

# Superschwere Elemente

## Die Reise zur Insel der Stabilität

Steffen Therre

Fakultät für Physik und Astronomie,  
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg



FAKULTÄT FÜR  
PHYSIK UND  
ASTRONOMIE



13. Juni 2014

Präzisionsexperimente der Teilchenphysik

# Inhalt

- 1 Einleitung
  - Motivation
  - Grundlagen
  - Geschichte

# Inhalt

- 1 Einleitung
  - Motivation
  - Grundlagen
  - Geschichte
- 2 Erzeugung & Analyse
  - Methoden der Erzeugung
  - Messung
  - Ergebnisse

# Inhalt

- 1 Einleitung
  - Motivation
  - Grundlagen
  - Geschichte
- 2 Erzeugung & Analyse
  - Methoden der Erzeugung
  - Messung
  - Ergebnisse
- 3 Ausblick
  - Stand der Dinge
  - Land in Sicht?

# Inhalt

## 1 Einleitung

- Motivation
- Grundlagen
- Geschichte

## 2 Erzeugung & Analyse

- Methoden der Erzeugung
- Messung
- Ergebnisse

## 3 Ausblick

- Stand der Dinge
- Land in Sicht?

# Was sind Superschwere Elemente?

Unterschiedliche Definitionen:

## Transurane

Elemente mit Ordnungszahl größer als Uran (U):  $Z > 92$

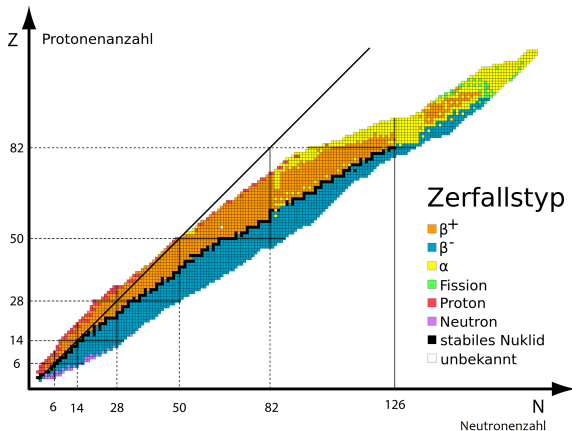
## Transactinoide

Elemente mit Ordnungszahl größer als schwerstes Actinoid  
*Lawrencium (Lr)*:  $Z > 103$

