

# **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

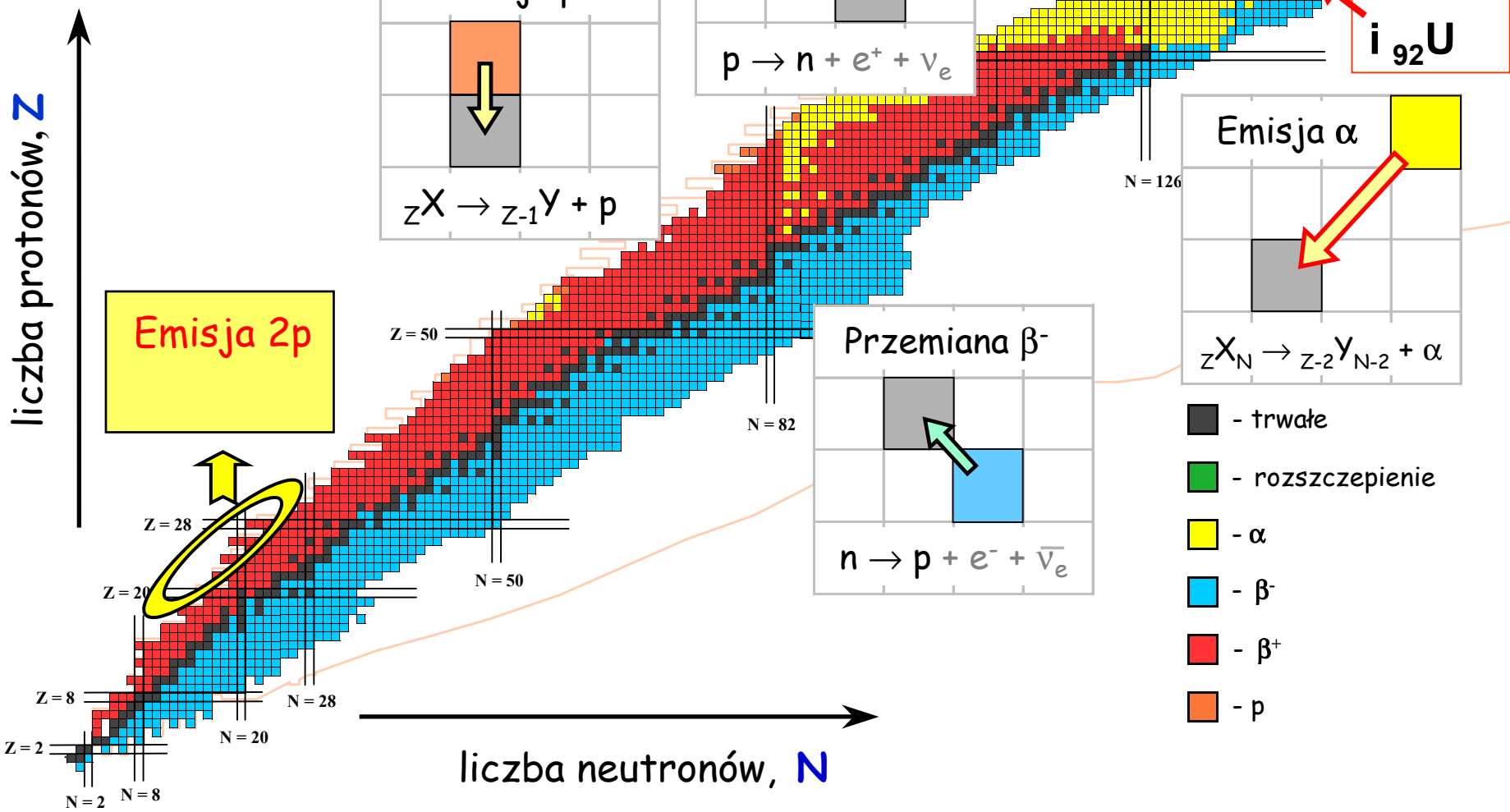
1. duża energia wiązania
2. kształt sferyczny (wokół  $Z=114$ ,  $N=184$ ) i zdeformowany ( $Z=108$ ,  $N=184$ )
3. największa stabilność dla jąder o  $N$  i  $Z$  magicznych

264 jądra stabilne

ok. 2700 jąder znanych

ok. 7000 jąder przewidywanych

# Mapa nuklidów



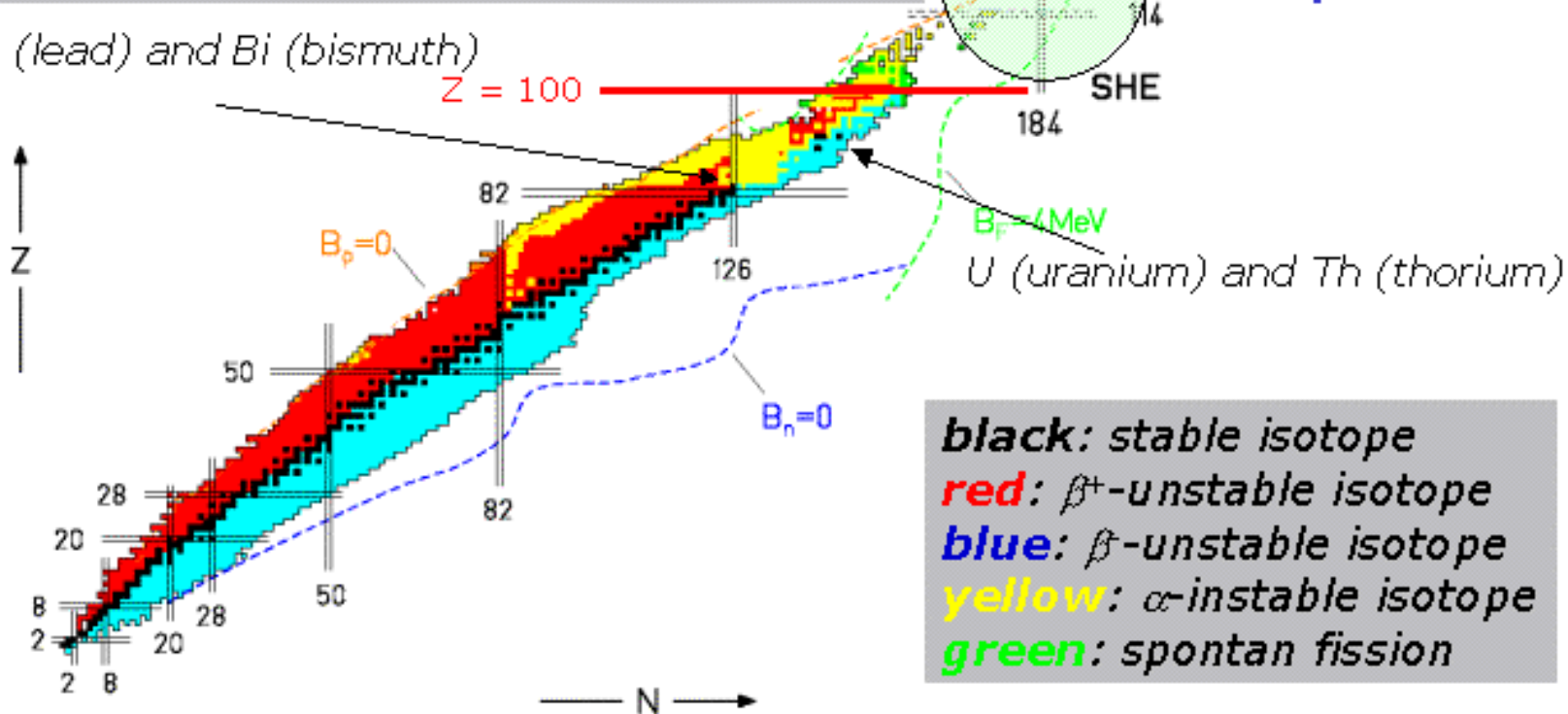
# Mapa nuklidów

## 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)

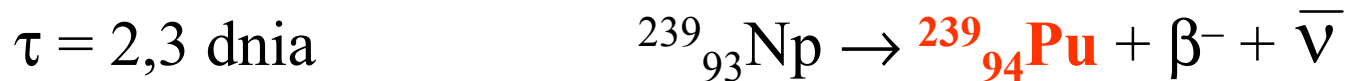
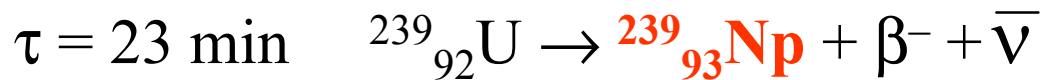


# Metody syntezy jąder superciężkich

Pierwiastki transuranowe ( $Z > 92$ )

## 1. Naświetlanie neutronami - próby od 1934 r

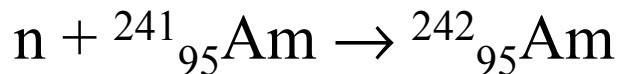
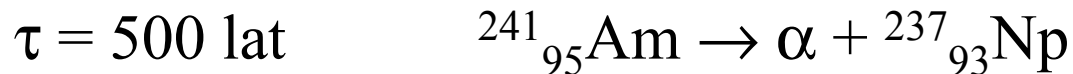
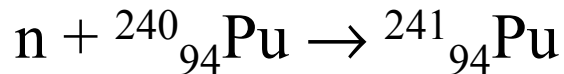
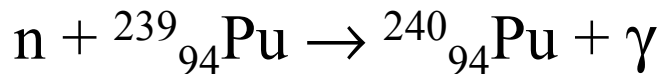
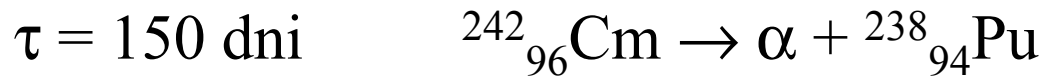
Nieoczekiwane odkrycie rozszczepienia jąder (1938)



Identyfikacja - badania radiochemiczne

# Metody syntezy jąder superciężkich

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



# 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

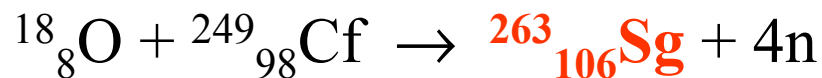
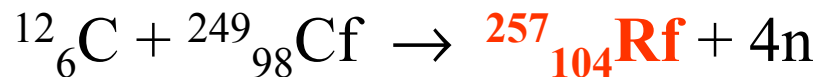
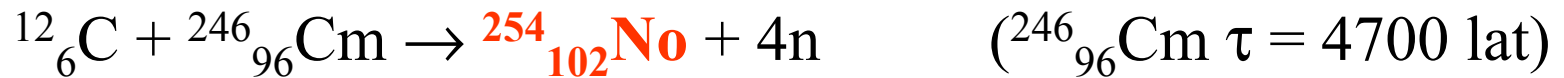
$\tau = 20$  dni  $^{253}_{99}\text{Es}$       i       $\tau = 22$  godz  $^{255}_{100}\text{Fm}$

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

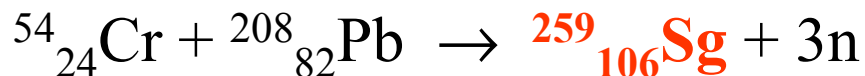
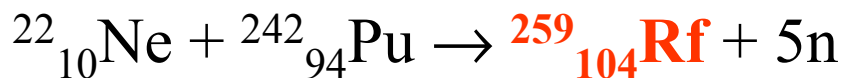
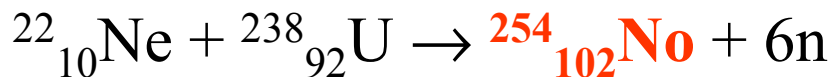
### 3. Reakcje syntezy jąder superciężkich z użyciem ciężkich jonów - Berkeley, Dubna, Darmstadt

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

Berkeley - akcelerator HILAC od 1957 r



Dubna - akcelerator cyklotron U-300 od 1962 r



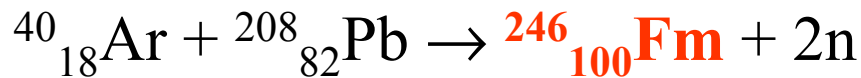
Trudności z ustaleniem odkrycia - powołanie Transfermium Working Group w 1985 r.



