

Jądra superciężkie

- 1. Co to są jądra superciężkie?**
- 2. Metody syntezy jąder superciężkich**
- 3. Odkryte jądra superciężkie**
- 4. Współczesne eksperymenty syntezy j.s.**
- 5. Metody identyfikacji j.s.**
- 6. Przewidywania teoretyczne**

Co to są jądra superciężkie?

Jądra superciężkie - najcięższe jądra o wydłużonym czasie życia, spowodowanym efektami struktury powłokowej

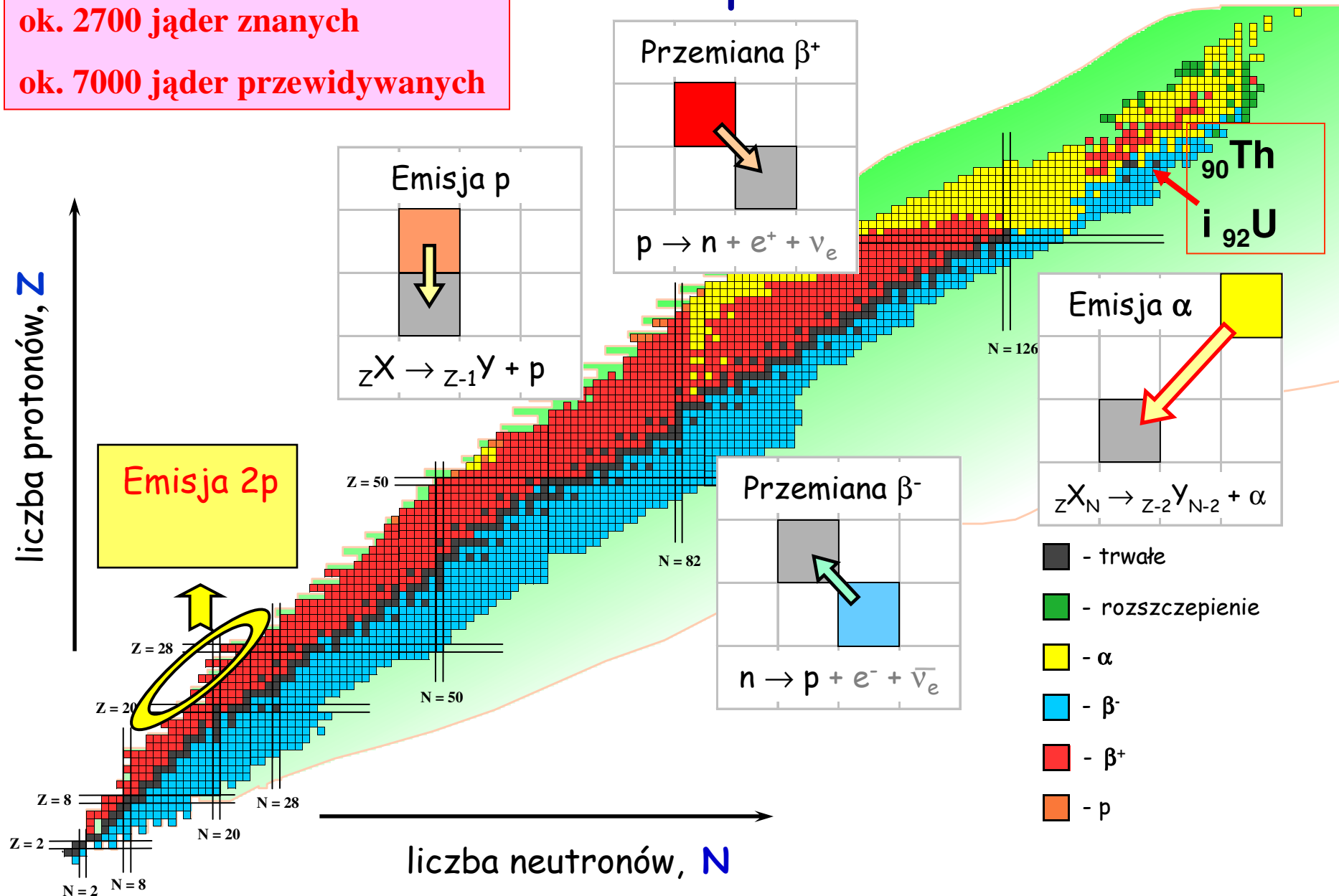
1. duża energia wiązania
2. kształt sferyczny (wokół $Z=108$, $N=162$ – ^{270}Hs) i zdeformowany ($Z=114$, $N=184$ – $^{298}114$)
3. największa stabilność dla jąder o N i Z magicznych

264 jądra stabilne

ok. 2700 jąder znanych

ok. 7000 jąder przewidywanych

Mapa nuklidów

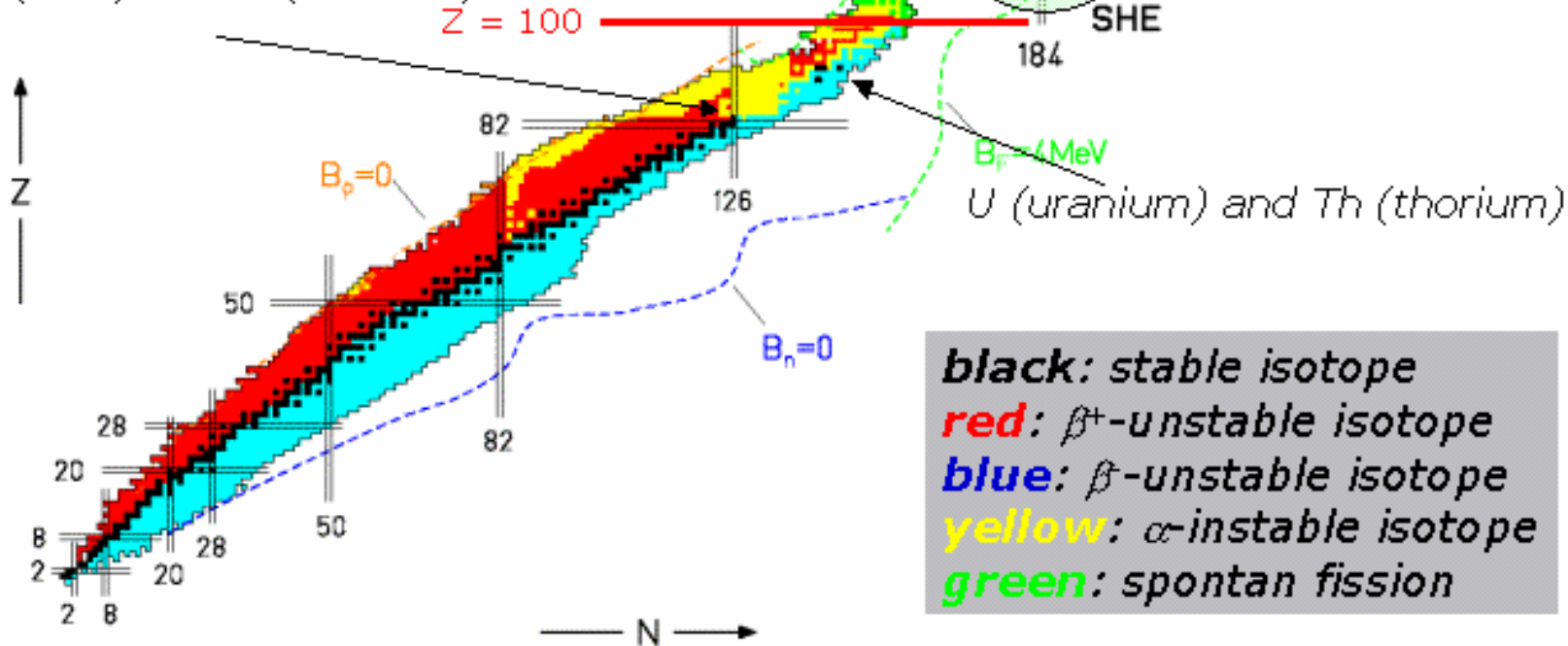


Mapa nuklidów

chart of nuclides:

- representation of the isotopes in the Z - N -plane
- isotope: atom (nucleus) of an element with different number of neutrons

Pb (lead) and Bi (bismuth)



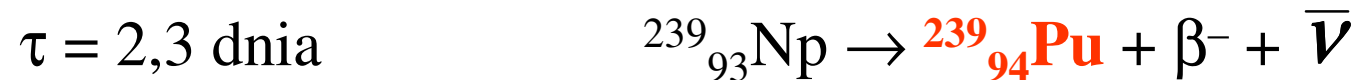
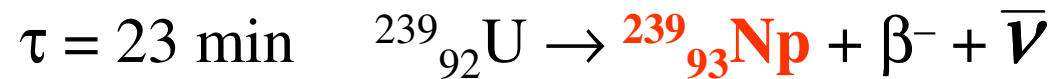
black: stable isotope
red: β^+ -unstable isotope
blue: β^- -unstable isotope
yellow: α -unstable isotope
green: spontan fission

Metody syntezy jąder superciężkich

Pierwiastki transuranowe ($Z > 92$)

1. Naświetlanie neutronami - próby od 1934 r

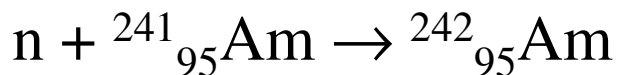
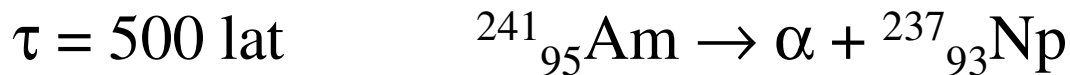
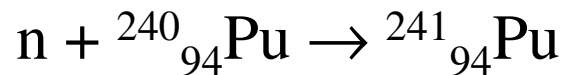
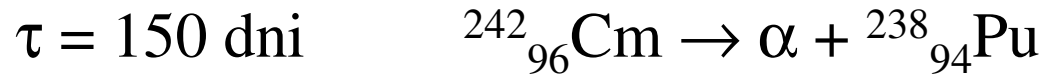
Nieoczekiwane odkrycie rozszczepienia jąder (1938)



Identyfikacja - badania radiochemiczne

Metody syntezy jąder superciężkich

2. Pierwiastki od $Z = 95$ do $Z = 101$ wytworzono w reakcjach wywołanych neutronami lub cząstkami α .



Metody syntezy jąder superciężkich

2a. Pierwiastki od $Z = 95$ do $Z = 101$ - Ciekawostki

Pierwiastki o $Z = 99$ i 100 zostały znalezione przypadkowo w pierwszej termojądrowej eksplozji na Pacyfiku w 1952 r

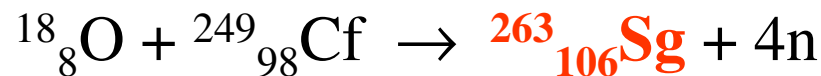
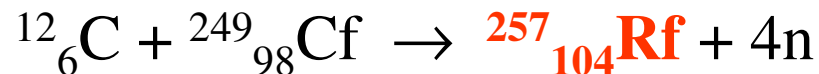
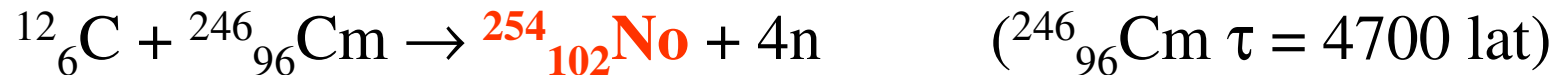
$\tau = 20$ dni ${}^{253}_{99}\text{Es}$ i $\tau = 22$ godz ${}^{255}_{100}\text{Fm}$

Pierwiastek o $Z = 101$ został jako pierwszy zidentyfikowany jako 1 atom w 1955 r.

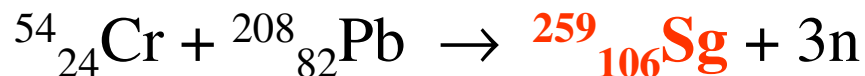
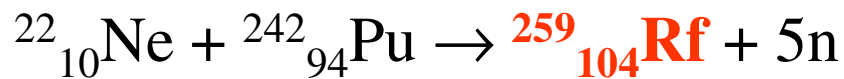
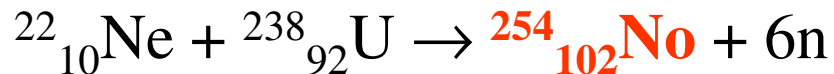
3. Reakcje syntezy jąder superciężkich z użyciem ciężkich jonów - Berkeley, Dubna, Darmstadt

a) gorąca synteza, $Z = 102 - 106$, konkurencja rozszczepienia

Berkeley - akcelerator HILAC od 1957 r



Dubna - akcelerator cyklotron U-300 od 1962 r

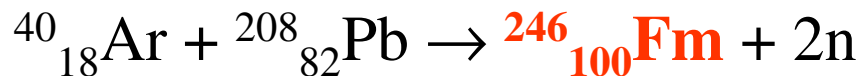


Trudności z ustaleniem odkrycia - powołanie Transfermium Working Group w 1985 r.

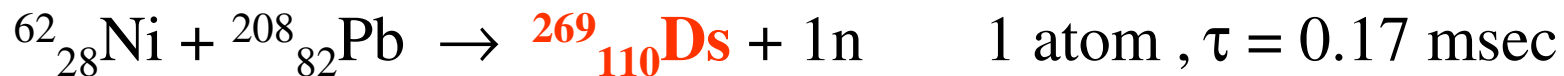
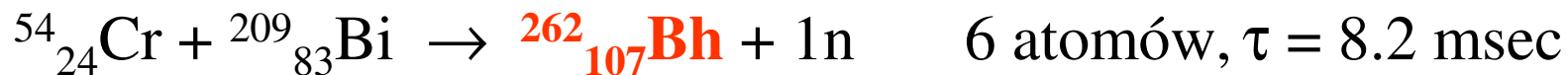
3. Reakcje syntezy jąder superciężkich z użyciem ciężkich jonów - Berkeley, Dubna, Darmstadt

b) zimna synteza, tarcza o zamkniętych powłokach

Dubna - akcelerator cyklotron U-300 od 1962 r



Darmstadt - akcelerator UNILAC, separator SHIP od 1981 r



Pierwiastki o $Z = 107 - 112$ - główna droga rozpadu to rozpad α , czasy życia $\tau = 1 \mu\text{sec} - 1 \text{ sec}$; identyfikacja metodami fizycznymi

Odkryte jądra superciężkie

Z= 93	94	95	96	97
Np	Pu	Am	Cm	Bk
Neptun	Pluton	Ameryk	Kiur	Berkel
1940	1940	1944	1944	1949

Z= 98	99	100	101	102
Cf	Es	Fm	Md	No
Kaliforn	Einstein	Ferm	Mendelew	Nobel
1950	1952	1952	1955	1957/58

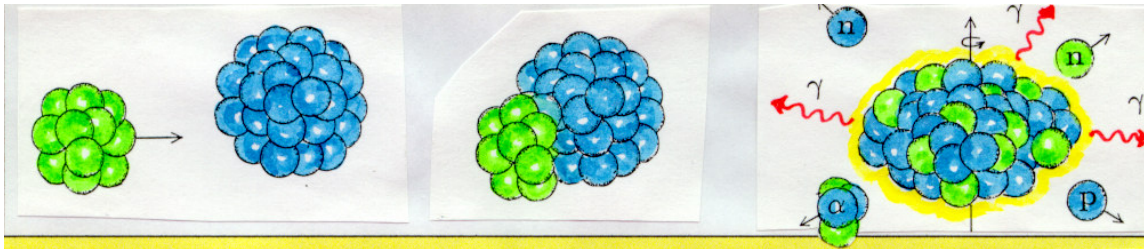
Z= 103	104	105	106	107
Lr	Rf	Db	Sg	Bh
Lorens	Rutherford	Dubn	Seaborg	Bohr
1961	1964	1967	1974	1975/81

