

# Symposium SHE 2017

## „Challenges in the studies of super-heavy nuclei and atoms”



Kazimierz Dolny 10-14.09.2017

Organizacja –

UMCS, NCBJ, UW i ZI BJ-Dubna  
ZI BJ – sponsorowało około 70  
uczestników

Statystyka - uczestników 120

referatów 88 (35 - sesje plenarne  
53 - sesje równoległe)

Referaty polskich uczestników

sesje plenarne - 6

sesje równoległe - 7

chairmani - 4 sesje plenarne

# Tematyka:

- Podsumowanie osiągnięć ostatnich lat w produkcji, badaniach własności spektroskopowych, chemicznych i atomowych pierwiastków super-ciężkich.
- Urządzenia badawcze i plany budowy nowych dedykowanych akceleratorów i bardziej wydajnych układów detekcyjnych.
- Teoretyczne metody opisu własności SHE..

Próby odpowiedzi na pytania:

- Jakie są najbardziej efektywne metody wytworzenia nowych nieznanymi pierwiastków i nowych cięższych izotopów znanych pierwiastków?
- Gdzie są granice wyspy stabilności i tablicy nuklidów?
- Jakie są własności jąder i atomów super-ciężkich?

2017


$X + {}^{208}\text{Pb}, {}^{209}\text{Bi}$

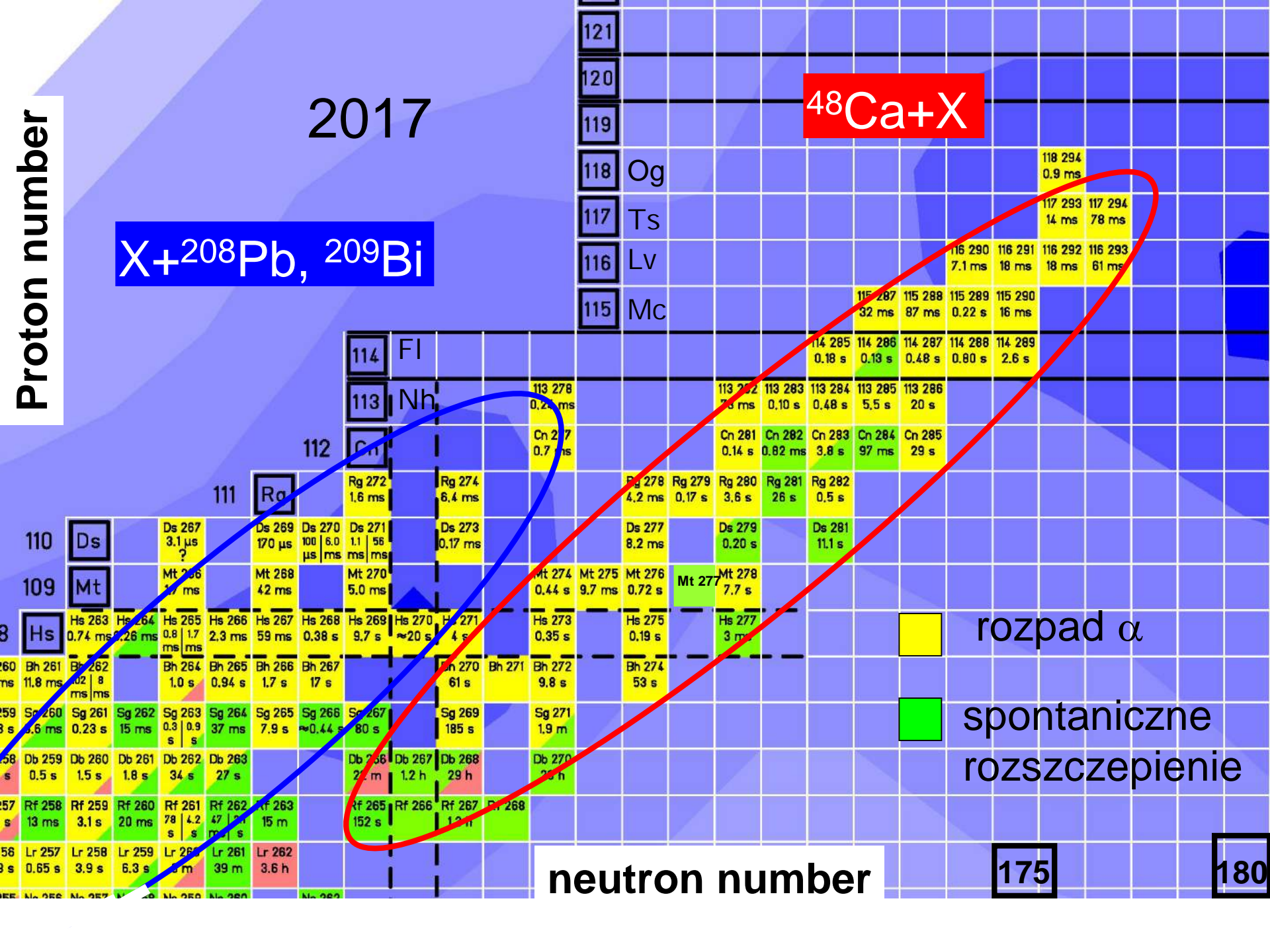
${}^{48}\text{Ca} + X$

Proton number

neutron number

 rozpad  $\alpha$

 spontaniczne rozszczepienie



# Presently Working Experimental Set Ups in the World

Dubna Gas Filled Separator (Russia)	★		Gas - filled	
SHIP (Darmstadt, Germany)	★	✦	Vac. V filter	FPS
Berkeley Gas Filled Separator (USA)	★		Gas - filled	
GARIS (Saitama, Japan)	★		Gas - filled	
VASSILISSA (Dubna, Russia)	★	✦	Vac. E filter → Vac. V filter	FPS
LIZE3 (GANIL, France)	★	✦	Vac. V filter	FPS
RITU (JYFL, Finland)		✦	Gas - filled	RDT + FPS
FMA (Argonne, USA)		✦	Vac. RMS	RDT
JAERI-RMS (Tokai, Japan)	★		Vac. RMS	
TASCA (Darmstadt, Germany)	★	✦	Gas - filled	FPS