# Das Periodensystem

1 <b>H</b> Hydrogen 1,0079																	2 <b>He</b> Helium 4,0026
3 <b>Li</b> Lithium 6,941	4 <b>Be</b> Beryllium 9,01218											5 <b>B</b> Bor 10,811	6 <b>C</b> Carbon 12,011	7 <b>N</b> Stickstoff 14,0074	8 <b>O</b> Sauerstoff 15,9994	9 <b>F</b> Fluor 18,998403	10 <b>Ne</b> Neon 20,1797
11 <b>Na</b> Natrium 22,989768	12 <b>Mg</b> Magnesium 24,305											13 <b>Al</b> Aluminium 26,981539	14 <b>Si</b> Silizium 28,0855	15 <b>P</b> Phosphor 30,973762	16 <b>S</b> Schwefel 32,06	17 <b>Cl</b> Chlor 35,4527	18 <b>Ar</b> Argon 39,948
19 <b>K</b> Kalium 39,0983	20 <b>Ca</b> Calcium 40,078	21 <b>Sc</b> Scandium 44,95591	22 <b>Ti</b> Titan 47,88	23 <b>V</b> Vanadium 50,9415	24 <b>Cr</b> Chrom 51,9961	25 <b>Mn</b> Mangan 54,938	26 <b>Fe</b> Eisen 55,845	27 <b>Co</b> Cobalt 58,9332	28 <b>Ni</b> Nickel 58,6934	29 <b>Cu</b> Kupfer 63,546	30 <b>Zn</b> Zink 65,39	31 <b>Ga</b> Gallium 69,723	32 <b>Ge</b> Germanium 72,64	33 <b>As</b> Arsen 74,9216	34 <b>Se</b> Selen 78,96	35 <b>Br</b> Brom 79,904	36 <b>Kr</b> Krypton 83,80
37 <b>Rb</b> Rubidium 85,4678	38 <b>Sr</b> Strontium 87,62	39 <b>Y</b> Yttrium 88,90585	40 <b>Zr</b> Zirkon 91,224	41 <b>Nb</b> Niobium 92,90638	42 <b>Mo</b> Molybdän 95,94	43 <b>Tc</b> Technetium [98]	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101,07	45 <b>Rh</b> Rhenium 101,0705	46 <b>Pd</b> Platin 106,42	47 <b>Ag</b> Silber 107,8682	48 <b>Cd</b> Cadmium 112,411	49 <b>In</b> Indium 114,818	50 <b>Sn</b> Zinn 118,71	51 <b>Sb</b> Antimon 121,760	52 <b>Te</b> Tellur 127,6	53 <b>I</b> Jod 126,90447	54 <b>Xe</b> Xenon 131,29
55 <b>Cs</b> Cäsium 132,90545	56 <b>Ba</b> Baryum 137,327	57-71 Lanthanoiden	72 <b>Hf</b> Hafnium 178,49	73 <b>Ta</b> Tantal 180,9479	74 <b>W</b> Wolfram 183,85	75 <b>Re</b> Rhenium 186,207	76 <b>Os</b> Osmium 190,23	77 <b>Ir</b> Iridium 192,22	78 <b>Pt</b> Platin 195,08	79 <b>Au</b> Gold 196,96655	80 <b>Hg</b> Quecksilber 200,59	81 <b>Tl</b> Thallium 204,3833	82 <b>Pb</b> Blei 207,2	83 <b>Bi</b> Bismut 208,98039	84 <b>Po</b> Polonium [209]	85 <b>At</b> Astatin [210]	86 <b>Rn</b> Radon [222]
87 <b>Fr</b> Francium [223]	88 <b>Ra</b> Radium 226,2074	89-103 Actinoiden	104 <b>Rf</b> Rutherfordium [261]	105 <b>Db</b> Dubnium [262]	106 <b>Sg</b> Seaborgium [266]	107 <b>Bh</b> Bohrium [264]	108 <b>Hs</b> Hassium [265]	109 <b>Mt</b> Meitnerium [268]	110 <b>Ds</b> Darmstadtium [269]	111 <b>Rg</b> Roentgenium [272]	112 <b>Cn</b> Copernicium [285]	113 <b>Uut</b> Ununtrium [288]	114 <b>Uuq</b> Ununquadium [289]	115 <b>Uup</b> Ununpentium [290]	116 <b>Uuh</b> Ununhexium [291]	117 <b>Uus</b> Ununseptium [294]	118 <b>Uuo</b> Ununoctium [294]
89 <b>La</b> Lanthan 138,90549	90 <b>Ce</b> Cerium 140,12	91 <b>Pr</b> Praseodym 140,90766	92 <b>Nd</b> Neodym 144,24	93 <b>Pm</b> Promethium [145]	94 <b>Sm</b> Samarium 150,36	95 <b>Eu</b> Europium 151,9654	96 <b>Gd</b> Gadolinium 157,25	97 <b>Tb</b> Terbium 158,92534	98 <b>Dy</b> Dysprosium 162,50	99 <b>Ho</b> Holmium 164,93032	100 <b>Er</b> Erbium 167,26	101 <b>Tm</b> Thulium 168,93403	102 <b>Yb</b> Ytterbium 173,04	103 <b>Lu</b> Lutetium 174,967			
99 <b>Ac</b> Actinium [227]	90 <b>Th</b> Thorium 232,0381	91 <b>Pa</b> Protactinium 231,03689	92 <b>U</b> Uran 238,02891	93 <b>Np</b> Neptunium [237]	94 <b>Pu</b> Plutonium [244]	95 <b>Am</b> Americium [243]	96 <b>Cm</b> Curium [247]	97 <b>Bk</b> Berkelium [247]	98 <b>Cf</b> Californium [251]	99 <b>Es</b> Einsteinium [252]	100 <b>Fm</b> Fermium [257]	101 <b>Md</b> Mendelevium [258]	102 <b>No</b> Nobelium [259]	103 <b>Lr</b> Lawrencium [262]			

# Die Nuklidkarte



Gibt es neues Land hinter dem *Nuklidkontinent*?



# Grundlagen

## Wie funktioniert Kernphysik? ein **kurzer** Blick in die Theorie

# Tröpfchenmodell

## Prinzip

WW der Nukleonen im Kern entspricht WW der Wassermoleküle im Wassertropfen.

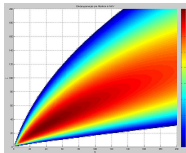
Bindungsenergie abhängig von  $A$  &  $Z$ , beschrieben durch  
**Weizsäcker-Formel**

# Tröpfchenmodell

## Prinzip

WW der Nukleonen im Kern entspricht WW der Wassermoleküle im Wassertropfen.

Bindungsenergie abhängig von  $A$  &  $Z$ , beschrieben durch  
**Weizsäcker-Formel**



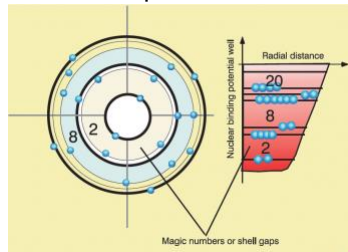
- leichte Kerne:  $N \approx Z$ , schwere:  $N > Z$
- starke WW vs. Coulomb-WW

**Aber:** bei großen  $N$ ,  $Z$  wird Bindung stärker

# Kernschalenmodell

- analog zum Atomschalenmodell
- Unterschiedliche Bindungsenergien der Nukleonen
- *magische Zahlen*:  
2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