Odkryte jądra superciężkie

Z= 108	109	110	111	112
Hs	Mt	Ds	Rg	
Has	Meitner	Darmstadt	Roentgen	
1984	1982	1994	1994	1996

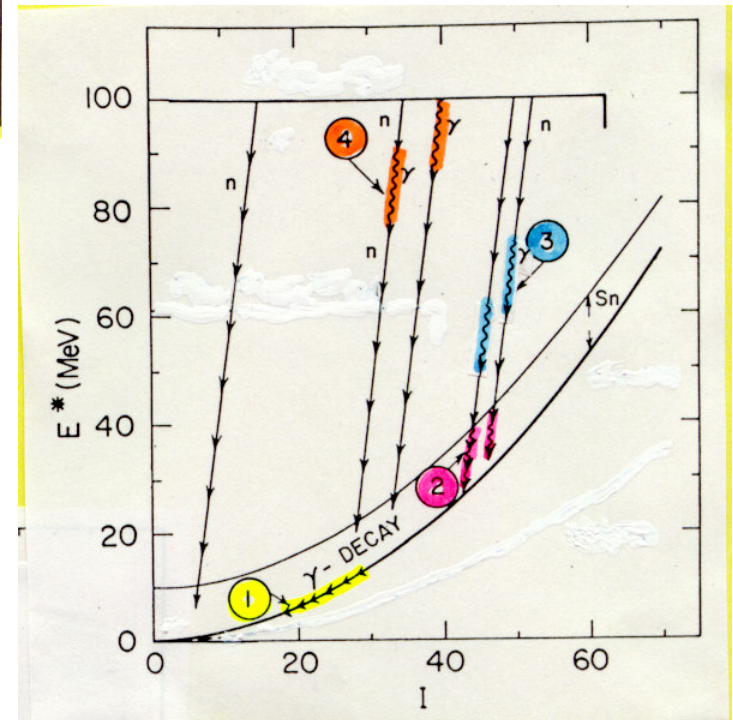
Z= 113	114	115	116	118
2003	1998	2003	2000	2006

Główne parametry procesu syntezy jąder superciężkich z użyciem ciężkich jonów



1. Prawdopodobieństwo utworzenia jądra złożonego

- wysokość bariery na fuzję,
- energia pocisku,
- energia wzbudzenia jądra złożonego



Główne parametry procesu syntezy jąder superciężkich z użyciem ciężkich jonów

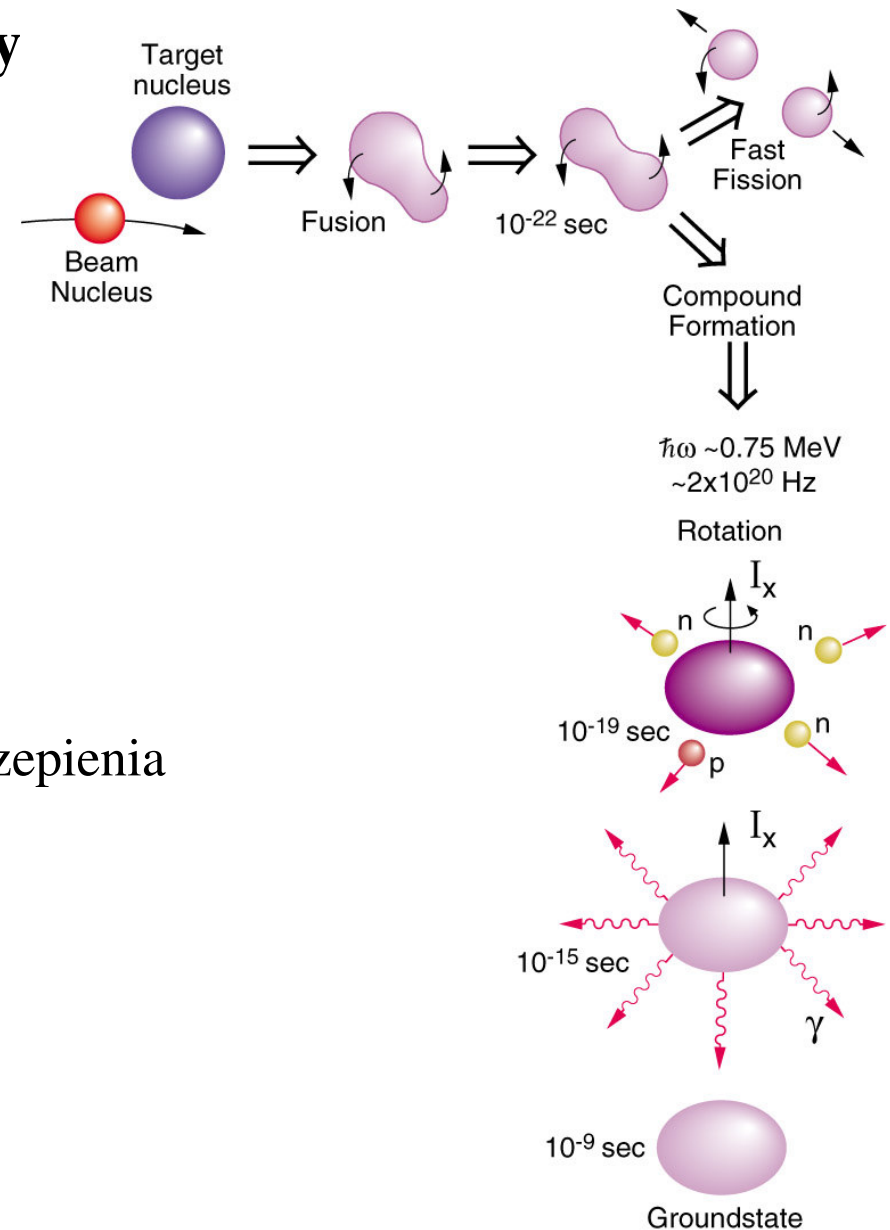
2. Prawdopodobieństwo rozszczepienia

a) stosunek $B_{\text{pow}} / B_{\text{kul}}$

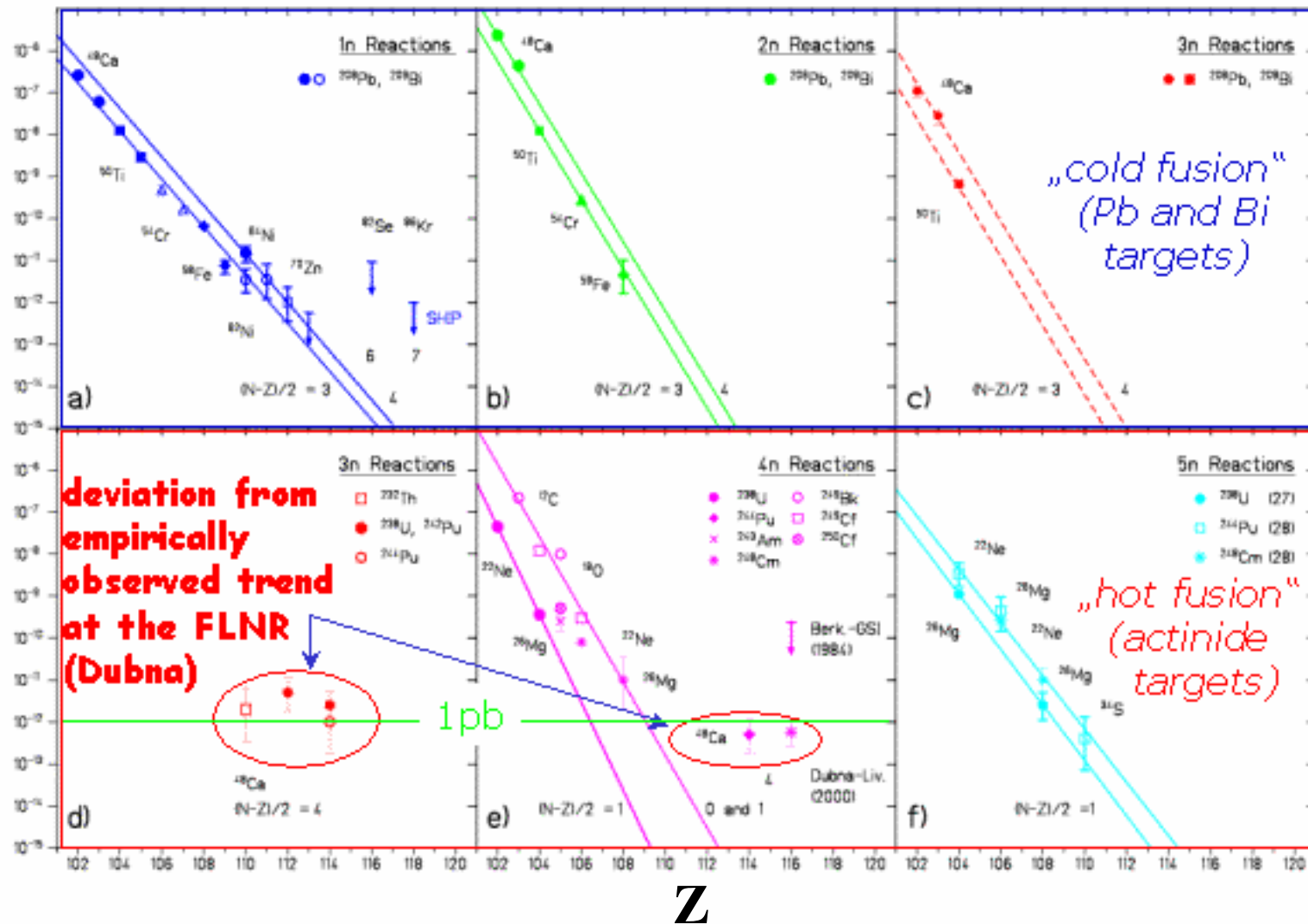
3. Centralność zderzenia, moment pędu

4. Konkurencja emisji n i γ wobec rozszczepienia

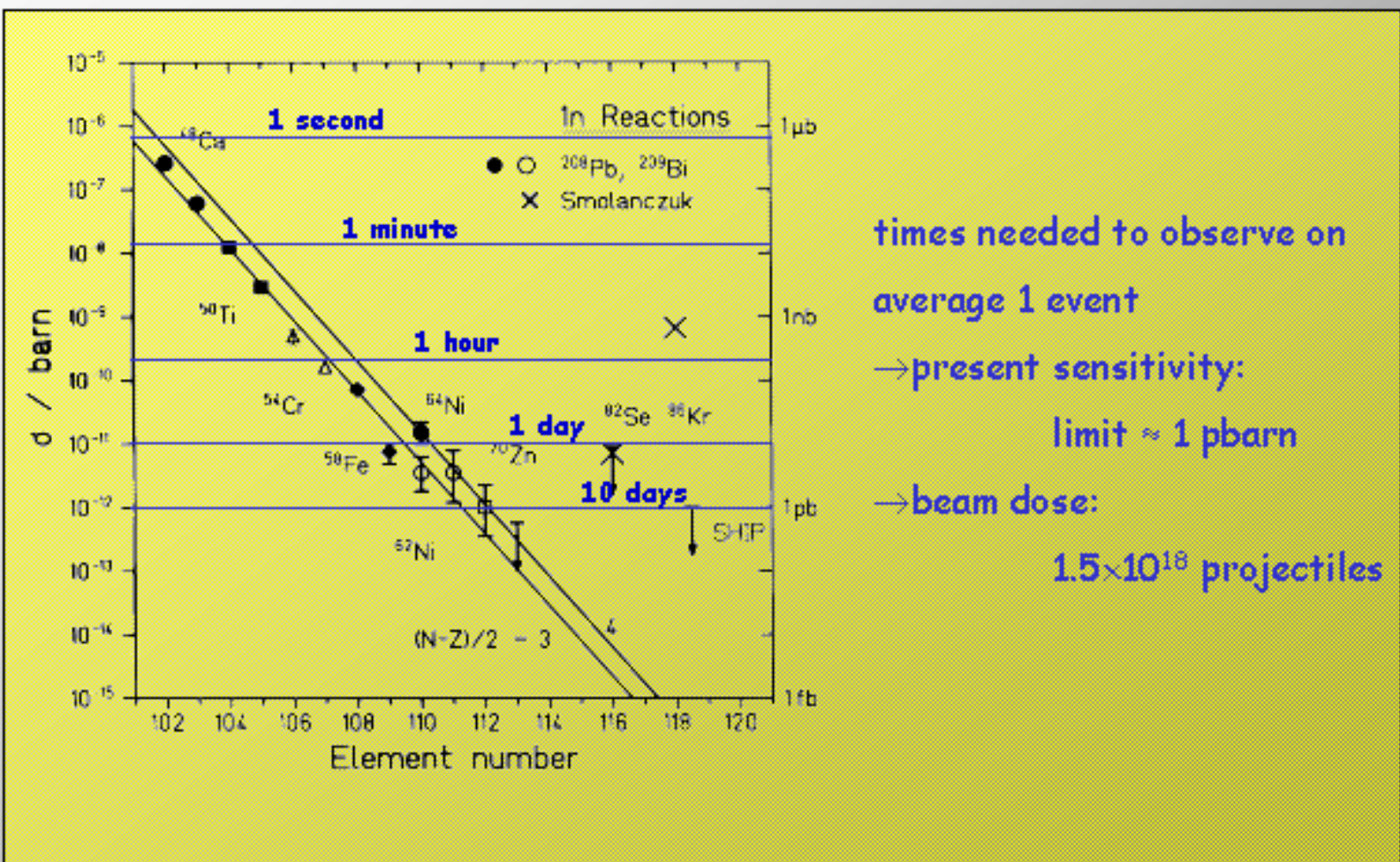
5. Czasy życia jąder superciężkich



Przekrój czynny na reakcję syntezy jąder superciężkich (reakcje xn ER)



Przekrój czynny na reakcję syntezy jąder superciężkich (reakcje 1n ER)

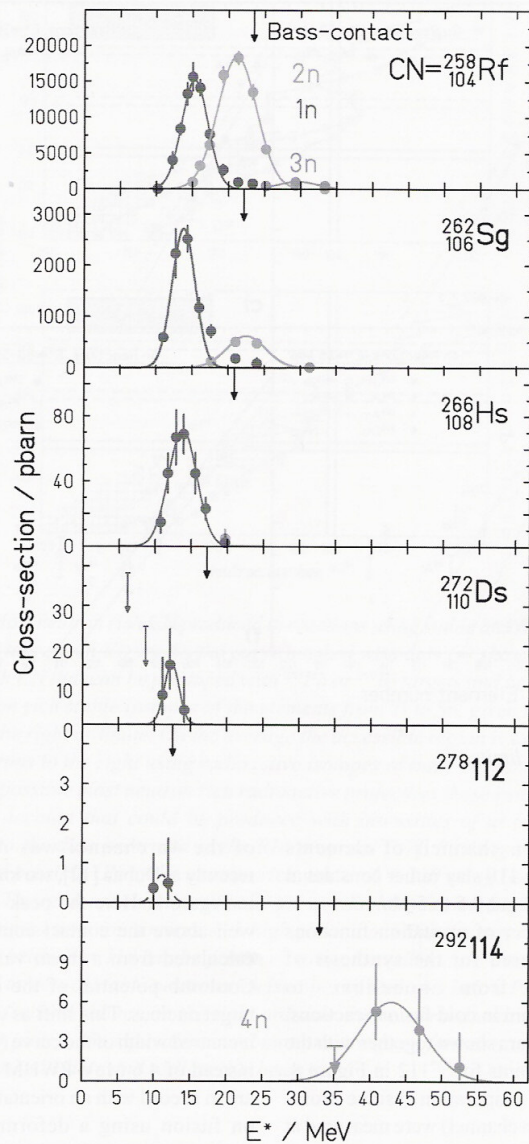


times needed to observe on average 1 event

→ present sensitivity:
limit \approx 1 pbarn

→ beam dose:
 1.5×10^{18} projectiles

Funkcje wzbudzenia na produkcję jąder superciężkich



Eksperyment przygotowawczy

1. Ekstrapolacja przekrojów czynnych dla wcześniej odkrytych jąder
2. Optymalizacja warunków eksperymentu - wybór energii pocisku poprzez pomiar funkcji wzbudzenia dla znanych jąder o zbliżonym Z