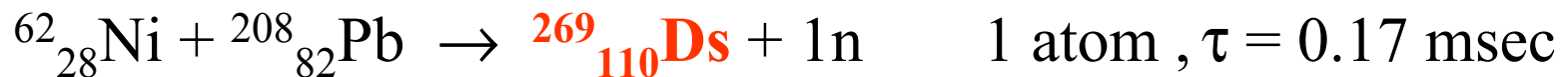
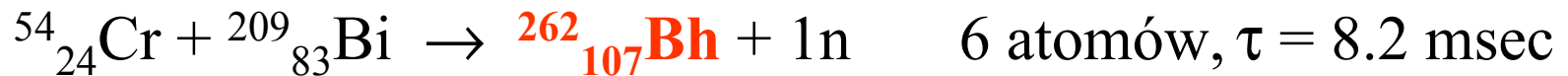
### 3. Reakcje syntezy jąder superciężkich z użyciem ciężkich jonów - Berkeley, Dubna, Darmstadt

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  $\alpha$ ,  
czasy życia  $\tau = 1 \mu\text{sec} - 1 \text{ sec}$

## Odkryte jądra superciężkie

|              |           |           |           |           |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Z= 93</b> | <b>94</b> | <b>95</b> | <b>96</b> | <b>97</b> |
| Np           | Pu        | Am        | Cm        | Bk        |
| Neptun       | Pluton    | Ameryk    | Kiur      | Berkel    |
| 1940         | 1940      | 1944      | 1944      | 1949      |

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

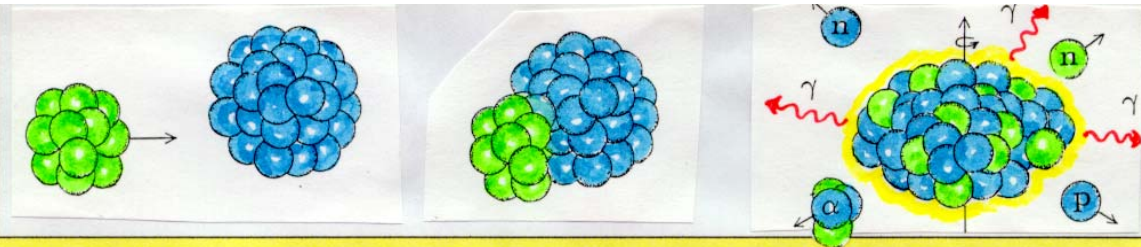
|               |            |            |            |            |
|---------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Z= 103</b> | <b>104</b> | <b>105</b> | <b>106</b> | <b>107</b> |
| Lr            | Rf         | Db         | Sg         | Bh         |
| Lorens        | Rutherford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

# Odkryte jądra superciężkie

|               |            |            |            |            |
|---------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Z= 108</b> | <b>109</b> | <b>110</b> | <b>111</b> | <b>112</b> |
| Hs            | Mt         | Ds         | Rg         |            |
| Has           | Meitner    | Darmstadt  | Roentgen   |            |
| 1984          | 1982       | 1994       | 1994       | 1996       |

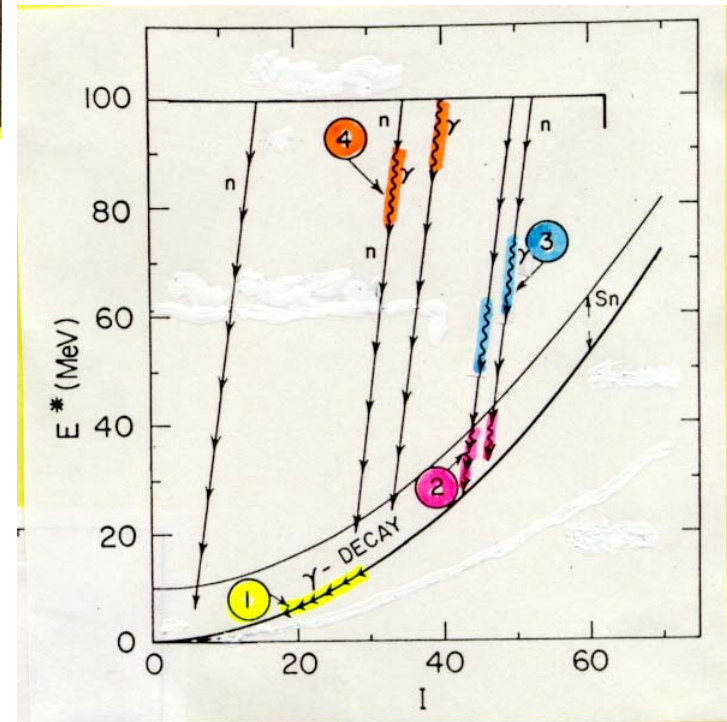
|               |            |            |            |
|---------------|------------|------------|------------|
| <b>Z= 113</b> | <b>114</b> | <b>115</b> | <b>116</b> |
|               |            |            |            |
| 2003          | 1998       | 2003       | 2000       |

# Główne parametry procesu syntezy jąder superciężkich z użyciem ciężkich jonów

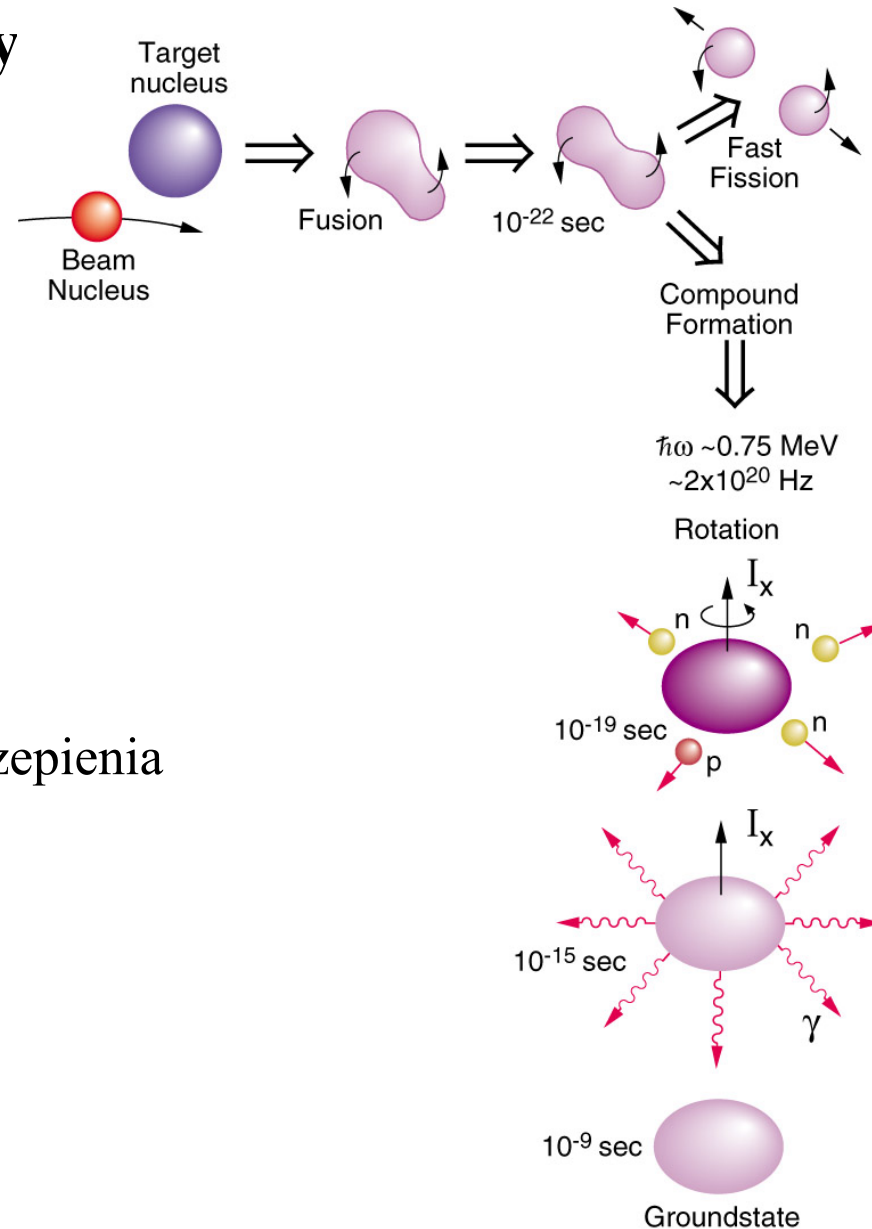


## 1. Prawdopodobieństwo utworzenia jądra złożonego

- a) wysokość bariery na fuzję,
- b) energia pocisku,
- c) energia wzbudzenia jądra złożonego



# Główne parametry procesu syntezy jąder superciężkich z użyciem ciężkich jonów



2. Prawdopodobieństwo rozszczepienia

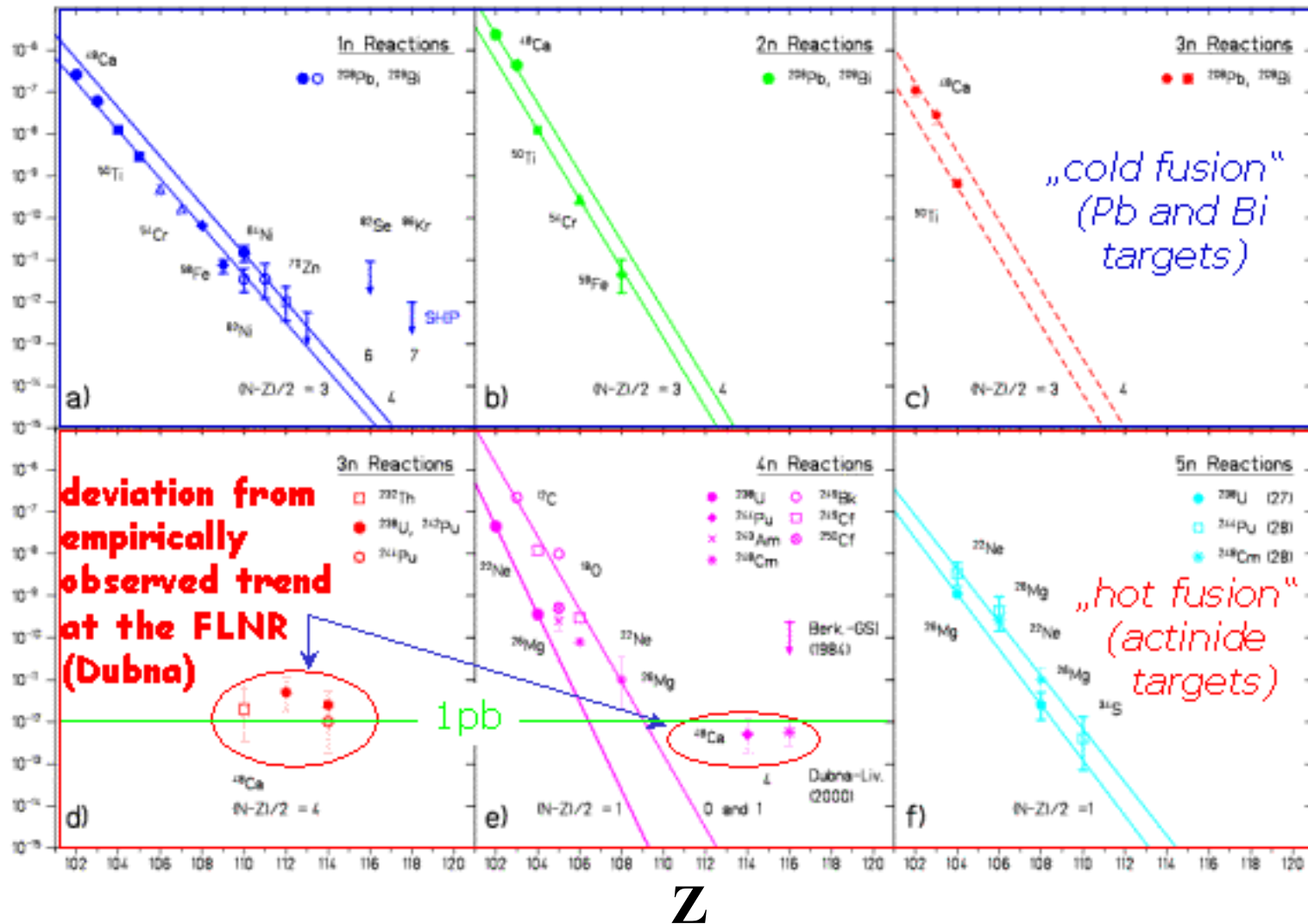
a) stosunek  $B_{\text{pow}} / B_{\text{kul}}$