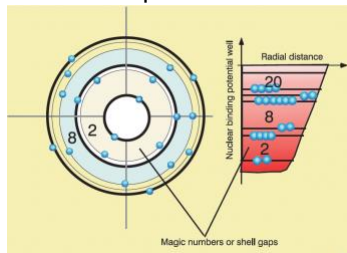
## Potentialtopfmodell



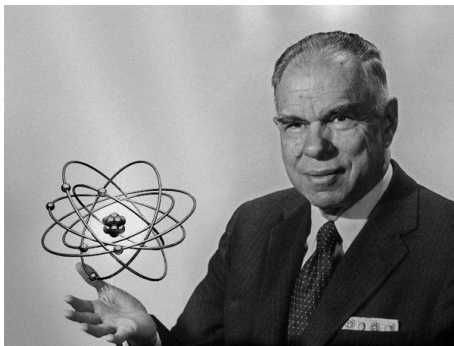
# Kernschalenmodell

- analog zum Atomschalenmodell
- Unterschiedliche Bindungsenergien der Nukleonen
- *magische Zahlen*:  
2, 8, 20, 28, 50, 82, 126
- **Wichtig**: Gilt für Neutronen und Protonen getrennt!
- besonders stabil: doppelt magische Nuklide  
 ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}\text{Ni}$ ,  ${}^{208}\text{Pb}$

## Potentialtopfmodell



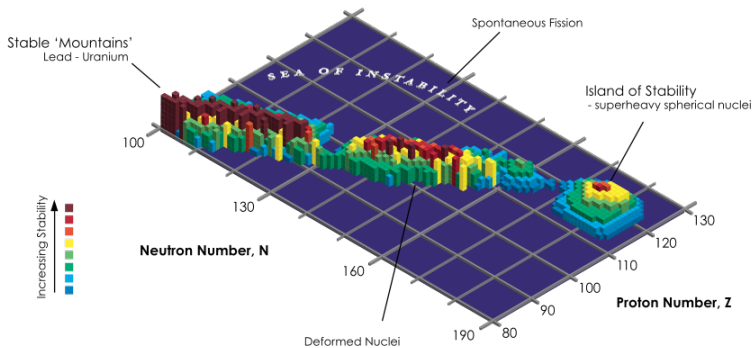
# Island of Stability



Postulat – *Glenn T. Seaborg*

Es gibt ein Gebiet stabiler Nuklide für  $Z > 110$ .

# Island of Stability



# Sinn der SHE-Forschung

- Wie schwer können Atome werden?
- Bestätigung/Wiederlegung von Theorien und Modellen
- Kenntniserwerb in Kernphysik



# Sinn der SHE-Forschung

- Wie schwer können Atome werden?
- Bestätigung/Wiederlegung von Theorien und Modellen
- Kenntniserwerb in Kernphysik

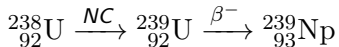
*We search for the island of stability because, like Mount Everest, it is there.*

---

Oliver Sachs

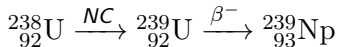
# Geschichte

- 1937: erste künstliche Elementerzeugung ( ${}^{97}_{43}\text{Tc}$ )
- 1940: Erzeugung von Neptunium-239

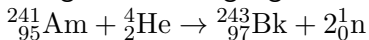


# Geschichte

- 1937: erste künstliche Elementerzeugung ( ${}^{97}_{43}\text{Tc}$ )
- 1940: Erzeugung von Neptunium-239



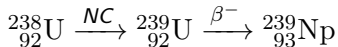
- von Neutronen zu Ionen (HILAC, Dubna)
- erfolgreiche Erzeugung schwerer Transurane (1949)



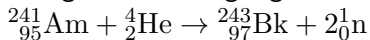
# Geschichte

- 1937: erste künstliche Elementerzeugung ( ${}^{97}_{43}\text{Tc}$ )

- 1940: Erzeugung von Neptunium-239



- von Neutronen zu Ionen (HILAC, Dubna)
- erfolgreiche Erzeugung schwerer Transurane (1949)



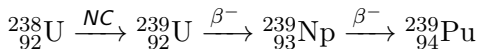
- seit 1975: UNILAC an der GSI in Darmstadt
- schwerste Elemente erzeugt in Dubna (JINR)

# Inhalt

- 1 Einleitung
  - Motivation
  - Grundlagen
  - Geschichte
- 2 Erzeugung & Analyse
  - Methoden der Erzeugung
  - Messung
  - Ergebnisse
- 3 Ausblick
  - Stand der Dinge
  - Land in Sicht?