★ Heavy element research

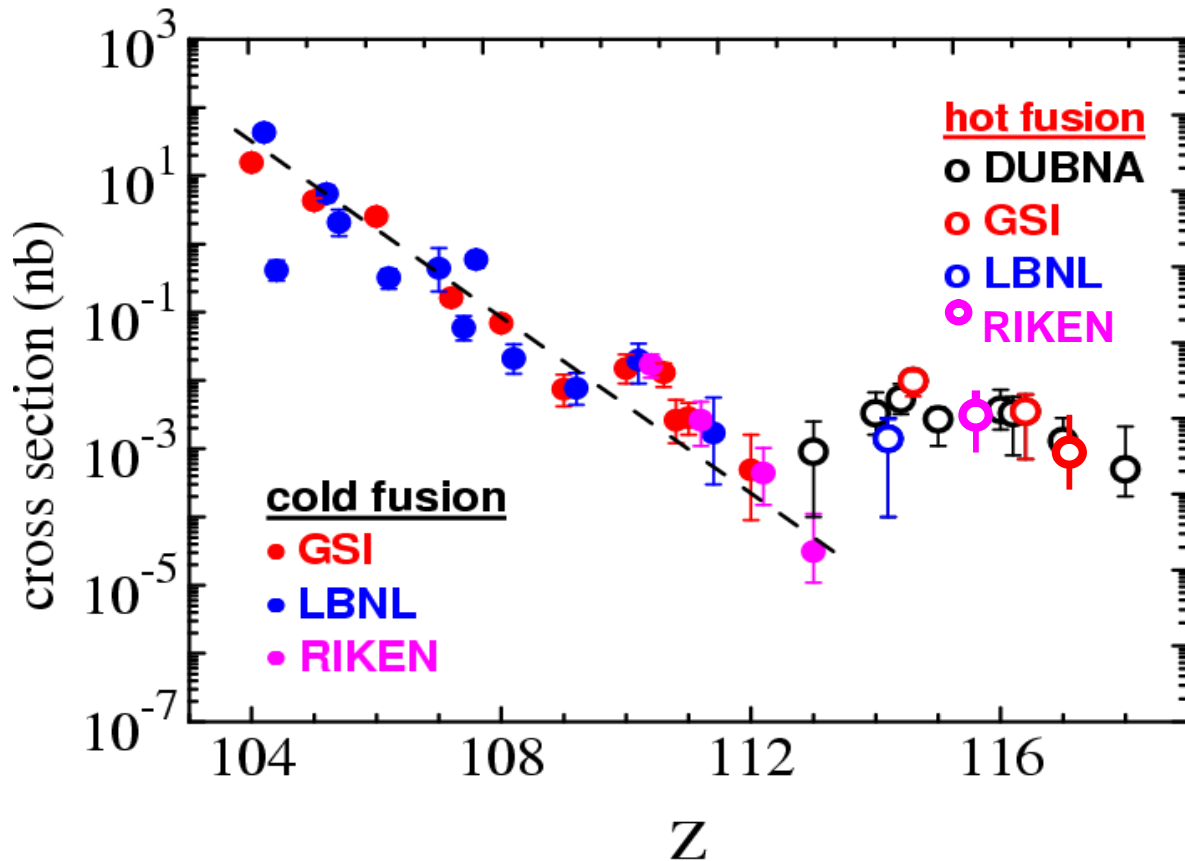
✦ Spectroscopy studies

RDT – Recoil Decay Tagging

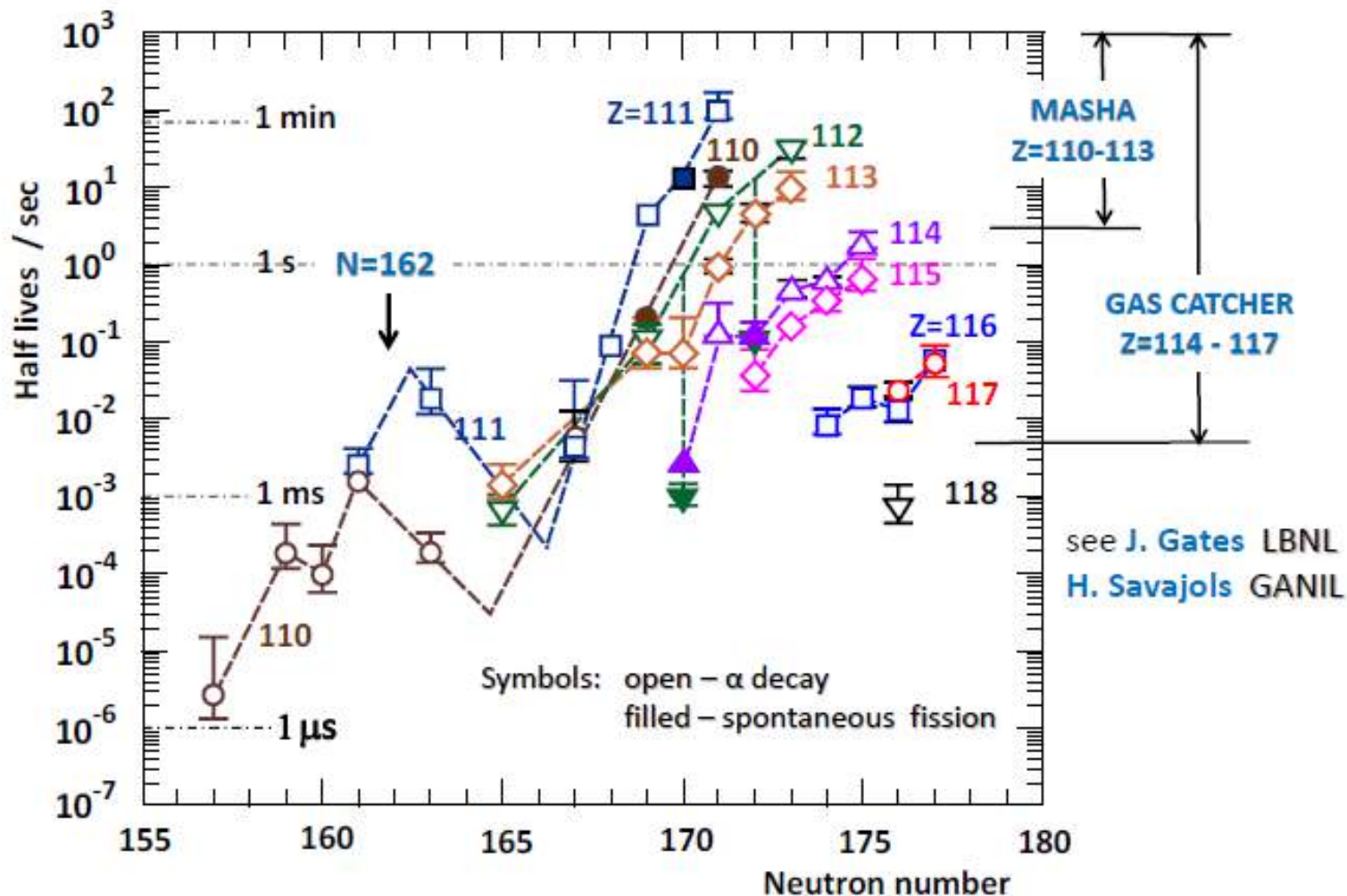
FPS – Focal Plane Spectroscopy

A.V. Yeremin

# Maksymalne eksperymentalne wartości przekrojów czynnych na produkcję SHE



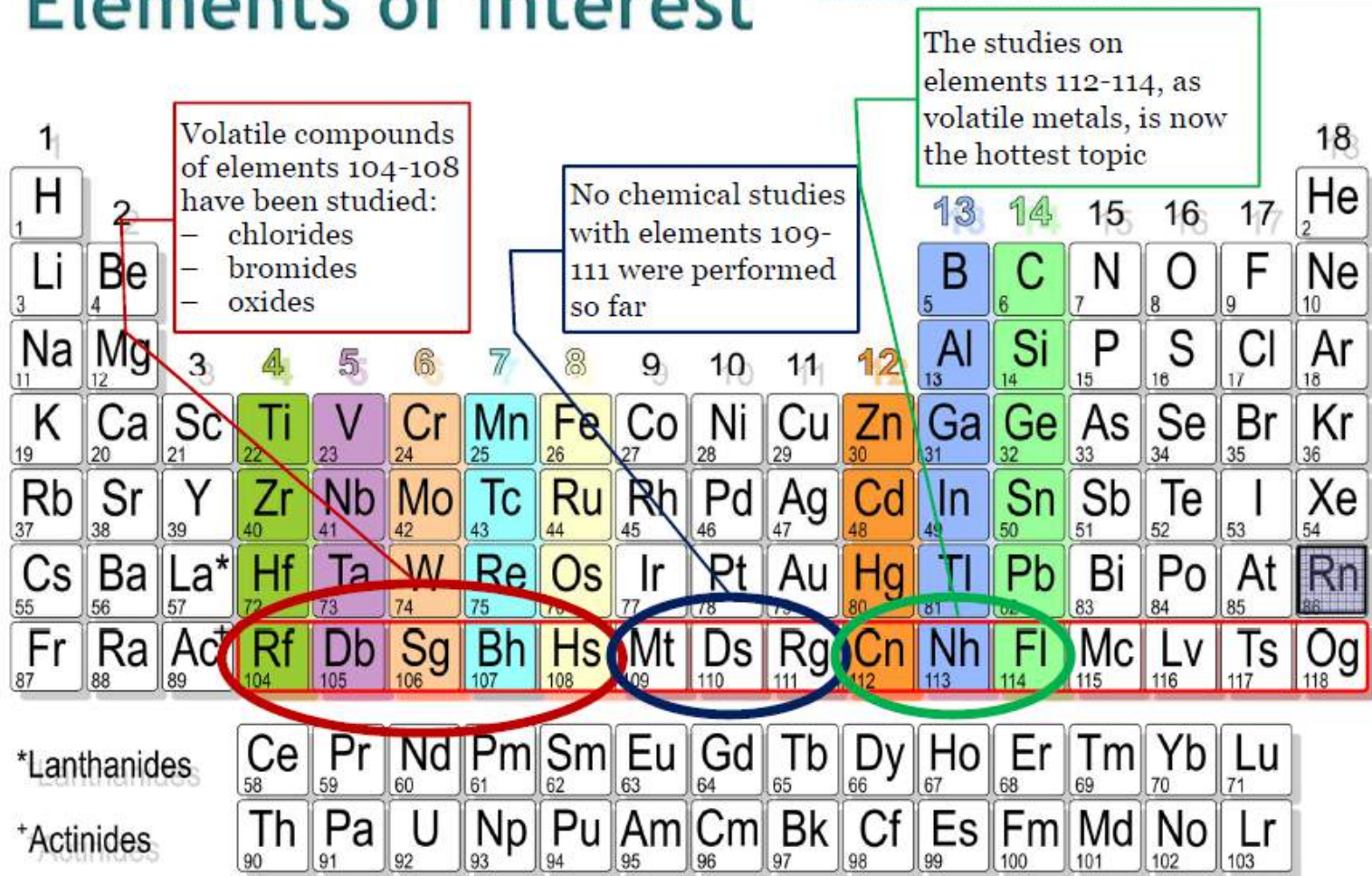
Wniosek: ograniczenia eksperymentalne  $\sigma > 100$  fb  
zwiększyć intensywność wiązki !



Wniosek:  $T_{1/2}$  rośnie ze wzrostem liczby neutronów.  
 $T_{1/2}$  maleje ze wzrostem liczby protonów

# Badania własności chemicznych

## Elements of interest





# Teoria - W. Nazarewicz

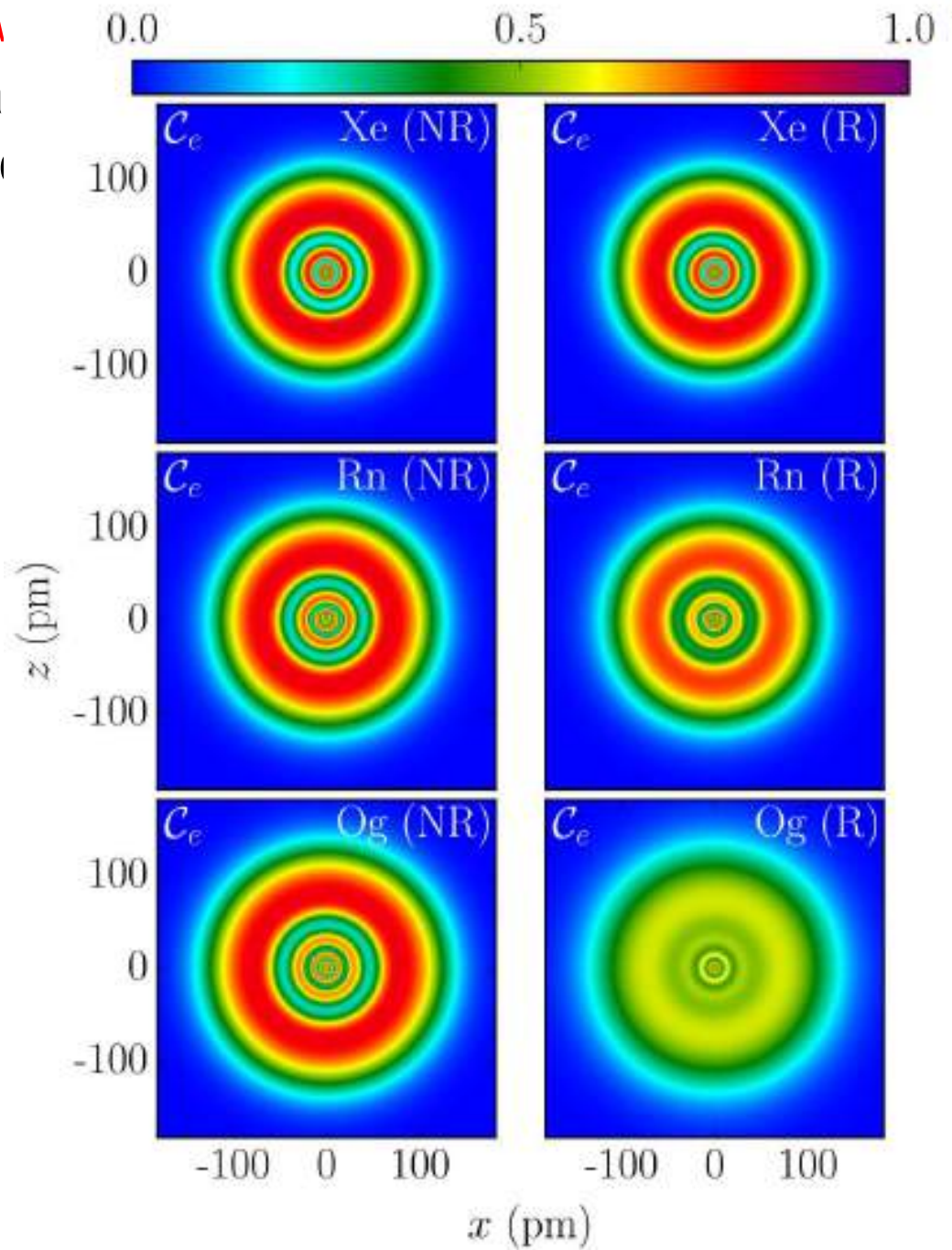
Uwzględnienie efektów relatywistycznych  
położenie orbit elektronowych

W 2013 (grupa NZ)  
uwzględniając efekty relatywistyczne obliczono prawidłową temperaturę topnienia Hg.