3. Centralność zderzenia, moment pędu

4. Konkurencja emisji  $n$  i  $\gamma$  wobec rozszczepienia

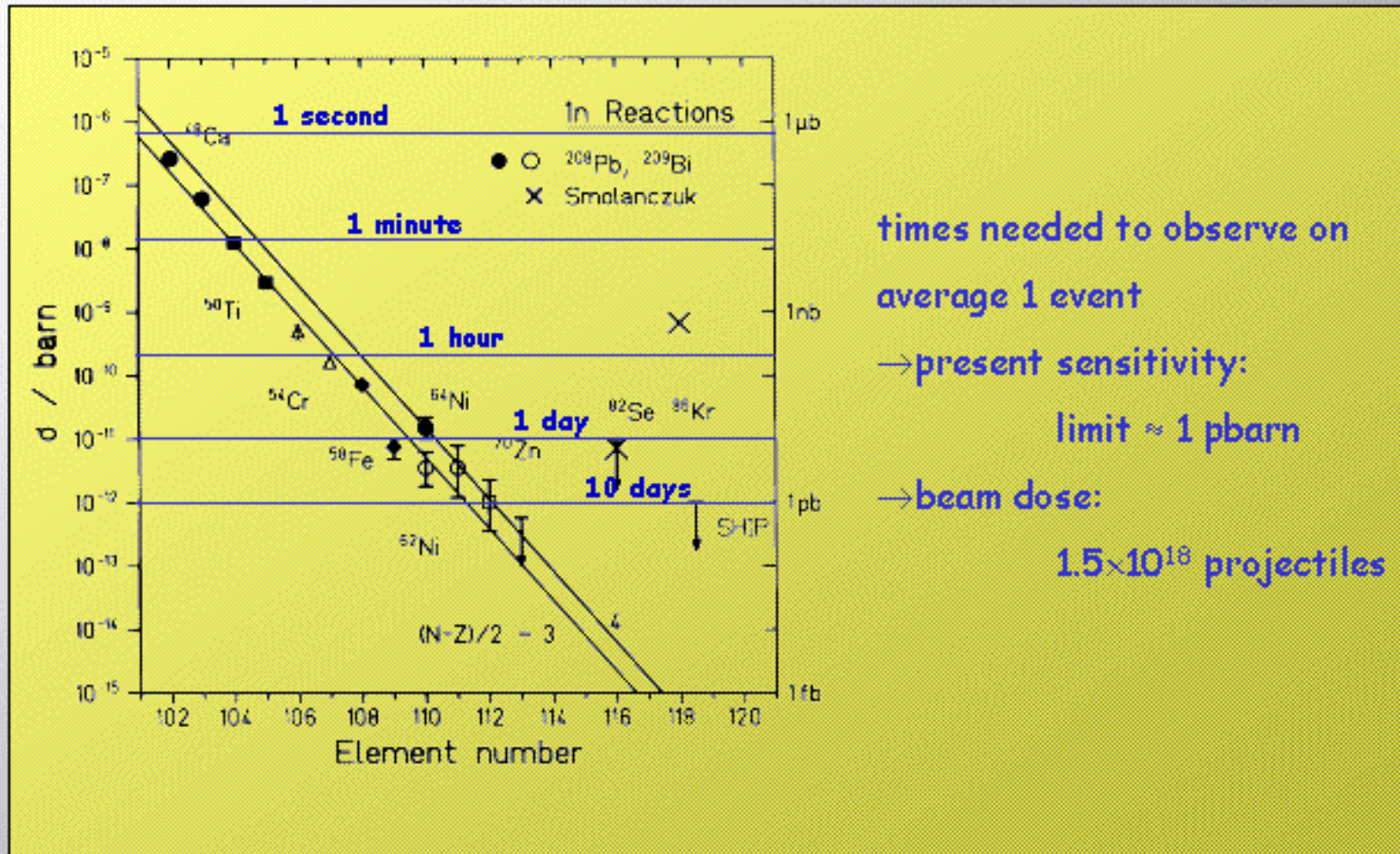
5. Czasy życia jąder superciężkich

# 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

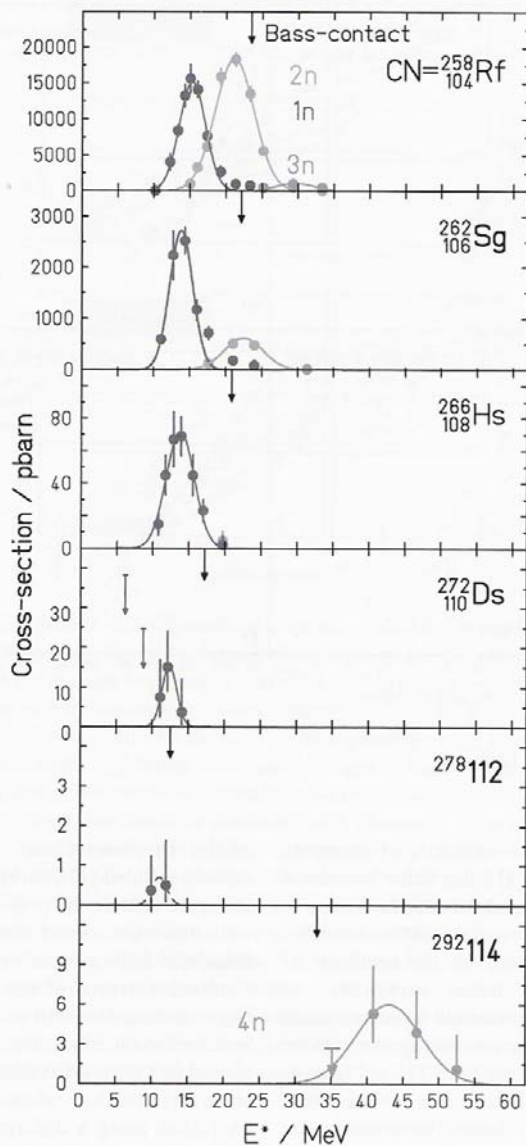
→ present sensitivity:

limit  $\approx 1$  pbarn

→ beam dose:

$1.5 \times 10^{18}$  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

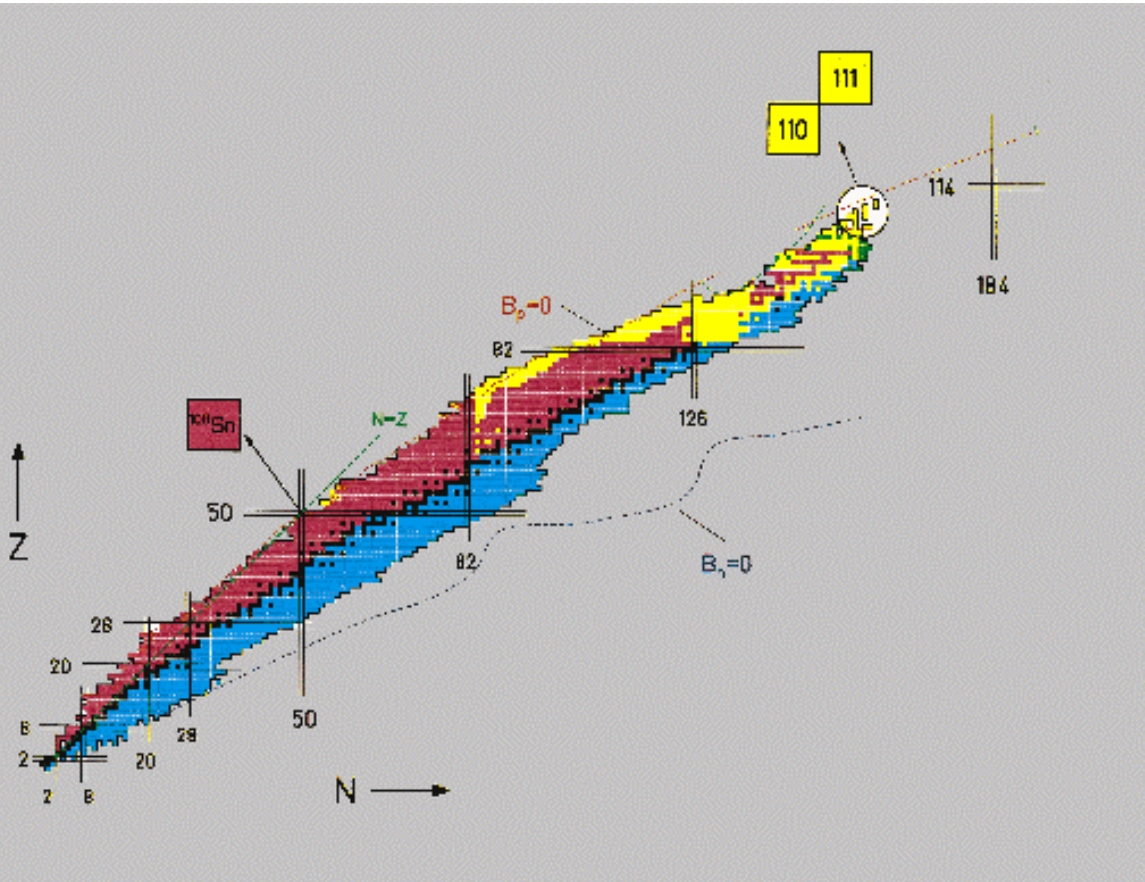


# Współczesne eksperymenty syntezy jąder superciężkich

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)

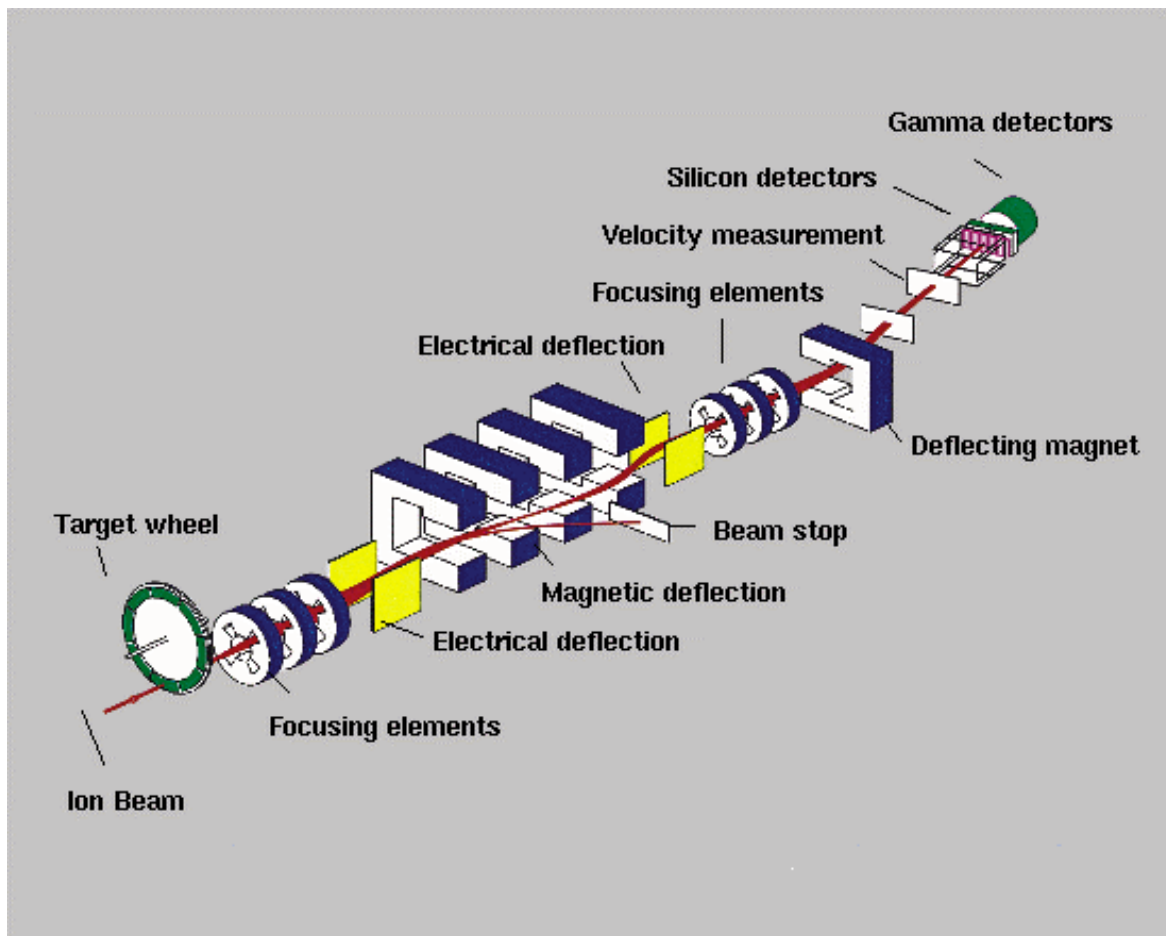


W ZIBJ w Dubnej :



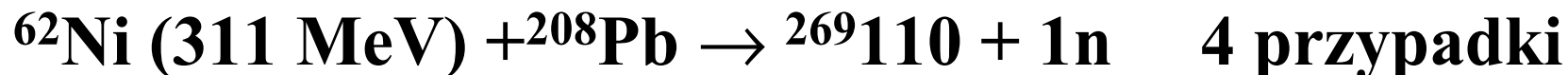
# Synteza nowych pierwiastków o $Z=110$ i $111$

(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



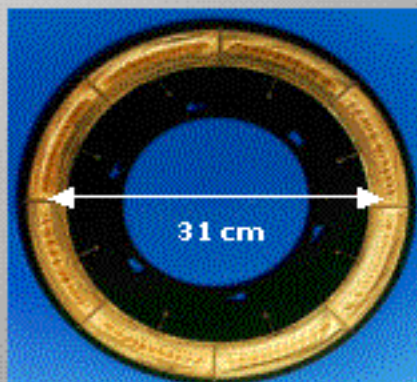
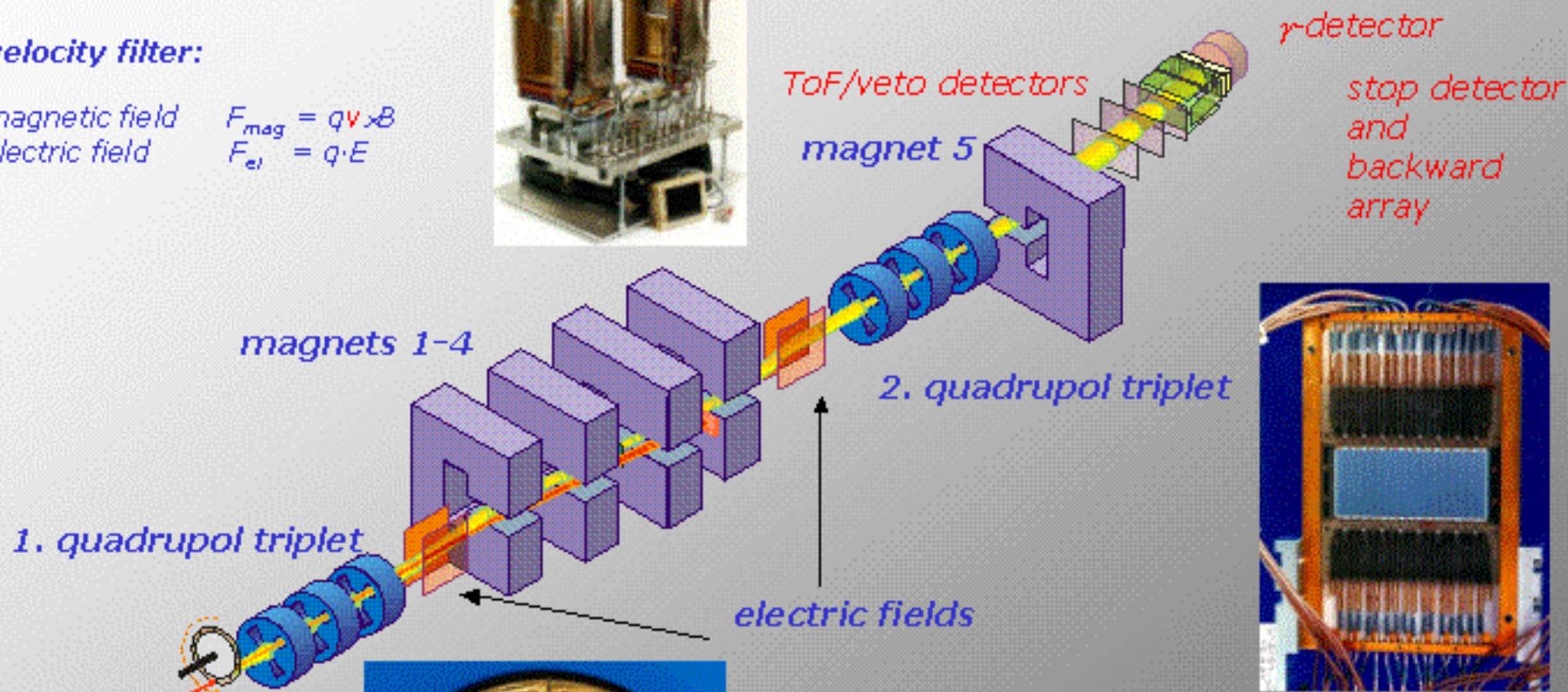
# The Velocity Filter SHIP

## velocity filter:

magnetic field  
electric field

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

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

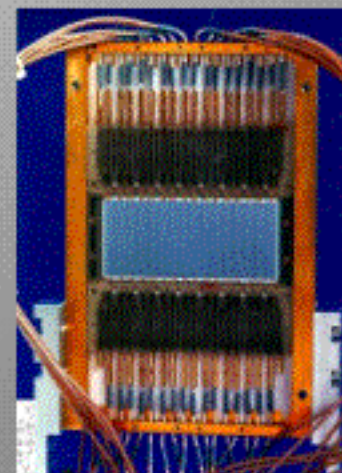


material:

Pb, Bi, U, rare earth

development:

chemical compounds  
cooling  
e-beam diagnosis

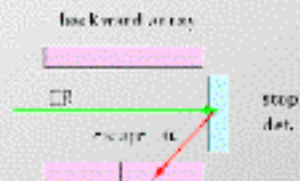




# Stop- und Backward-Detektor Array



Stop- and backward array



Parameters:

**ER:**

position, time, energy

- in the stop detector

**$\alpha$ 's:**

position, time, energy

- in the stop detector

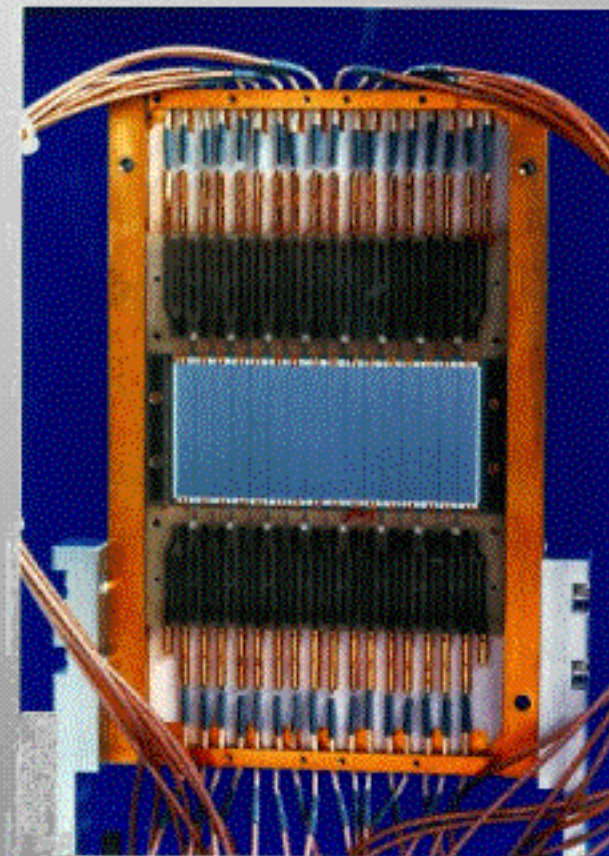
or (in case of an escape  $\alpha$ ):

position, time, partial energy

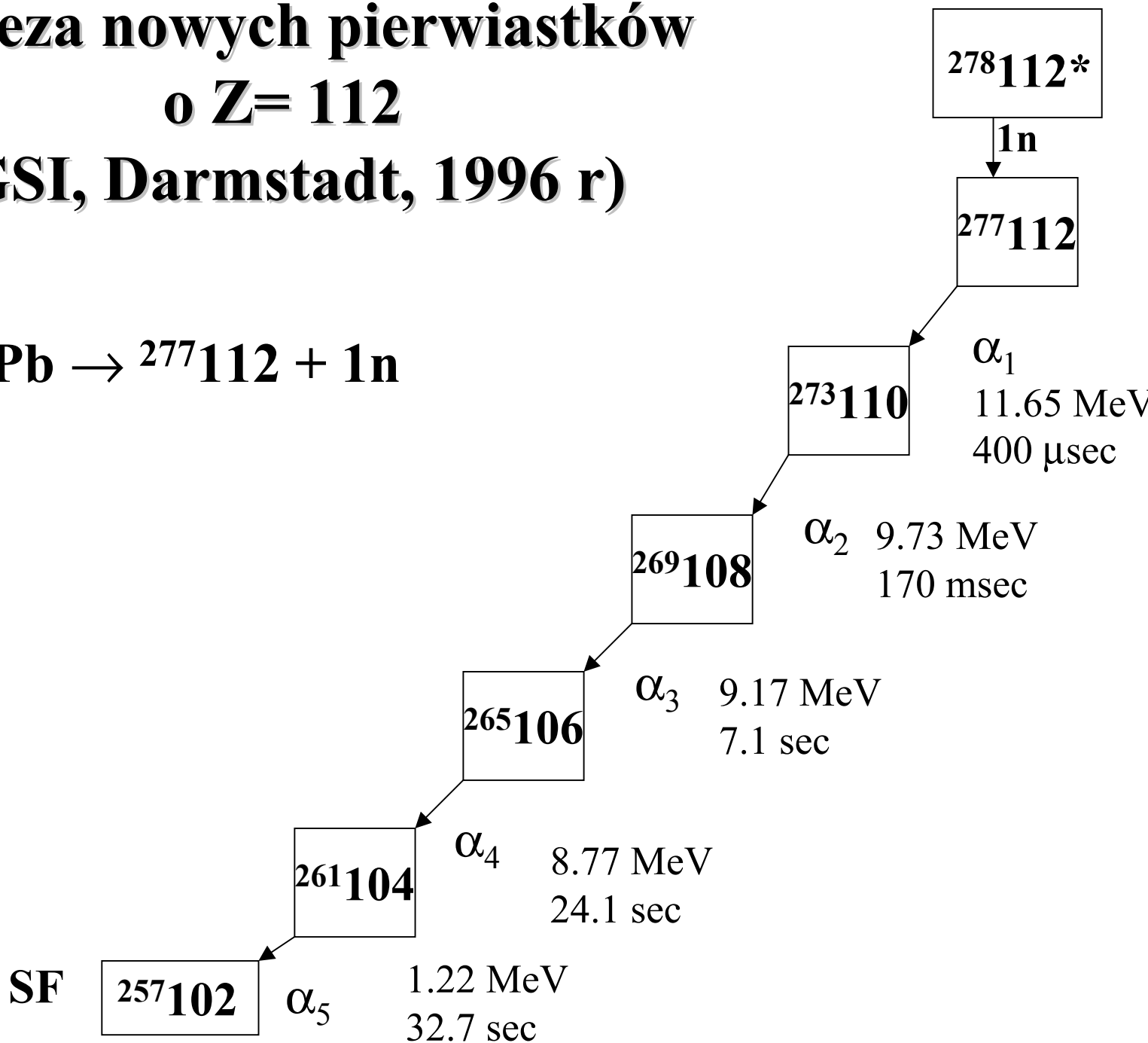
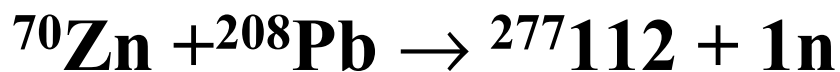
- in the stop detector

and position, time, residual energy

- in the backward array



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

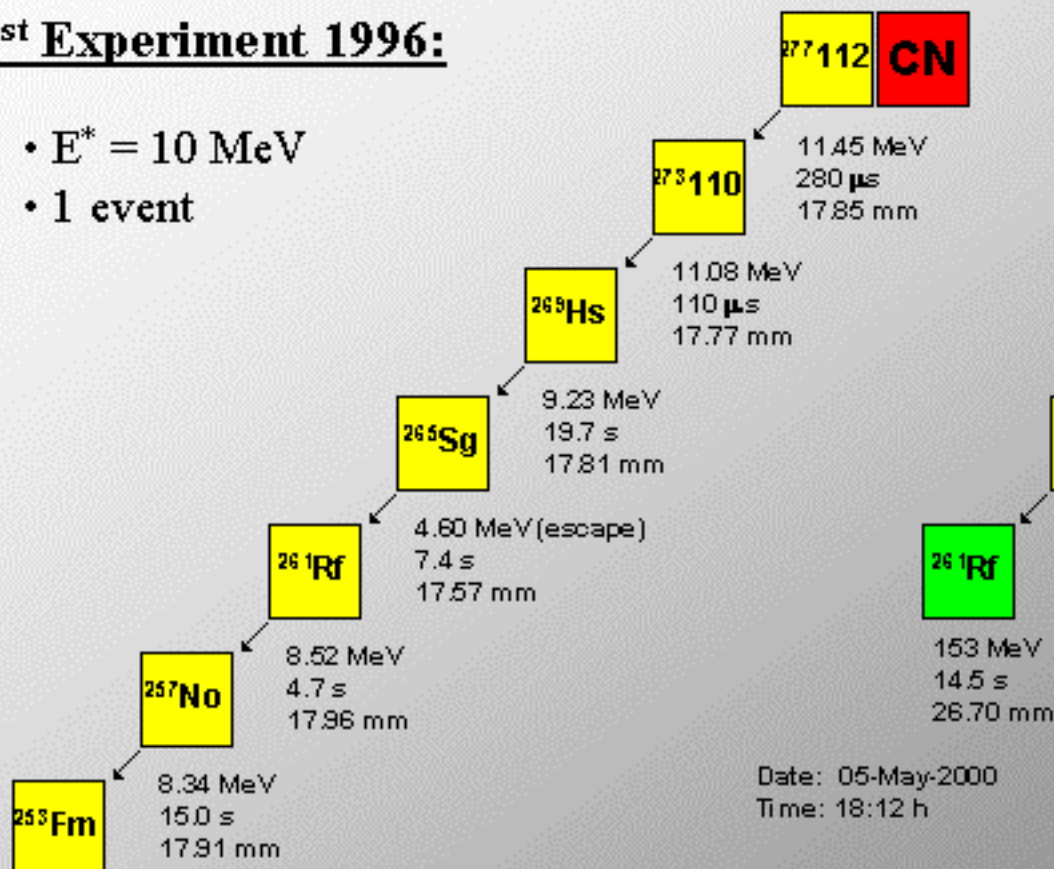




# Confirmation of Element 112

## 1<sup>st</sup> Experiment 1996:

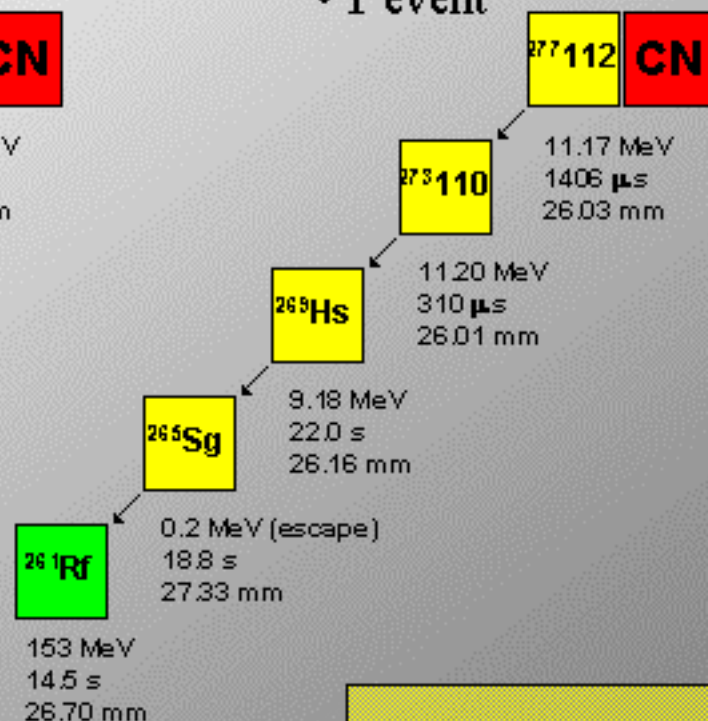
- $E^* = 10 \text{ MeV}$
- 1 event



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

## 2<sup>nd</sup> Exp. in May 2000:

- $E^* = 10 \text{ MeV}$  and 12 MeV
- 1 event



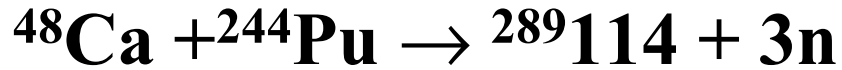
Date: 05-May-2000  
Time: 18:12 h

### New cross section values:

$$\sigma(E^*=10 \text{ MeV}) = 0.4_{-0.3}^{+0.2} \text{ pb}$$

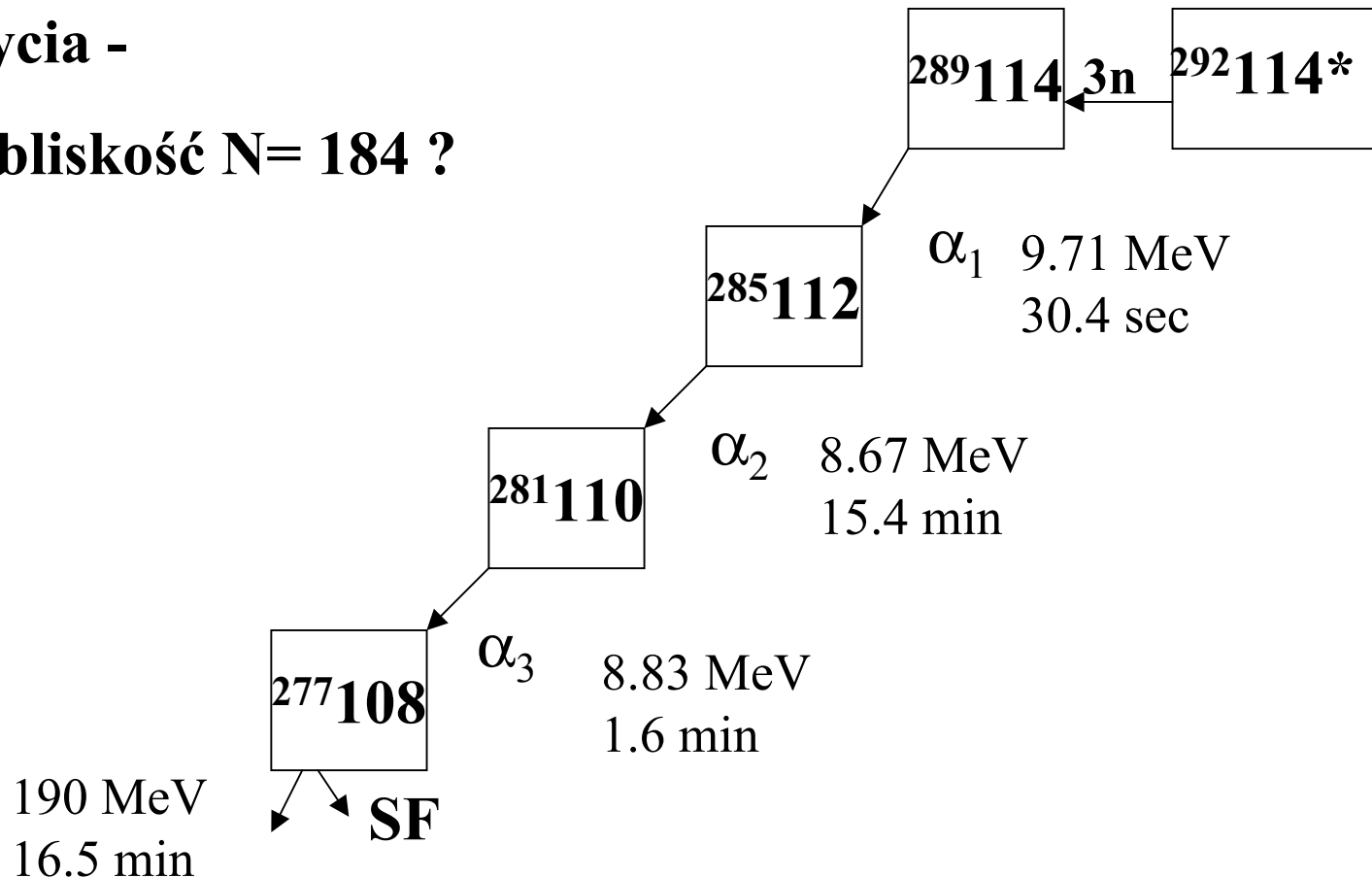
$$\sigma(E^*=12 \text{ MeV}) = 0.5_{-0.4}^{+1.1} \text{ pb}$$