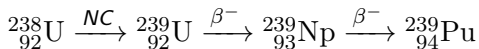
# Neutroneneinfang

- Ausgangspunkt: schwerstes natürliches Element:  
 Uran ( $Z = 92$ )
- Neutronenbeschuss zur Erzeugung schwererer Nuklide:



# Neutroneneinfang

- Ausgangspunkt: schwerstes natürliches Element:  
 Uran ( $Z = 92$ )
- Neutronenbeschuss zur Erzeugung schwererer Nuklide:



- entstandene Kerne für  $Z > 100$  instabil
- geringe Überlebenschance:  
 Fission,  $\alpha$ -Zerfall

# Kernfusion

genutzt zur Erzeugung von Elementen mit  $Z > 100$   
Prinzip: Projektil  $P$  auf schweres Target  $T$





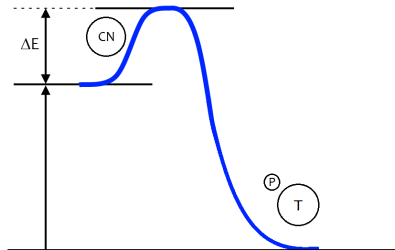
# Kernfusion

genutzt zur Erzeugung von Elementen mit  $Z > 100$   
Prinzip: Projektil P auf schweres Target T



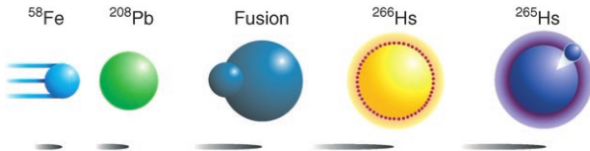
Zwei Voraussetzungen:

- 1 Coulomb-Barriere überwinden
- 2 CN muss Anregungsenergie abgeben  
→ Neutronenevaporation



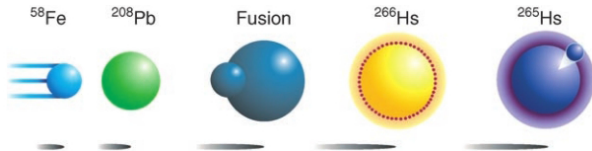
Erklärung: Fermi-Kante

# Kalte Fusion



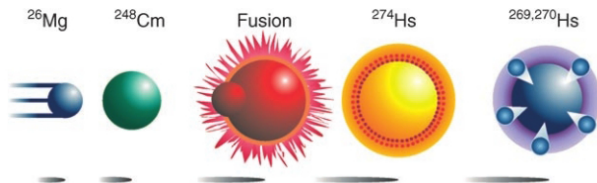
- schwere Isotope als Target:  $^{208}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{209}_{83}\text{Bi}$
- mittelschwere Projektilen:  $^{48}_{20}\text{Ca}$ ,  $^{58}_{26}\text{Fe}$ ,  $^{64}_{28}\text{Ni}$ ,  $^{78}_{32}\text{Ge}$
- bevorzugt: (doppelt) magische Nuklide

# Kalte Fusion



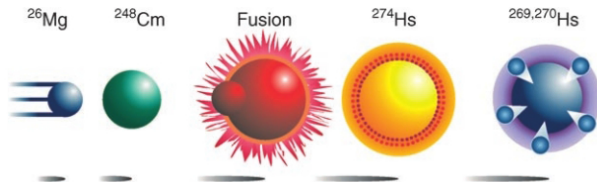
- schwere Isotope als Target:  $^{208}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{209}_{83}\text{Bi}$
- mittelschwere Projektilen:  $^{48}_{20}\text{Ca}$ ,  $^{58}_{26}\text{Fe}$ ,  $^{64}_{28}\text{Ni}$ ,  $^{78}_{32}\text{Ge}$
- bevorzugt: (doppelt) magische Nuklide
- geringere Anregungsenergie des CN (10-20 MeV)
- Evaporation: 1n oder 2n, trotzdem: zu wenige N

# Heiße Fusion



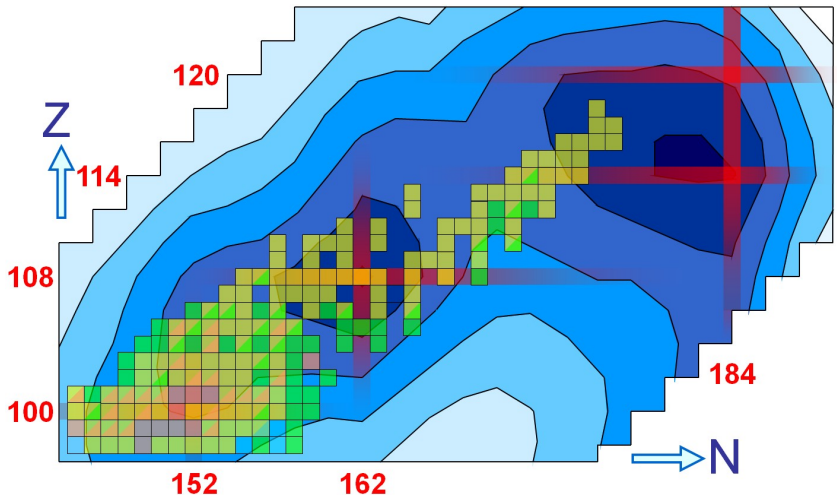
- schwere (Trans-)Actinide als Target:  $^{240}_{94}\text{Pu}$ ,  $^{249}_{97}\text{Bk}$ ,  $^{248}_{98}\text{Cm}$
- leichtere Ionen als Projektile:  $^{26}_{12}\text{Mg}$ ,  $^{34}_{14}\text{Si}$ ,  $^{48}_{20}\text{Ca}$
- höhere Asymmetrie der Z, Coulomb-Barriere