Czy Og jest gazem szlachetnym ?

$$T_{\text{Top}} \approx 150^{\circ} \text{ C}$$

$C_e$  - electron localization function  
 $\frac{1}{2}$  - jednorodny gaz Fermiego

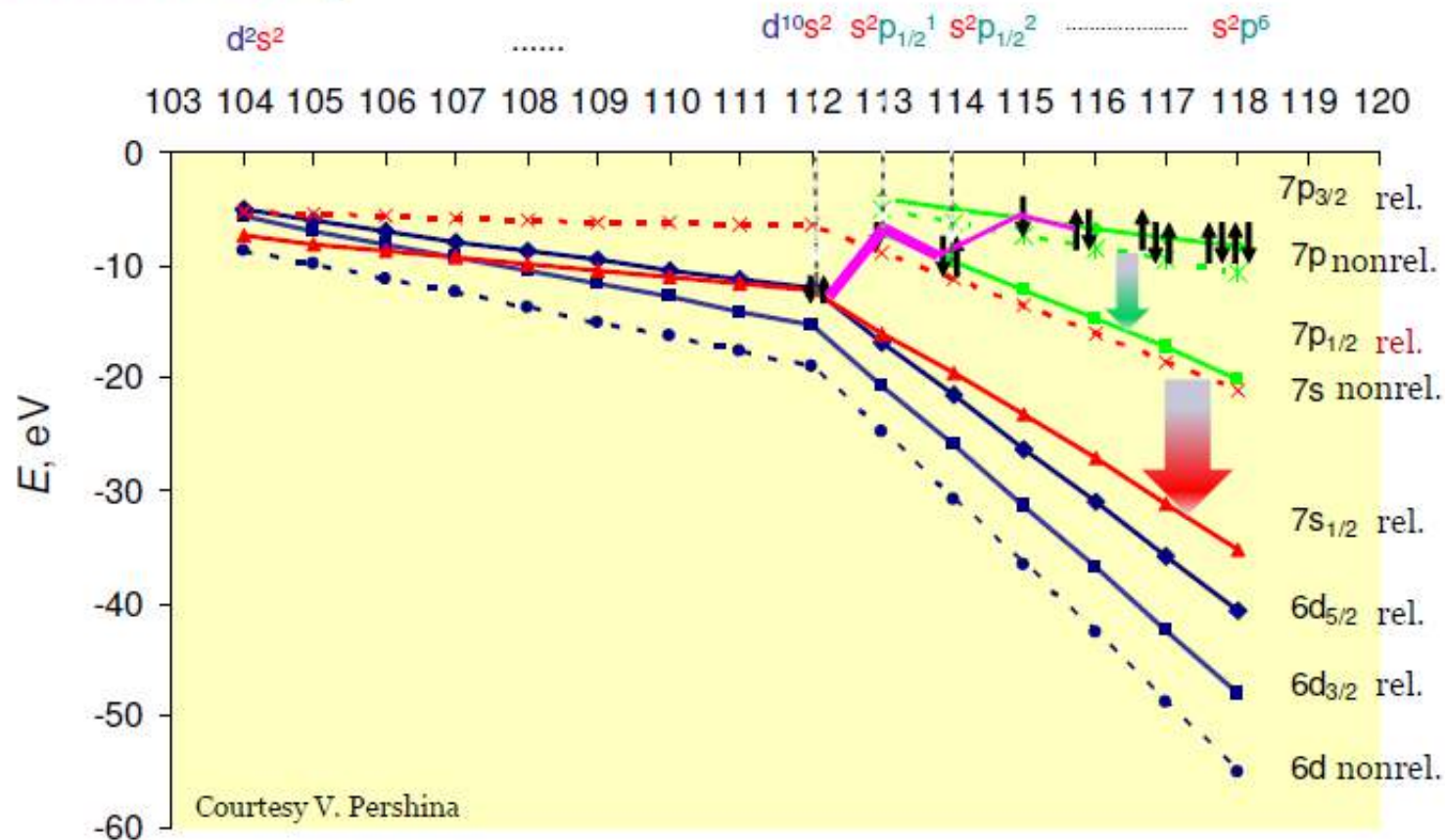


# Efekty relatywistyczne rosną jak $Z^2$

## Relativistic effects in chemistry

linie ciągłe - rel.

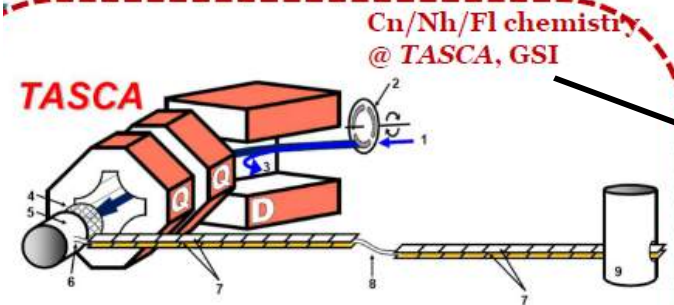
linie przerywane - nonrel.



**7s- and  $7p_{1/2}$ -elements are strongly stabilized due to relativistic effects**  
**Experimental method: adsorption on noble metals from the gas phase**