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



długie czasy życia -

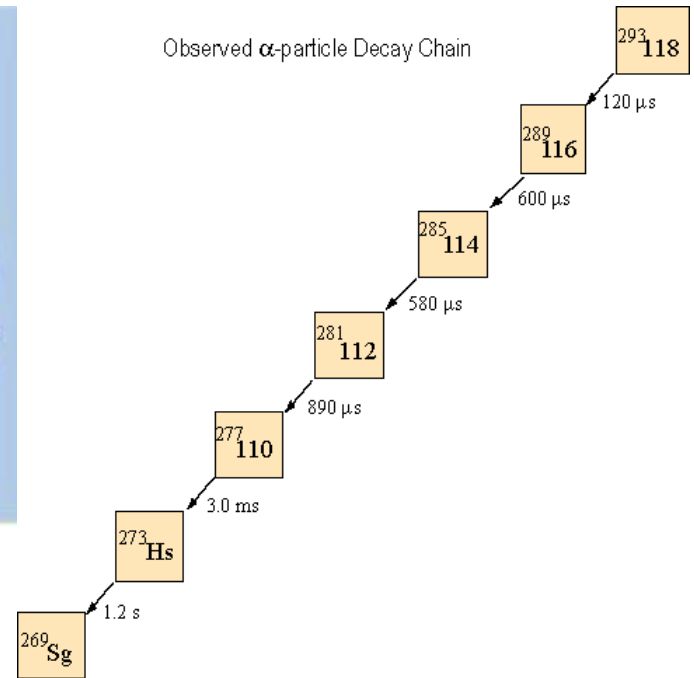
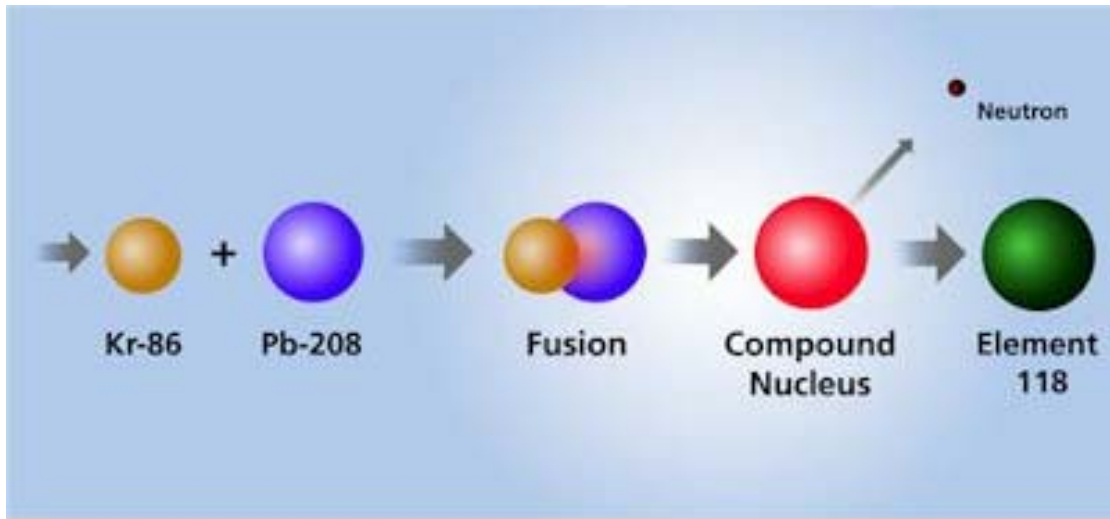
bliskość  $N = 184$  ?





# Synteza nowych pierwiastków o $Z = 116$ i $118$

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



## Trudności:

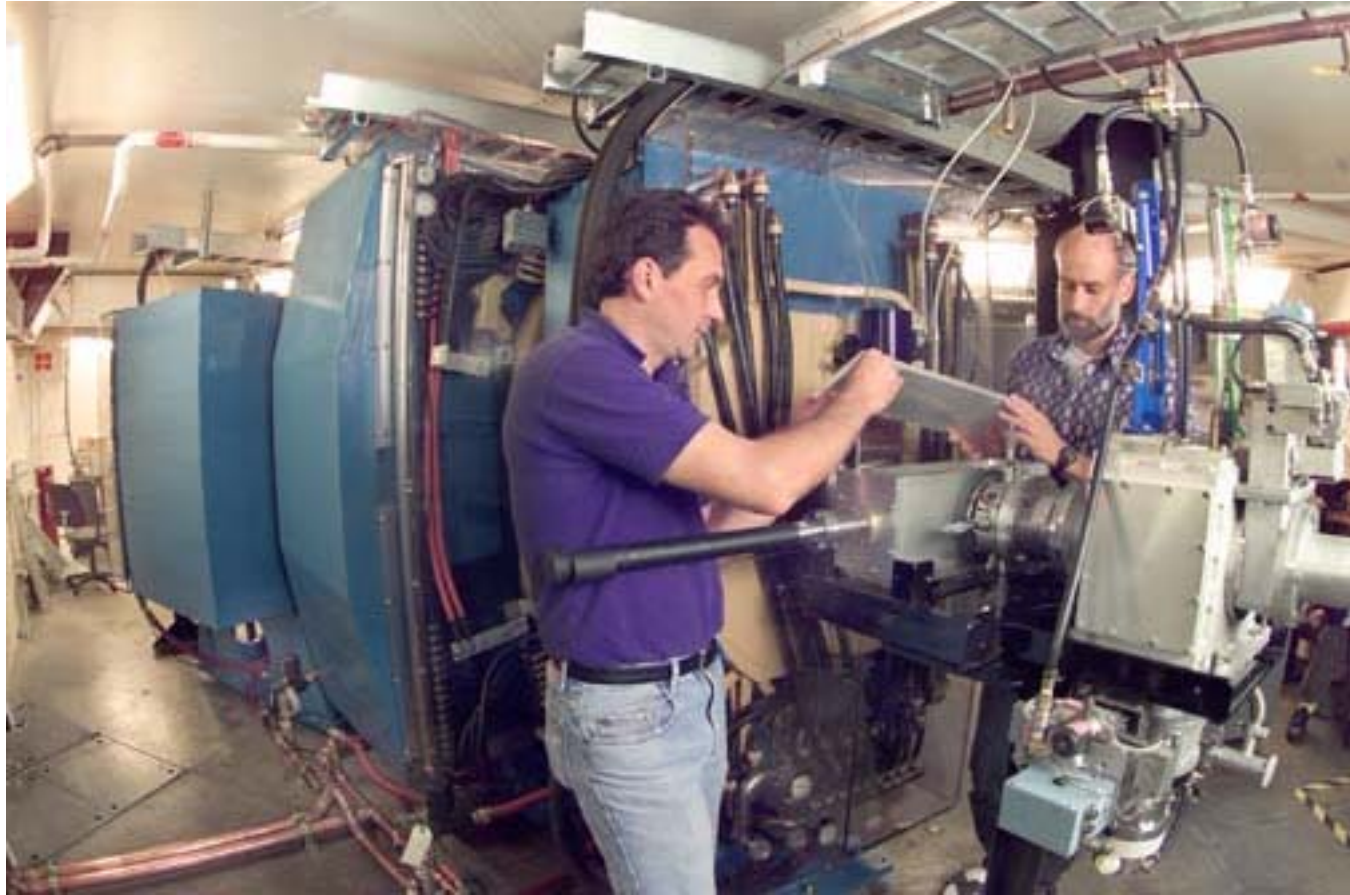
jądro  $^{293}_{118}$  produkowane jest raz na  $10^{12}$  zderzeń,

przewidywany czas życia ok.  $200\mu\text{s}$

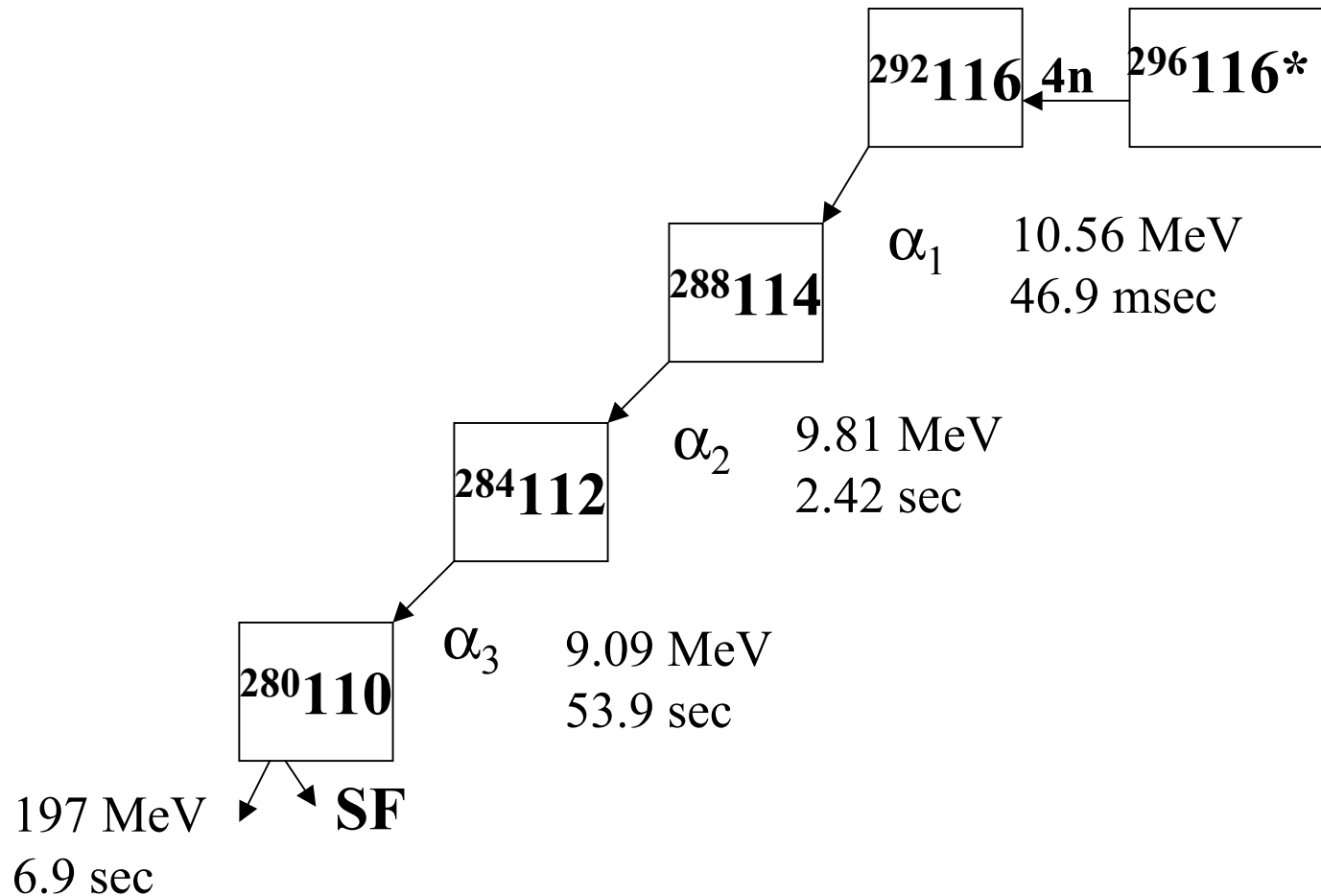
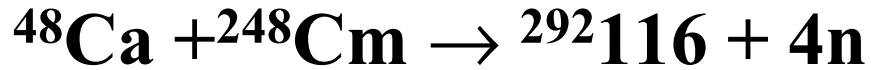