# Heiße Fusion



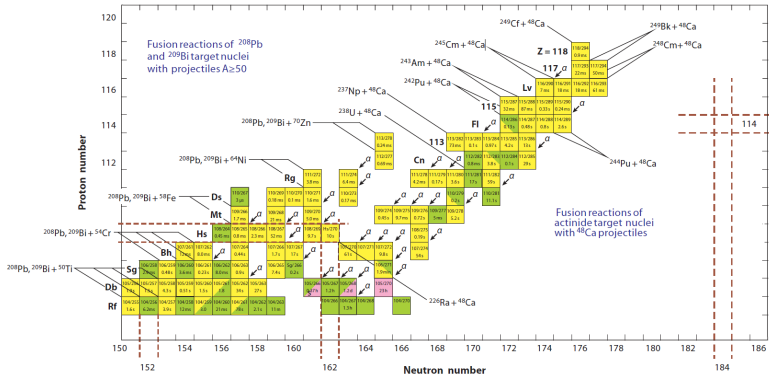
- schwere (Trans-)Actinide als Target:  ${}^{240}_{94}\text{Pu}$ ,  ${}^{249}_{97}\text{Bk}$ ,  ${}^{248}_{98}\text{Cm}$
- leichtere Ionen als Projektile:  ${}^{26}_{12}\text{Mg}$ ,  ${}^{34}_{14}\text{Si}$ ,  ${}^{48}_{20}\text{Ca}$
- höhere Asymmetrie der Z, Coulomb-Barriere
- Anregungsenergie des CN ist sehr hoch (bis zu 50 MeV)
- Evaporation von bis zu 5n

# Betrachtung in Nuklidkarte



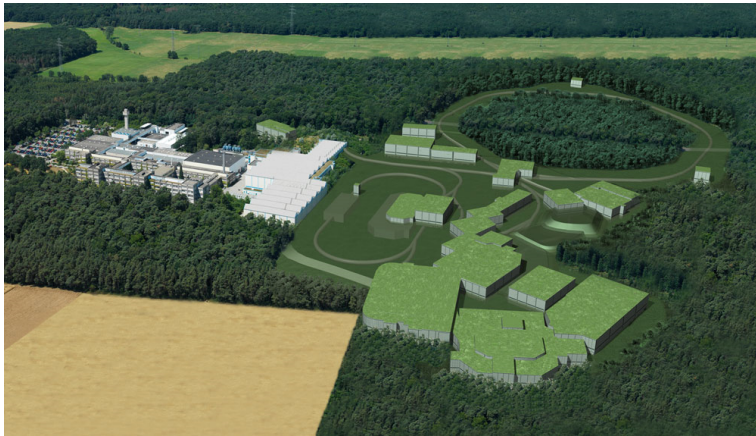
# Wie misst man SHE?

## Analyse des Zerfalls



Quelle:  
Hamilton et al.: *Search for Superheavy Nuclei*

# Gesellschaft für Schwerionenforschung





# Gesellschaft für Schwerionenforschung

## UNILAC und SHIP

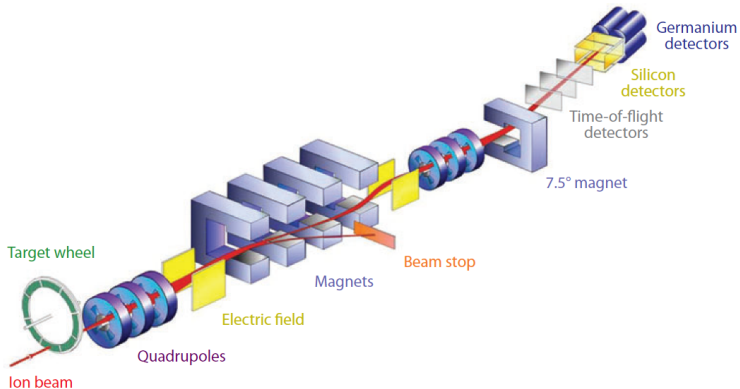
### Universal Linear Accelerator (UNILAC)



hochionisierte Strahlung, große Bandbreite  
Protonen... , leichte Ionen... , Uran

# Gesellschaft für Schwerionenforschung UNILAC und SHIP

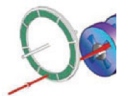
## Separator for Heavy Ion reaction Products (SHIP):



# Gesellschaft für Schwerionenforschung

## Funktion des SHIP

Target wheel



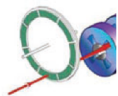
Ion beam

- Target-Folien ( $300\text{-}450\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )
- niedrige Schmelztemperatur
- rotiert mit  $400\text{-}1100\ \text{rpm}$