Współczesne eksperymenty syntezy jąder superciężkich

1. Trudności eksperymentalne

- a) mały przekrój czynny na reakcję syntezy (rzędu 1 pb)
- b) krótki czas życia jąder
- c) konieczność identyfikacji nowych pierwiastków

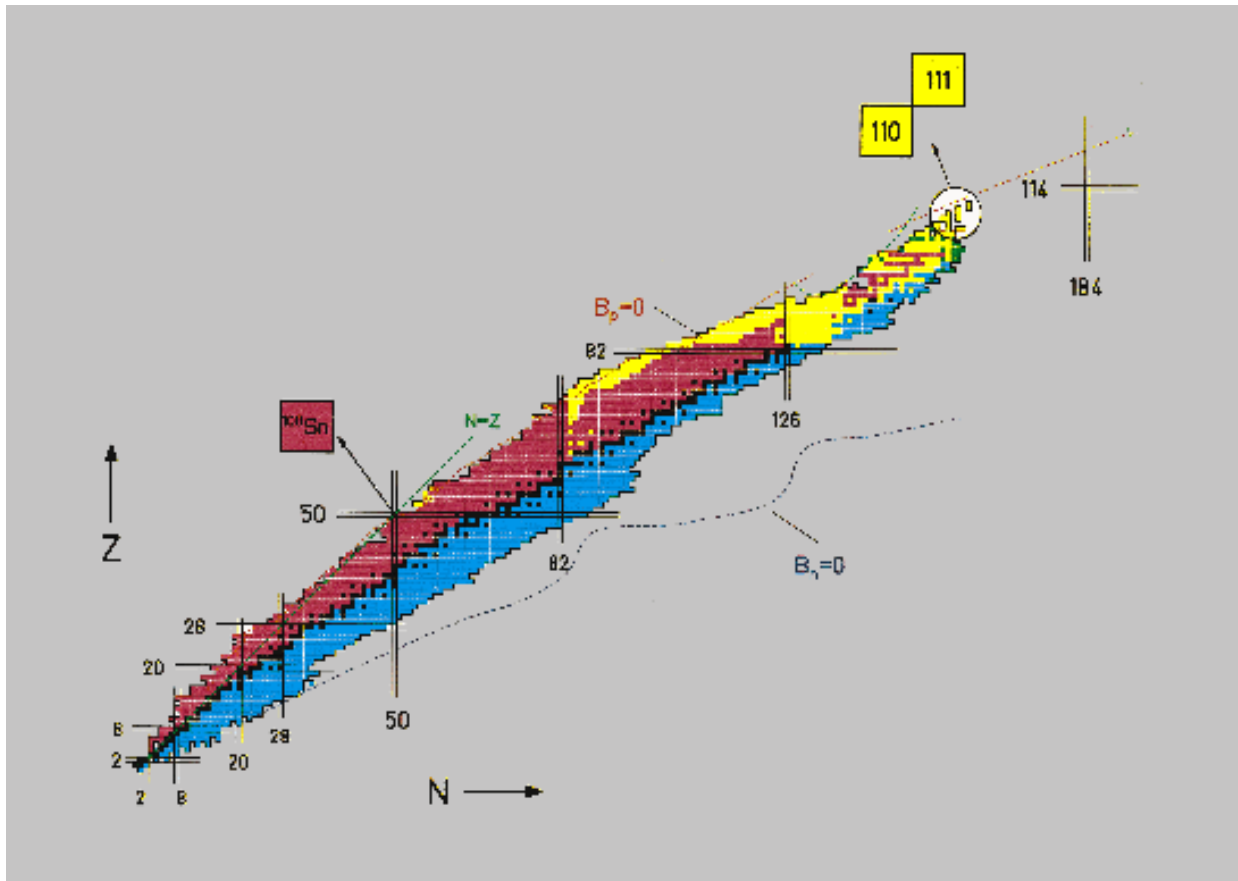
2. Zimna synteza jądrowa

- a) badanie funkcji wzbudzenia

3. Zastosowanie separatora fragmentów

4. Układ detekcyjny

Synteza nowych pierwiastków o $Z=110$ i 111 (GSI, Darmstadt, listopad-grudzień 1994 r)

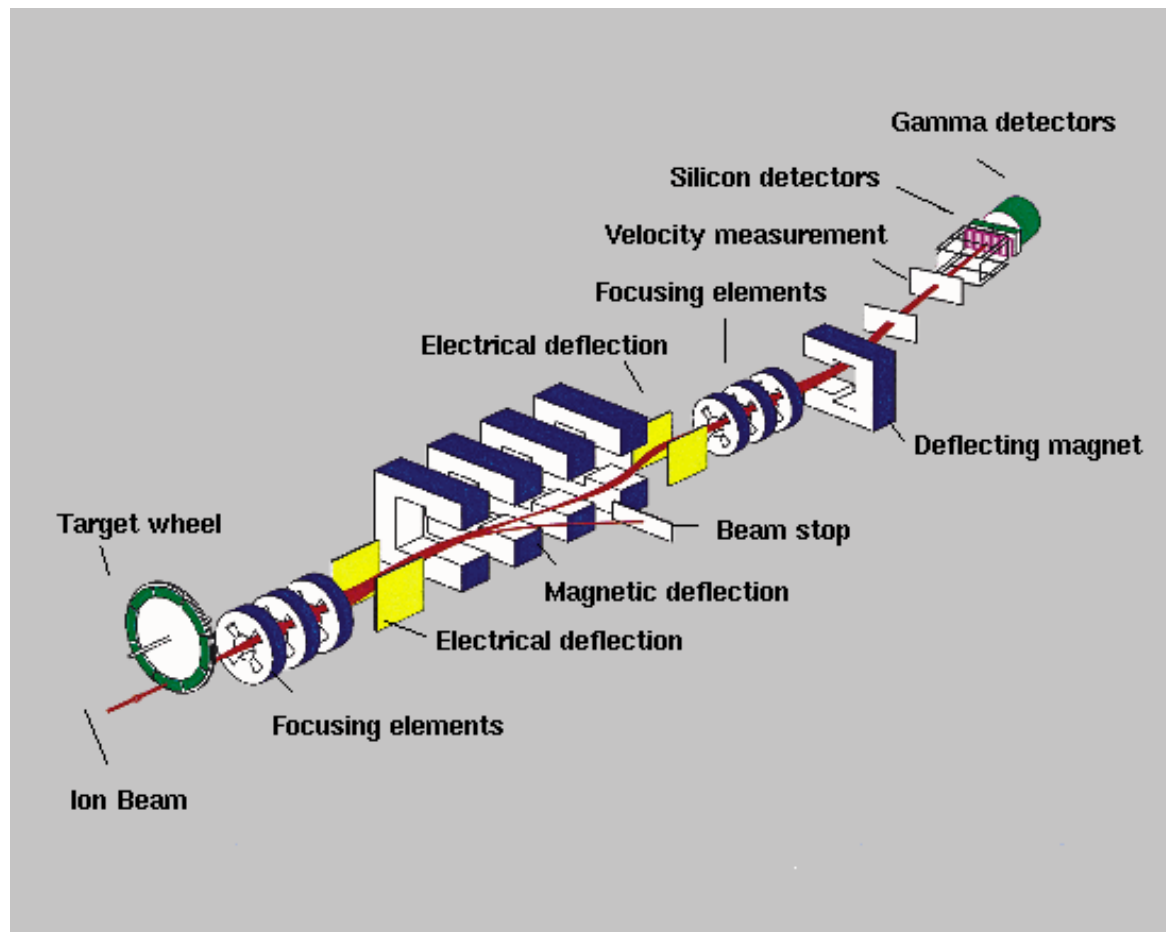


W ZIBJ w Dubnej :



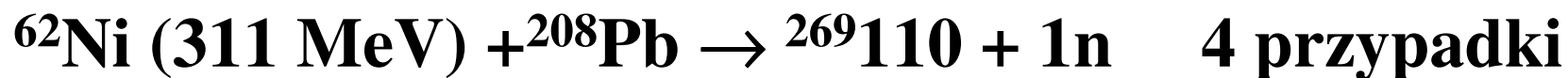
Synteza nowych pierwiastków o $Z=110$ i 111

(GSI, Darmstadt, listopad-grudzień 1994 r)



Układ eksperymentalny:
od koła tarczowego,
poprzez filtr prędkości
SHIP, do układu detekcyjnego

SHIP = Separator for
Heavy Ion Products



$3 \cdot 10^{12}$ jonów/s

tarcza ok. 1200 warstw atomowych = $0.4 \mu\text{m}$ - chłodzenie

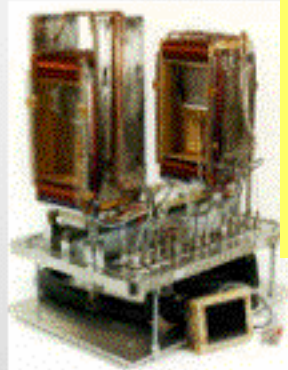
The Velocity Filter SHIP

velocity filter:

magnetic field
electric field

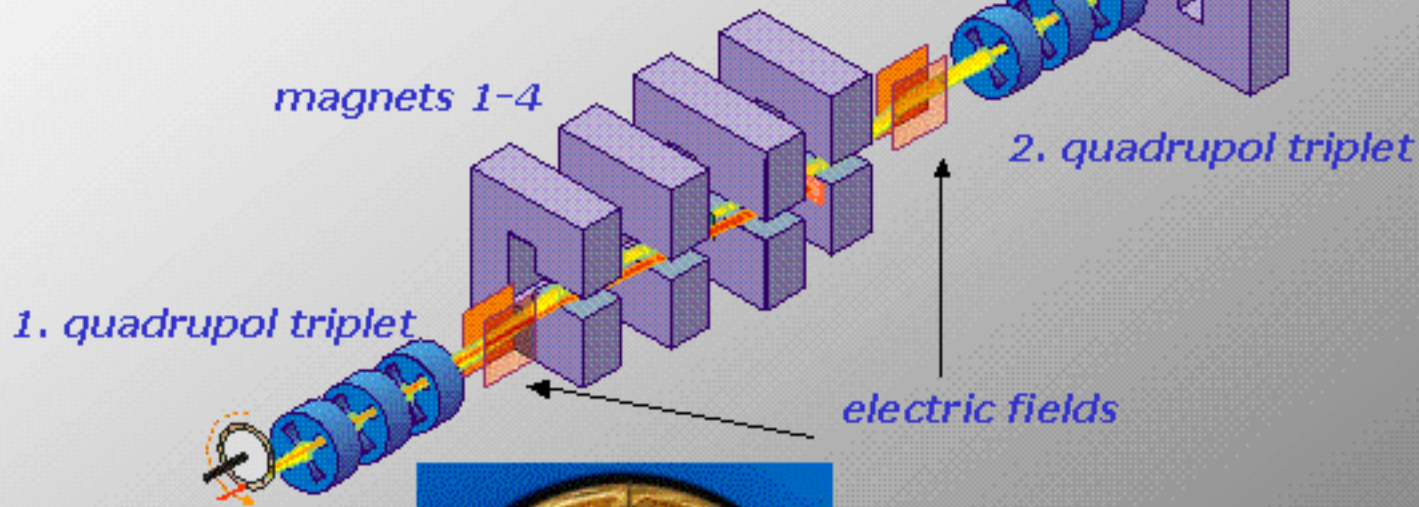
$$F_{mag} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$F_{el} = q \cdot \mathbf{E}$$

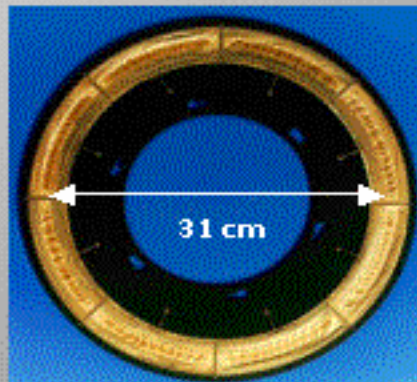


Detektor γ
Detektor krzemowy
Detektor czasu przelotu

*γ -detector
stop detector
and
backward
array*



target

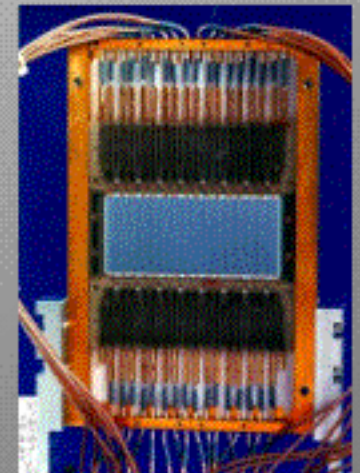


material:

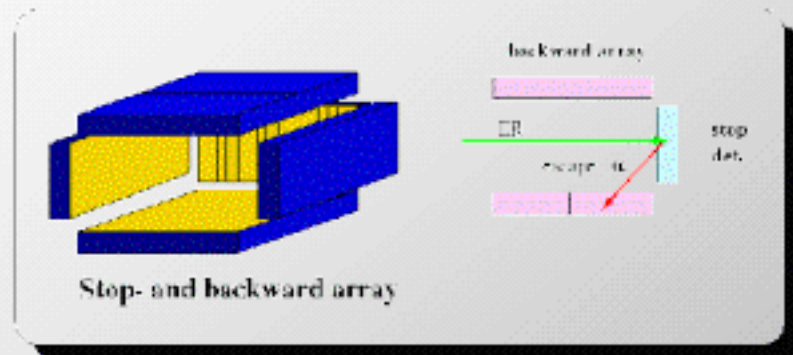
Pb, Bi, U, rare earth

development:

chemical compounds
cooling
e-beam diagnosis



Stop- und Backward-Detector Array



Parameters:

ER:

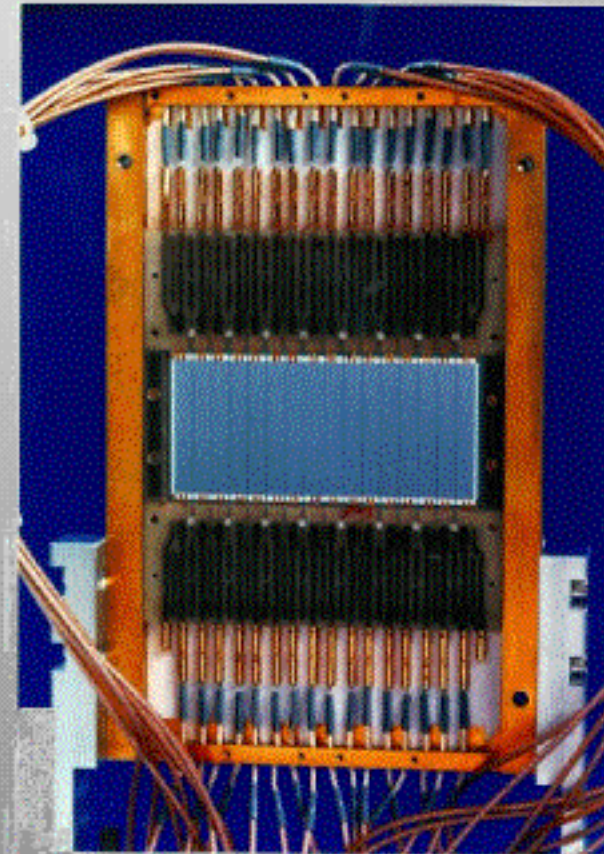
position, time, energy
– in the stop detektor