# Badania własności chemicznych atomów SHE (możliwe dzięki podwójnej separacji – fizyka i chemia)

Dubna, GSI, RIKEN

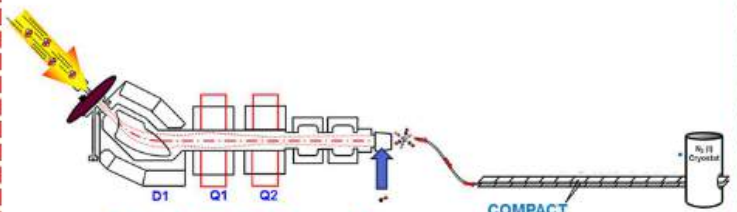


Cn/Nh/FI chemistry  
@ TASCA, GSI

Cn	112	metale
Nh	113	lotne ?
FI	114	

P. Schwerdtfeger

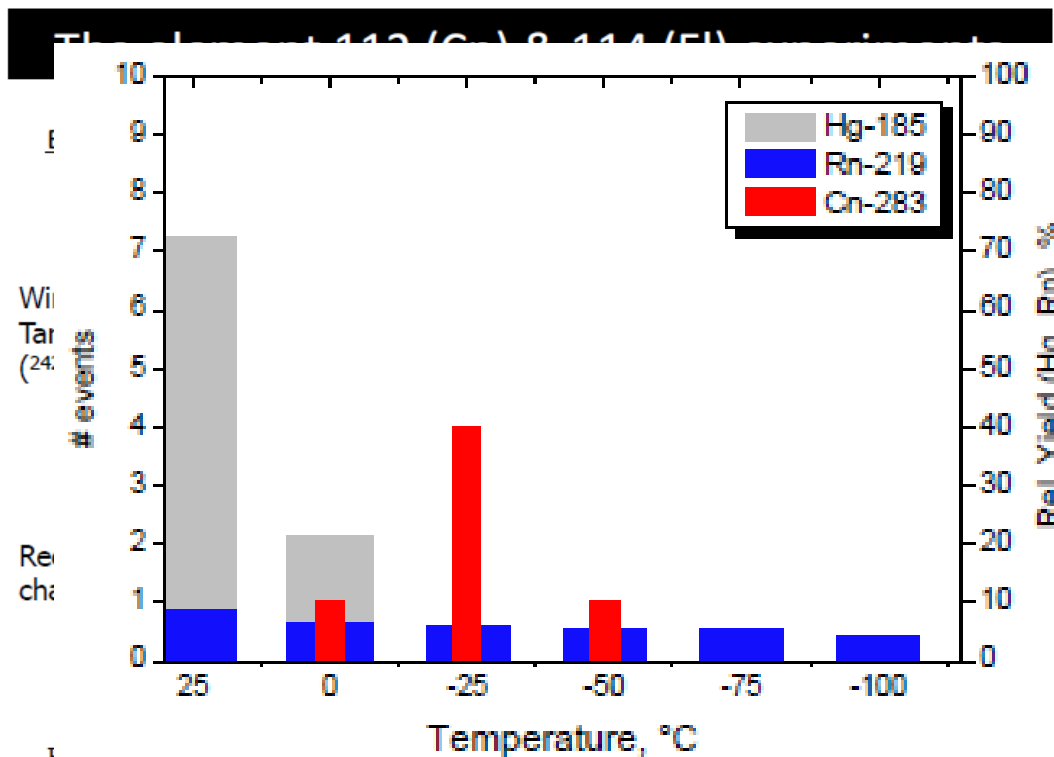
Fl chemistry at TASCA



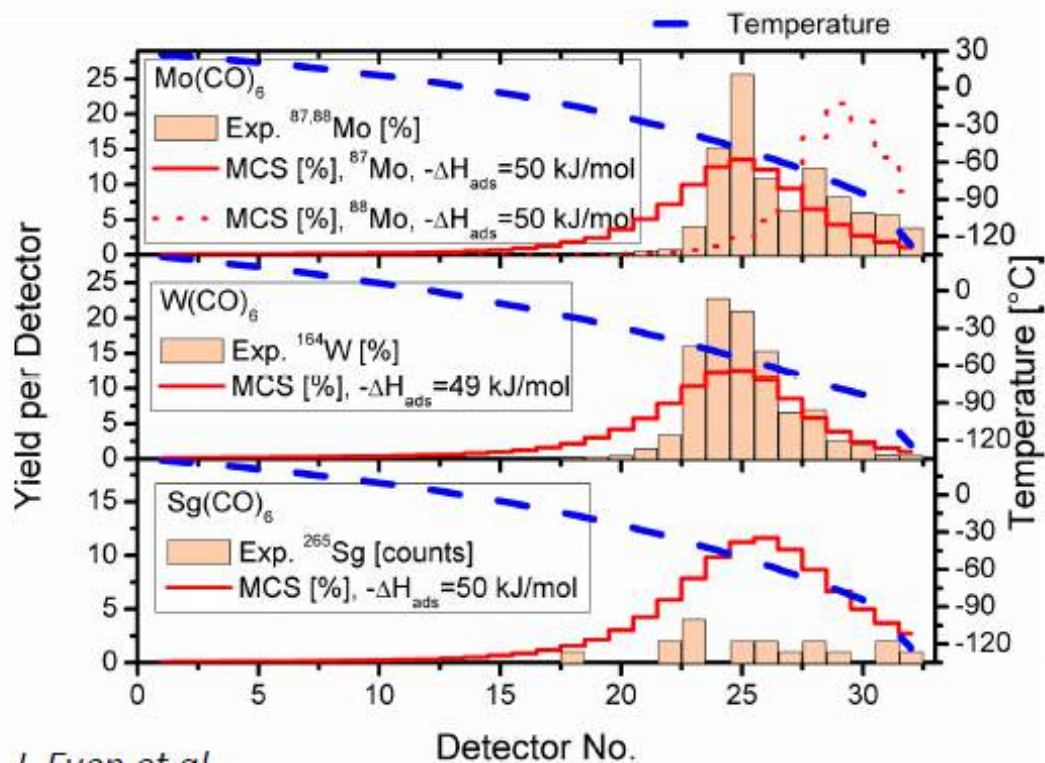
Sg(CO)<sub>6</sub> chemistry  
at GARIS

Sg Z=106

A.V. Yakushev



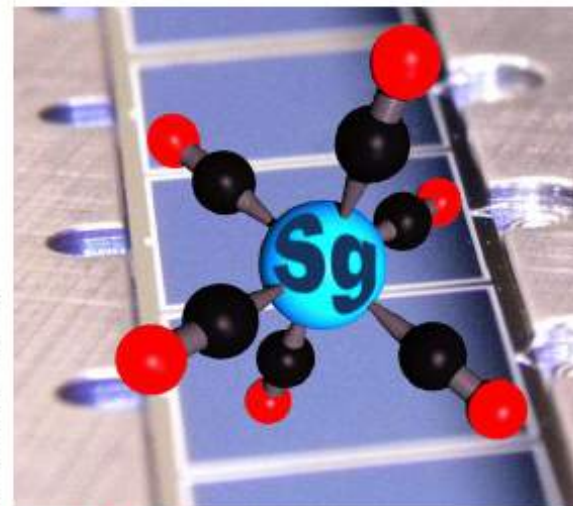
# Comparative studies of Sg with Mo and W



*J. Even et al.*

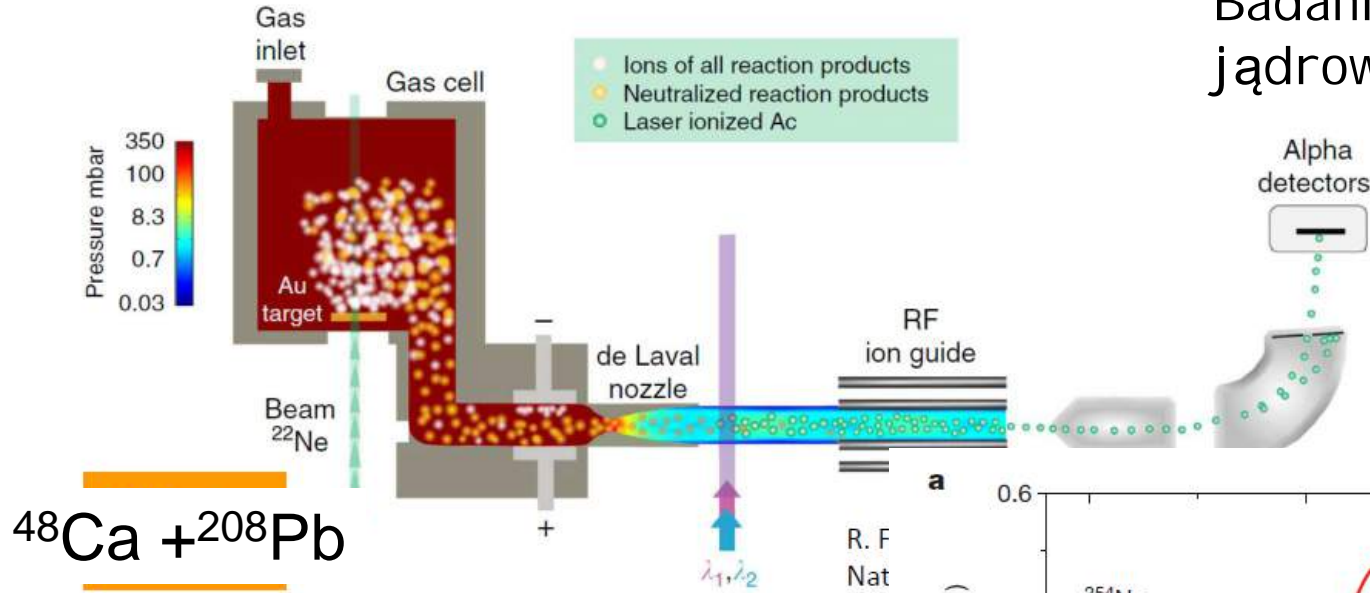
*Science 19 September 2014: Vol. 345 no. 6203 pp. 1491-1493*

**Synthesis and detection of a seaborgium carbonyl complex**



# In-gas-jet laser spectroscopy

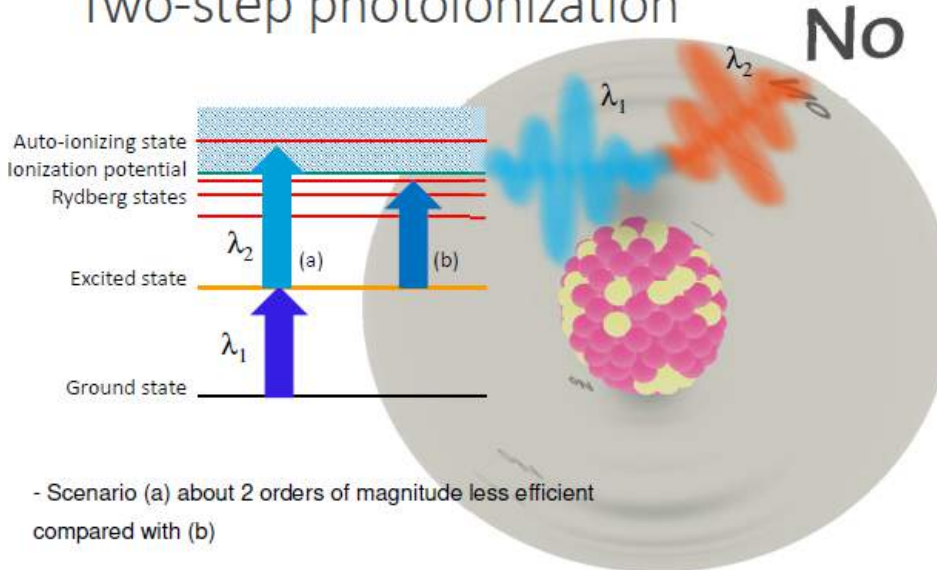
Badania własności  
jądrowych i atomowych



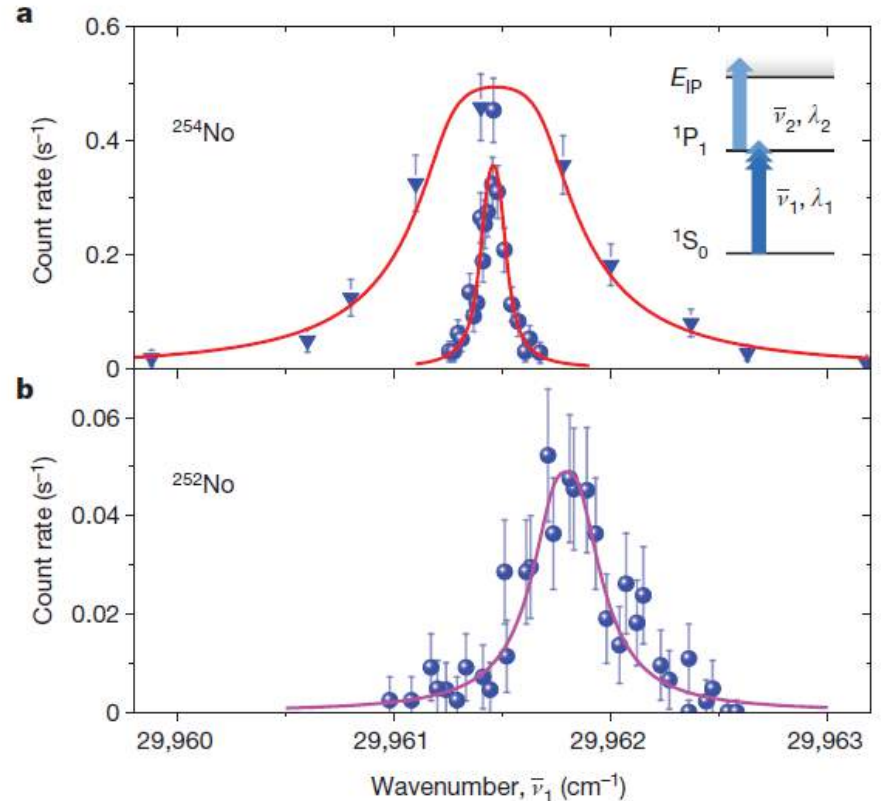
Spectroscopy on  $^{252-254}\text{No}$   
M. Laatiaoui et al.,  
*Nature*, 538 (2016) 495

M. Laatiaoui

Two-step photoionization



- Scenario (a) about 2 orders of magnitude less efficient compared with (b)



- Pomiar mas on line - GSI
- Spektroskopia SHE - GSI, Dubna, Riken  
{koincydencje  $\alpha$ - $\gamma$  (EC), ER- $\gamma$  (EC) }

## Plany na przyszłość:

- Metody wytworzenia nowych nieznanych pierwiastków i nowych cięższych izotopów znanych pierwiastków superciężkich.
- Badania własności spektroskopowych.
- Badania własności atomowych
- Nowe urządzenia badawcze.

# Jak produkować pierwiastki o $Z > 118$ ?

Problemy eksperymentalne:

Wiązka  $^{48}\text{Ca}$  wymaga targetu o  $Z > 98$ .