# Gesellschaft für Schwerionenforschung

## Funktion des SHIP

Target wheel

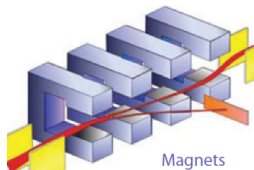


Ion beam

- Target-Folien ( $300\text{-}450 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )
- niedrige Schmelztemperatur
- rotiert mit  $400\text{-}1100 \text{ rpm}$

Impulserhaltung:

$$v_{CN} = \frac{m_p}{m_p + m_t} \cdot v_p$$



# Gesellschaft für Schwerionenforschung

## Funktion des SHIP

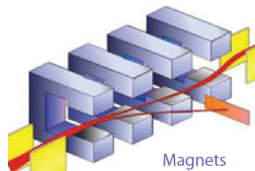
Target wheel



- Target-Folien ( $300\text{-}450 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )
- niedrige Schmelztemperatur
- rotiert mit  $400\text{-}1100 \text{ rpm}$

Impulserhaltung:

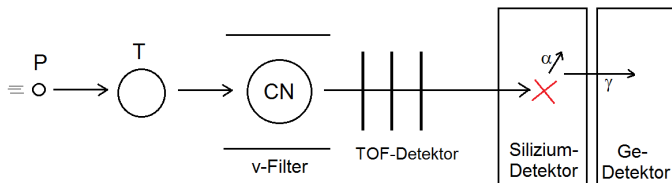
$$v_{CN} = \frac{m_p}{m_p + m_t} \cdot v_p$$



Dazwischen: Strahlfokussierer, Ablenkmagneten

# Gesellschaft für Schwerionenforschung

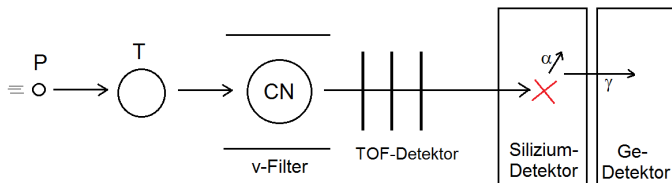
## Detektion der SHE



- CN in Si-Detektor implantiert
- Messung der  $\alpha$ -Zerfälle (Energie, Position, Zeit)
- koinzidente  $\gamma$ -Zerfälle im Ge-Detektor

# Gesellschaft für Schwerionenforschung

## Detektion der SHE



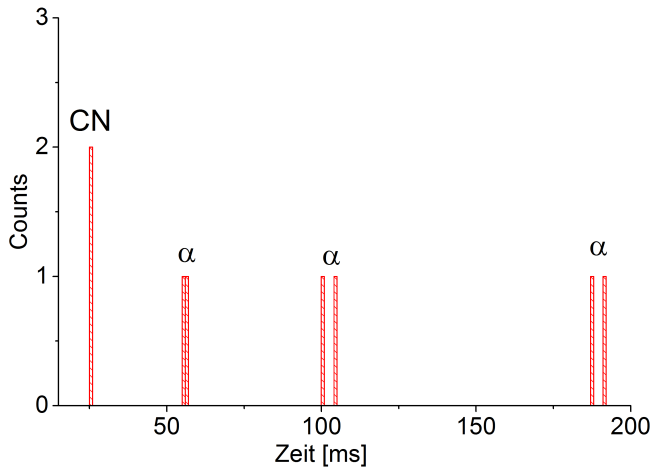
- CN in Si-Detektor implantiert
- Messung der  $\alpha$ -Zerfälle  
(Energie, Position, Zeit)
- koinzidente  $\gamma$ -Zerfälle im Ge-Detektor

$$\Delta E = 14 \text{ keV}$$

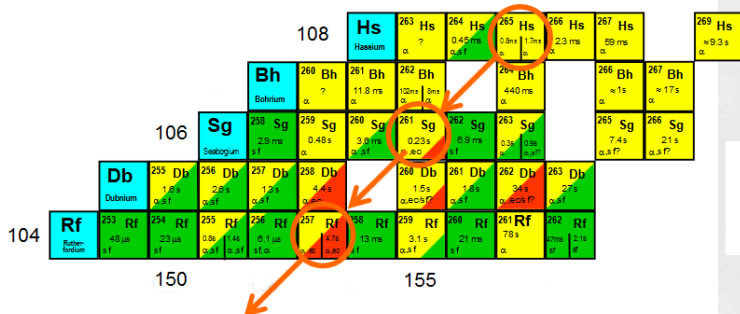
$$\Delta x = 150 \mu\text{m}$$

$$T_{\frac{1}{2}} \geq 15 \mu\text{s}$$

## Histogramm: SHE im Silizium-Halbleiter-Detektor

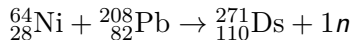






- Diskrete  $\alpha$ -Zerfälle
- oft mehrere Zerfallskanäle
- häufig sehr kleine Statistik (Größenordnung  $10^0$ )