α 's:

position, time, energy
– in the stop detektor

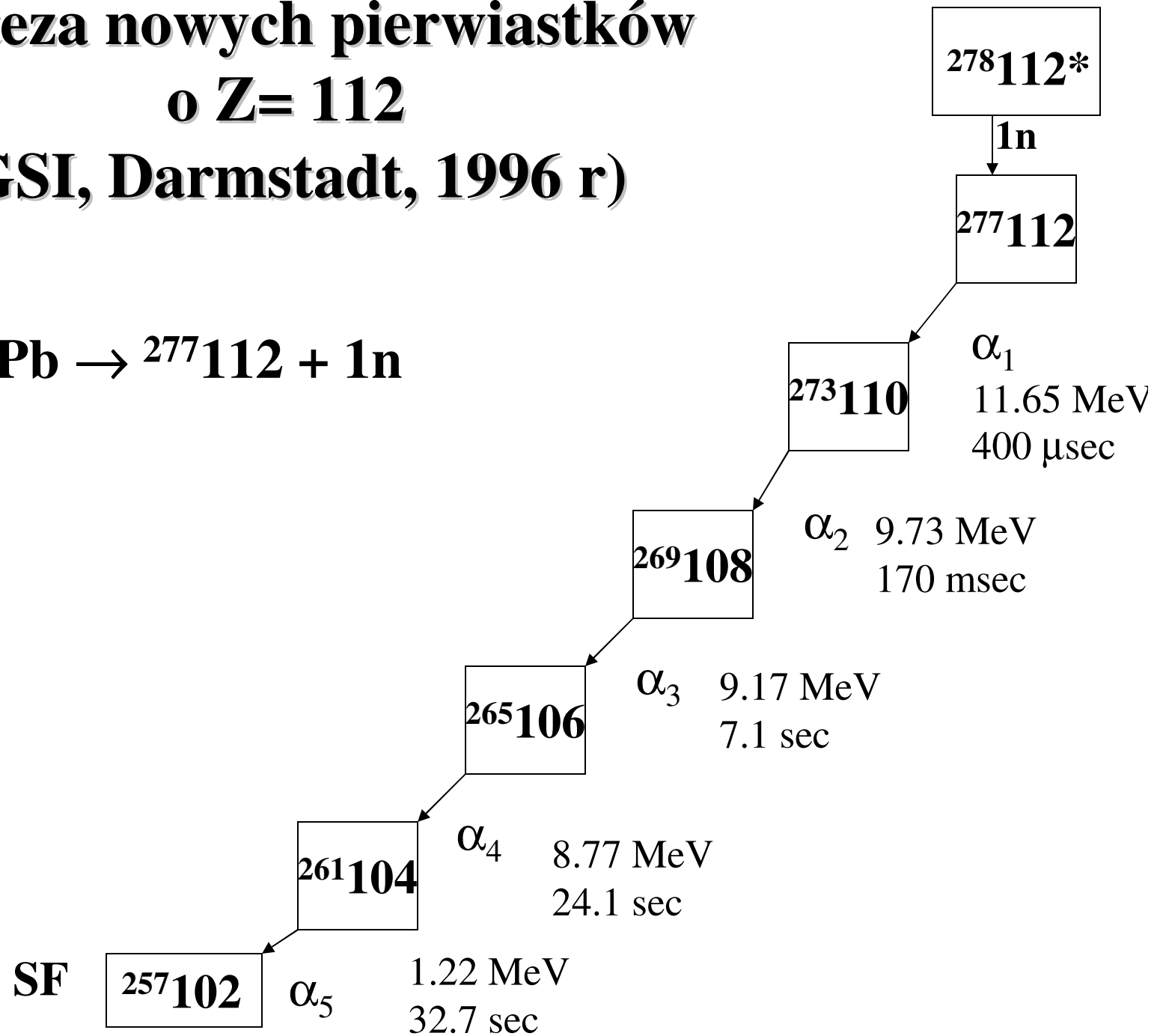
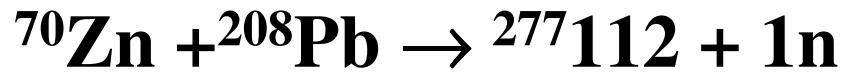
or (in case of an escape α):

position, time, partial energy
– in the stop detektor
and position, time, residual energy
– in the backward array



16 pasków, 28 cm²

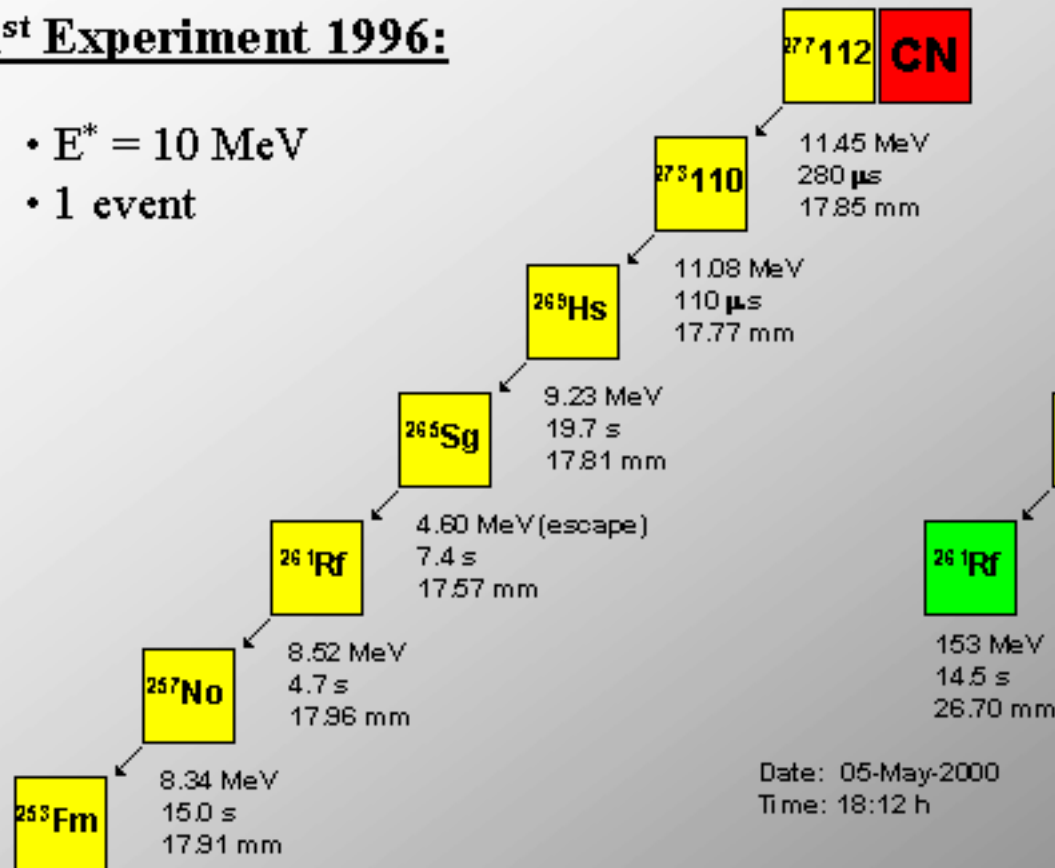
Synteza nowych pierwiastków o $Z=112$ (GSI, Darmstadt, 1996 r)



Confirmation of Element 112

1st Experiment 1996:

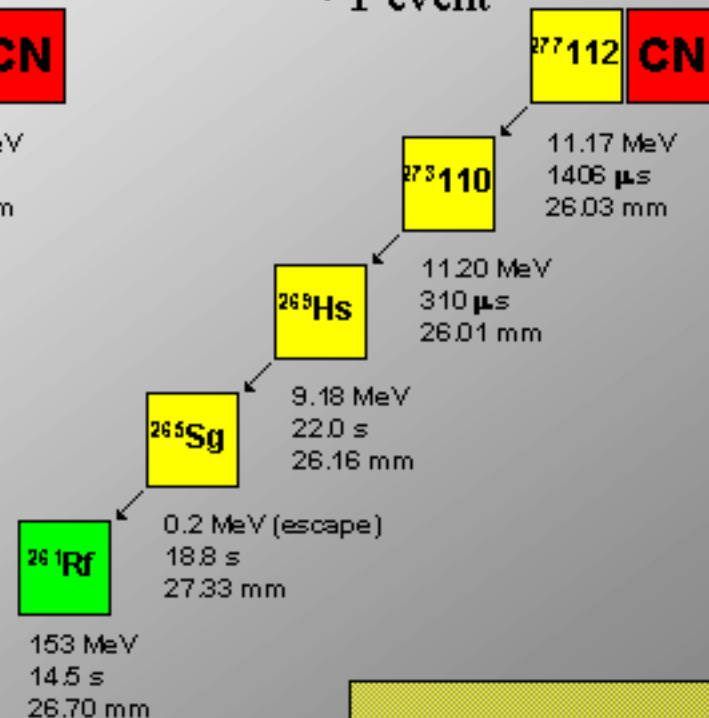
- $E^* = 10$ MeV
- 1 event



Date: 09-Feb-1996
Time: 22:37 h

2nd Exp. in May 2000:

- $E^* = 10$ MeV and 12 MeV
- 1 event



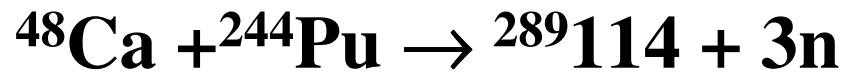
Date: 05-May-2000
Time: 18:12 h

New cross section values:

$$\sigma(E^*=10 \text{ MeV}) = 0.4_{-0.3}^{+0.9} \text{ pb}$$

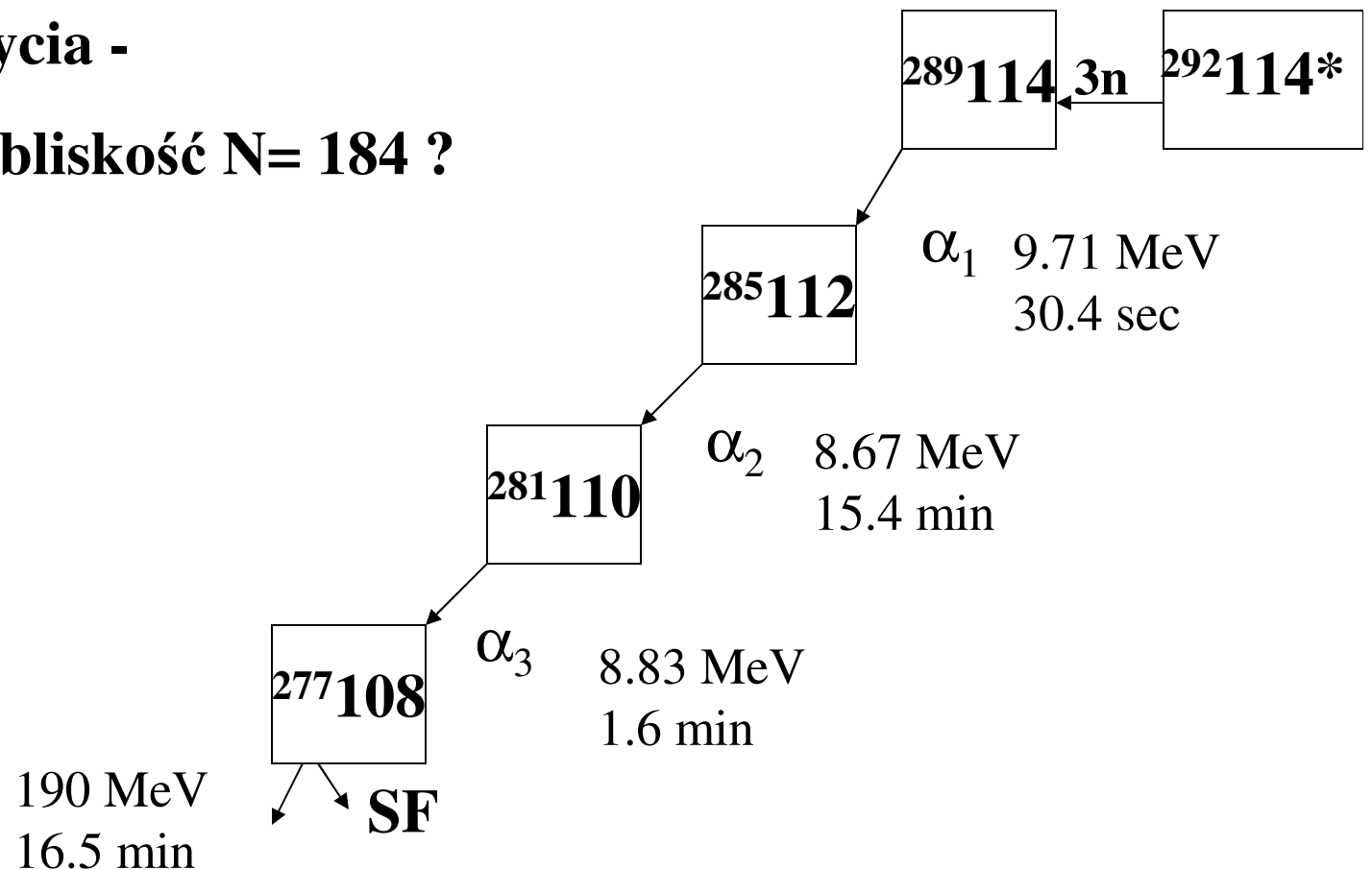
$$\sigma(E^*=12 \text{ MeV}) = 0.5_{-0.4}^{+1.1} \text{ pb}$$

Synteza nowych pierwiastków o $Z = 114$ (Dubna, 1999 r.)



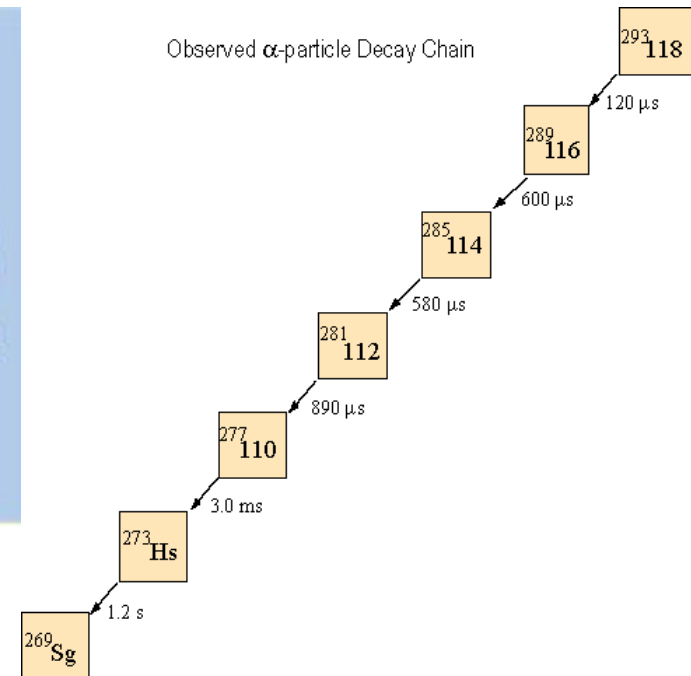
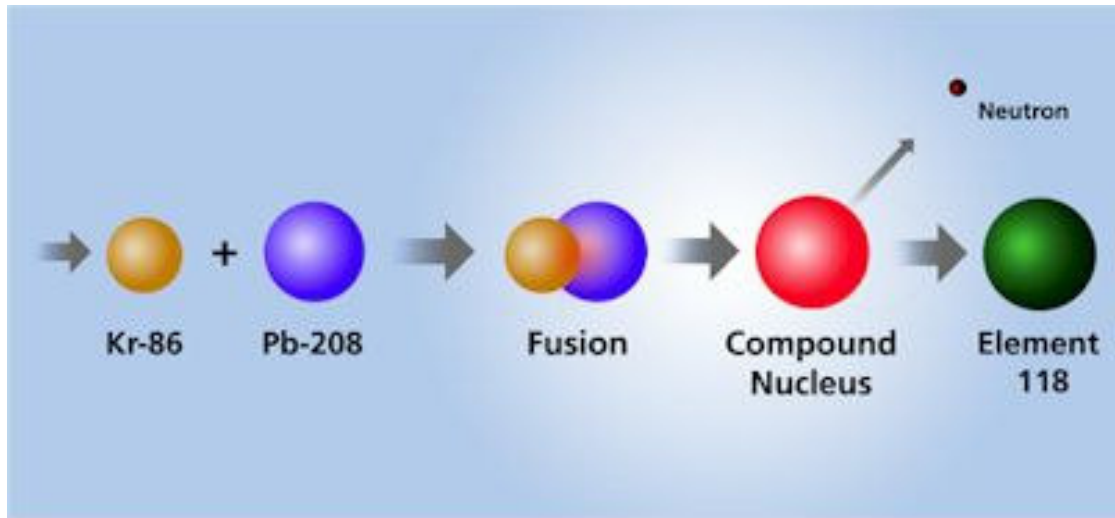
długie czasy życia -

bliskość $N = 184$?