Układ eksperymentalny: tarcza, separator fragmentów, detektor

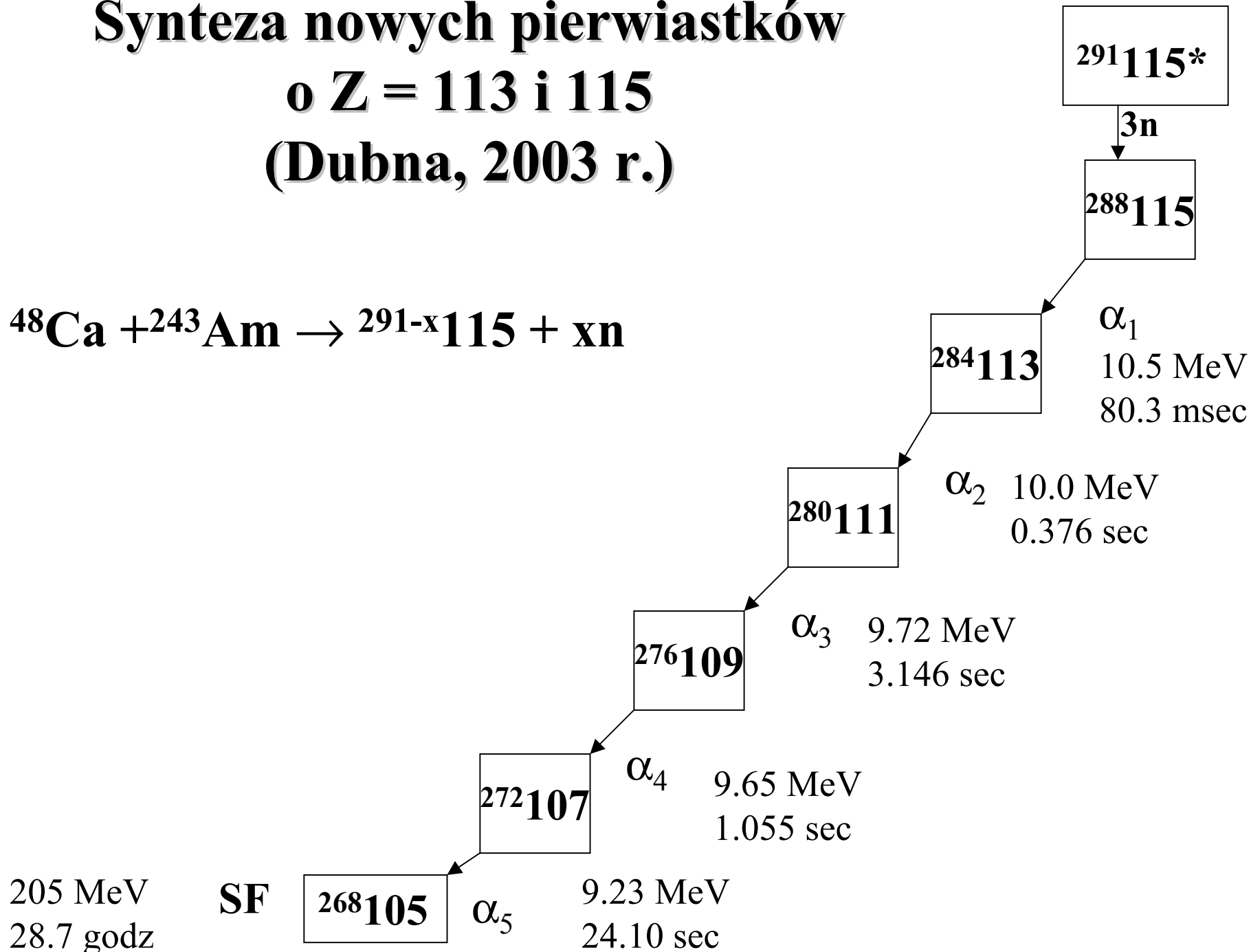
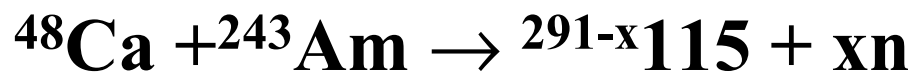
## Separator fragmentów BGS



# 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 neutrononadmiarowe, emisja 4-5n

# Metody identyfikacji pierwiastków superciężkich (produkcja pojedynczych atomów)

1. Badanie radiochemiczne: rejestracja emisji  $\alpha$ ,  $\beta$ , produktów rozszczepienia
2. Chromatografia gazowa
3. Badanie łańcucha genetycznego
4. Badania chemiczne określające własności pierwiastka
5. Obliczenia energii poziomów elektronowych - poprawki relatywistyczne ( $\sim Z^2$ ) - przewidywania ważne dla planowania procesu separacji atomów

Wnioski: E112 - własności nie podobne do Hg

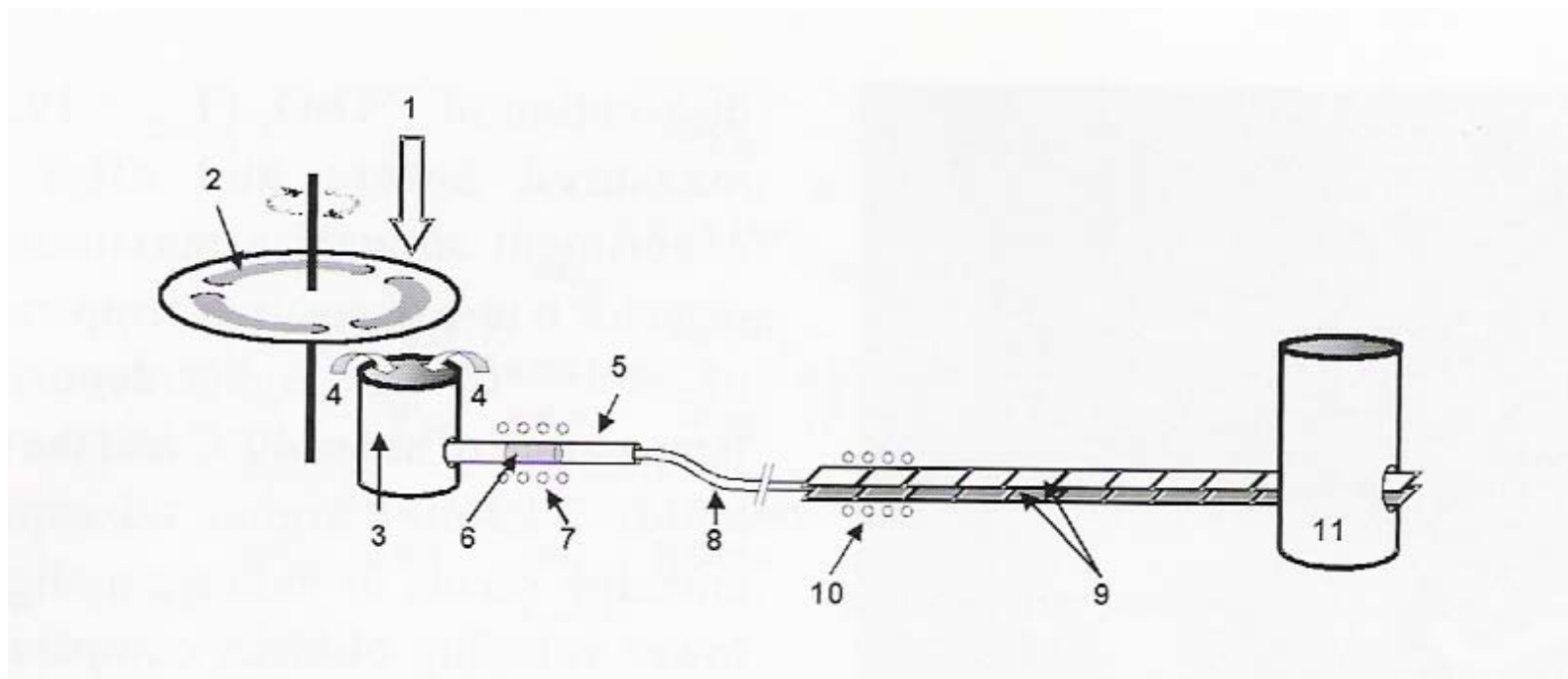
# Układ okresowy pierwiastków

## Periodic Table of the Elements

|             |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |          |           |           |           |           |          |          |         |         |         |         |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1           |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |          |           |           |           |           |          |          | 18      |         |         |         |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1<br>H      | 2        |          |           |           |           |           |           |           |           |           |          |           |           |           |           |          | 13<br>B  | 14<br>C | 15<br>N | 16<br>O | 17<br>F | 18<br>Ne |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3<br>Li     | 4<br>Be  |          |           |           |           |           |           |           |           |           |          | 5<br>B    | 6<br>C    | 7<br>N    | 8<br>O    | 9<br>F   | 10<br>Ne |         |         |         |         |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 11<br>Na    | 12<br>Mg | 3        | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        | 11        | 12       | 13<br>Al  | 14<br>Si  | 15<br>P   | 16<br>S   | 17<br>Cl | 18<br>Ar |         |         |         |         |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 19<br>K     | 20<br>Ca | 21<br>Sc | 22<br>Ti  | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni  | 29<br>Cu  | 30<br>Zn | 31<br>Ga  | 32<br>Ge  | 33<br>As  | 34<br>Se  | 35<br>Br | 36<br>Kr |         |         |         |         |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 37<br>Rb    | 38<br>Sr | 39<br>Y  | 40<br>Zr  | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd  | 47<br>Ag  | 48<br>Cd | 49<br>In  | 50<br>Sn  | 51<br>Sb  | 52<br>Te  | 53<br>I  | 54<br>Xe |         |         |         |         |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 55<br>Cs    | 56<br>Ba | 57-71    | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt  | 79<br>Au  | 80<br>Hg | 81<br>Tl  | 82<br>Pb  | 83<br>Bi  | 84<br>Po  | 85<br>At | 86<br>Rn |         |         |         |         |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 87<br>Fr    | 88<br>Ra | 89-103   | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs |           |           |           |          |           |           |           |           |          |          | 118     |         |         |         |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|             |          |          |           |           |           |           |           | 109<br>Mt | 110<br>Ds | 111<br>Rg | 112      | 113       | 114       | 115       | 116       |          |          |         |         |         |         |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Lanthanides | 57<br>La | 58<br>Ce | 59<br>Pr  | 60<br>Nd  | 61<br>Pm  | 62<br>Sm  | 63<br>Eu  | 64<br>Gd  | 65<br>Tb  | 66<br>Dy  | 67<br>Ho | 68<br>Er  | 69<br>Tm  | 70<br>Yb  | 71<br>Lu  |          |          |         |         |         |         |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Actinides   | 89<br>Ac | 90<br>Th | 91<br>Pa  | 92<br>U   | 93<br>Np  | 94<br>Pu  | 95<br>Am  | 96<br>Cm  | 97<br>Bk  | 98<br>Cf  | 99<br>Es | 100<br>Fm | 101<br>Md | 102<br>No | 103<br>Lr |          |          |         |         |         |         |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |



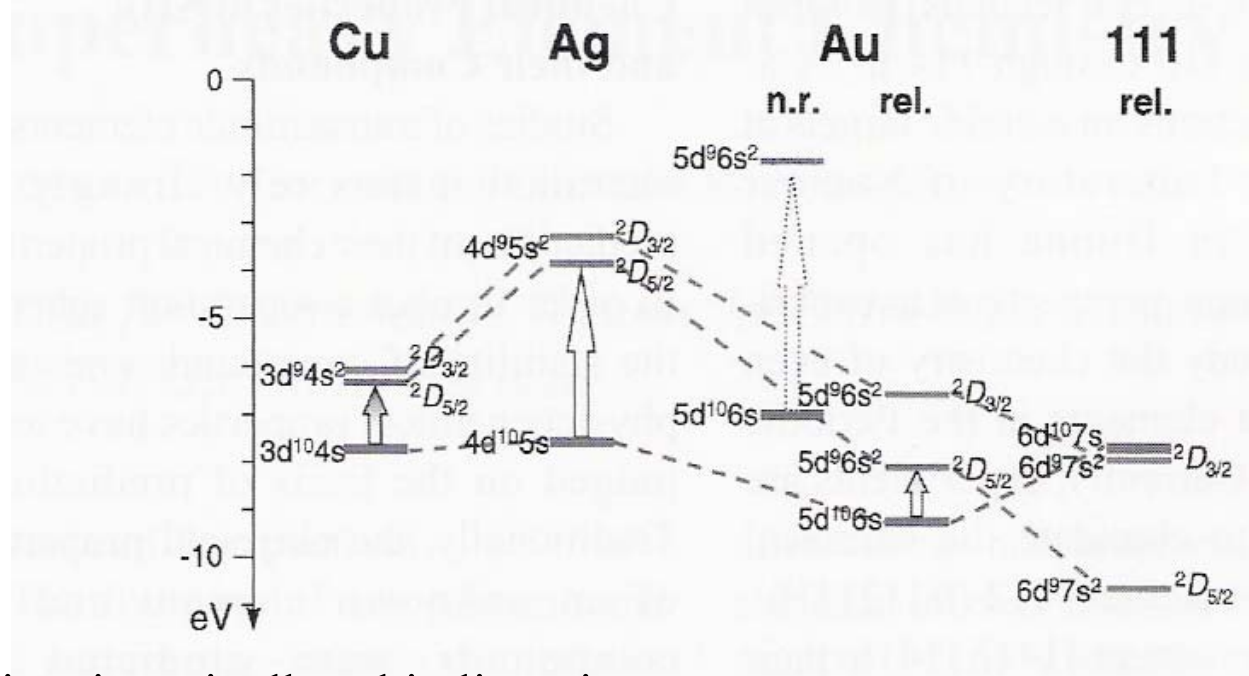
# Metody identyfikacji pierwiastków superciężkich (produkcja pojedynczych atomów)



Jądra Hs utworzone w tarczy (2) ulegają odrzutowi i wpadają w przestrzeń gazu (3), gdzie są przedmuchiwane He lub  $O_2$  (4) do kolumny kwarcowej (5) i ogrzewane (6) do 600 st przez piecyk (7). Tutaj Hs zostaje zamieniony na lotny  $HsO_4$  - i jest transportowany kapilarą (8) do Cryo On-Line Detectora rejestrującego rozpad ( $\alpha$  i rozszczepienie). COLD (9) składa się z 36 detektorów PIN. Termostat (10) utrzymuje temperaturę 20 st.