# Zerfallsstatistik

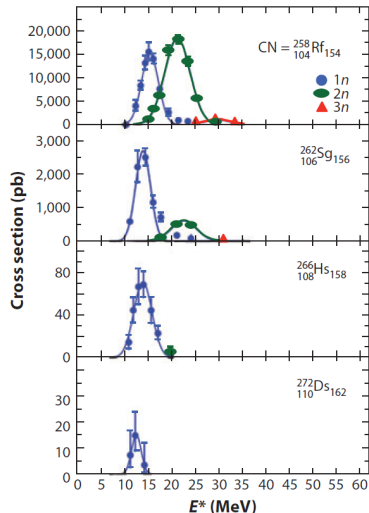


$E_{proj}$ (MeV)	$E^*$ (MeV)	Measuring time (days)	Ion dose $10^{18}$	events	$\sigma$ (pb)
305.3	3.94	0.4	0.09	0	$< 38$
308.6	6.49	0.6	0.15	0	$< 25$
311.7	8.84	2.7	0.53	2	$7.4^{+9.4}_{-4.8}$
313.0	9.85	3.5	0.78	6	$15^{+9}_{-6}$
315.5	11.80	4.8	0.55	1	$3.6^{+6.8}_{-3.0}$

# Unbegrenzte Möglichkeiten?

Kann man alle SHE mit dieser Methode erzeugen?

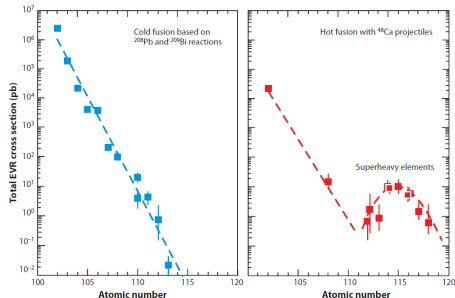
- Abnahme des WQ für kalte Fusion
- Herausforderungen an Experiment
- Bestrahlungsdauer/  
-intensität



# Unbegrenzte Möglichkeiten?

Kalte Fusion für  $Z > 112$   
nicht mehr geeignet

- WQ-Abnahme auch bei heißer Fusion
- Aber: stabilere Endprodukte für  $Z > 112$
- Hauptsächlich in Dubna (JINR) durchgeführt



# Inhalt

- 1 Einleitung
  - Motivation
  - Grundlagen
  - Geschichte
- 2 Erzeugung & Analyse
  - Methoden der Erzeugung
  - Messung
  - Ergebnisse
- 3 Ausblick
  - Stand der Dinge
  - Land in Sicht?

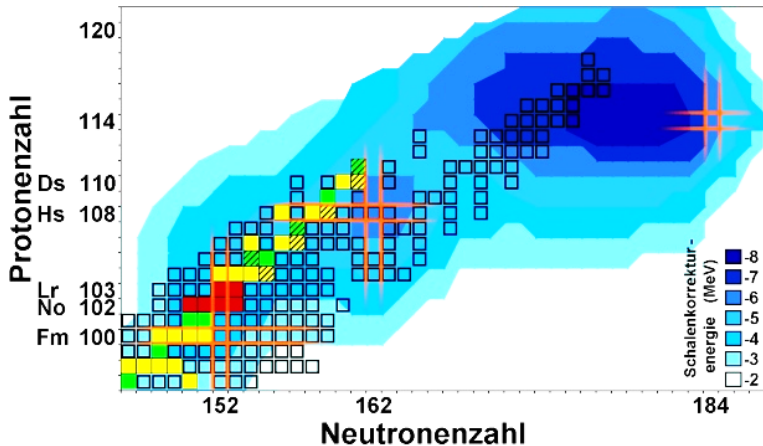
## Erzeugte Transactinoide

Z	Name	Lebensdauer		erste Erzeugung
104	Rutherfordium	1.3 h	( <sup>267</sup> Rf)	1964 Dubna
105	Dubnium	16 h	( <sup>268</sup> Db)	1967 Dubna
106	Seaborgium	2.4 min	( <sup>271</sup> Sg)	1974 Dubna/Berkeley
107	Bohrium	17 s	( <sup>267</sup> Bh)	1981 Darmstadt
108	Hassium	2.4 min	( <sup>278</sup> Hs)	1984 Darmstadt
109	Meitnerium	20 s	( <sup>274</sup> Mt)	1982 Darmstadt
110	Darmstadtium	1.1 min	( <sup>282</sup> Ds)	1994 <b>Rätsel!</b>
111	Roentgenium	3.6 s	( <sup>280</sup> Rg)	1994 Darmstadt
112	Copernicium	34 s	( <sup>285</sup> Cn)	1996 Darmstadt
113	<i>Ununtrium</i>	480 ms	( <sup>284</sup> Uut)	2012 Dubna/Wako
114	Flerovium	2.7 s	( <sup>289</sup> Fl)	1999 Dubna
115	<i>Ununpentium</i>	10 s	( <sup>289</sup> Uup)	2004 Dubna
116	Livermorium	53 ms	( <sup>293</sup> Lv)	2000 Dubna
117	<i>Ununseptium</i>	≈ 50 ms	( <sup>292</sup> Uus)	2010 Dubna
118	<i>Ununoctium</i>	1.8 ms	( <sup>294</sup> Uuo)	2006 Dubna