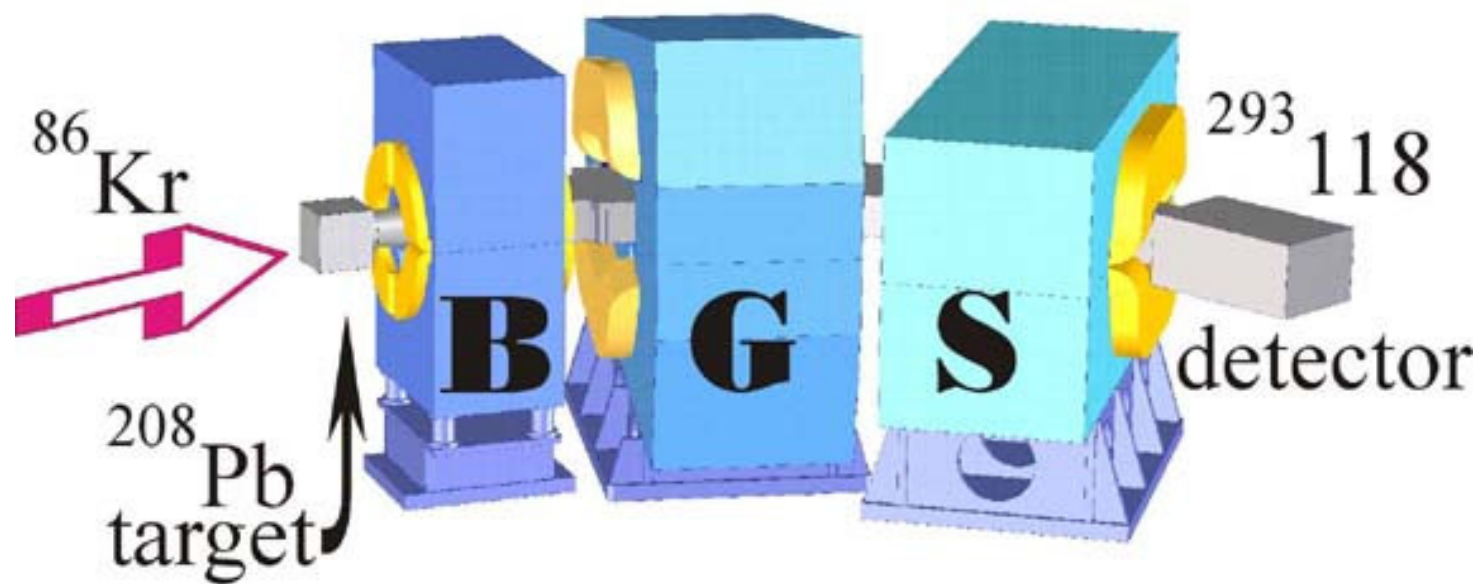
Synteza nowych pierwiastków o $Z = 116$ i 118

(Berkeley, USA, 5 maja 1999 r) - **odwołane!**



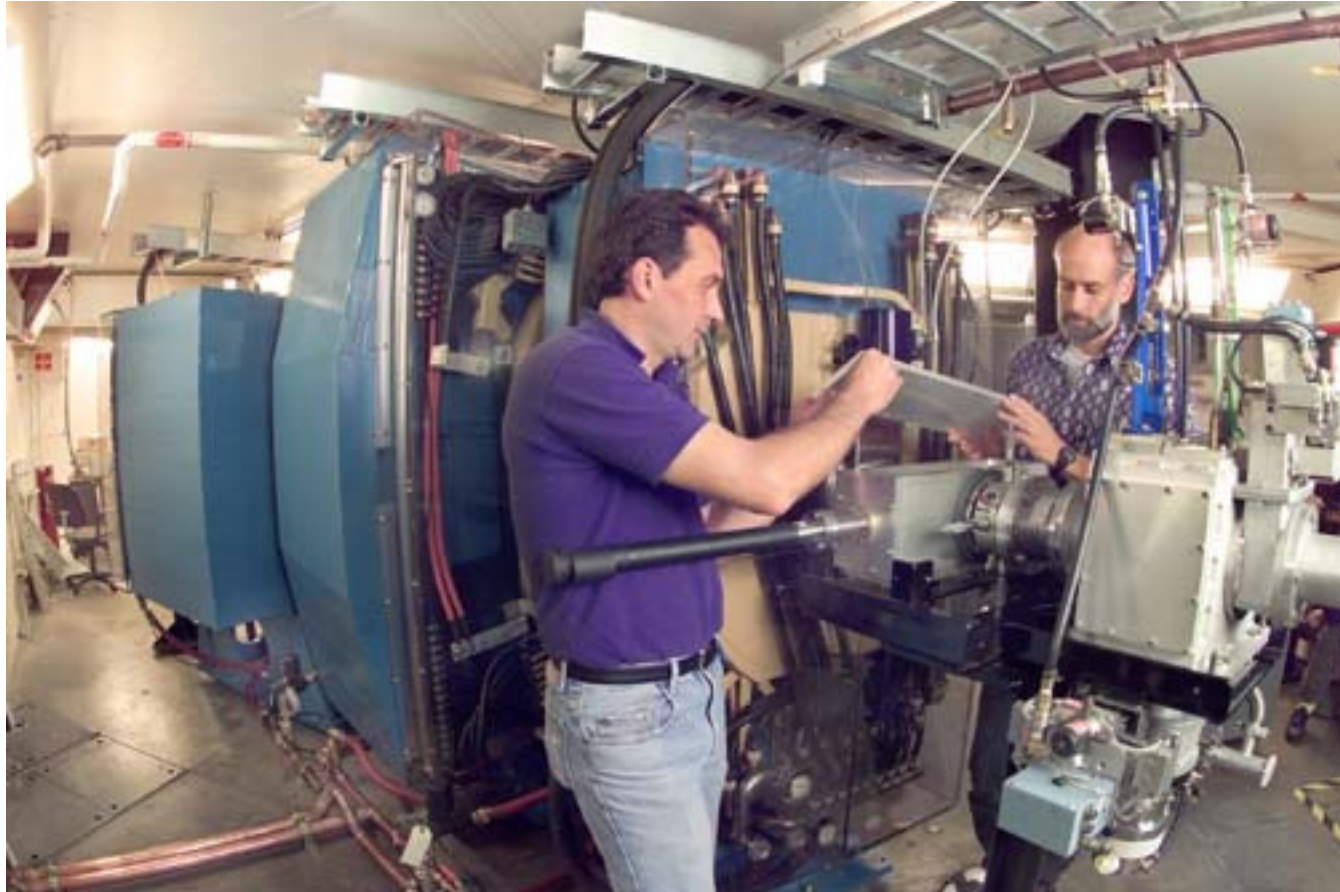
Trudności:

jądro $^{293}_{118}$ produkowane jest raz na 10^{12} zderzeń,
przewidywany czas życia ok. $200\mu\text{s}$

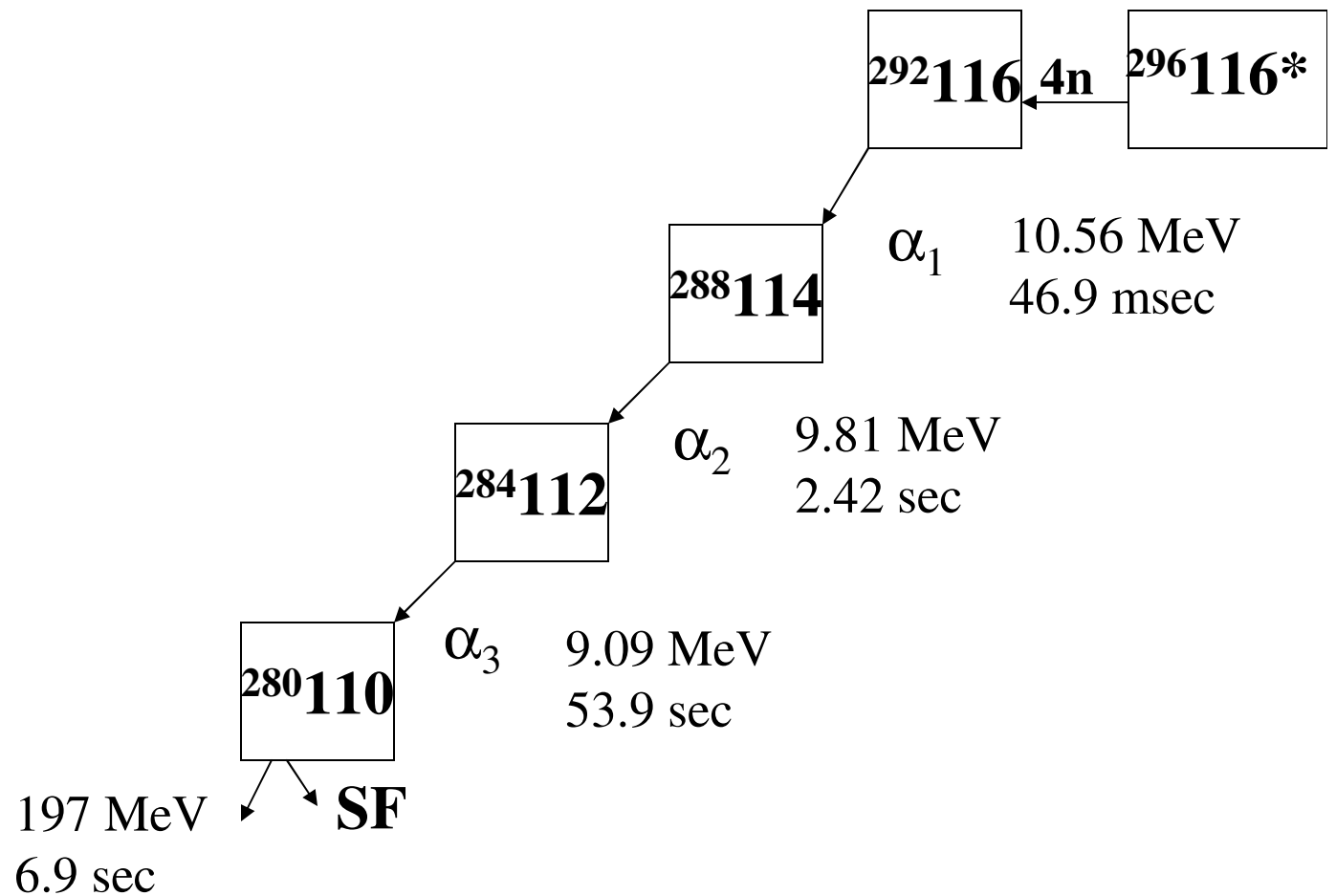


Układ eksperymentalny: tarcza, separator fragmentów, detektor

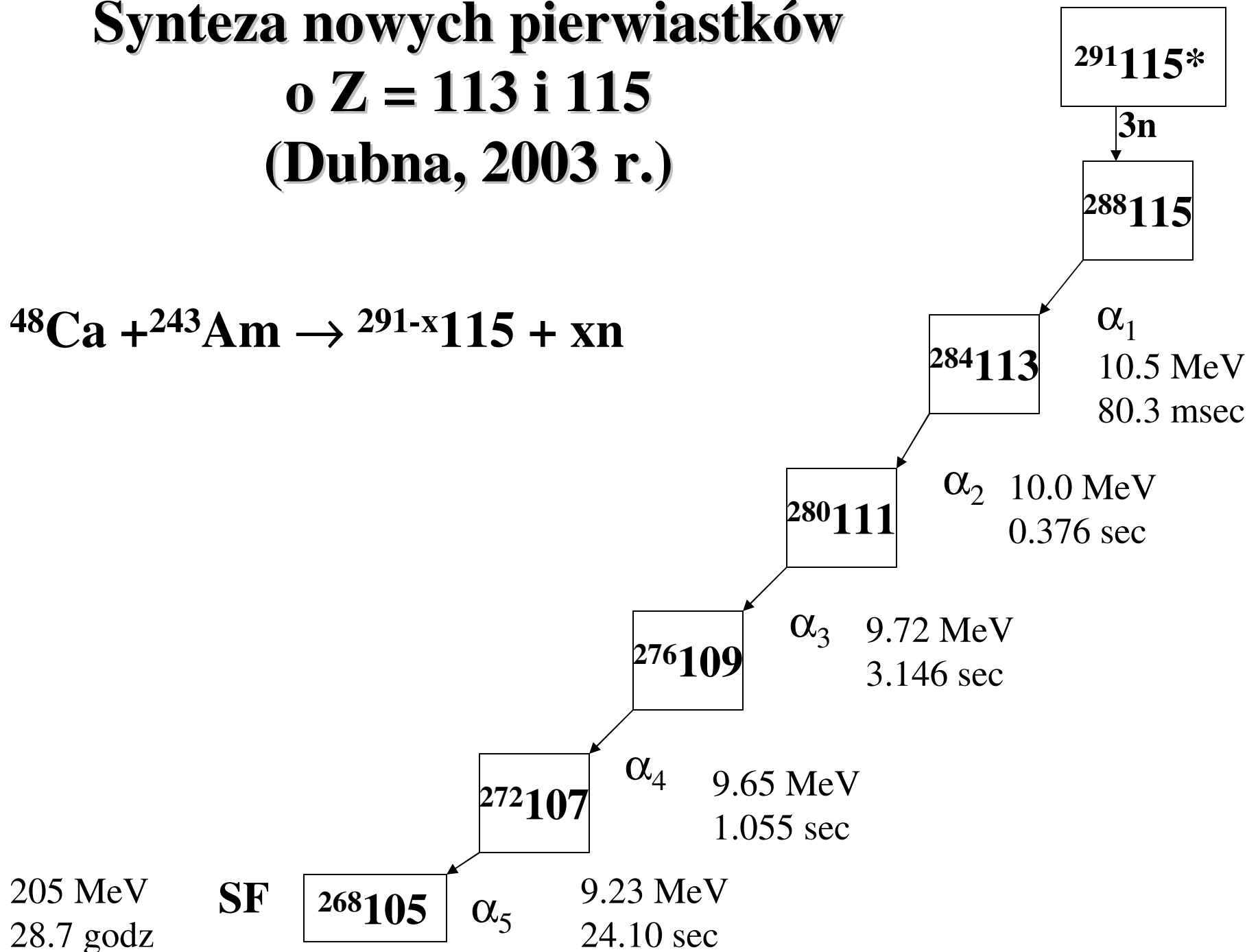
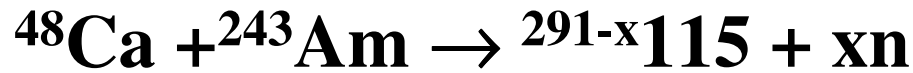
Separator fragmentów BGS



Synteza nowych pierwiastków o $Z = 116$ (Dubna, 2000 r.)



Synteza nowych pierwiastków o $Z = 113$ i 115 (Dubna, 2003 r.)