Możliwości:

Z=99	$^{252}\text{Es}$ , $^{254}\text{Es}$	$T_{1/2} = 472 \text{ d}$ , $275.7 \text{ d}$
Z=100	$^{257}\text{Fm}$	$T_{1/2} = 100.5 \text{ d}$

Alternatywy: cięższe pociski → dużo mniejsze przekroje czynne

Ekperymenty 2007/2008	$^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{302}\mathbf{120^*}$	$\leftarrow ^{58}\text{Fe} + ^{244}\text{Pu}$
	GSI	Dubna

Ograniczenia przekrojów  
czynnych

< 0.1 pb

< 0.4 pb

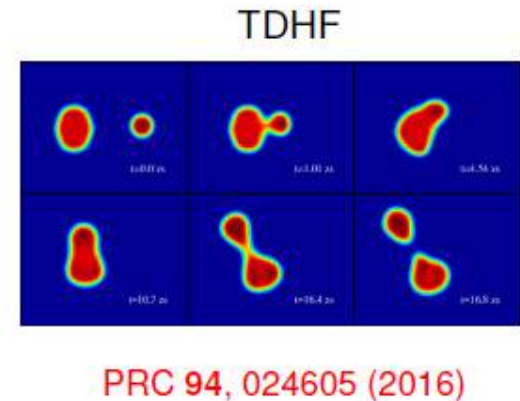
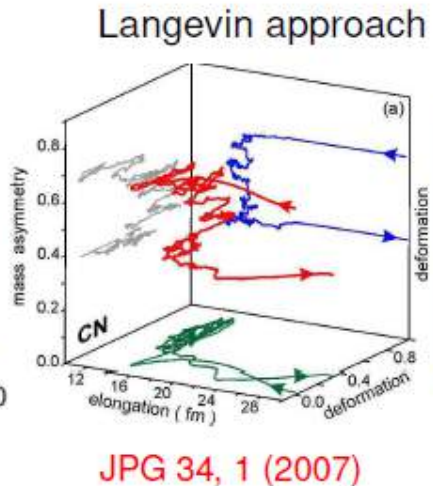
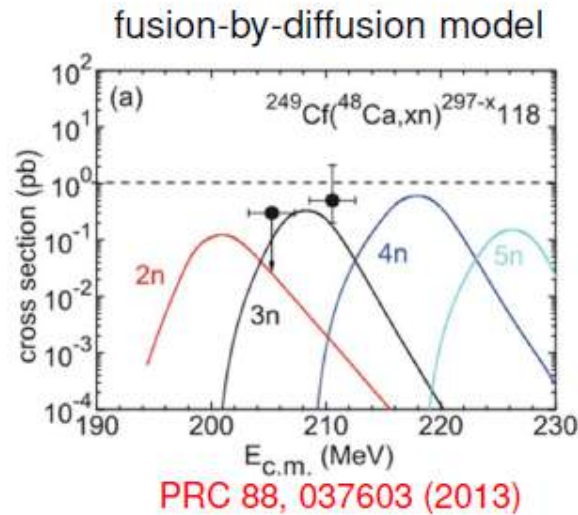
Ekperymenty 2010/2014



Nowy mechanizm reakcji lub intensywniejsze wiązki ?

# How to get there?

A quest for predictive theory of production cross sections (excitation functions)



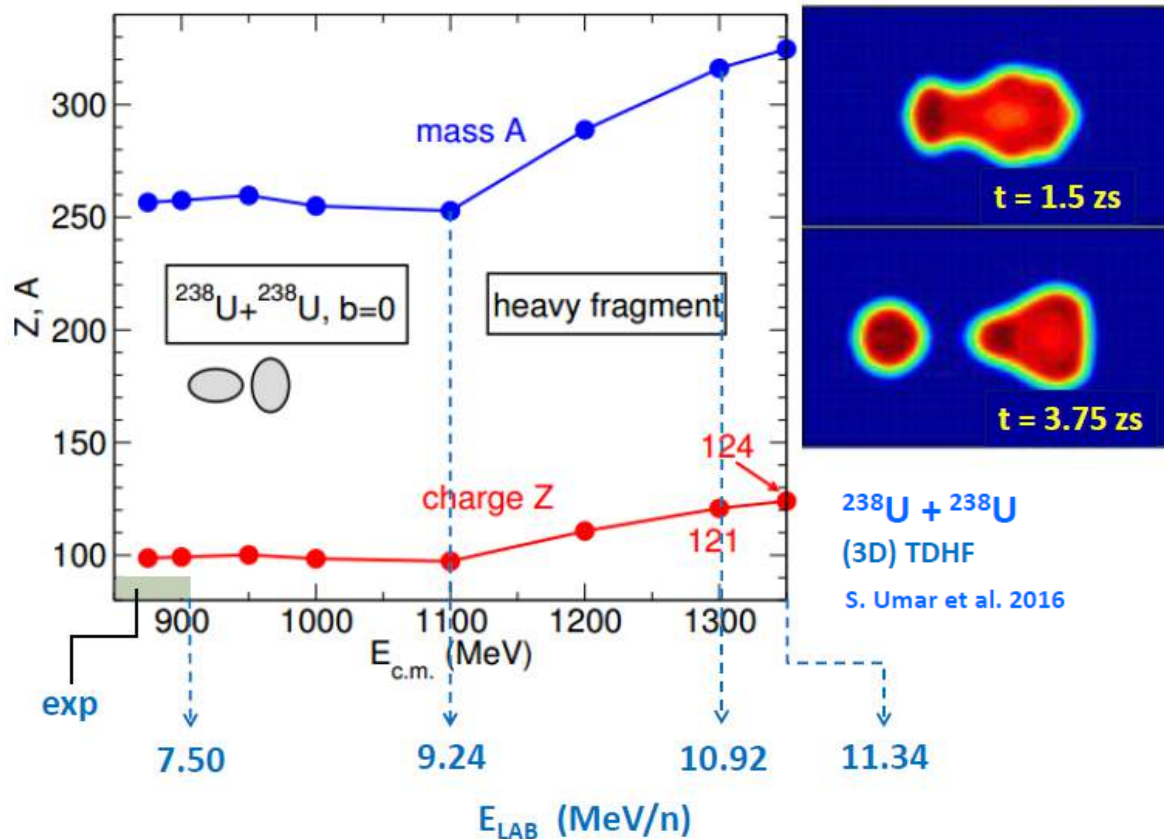
What are best reactions?

- Multi-neutron transfer?
- Exotic beams (far into the future)?
- Is cold fusion really dead?



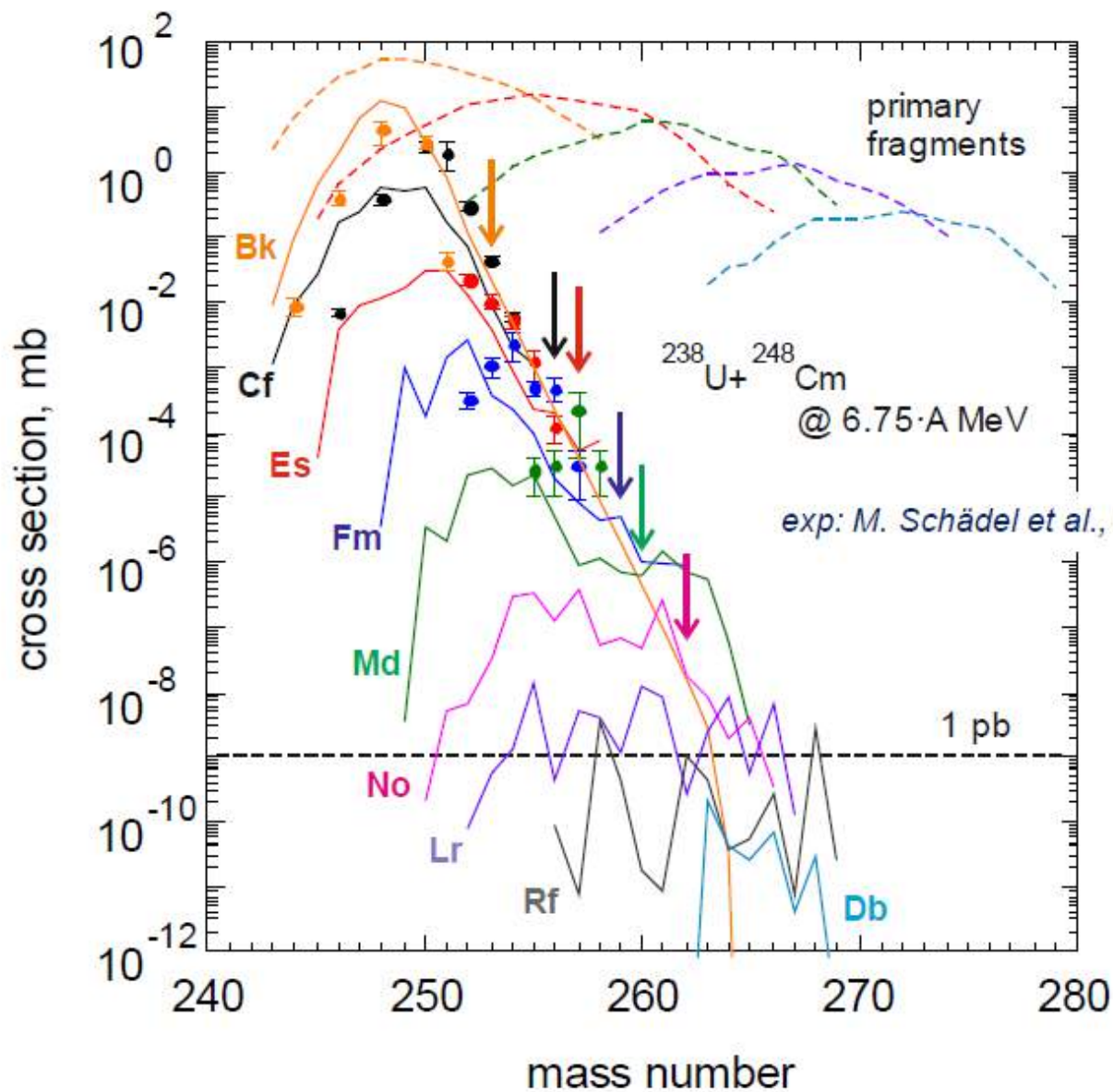


# 3D TDHFB



Yuri Oganessian SHE-2017, Sept. 10-14, 2017, Kazimierz Dolny, Poland

According to the TD HFB calculations of U + U reaction, a super heavy fragment  $Z \approx 120$ ,  $A \approx 300$  may be produced only at the beam energy  $E_{LAB} > 10$  MeV/n with an excitation energy  $E_x > 300$  MeV. The probability of survival of such a nucleus is extremely small.

