusionsprozess:



Zerfallsprozesse:



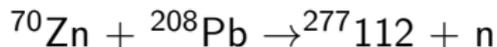
Element 111

Datum	Dauer	E(Projectil)	Events	Wirkungsquerschnitt
01.12.-06.12.94	5.0d	316,1MeV	0	$< 2,9 \text{ pb}$
06.12.-12.12.94	5.8d	318,1MeV	1	$1,7^{+3,3}_{-1,4} \text{ pb}$
12.12.-18.12.94	5.9d	320,0MeV	2	$3,5^{+4,6}_{-2,3} \text{ pb}$

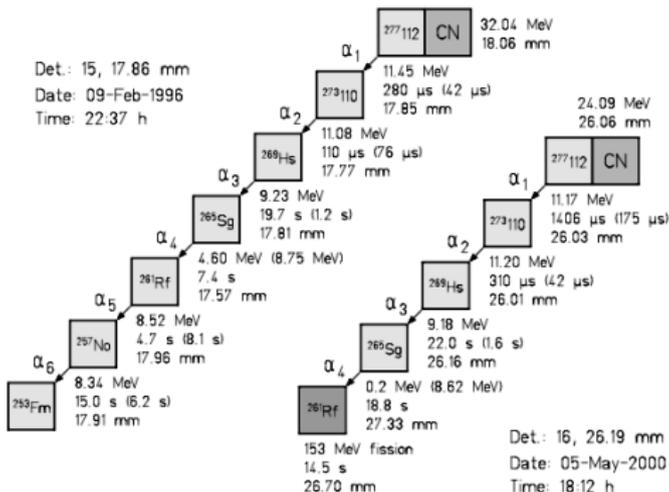
- Messdauer: 17 Tage - Eventanzahl: 3
- Wirkungsquerschnitt abhängig von Projektilenergie
- Halbwertszeit: $1,5^{+2,0}_{-0,5} \text{ ms}$
- Wiederholte Messung und Bestätigung im Jahr 2000

Element 112

Fusionsprozess:

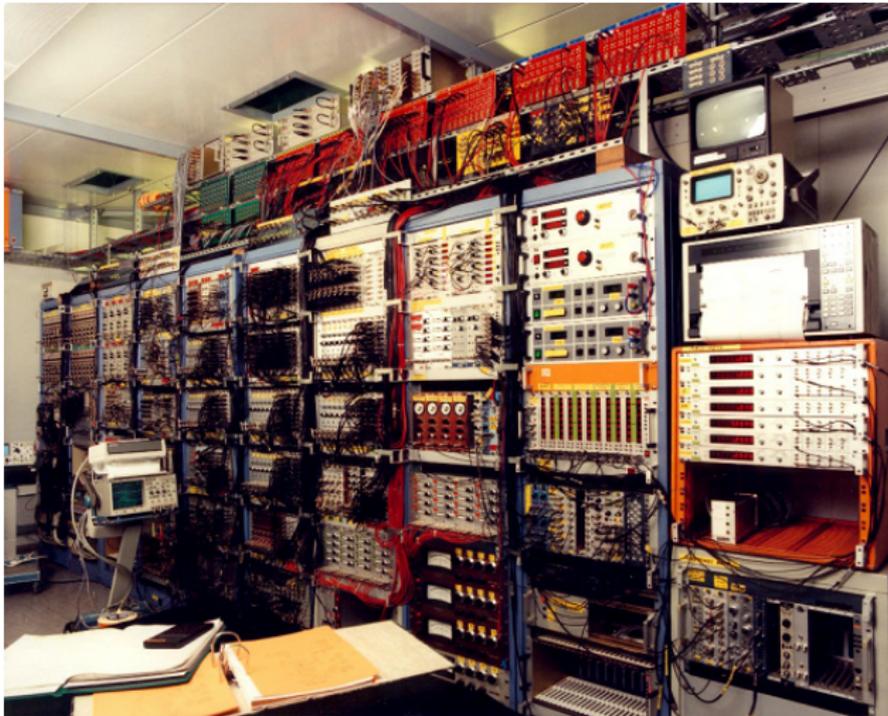


Zerfallsprozesse:



IV. Interessantes

etwas komplizierter als bei den FP-Versuchen...



Elementbenennung



- offizielle Taufe des Elements 111 am 17. November 2006 zu Roentgenium
- Kriterium für Anerkennung der Entdeckung: Reproduzierbarkeit des Ergebnisses

- Element 112 anerkannt seit 10. Juni 2009
- Namensbenennung am 19.02.2010 zu Copernicium 'Cn'

produzierte Elemente an der GSI

Z	Name	Symbol	Veröffentlichung	$t_{1/2}$
107	Bohrium	Bh	24. Februar 1981	17 s
108	Hassium	Hs	14. März 1984	25 s
109	Meitnerium	Mt	29. August 1982	42 ms
110	Darmstadtium	Ds	9. November 1994	56 ms
111	Roentgenium	Rg	8. Dezember 1994	6,4 ms
112	Copernicium	Cn	9. Februar 1996	0,6 ms

Veröffentlichung vom 22.06.10

Darmstadt, den 22. Juni 2010

Chemisches Element 114 erstmals bei GSI erzeugt

... ist es gelungen, in einem vierwöchigen Experiment 13 Atome des Elements 114 nachzuweisen. Obwohl dies nur wenige Atome sind, ist das die höchste jemals gemessene Produktionsrate für Element 114 ...

... Ziel ist es nun, mit der neuen Messapparatur zu noch schwereren Elementen vorzudringen und vielleicht sogar neue Elemente jenseits von Element 118 zu entdecken ...

Der Wettlauf der drei Forschungszentren

- Entdeckte Elemente
 - an der GSI Darmstadt: 108, 109, 110, 111, 112
 - am LBNL Berkeley: 104, 105
 - am JINR Dubna: 107, 113, 114, 115, 116, 117, 118

Zusammenfassung

- Superschwere Elemente definitionsgemäß ab $Z=104$
- Schwere Elemente bis $Z=100$ herstellbar mit Neutroneneinfang
- Ab $Z=100$ Synthese von neuen Elementen per Kernfusion
- Hoffnung bei der Suche nach Insel der Stabilität
- Wettrennen: Darmstadt, Dubna und Berkeley

Referenzliste

- The discovery of the heaviest elements, S. Hofmann und G. Münzenberg, Rev. Mod. Phys. 72 (2000), p. 733-767
- The velocity filter SHIP, a separator of unslowed heavy ion fusion products, G. Münzenberg, Nucl. Instr. Meth. 161 (1979), 65-82
- Teilchen und Kerne, B. Povh et al, 8. Auflage (2008), Springer Verlag
- www.gsi.de
- www.strz.uni-giessen.de/ezr/german/prinzip.html
- www.lhc-facts.ch
- www.wikipedia.de