Podsumowanie metod syntezy jąder superciężkich z użyciem ciężkich jonów

a) gorąca synteza

pociski: $^{48}_{20}\text{Ca}$

tarcze: $^{232}_{90}\text{Th}$, $^{238}_{92}\text{U}$, $^{242,244}_{94}\text{Pu}$, $^{243}_{95}\text{Am}$, $^{245,248}_{96}\text{Cm}$ i $^{249}_{98}\text{Cf}$

jądro złożone o energii wzbudzenia 35 - 50 MeV, emisja 3-5n

b) zimna synteza

pociski: od $^{20}_{20}\text{Ca}$ do $^{38}_{38}\text{Sr}$

tarcza: $^{208}_{82}\text{Pb}$ lub $^{209}_{83}\text{Bi}$

jądro złożone o energii wzbudzenia 10 - 20 MeV, emisja 1n

c) gorąca synteza

pociski: $^{22}_{10}\text{Ne}$ lub $^{26}_{12}\text{Mg}$

tarcze: $^{248}_{96}\text{Cm}$ lub $^{249}_{97}\text{Bk}$

jądro złożone: Sg, Bh, Hs - silnie neutrono-nadmiarowe, emisja 4-5n

Metody identyfikacji pierwiastków superciężkich

Z	Nazwa	Najdłużej żyjący izotop	T_{1/2} najdłużej żyjącego izotopu
93	Neptun	^{237}Np	2,14 M lat
94	Pluton	^{242}Pu	0,376 M lat
95	Ameryk	^{243}Am	7370 lat
96	Kiur	^{247}Cm	16 M lat
97	Berkel	^{247}Bk	1380 lat
98	Kaliforn	^{251}Cf	898 lat
99	Einstein	^{252}Es	472 dni

Z	Nazwa	Najdłużej żyjący izotop	T_{1/2} najdłużej żyjącego izotopu
100	Ferm	²⁵⁷ Fm	101 dni
101	Mendelew	²⁵⁸ Md	52 dni
102	Nobel	²⁵⁹ No	58 min
103	Lorens	²⁶² Lr	215 min
104	Rutherford	²⁶¹ Rf	65 min
105	Dubn	²⁶² Db	34 sek
106	Seaborg	²⁶⁶ Sg	21 sek
107	Bohr	²⁶⁷ Bh	17 sek
108	Has	²⁷⁰ Hs	ok. 30 sek (grudzień 2006)
109	Meitner	²⁶⁸ Mt	70 msek

Z	Nazwa	L.izotopów	L. obs. izotopów	T_{1/2} [ms]
110	Darmstadt	15	10	210
111	Roentgen	12	4	3600
112		9	1	1.1
113		6	2	480
114		5	4	2600
115		5	2	87
116		5	4	61
117		2	0	N/A
118		1	1	0.89

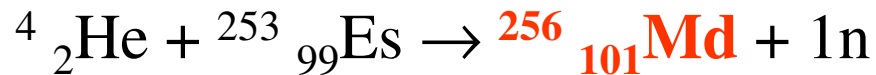
Metody identyfikacji pierwiastków superciężkich do $Z = 104$ (produkcja pojedynczych atomów)

1. Badanie radiochemiczne: rejestracja emisji α , β , produktów rozszczepienia
 - a) pomiar radioaktywności – możliwy dla próbki za małej do zobaczenia okiem, zważenia itp., wyznaczenie czasu życia $T_{1/2}$
 - b) obserwacja rozpadu w komorze mgłowej
 - c) porównanie energii emitowanych cząstek α ; systematyczny wzrost E_{α} ze wzrostem Z
2. Badanie chemiczne
 - a) porównanie własności nowego pierwiastka i jego związków z własnościami znanych pierwiastków z „tej samej” grupy
 - b) chromatografia jono-wymienna (rozwinięta na początku XX w)

Metody identyfikacji pierwiastków superciężkich

Z = 101 (produkcja pojedynczych atomów)

3. Identyfikacja pierwiastka o Z = 101 w 1955 roku



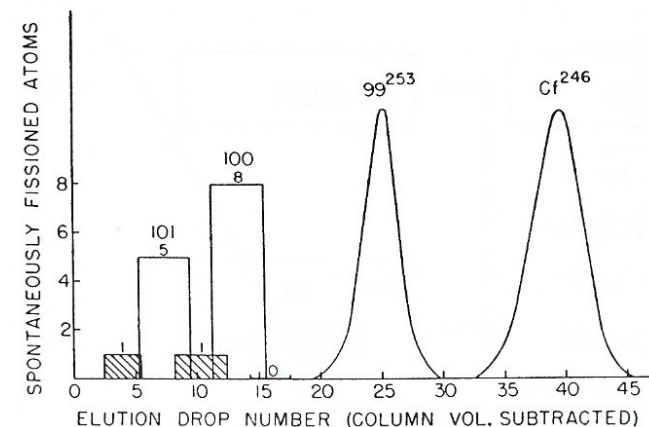
metodą chromatografii jono-wymiennej:

Tarcza: 1 pikogram ${}^{253}\text{Es}$, $T_{1/2} = 20$ dni

Produkty reakcji wychodzące z tarczy były zbierane na folii Au, która po stopieniu była poddawana chromatografii

Obserwowano spontaniczne rozszczepienie ${}^{256}\text{Fm}$ (Z = 100), który powstawał z ${}^{256}\text{Md}$ przez EC.

Kalibracja chromatografu dla Z=99 i 98.



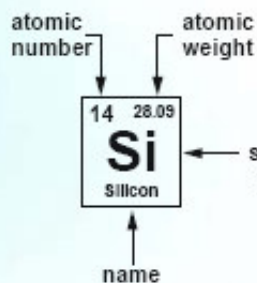
Metody identyfikacji pierwiastków superciężkich dla $Z > 104$ (produkcja pojedynczych atomów)

1. Badanie łańcucha genetycznego
2. Chromatografia cieczowa i gazowa – automatyczne szybkie układy
3. Badania chemiczne określające własności pierwiastka
 - a) utrudnione porównanie własności fizyko-chemicznych z lżejszymi pierwiastkami ze względu na wzrost wagi efektów relatywistycznych
 - b) Obliczenia energii poziomów elektronowych - poprawki relatywistyczne ($\sim Z^2$) - przewidywania ważne dla planowania procesu separacji atomów

Wnioski: E112 - własności nie podobne do Hg

Układ okresowy pierwiastków

1 1.01 H Hydrogen																	2 4.003 He Helium						
3 6.94 Li Lithium	4 9.01 Be Beryllium																	5 10.81 B Boron	6 12.01 C Carbon	7 14.01 N Nitrogen	8 15.999 O Oxygen	9 18.998 F Fluorine	10 20.18 Ne Neon
11 22.99 Na Sodium	12 24.31 Mg Magnesium																	13 26.98 Al Aluminum	14 28.09 Si Silicon	15 30.97 P Phosphorus	16 32.06 S Sulfur	17 35.45 Cl Chlorine	18 39.95 Ar Argon
19 39.10 K Potassium	20 40.08 Ca Calcium	21 44.96 Sc Scandium	22 47.90 Ti Titanium	23 50.94 V Vanadium	24 51.996 Cr Chromium	25 54.94 Mn Manganese	26 55.85 Fe Iron	27 58.93 Co Cobalt	28 58.70 Ni Nickel	29 63.55 Cu Copper	30 65.37 Zn Zinc	31 69.72 Ga Gallium	32 72.59 Ge Germanium	33 74.92 As Arsenic	34 78.96 Se Selenium	35 79.90 Br Bromine	36 83.80 Kr Krypton						
37 85.47 Rb Rubidium	38 87.62 Sr Strontium	39 88.91 Y Yttrium	40 91.22 Zr Zirconium	41 92.91 Nb Niobium	42 95.94 Mo Molybdenum	43 (98) Tc Technetium	44 101.07 Ru Ruthenium	45 102.91 Rh Rhodium	46 106.40 Pd Palladium	47 107.87 Ag Silver	48 112.41 Cd Cadmium	49 114.82 In Indium	50 118.69 Sn Tin	51 121.75 Sb Antimony	52 127.60 Te Tellurium	53 126.90 I Iodine	54 131.30 Xe Xenon						
55 132.91 Cs Caesium	56 137.33 Ba Barium	57 138.91 La Lanthanum	72 178.49 Hf Hafnium	73 180.95 Ta Tantalum	74 183.85 W Tungsten	75 186.21 Re Rhenium	76 190.20 Os Osmium	77 192.22 Ir Iridium	78 195.09 Pt Platinum	79 196.97 Au Gold	80 200.59 Hg Mercury	81 204.37 Tl Thallium	82 207.19 Pb Lead	83 208.98 Bi Bismuth	84 (209) Po Polonium	85 (210) At Astatine	86 (222) Rn Radon						
87 (223) Fr Francium	88 226.03 Ra Radium	89 227.03 Ac Actinium	104 (261) Rf Rutherfordium	105 (262) Db Dubnium	106 (266) Sg Seaborgium	107 (262) Bh Bohrium	108 (265) Hs Hassium	109 (266) Mt Meitnerium	110 (271) Ds Darmstadtium	111 (272) Rg Roentgenium	(277)	(284)	(288)	(288)	(292)		(294)						
												112	113	114	115	116		118					



black solid
blue liquid
red gas

- alkali metals
- alkaline earth metals
- transitional metals
- other metals
- non metals
- noble gases

Lanthanides

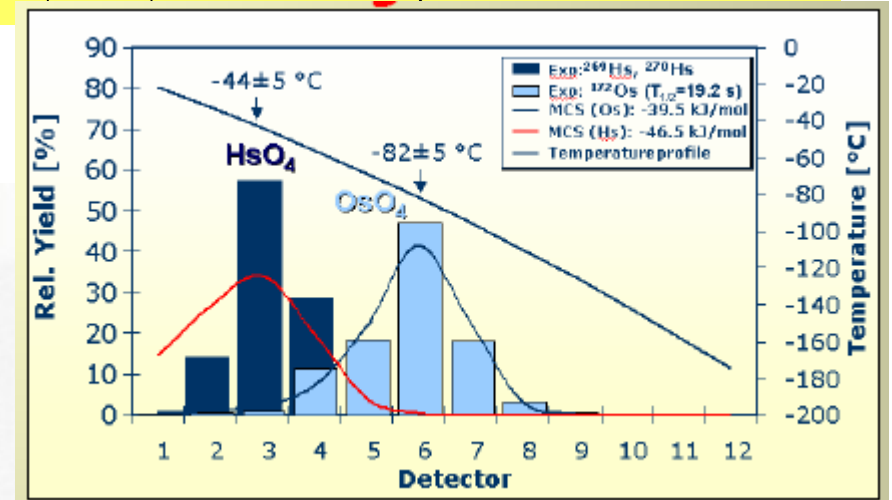
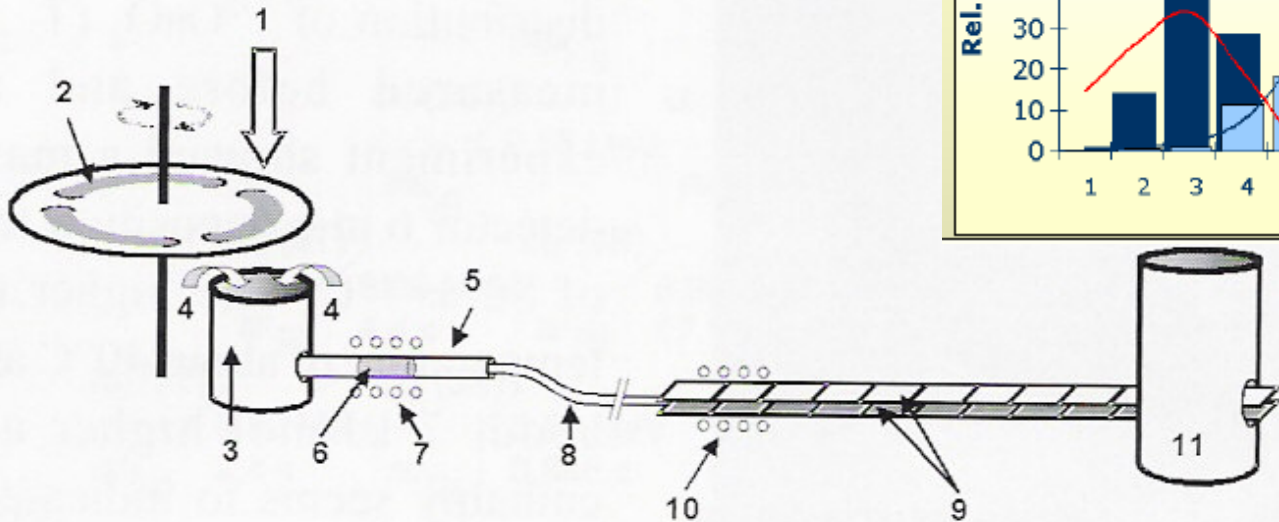
58 140.12 Ce Cerium	59 140.91 Pr Praseodymium	60 144.24 Nd Neodymium	61 (145) Pm Promethium	62 150.40 Sm Samarium	63 151.96 Eu Europium	64 157.25 Gd Gadolinium	65 158.93 Tb Terbium	66 162.50 Dy Dysprosium	67 164.93 Ho Holmium	68 167.26 Er Erbium	69 168.93 Tm Thulium	70 173.04 Yb Ytterbium	71 174.97 Lu Lutetium
-------------------------------------	---	--	--	---------------------------------------	---------------------------------------	---	--------------------------------------	---	--------------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	--	---------------------------------------

Actinides

90 232.04 Th Thorium	91 231.04 Pa Protactinium	92 238.03 U Uranium	93 237.05 Np Neptunium	94 (244) Pu Plutonium	95 (243) Am Americium	96 (247) Cm Curium	97 (247) Bk Berkelium	98 (251) Cf Californium	99 (252) Es Einsteinium	100 (257) Fm Fermium	101 (260) Md Mendelevium	102 (259) No Nobelium	103 (262) Lr Lawrencium
--------------------------------------	---	-------------------------------------	--	---------------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------------	---	---	--------------------------------------	--	---------------------------------------	---

Metody identyfikacji pierwiastków superciężkich

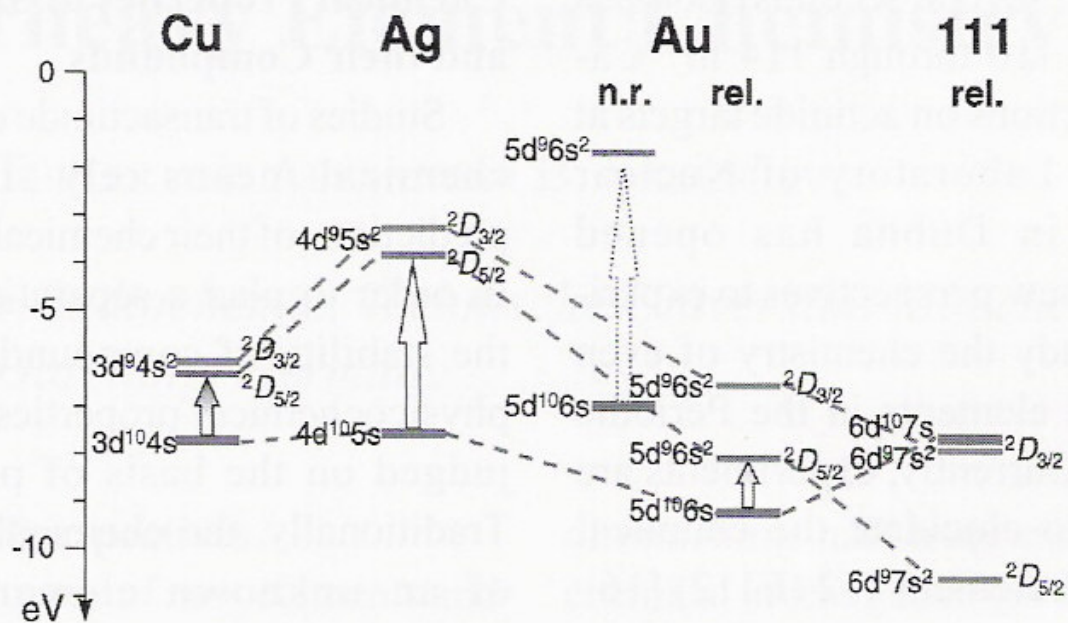
Z = 108 (produkcja pojedynczych atomów)