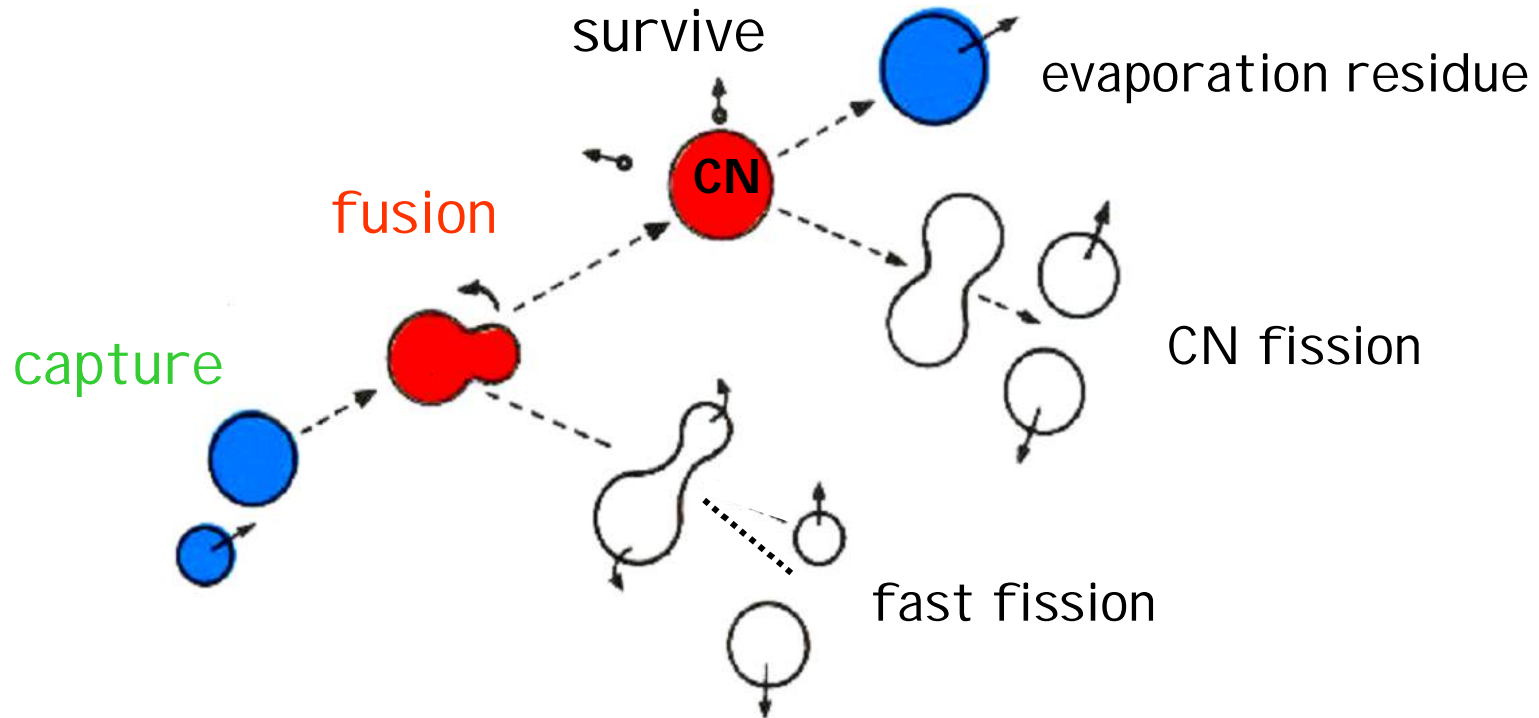


Równania Langevin +  
statystyczny rozpad

Reakcje  
wielonukleonowego  
transferu – nie  
prowadzą do  
produkcji SHE.

A.V. Karpov and V.V. Saiko, Phys. Rev. C 96, 024618 (2017)

# Reakcja fuzja-wyparowanie. Zderzenie jądro-jądro, które może doprowadzić do syntezy SHE.



$$\sigma(\text{synthesis}) = \pi \tilde{\lambda}^2 \sum_{l=0}^{\infty} \sigma_l(\text{cap}) P_l(\text{fusion}) P_{xn}^l(\text{survive})$$

W. J. Świątecki, K. Siwek-Wilczyńska, and J. Wilczyński, *Acta Phys. Pol.* 34, 2049 (2003).

W. J. Świątecki, K. Siwek-Wilczyńska, and J. Wilczyński, *Phys. Rev. C* 71, 014602 (2005).

T. Cap, K. Siwek-Wilczyńska, J. Wilczyński, *Phys. Rev. C* 83, 054602 (2011)

K. Siwek-Wilczyńska, T. Cap, et al., *Phys. Rev. C* 86 014611 (2012)

FBD

$$\sigma(\text{synthesis}) = \pi \hat{\lambda}^2 \sum_{l=0}^{l_{\max}} (2l+1) P_l(\text{fusion}) P_l(\text{survive})$$

$l_{\max}$  - obliczone z wartości przekroju czynnego na wychwyty (capture).

$$\sigma_{cap}(E) = \pi \hat{\lambda}^2 \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l \approx \pi \hat{\lambda}^2 (l_{\max} + 1)^2$$

pół-empiryczna formuła

$$\sigma_{cap}(E) = \pi R_{\sigma}^2 \left[ X \sqrt{\pi} (1 + \text{erf } X) + \exp(-X^2) \right] \frac{w}{E \sqrt{2\pi}}$$

$$\text{gdzie: } X = \frac{E - B_0}{\sqrt{2w}}, \quad \text{erf } X - \text{ Gaussowska funkcja błędu}$$

Formuła wyprowadzona przy założeniu:

- Gaussowskiego kształtu rozkładu barier na reakcje fuzji
- Klasycznej formuły  $\sigma_{fus}(E, B) = \pi R^2 (1 - B/E)$

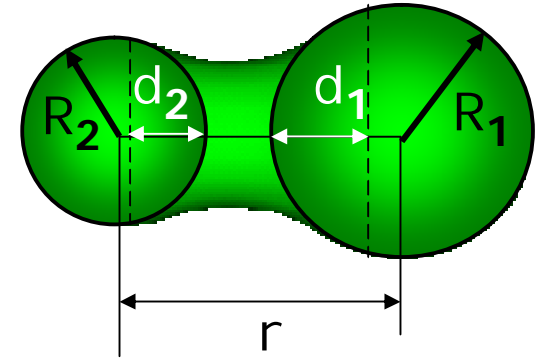
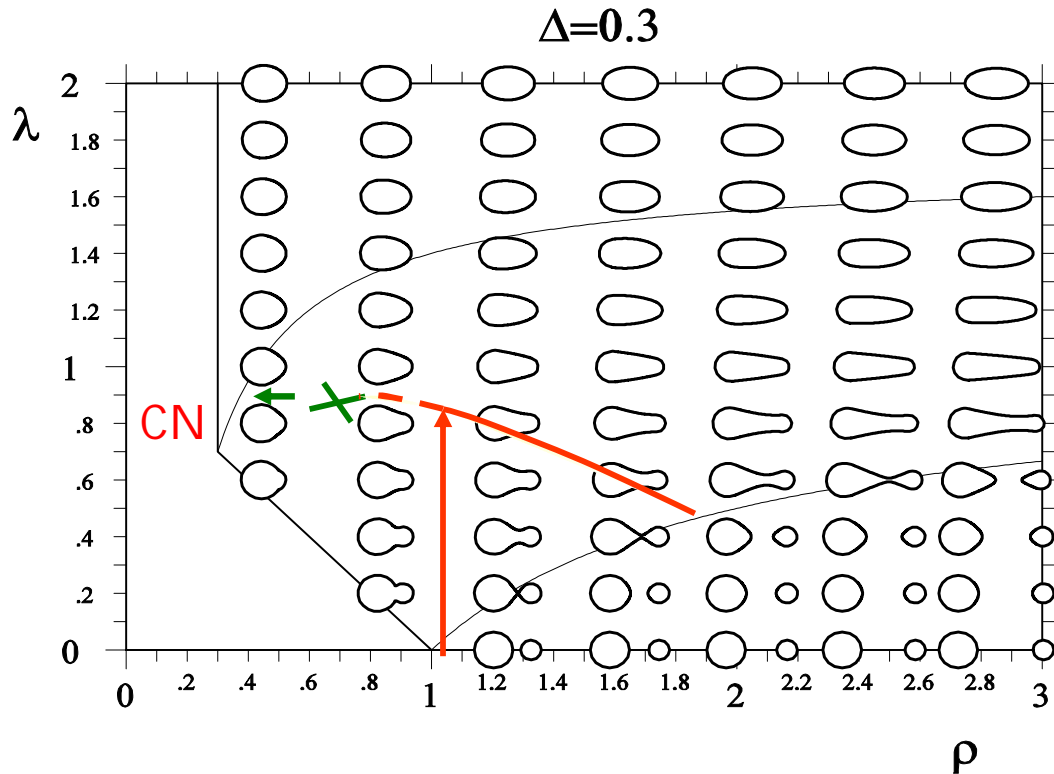
W. Świątecki, K. Siwek-Wilczyńska, J. Wilczyński Phys. Rev. C 71 (2005) 014602,  
Acta Phys. Pol. B34(2003) 2049

Systematyka 3 parametrów  $B_0$ ,  $w$ ,  $R_{\sigma}$  uzyskana poprzez dopasowanie formuły do 48 eksperymentalnie wyznaczonych około barierowych krzywych wzbudzenia na reakcje fuzji w zakresie  $40 < Z_{CN} < 98$

(K. Siwek-Wilczyńska, J. Wilczyński Phys. Rev. C 69 (2004) 024611)

# $P_f(\text{fusion})$

J. Błocki, W. J. Świątecki, Nuclear Deformation Energies, Report LBL 12811 (1982)



Równanie dyfuzji Smoluchowskiego  
dla potencjału parabolicznego

$$P_f(\text{fusion}) = \frac{1}{2}(1 - \text{erf}\sqrt{H_f/T})$$

$H_f$  - bariera dla fuzji  
 $T$  - temperatura układu

$\lambda = (d_1 + d_2)/(R_1 + R_2)$  - parametr  
charakteryzujący szyjkę

$\rho = r/(R_1 + R_2)$  - odległość środków kul

$\Delta = (R_1 - R_2)/(R_1 + R_2)$  - parametr asymetrii

# $P_l(\text{survive})$ – model statystyczny

Dane wejściowe - dla wszystkich jąder w kaskadzie deekscytacji

- masy w stanie podstawowym,
- bariery na rozszczepienie,
- poprawki powłokowe oraz deformacje jąder (w stanie podstawowym i siodle).

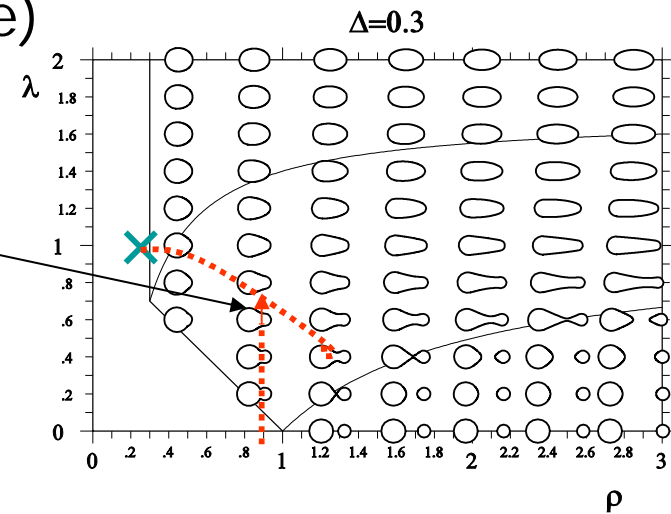
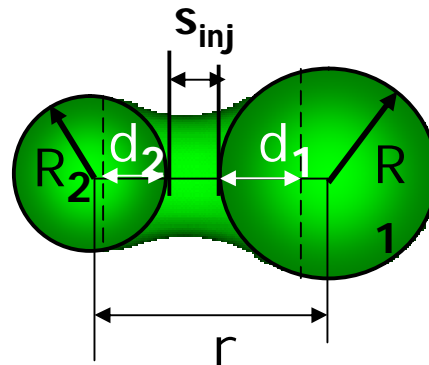
W naszych obliczeniach używaliśmy danych wyznaczonych z użyciem warszawskiego modelu mikro-makro z uwzględnieniem kształtów nieosiowych.