## Erzeugte Transactinoide

Z	Name	Lebensdauer		erste Erzeugung
104	Rutherfordium	1.3 h	( <sup>267</sup> Rf)	1964 Dubna
105	Dubnium	16 h	( <sup>268</sup> Db)	1967 Dubna
106	Seaborgium	2.4 min	( <sup>271</sup> Sg)	1974 Dubna/Berkeley
107	Bohrium	17 s	( <sup>267</sup> Bh)	1981 Darmstadt
108	Hassium	2.4 min	( <sup>278</sup> Hs)	1984 Darmstadt
109	Meitnerium	20 s	( <sup>274</sup> Mt)	1982 Darmstadt
110	Darmstadtium	1.1 min	( <sup>282</sup> Ds)	1994 Darmstadt
111	Roentgenium	3.6 s	( <sup>280</sup> Rg)	1994 Darmstadt
112	Copernicium	34 s	( <sup>285</sup> Cn)	1996 Darmstadt
113	<i>Ununtrium</i>	480 ms	( <sup>284</sup> Uut)	2012 Dubna/Wako
114	Flerovium	2.7 s	( <sup>289</sup> Fl)	1999 Dubna
115	<i>Ununpentium</i>	10 s	( <sup>289</sup> Uup)	2004 Dubna
116	Livermorium	53 ms	( <sup>293</sup> Lv)	2000 Dubna
117	<i>Ununseptium</i>	≈ 50 ms	( <sup>292</sup> Uus)	2010 Dubna
118	<i>Ununoctium</i>	1.8 ms	( <sup>294</sup> Uuo)	2006 Dubna

# Nochmal die Nuklidkarte





## Wann geht es weiter?

- schwierigere/ teurere Target-Erzeugung
- Experimente zur Erzeugung von  ${}_{120}^{302}\text{Ubn}^*$
- kleine Wirkungsquerschnitte ( $\approx 40$  fb)
- Detektor-/Experimentsensibilität verbesserungswürdig
- Neutronenmangel zur IoS

# Land in Sicht?

- noch kein quasi-stabiles Isotop erzeugt
- Lebensdauern werden größer: Trend ist klar erkennbar
- Kernschalenmodell bestätigt

# Land in Sicht?

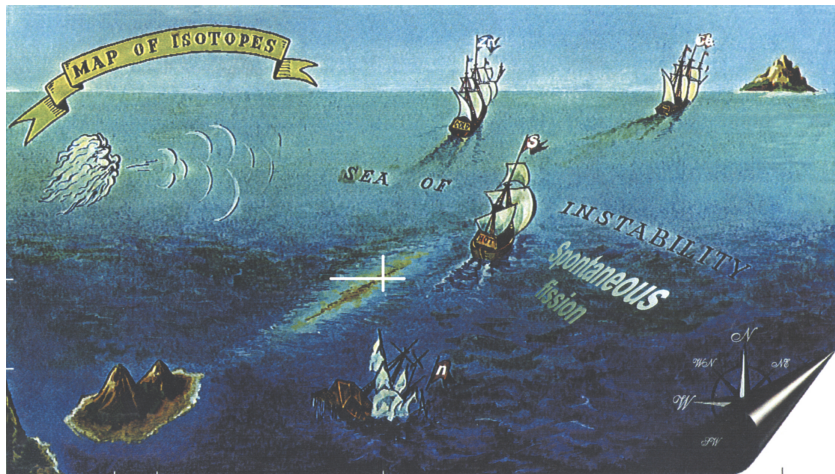
- noch kein quasi-stabiles Isotop erzeugt
- Lebensdauern werden größer: Trend ist klar erkennbar
- Kernschalenmodell bestätigt

*Die Insel der Stabilität ist nunmehr gut in Sicht, man weiß nur noch nicht welche Route zum Ziel führt.*

---

Walter Greiner

# Land in Sicht?



Ende

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit  
Fragen?

# Literatur

**W. Greiner** *Heavy Into Stability (2010)*

**J.H. Hamilton et al.** *Search for Superheavy Nuclei (2013)*

**G. Münzenberg, M. Gupta** *Discoveries with cold heavy-ion fusion (2011)*

**S. Hofmann** *Synthesis of superheavy elements by cold fusion (2009)*

**V.I. Zagrebaev et al.** *Production of heavy and superheavy neutron-rich nuclei (2011)*

**G. Münzenberg et al.** *The identification of Element 108 (1984)*

**U. Mosel, W. Greiner** *On the Stability of Superheavy Nuclei against Fission (1969)*