Jądra Hs utworzone w tarczy (2) ulegają odrzutowi i wpadają w przestrzeń gazu (3), gdzie są przedmuchiwane He lub O₂ (4) do kolumny kwarcowej (5) i ogrzewane (6) do 600 st przez piecyk (7). Tutaj Hs zostaje zamieniony na lotny HsO₄ - i jest transportowany kapilarą (8) do Cryo On-Line Detektora rejestrującego rozpad (α i rozszczepienie). COLD (9) składa się z 36 detektorów PIN. Termostat (10) i zbiornik LN₂ utrzymuje gradient temperatury

Wpływ efektów relatywistycznych na energie poziomów elektronowych i cechy pierwiastków

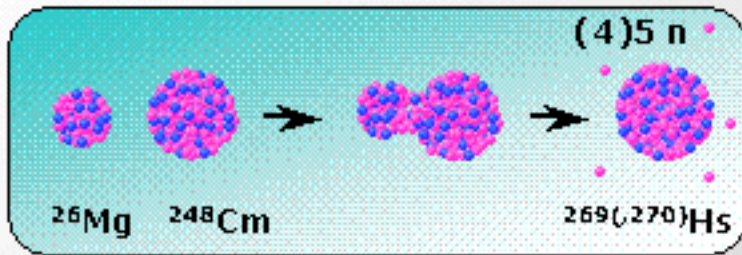
XI - grupa: Cu, Ag, Au, Rg



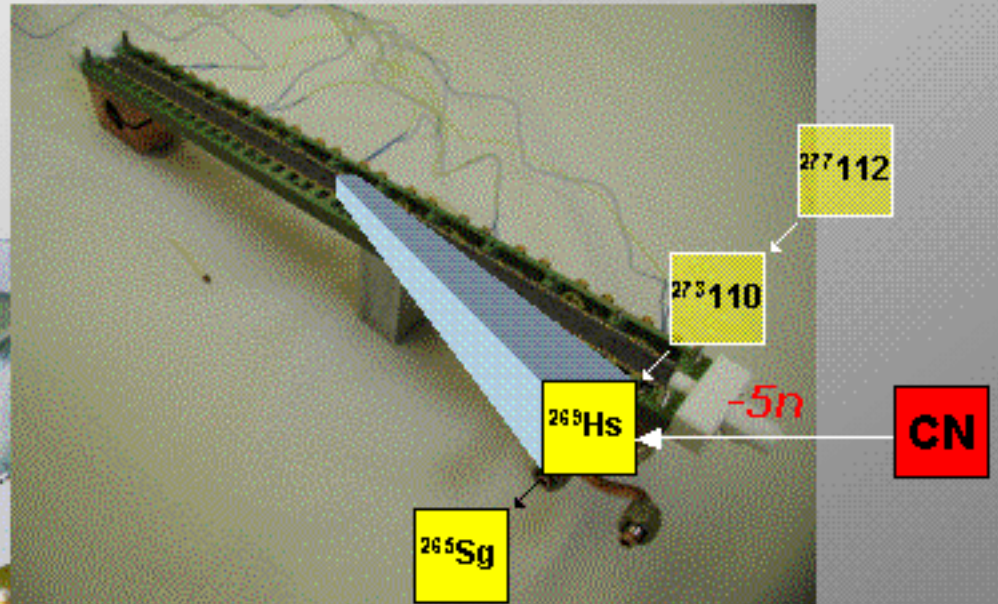
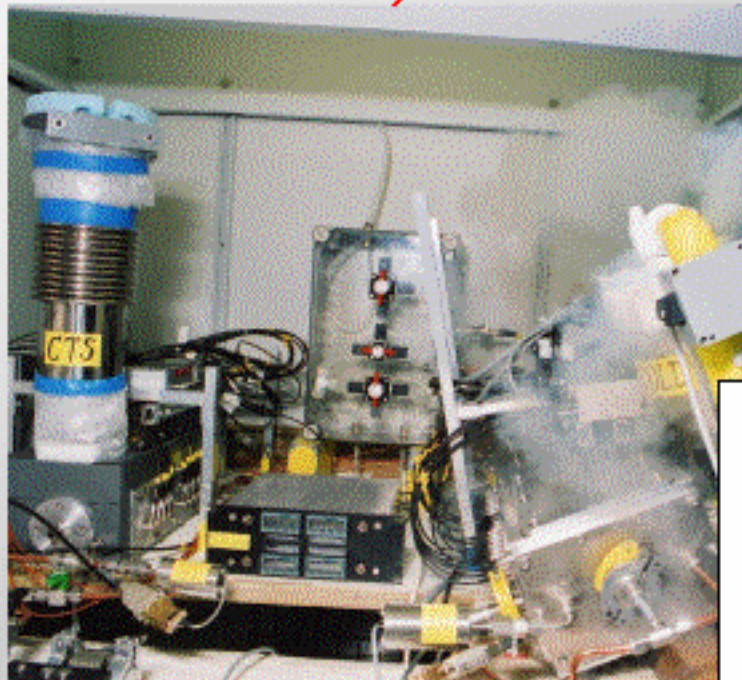
1. zwiększona energia wiązania dla orbitali $s_{1/2}$ i $p_{1/2}$
2. rozszczepienie spin-orbita poziomów
3. orbitale d i f są przestrzennie poszerzone

Confirmation by Chemistry

Ch.E. Düllmann et al., Nature 418, 859 (2002)



+ chemistry



3 events for ^{269}Hs
(2 events for ^{270}Hs) confirm the SHIP-data

determination of the chemical Properties of Hassium

Badania spektroskopowe jąder superciężkich

1. Izotopy od No do Sg są produkowane z przekrojem czynnym ok. $3 \mu\text{b}$ - 3nb - pozwala to mierzyć promieniowanie γ i elektrony konwersji wewnętrznej tzw. pomiary in beam
2. Pomiar emitowanych cząstek α i β oraz rozszczepienia

Nuclear Structure of the Heaviest Nuclei I:

α - α

F.P. Heßberger et al., Eur. Phys. J. A 12, 57-67 (2001)

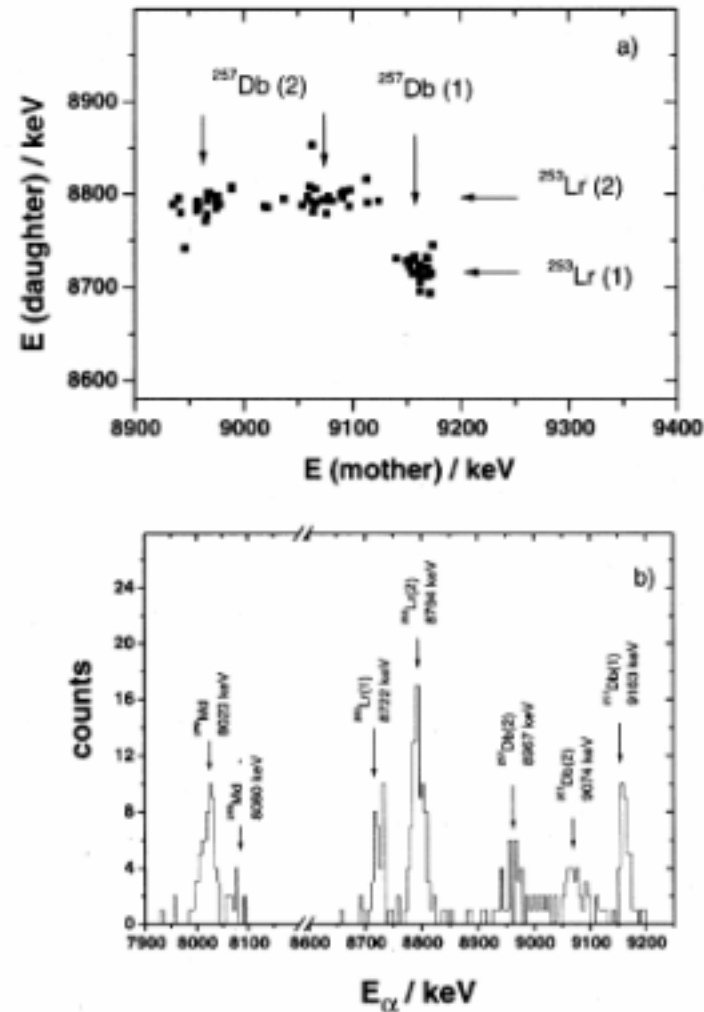


Fig. 3. a) α - α correlation plot for $^{257}\text{Db} \rightarrow ^{253}\text{Lr}$; b) spectrum of α -events attributed to ^{257}Db , ^{253}Lr and ^{249}Md .

Nuclear Structure of the Heaviest Nuclei I:

α - α

F.P. Heßberger et al., Eur. Phys. J. A 12, 57-67 (2001)

62

The European Physical Journal A

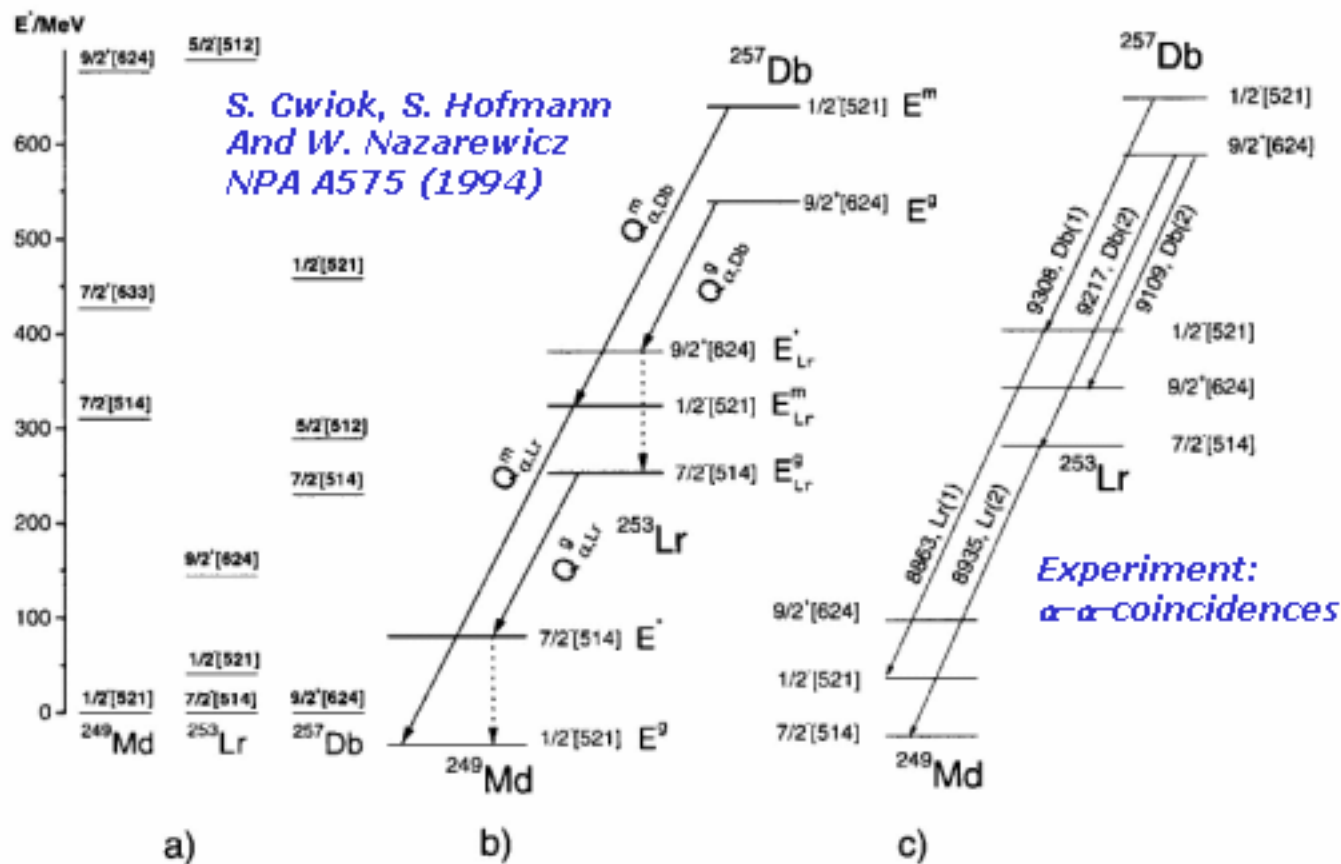


Fig. 4. a) Level schemes predicted for ^{249}Md , ^{253}Lr , ^{257}Db according to [3]; b) symbolic decay scheme for ^{257}Db using level sequences as predicted in ref. [3]; c) tentative decay scheme suggested for $^{257,257\text{m}}\text{Db}$ on the basis of the observed α -decay energies. The numbers denote the Q values.

Obserwacje eksperymentalne związane z syntezą jąder superciężkich

1. Spadek czasu życia SHE ze wzrostem Z
2. Wzrost czasu życia izotopów SHE ze wzrostem liczby neutronów
3. Przekroje czynne rzędu 1pb na reakcję syntezy przy użyciu pocisku ^{48}Ca i gorącej syntezy, nawet do $Z = 118$

Przewidywania teoretyczne

1. Przewidywanie stabilności na rozszczepienie dzięki strukturze powłokowej - 1966 W. Mayers i W. Świątecki

a) zamknięta powłoka $Z = 114, N = 184$ - jądra kuliste

b) czasy życia - najdłuższy dla $^{249}_{110}$ $\tau = 10^9$ lat,

powinien istnieć w naturze - brak potwierdzenia

2. Zamknięte powłoki

dla $Z = 108$ i $N = 162$ - jądra zdeformowane

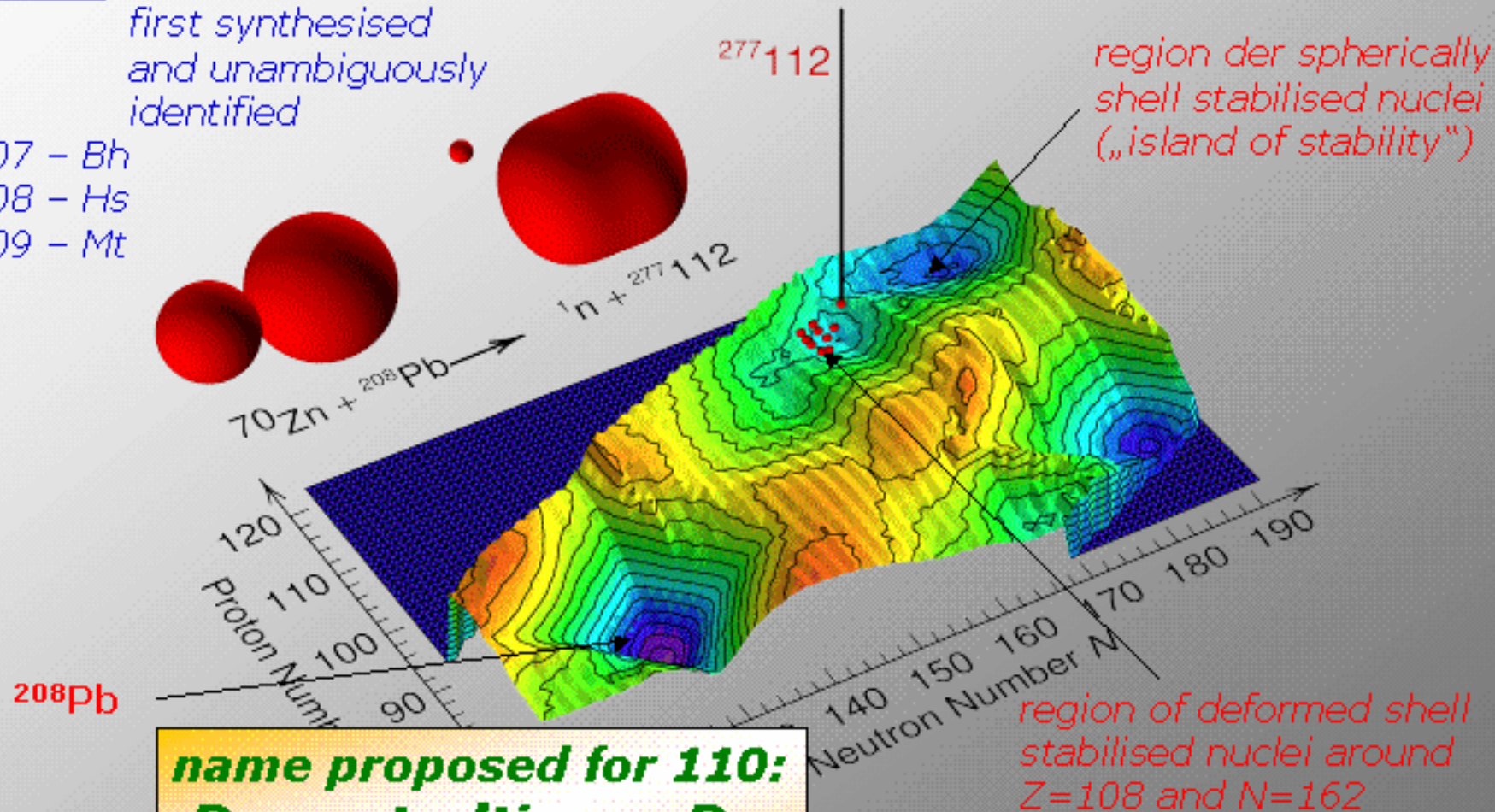
dla $Z = 114, 120,$ lub 126 i $N = 184$ lub 172 - jądra kuliste

A.Sobiczewski, R. Smolańczuk, Instytut Problemów Jądrowych

Energia poprawki powłokowej dla jąder superciężkich (obliczenia teoretyczne P. Möller et al.)