M. Kowal, P. Jachimowicz, A. Sobiczewski, Phys. Rev. C82 (2010) 014303

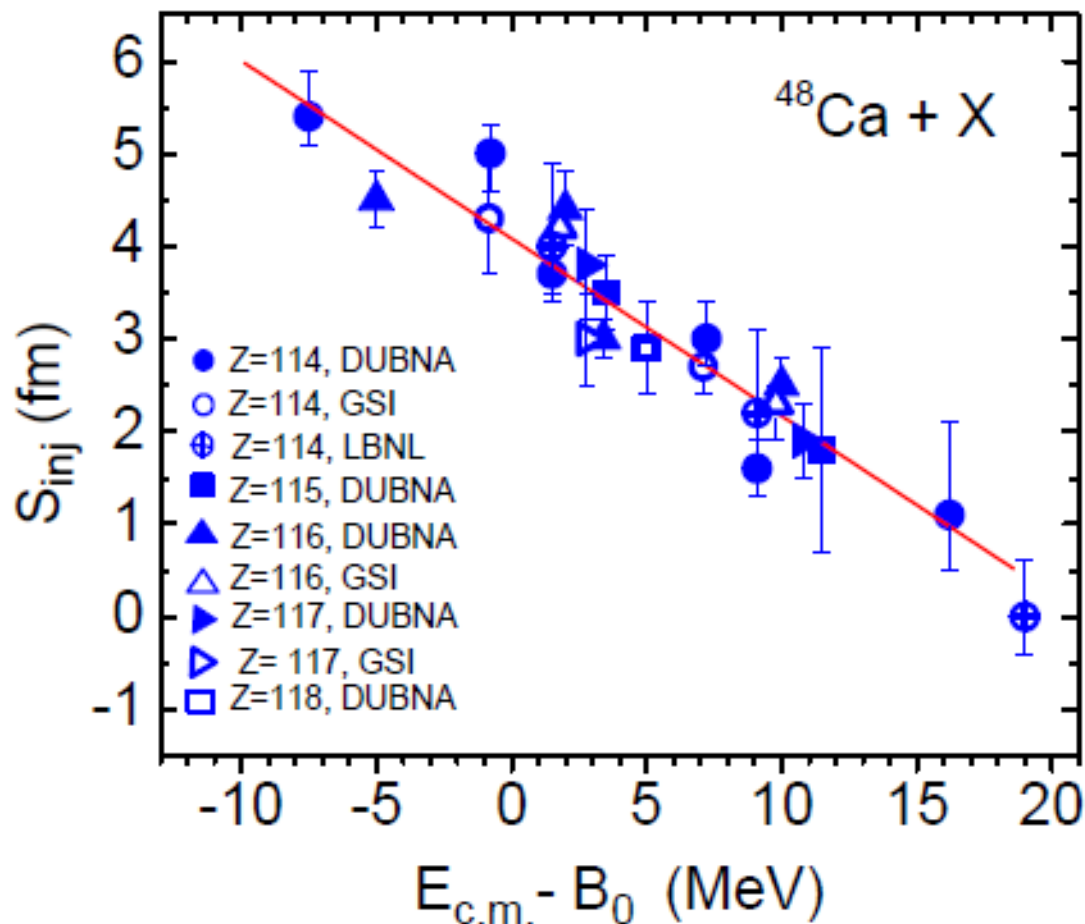
M. Kowal, P. Jachimowicz, J. Skalski, arXiv:1203.5013

P. Jachimowicz, M. Kowal, J. Skalski (to be published)

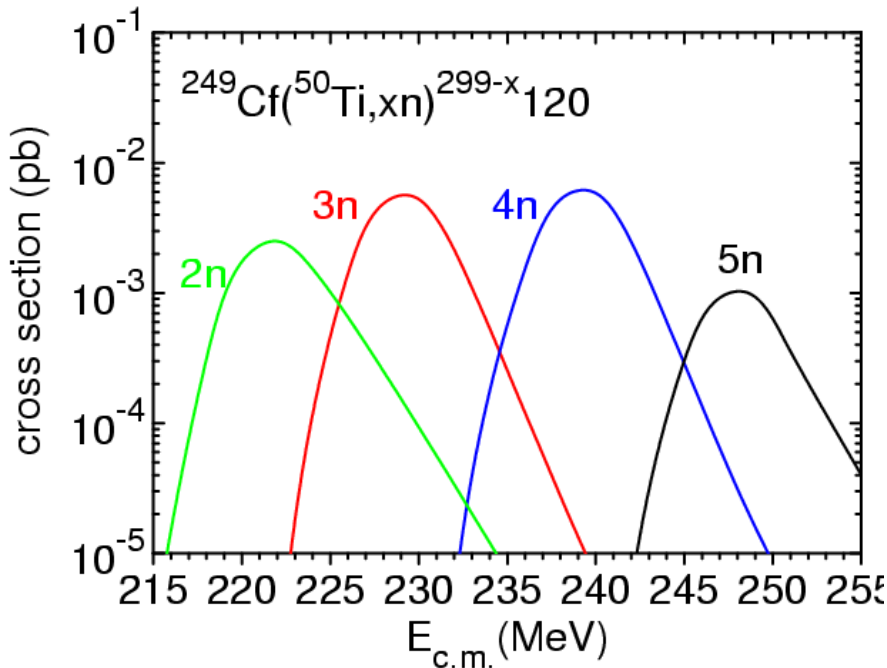
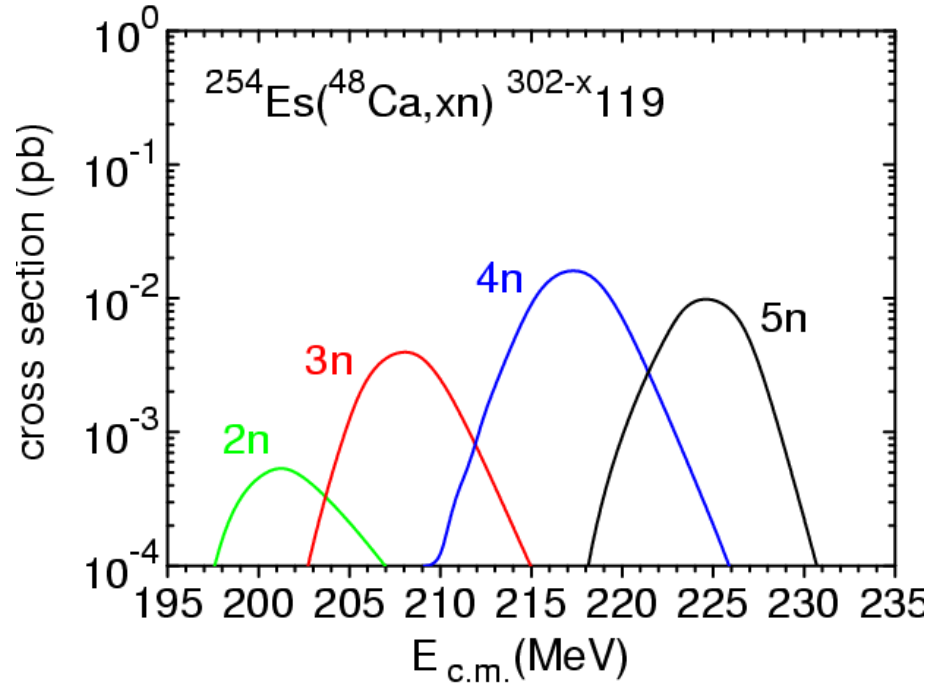
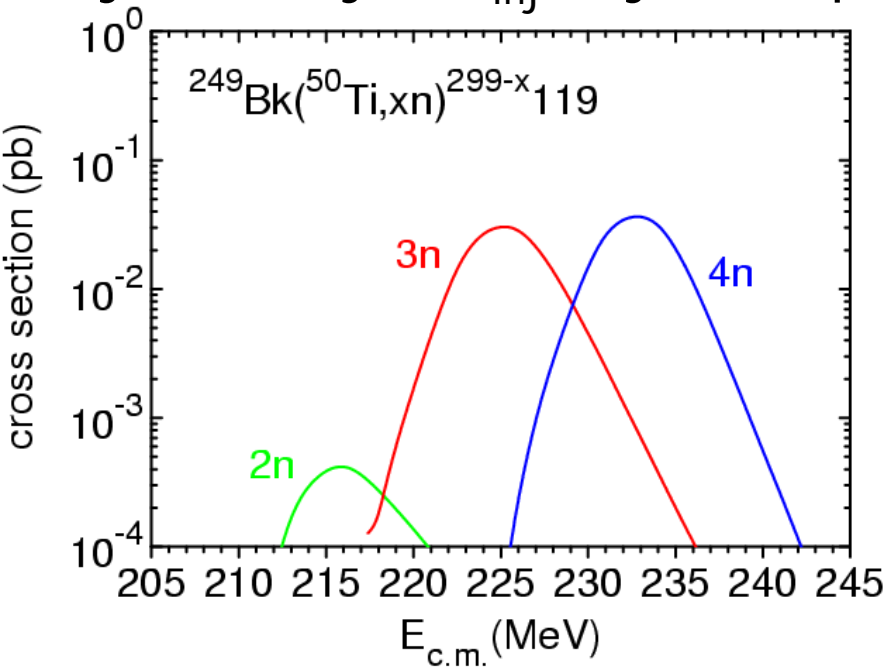
$$\sigma(\text{synthesis}) = \pi \hat{\lambda}^2 \sum_{l=0}^{l_{\max}} (2l+1) P_l(\text{fusion}) P_l(\text{survive})$$



Systematyka parametru  $s_{inj}$  uzyskana z dopasowania do eksperymentalnych wartości przekrojów czynnych dla reakcji  $^{48}\text{Ca} + X$  (fuzja-wyparowanie xn)