# Wpływ efektów relatywistycznych na energie poziomów elektronowych i cechy pierwiastków

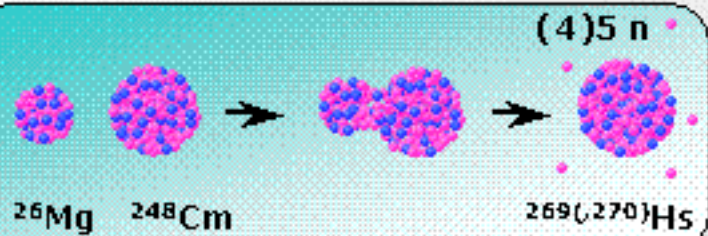
XI - grupa: Cu, Ag, Au, Rg



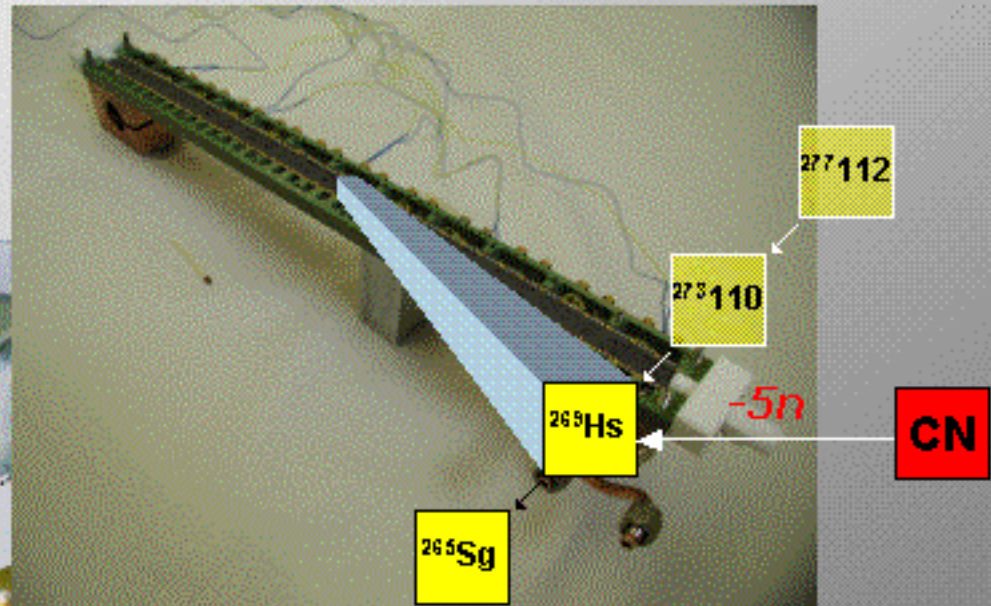
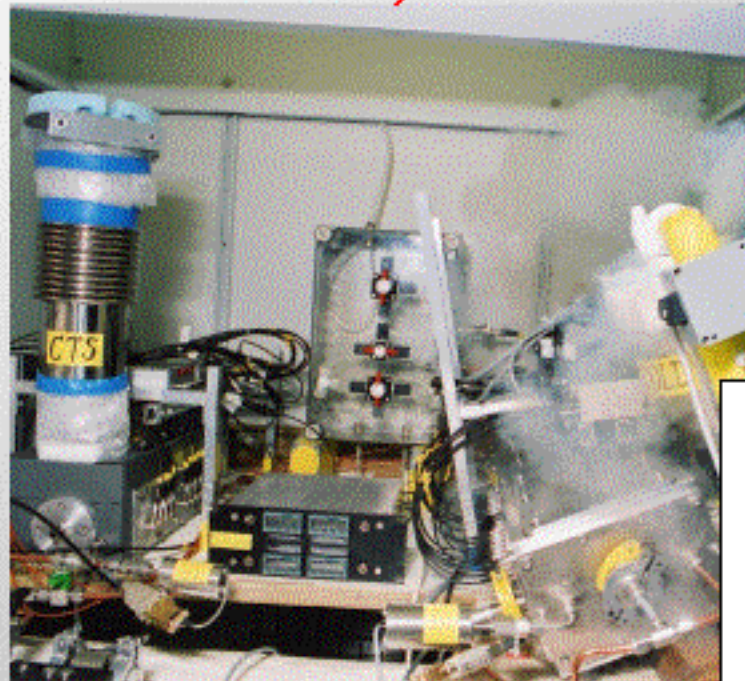
1. zwiększona energia wiązania dla orbitali  $s_{1/2}$  i  $p_{1/2}$
2. rozszczepienie spin-orbita poziomów
3. orbitale d i f są przestrzennie poszerzone

# Confirmation by Chemistry

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



+ chemistry



3 events for  $^{269}\text{Hs}$   
(2 events for  $^{270}\text{Hs}$ ) 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.  $3 \mu\text{b}$  -  $3 \text{nb}$  - pozwala to mierzyć promieniowanie  $\gamma$  i elektrony konwersji wewnętrznej tzw. pomiary in beam
2. Pomiar emitowanych cząstek  $\alpha$  i  $\beta$  oraz rozszczepienia





# Nuclear Structure of the Heaviest Nuclei I:

$\alpha$ - $\alpha$

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

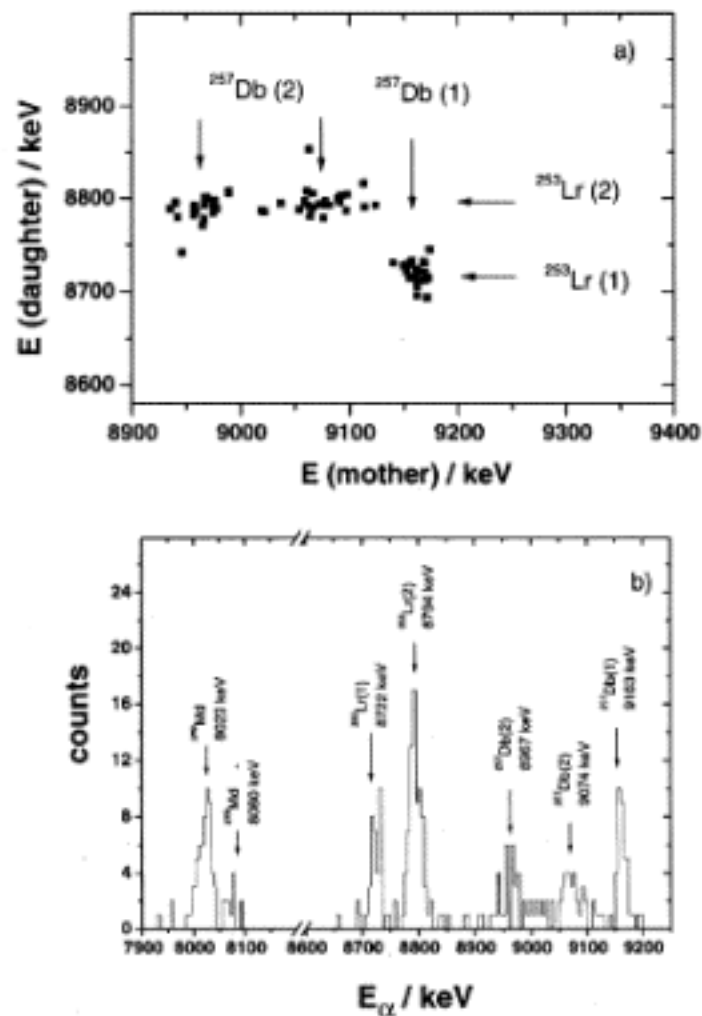


Fig. 3. a)  $\alpha$ - $\alpha$  correlation plot for  $^{257}\text{Db} \rightarrow ^{253}\text{Lr}$ ; b) spectrum of  $\alpha$ -events attributed to  $^{257}\text{Db}$ ,  $^{253}\text{Lr}$  and  $^{249}\text{Md}$ .

# Nuclear Structure of the Heaviest Nuclei I:

$\alpha$ - $\alpha$

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

62

The European Physical Journal A

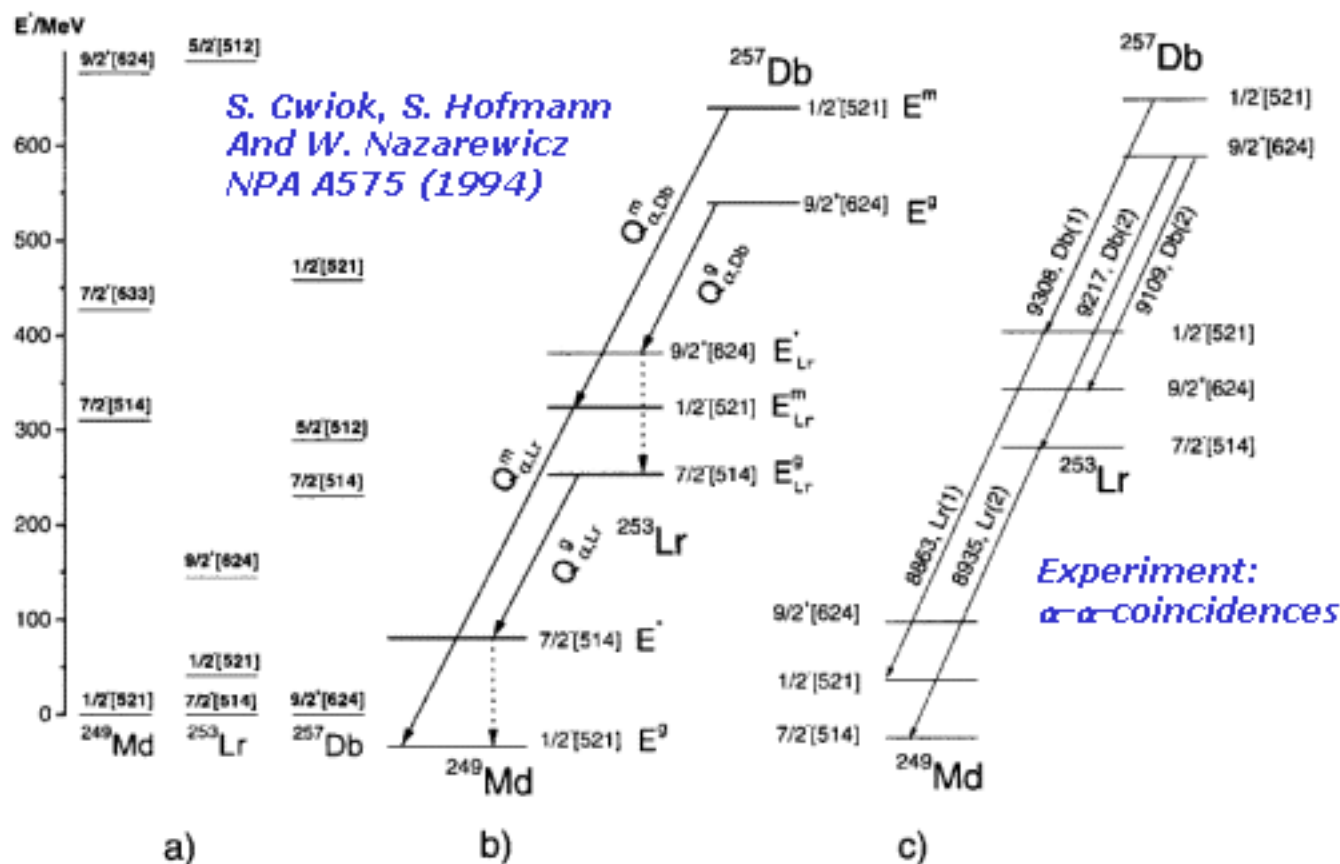


Fig. 4. a) Level schemes predicted for  $^{249}\text{Md}$ ,  $^{253}\text{Lr}$ ,  $^{257}\text{Db}$  according to [3]; b) symbolic decay scheme for  $^{257}\text{Db}$  using level sequences as predicted in ref. [3]; c) tentative decay scheme suggested for  $^{257,257\text{m}}\text{Db}$  on the basis of the observed  $\alpha$ -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 1 pb na reakcję syntezy przy użyciu pocisku  $^{48}\text{Ca}$  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

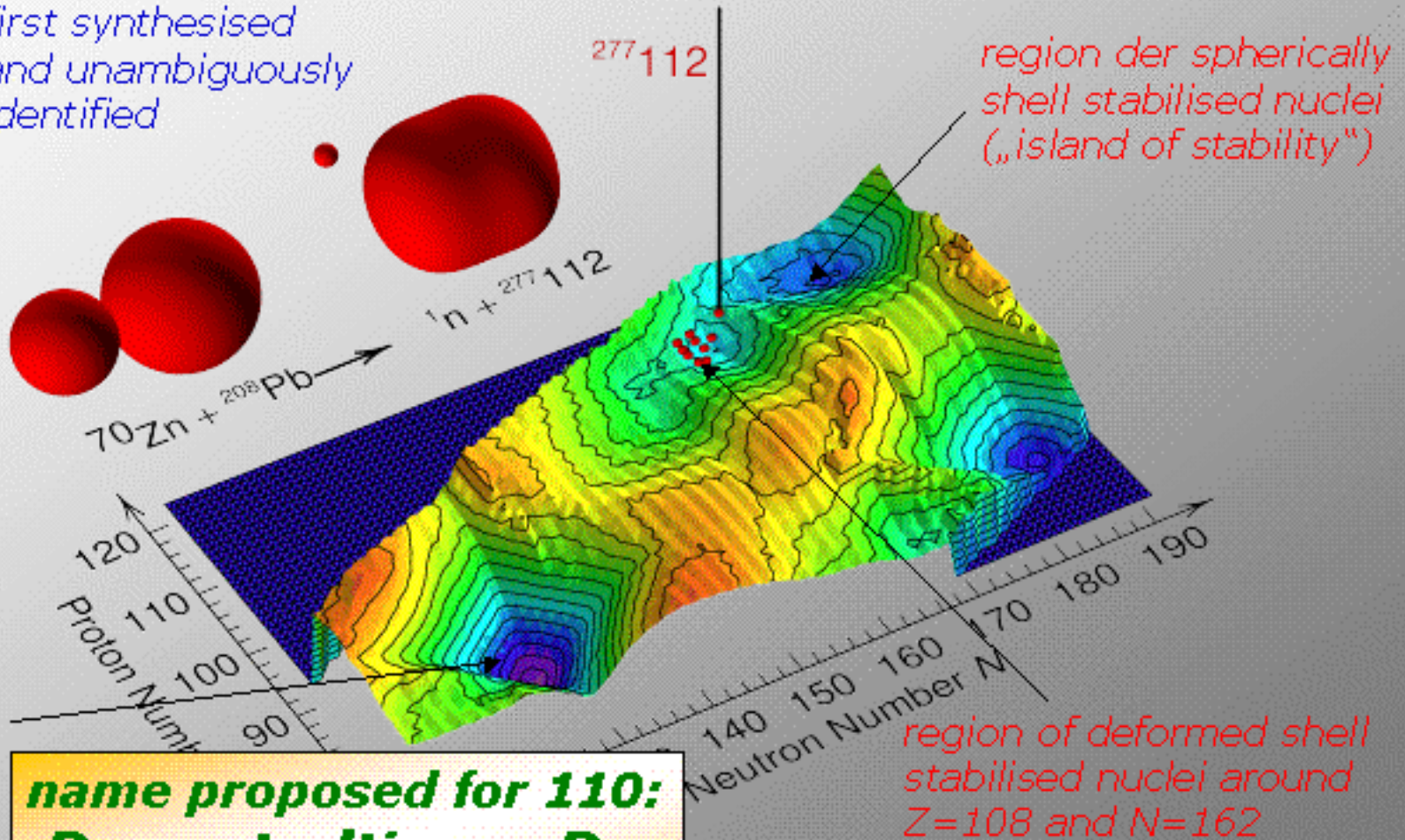
dla  $Z=114, 120$ , lub  $126$  i  $N=184$  lub  $172$  - jądra kuliste