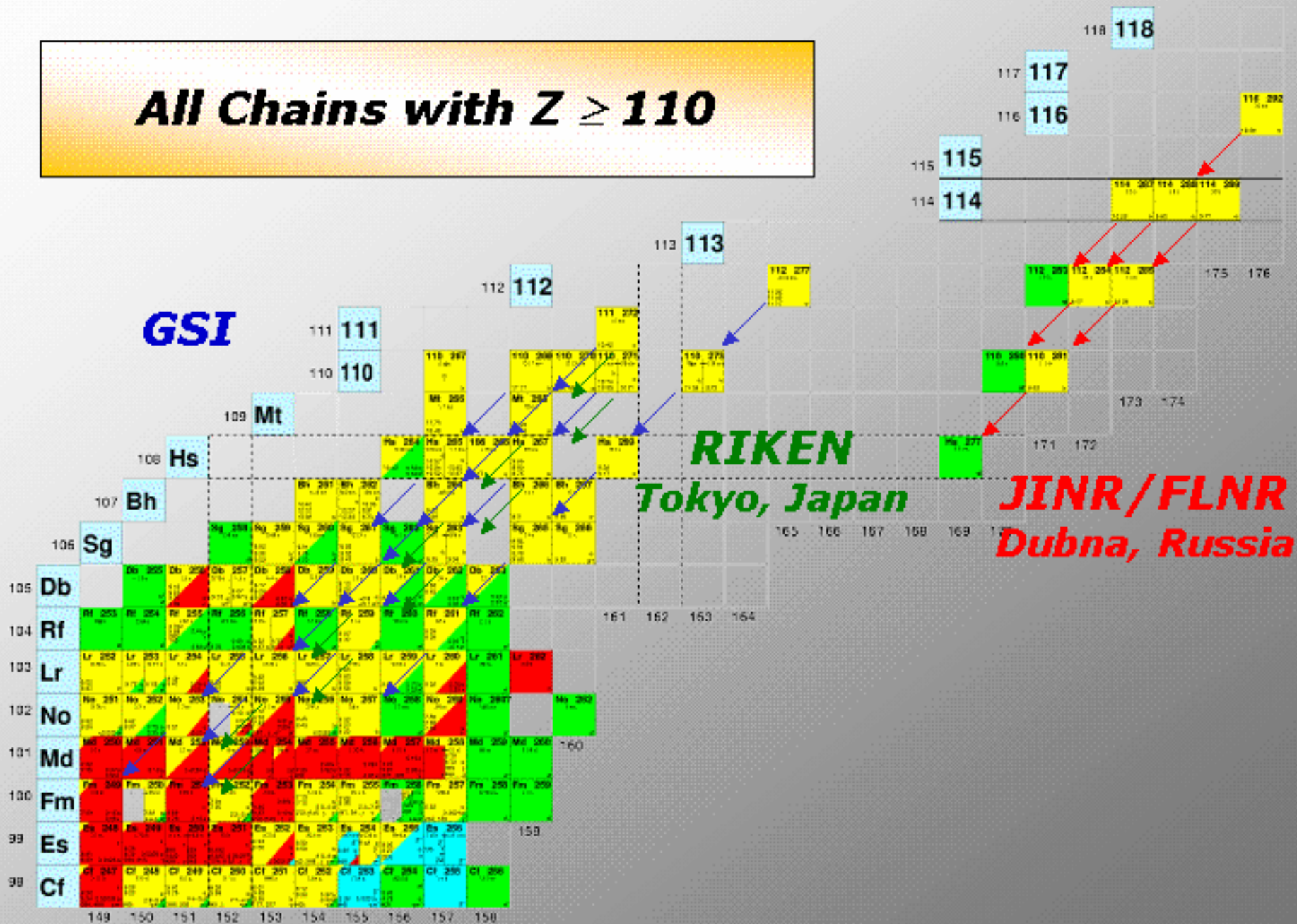
at GSI: Elements 107-112
first synthesised
and unambiguously
identified

107 – Bh
108 – Hs
109 – Mt



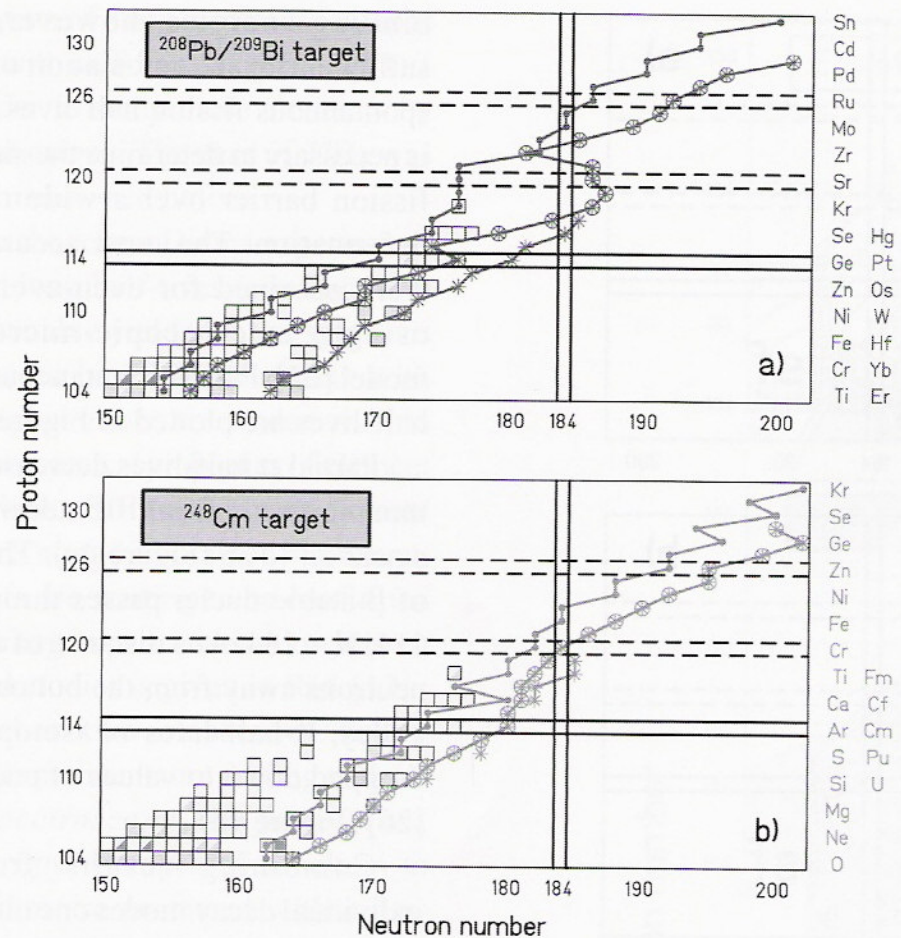
name proposed for 110:
Darmstadtium – Ds
(IUPAC decision in August 2003)

All Chains with $Z \geq 110$



Synteza jąder superciężkich przy użyciu wiązek radioaktywnych

Możliwość przesunięcia granicy syntezy o 4-5n - może dojść do zamkniętej powłoki N = 184 dla lżejszych pierwiastków




Otwarte pytania

1. Jakie są granice terytorium jąder superciężkich?
2. Jak te jądra mogą wytrzymać ogromne odpychanie kulombowskie?
3. Czy możliwe są egzotyczne konfiguracje?

SHIP Development

 scattered beam
 other reaction products

} 50 Hz (SHE)
- n x 100Hz

 evaporation residues

0.1 AMeV - 1 AMeV
pbarn (1ER/10d) - mbarn (some kHz)

background reduction: 3

- degrader foils
- ionoptics

target development: 2

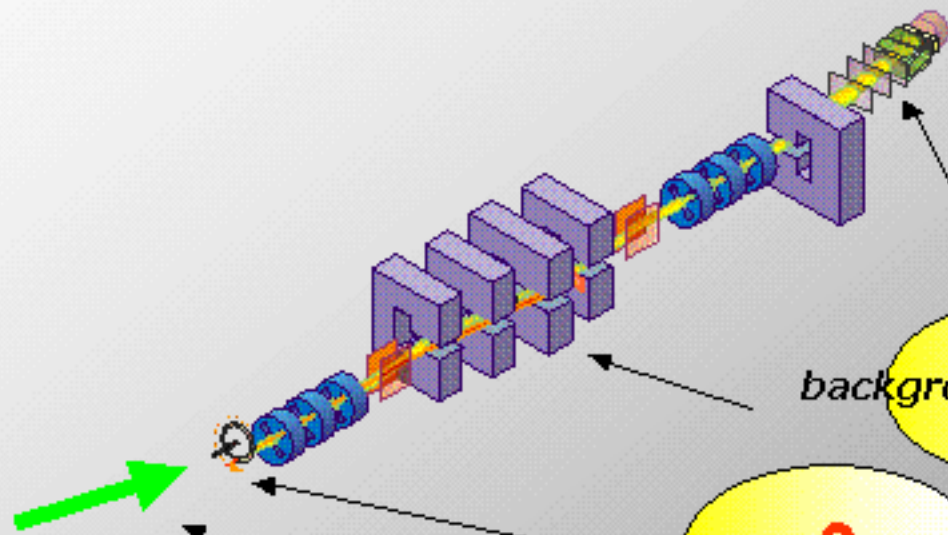
- cooling
- chemical compounds
- e-beam diagnosis

beam development: 1

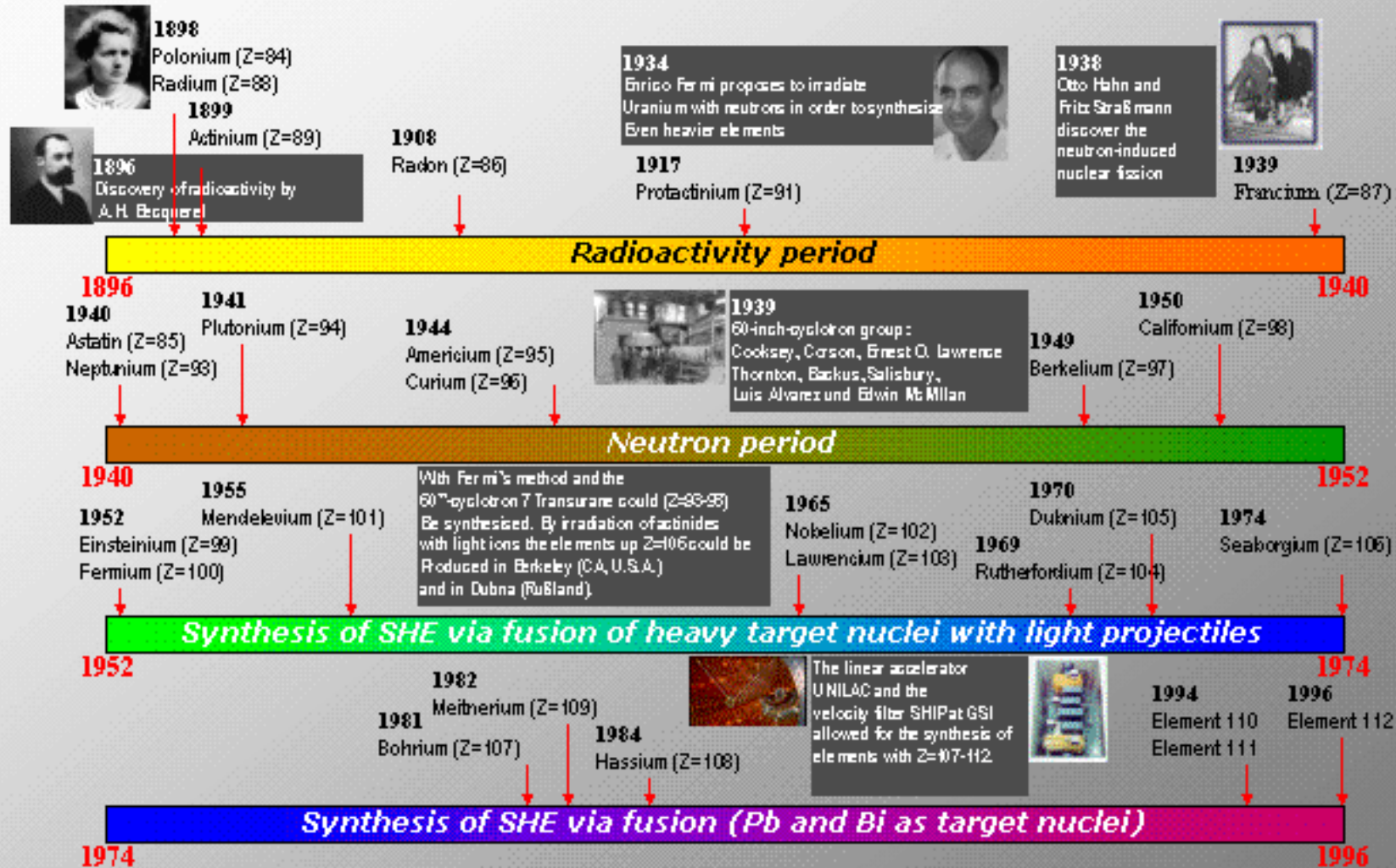
- higher beam current
DC-accelerator
- better target illumination
(rectangular profile)

projectile

≈5 AMeV
≈10⁻⁶ particle A



History of the synthesis and discovery of super heavy elements (SHE)



Literatura

1. P. Ambruster, S. Hofmann, A. Sobiczewski, Postępy Fizyki, t.46, str. 431 (1995)
2. A. Sobiczewski, Postępy Fizyki, t.47, str. 495 (1996)
3. A. Sobiczewski, Postępy Fizyki, t.50, str. 204 (1999)
4. A. Sobiczewski, Postępy Fizyki, t.55, str. 7 (2004)