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 $Z \geq 110$

**GSI**

**Hs**

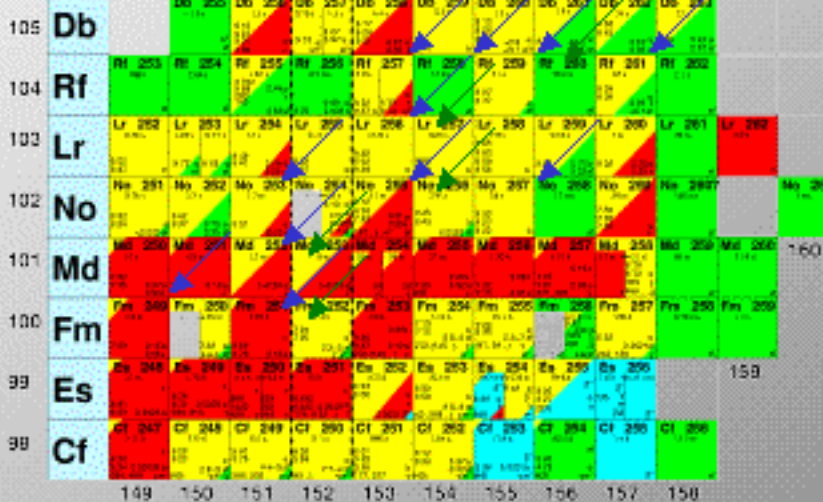
**Bh**

**Sg**

**Mt**

**RIKEN**  
Tokyo, Japan

**JINR/FLNR**  
Dubna, Russia



113 **113**

112 **112**

111 **111**

110 **110**

118 **118**

117 **117**

116 **116**

115 **115**

114 **114**

165 166 167 168 169 170

161 162 163 164

173 174

171 172

175 176

116 292

114 291 114 292 114 293

112 293 112 294 112 295

110 298 110 299

110 297

108 294

106 291

104 288

102 285

100 282

98 279

96 276

94 273

92 270

90 267

88 264

86 261

84 258

82 255

80 252

78 249

76 246

74 243

72 240

70 237

68 234

66 231

64 228

62 225

60 222

58 219

56 216

54 213

52 210

50 207

48 204

46 201

44 198

42 195

40 192

38 189

36 186

34 183

32 180

30 177

28 174

26 171

24 168

22 165

20 162

18 159

16 156

14 153

12 150

10 147

8 144

6 141

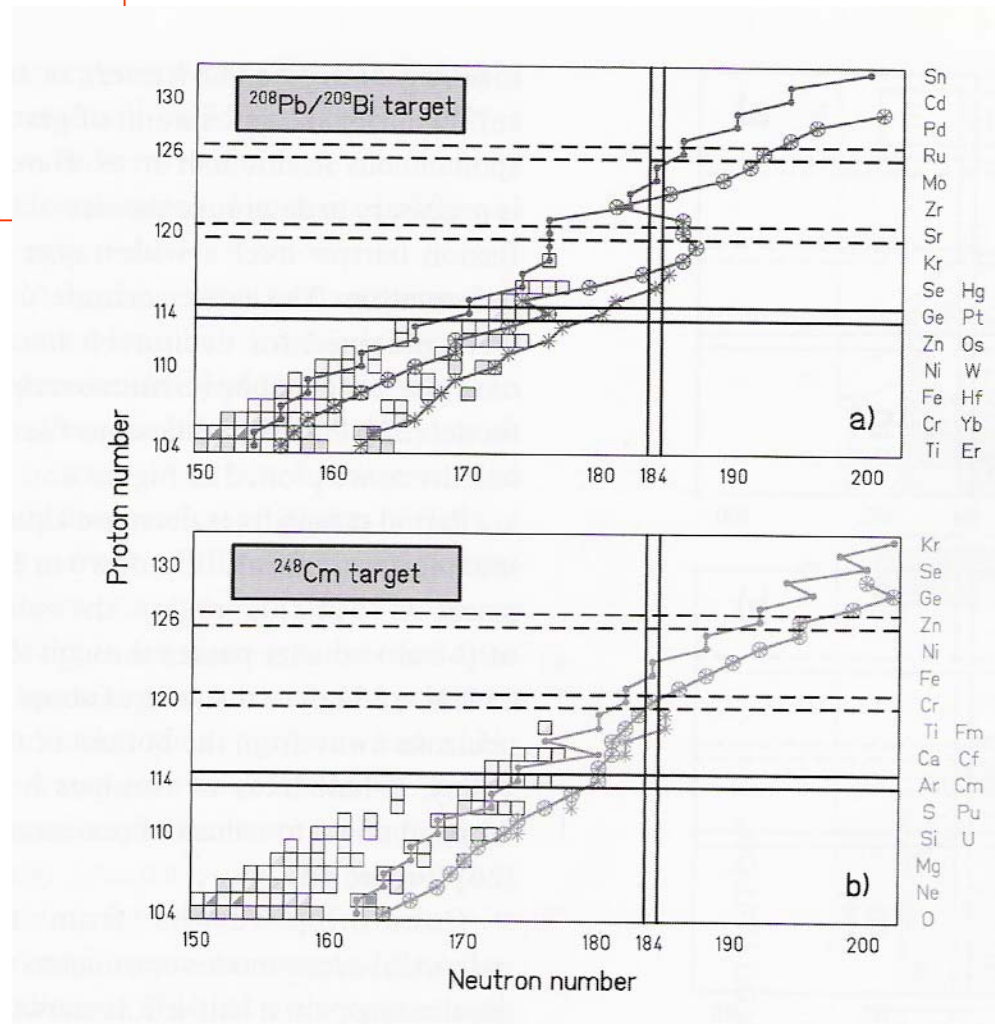
4 138

2 135



# Synteza jąder superciężkich przy użyciu wiązek radioaktywnych

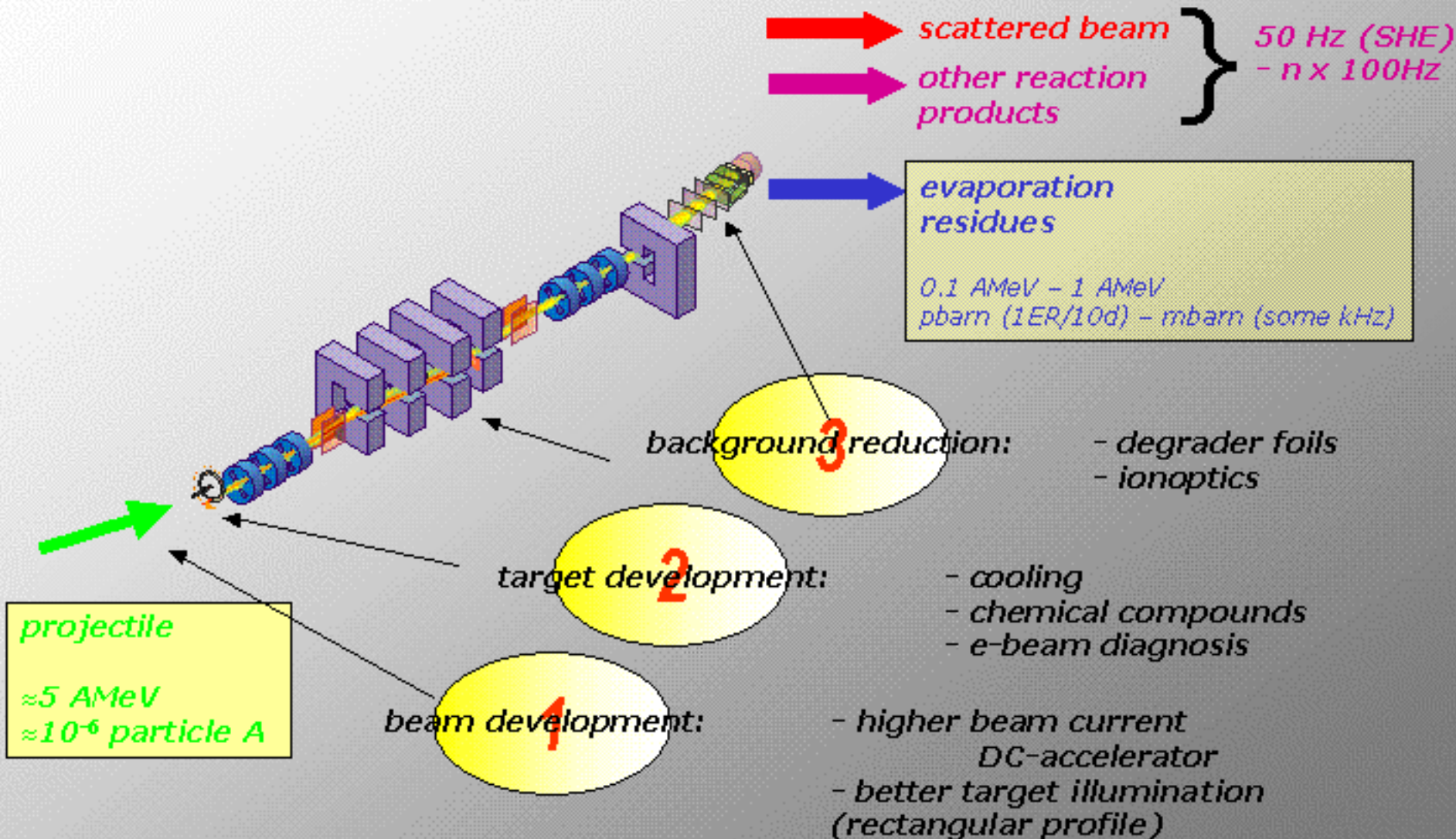
Możliwość przesunięcia granicy syntezy o 4-5n - może dojść do zamkniętej powłoki N = 184 dla lżejszych pierwiastków



# Otwarte pytania

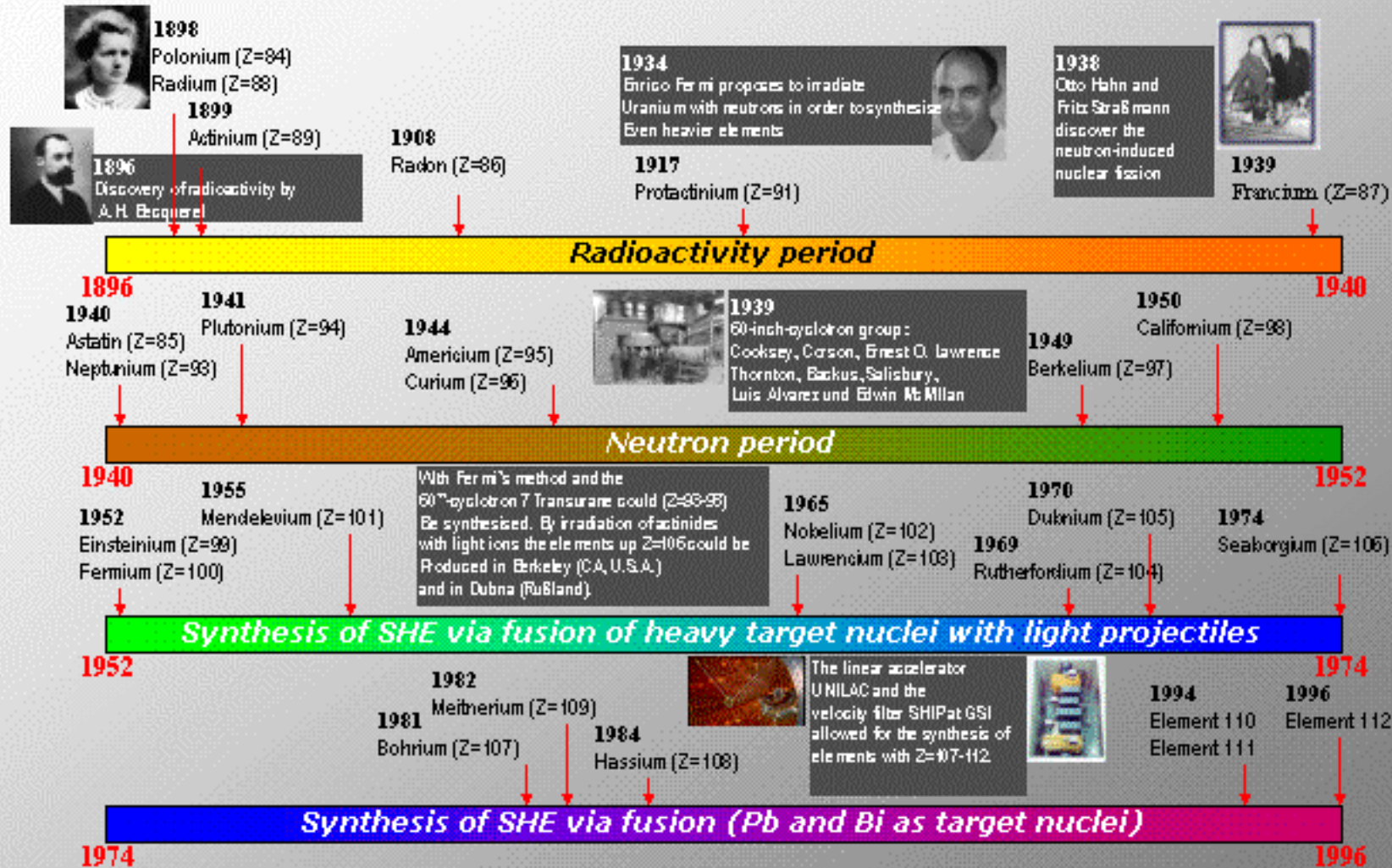
1. Jakie są granice terytorium jąder superciężkich?
2. Jak te jądra mogą wytrzymać ogromne odpychanie kulombowskie?
3. Czy możliwe są egzotyczne konfiguracje?

# SHIP Development





# 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)