# Systematyka $s_{inj}$ użyta do przewidywań przekrojów czynnych dla $Z = 119$ and $120$

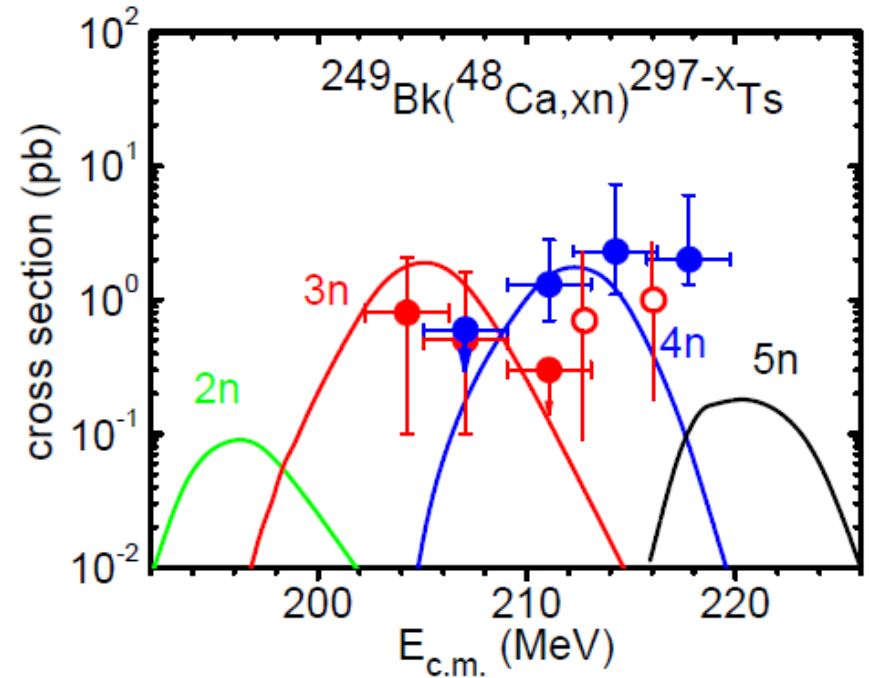
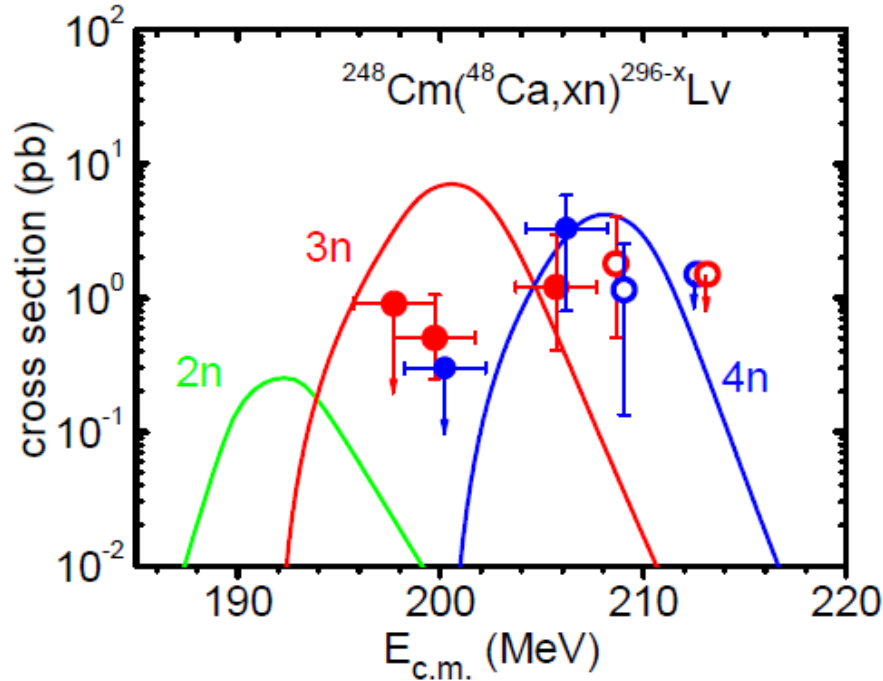


Największe przekroje czynne uzyskano:

- |     |   |
|-----|---|
| 119 | $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$ (~30 fb) |
|     | $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ (~20 fb) |
|     | $^{51}\text{V} + ^{248}\text{Cm}$ (~10 fb)  |
| 120 | $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf}$ (~7 fb)  |
|     | $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$ (~1 fb)  |



# Nowe izotopy znanych pierwiastków produkowane w procesach $xn$ fuzja-wyparowanie



full circles - Dubna  
open circles - GSI

$^{294}\text{Lv}$  (~250 fb)

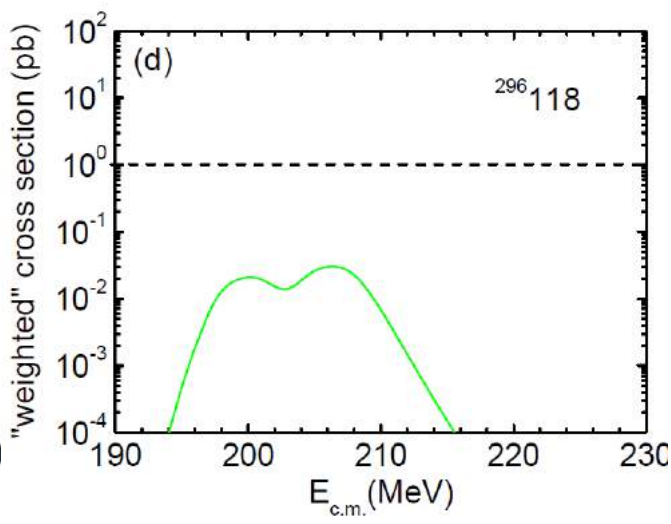
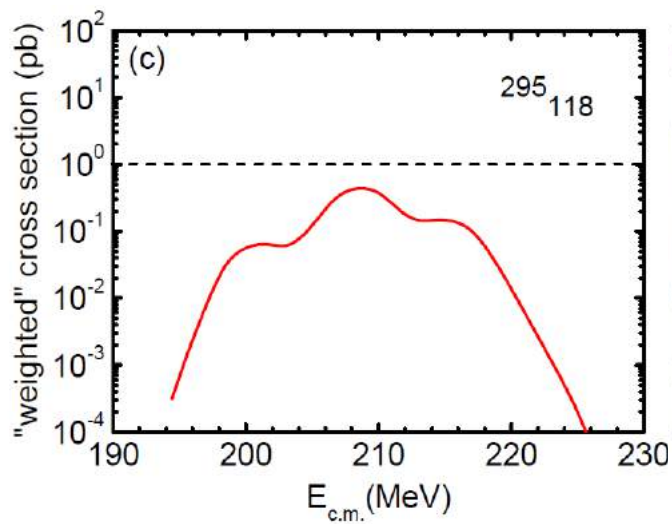
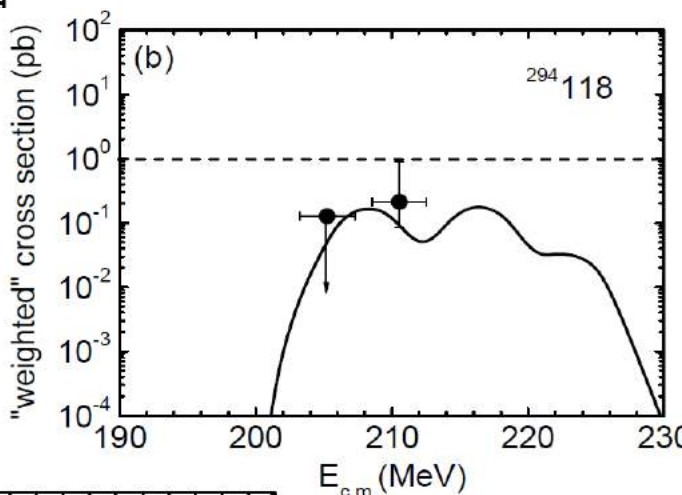
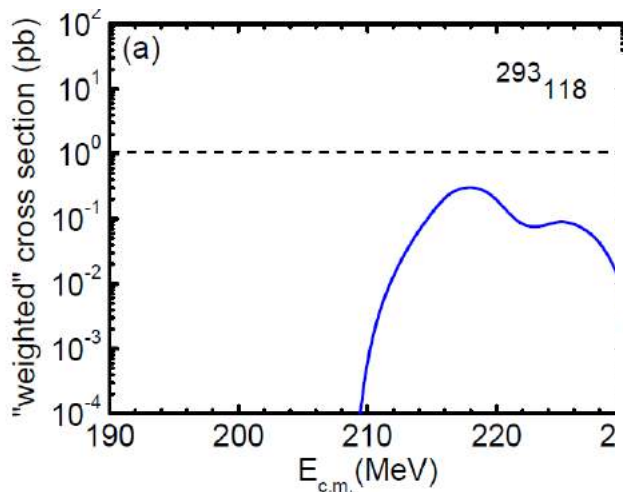
$^{295}\text{Ts}$  (~100 fb)

$^{292}\text{Ts}$  (~200 fb)

# Eksperyment z silnie radioaktywnym targetem - cztery izotopy kalifornium. Wytworzenie nowych izotopów Og i Lv w reakcjach gorącej fuzji (xn)

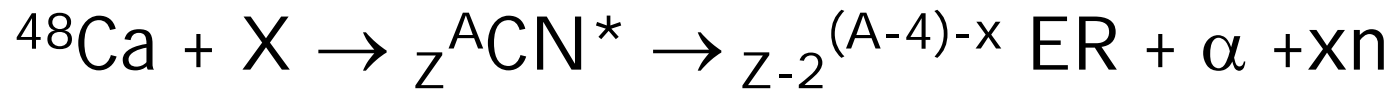
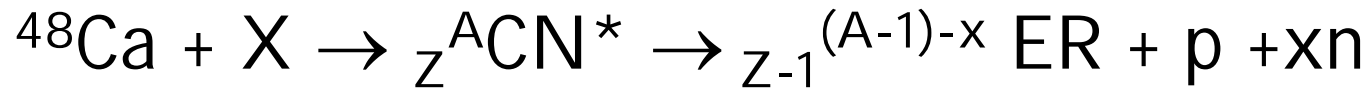
	$f_i$ isotopic content *	$T_{1/2}$
$^{249}\text{Cf}$	50.29%	351 y
$^{250}\text{Cf}$	12.79 %	13.1 y
$^{251}\text{Cf}$	36.12 %	898 y
$^{252}\text{Cf}$	0.02 %	2.64 y

$$\text{"weighted" cross section } ({}^A\text{Og}) = \sum_{i=249}^{252} f_i \times \sigma_i(A)$$



\* Jan. 2015, K. Rykaczewski, private communication

Produkcja nowych izotopów znanych SHE w procesach fuzja-wyparowanie z emisją cząstek naładowanych pxn and  $\alpha$ xn:



Y. Ts. Oganessian  
G. Adamian

H. Hofmann  
K. Siwek-Wilczyńska

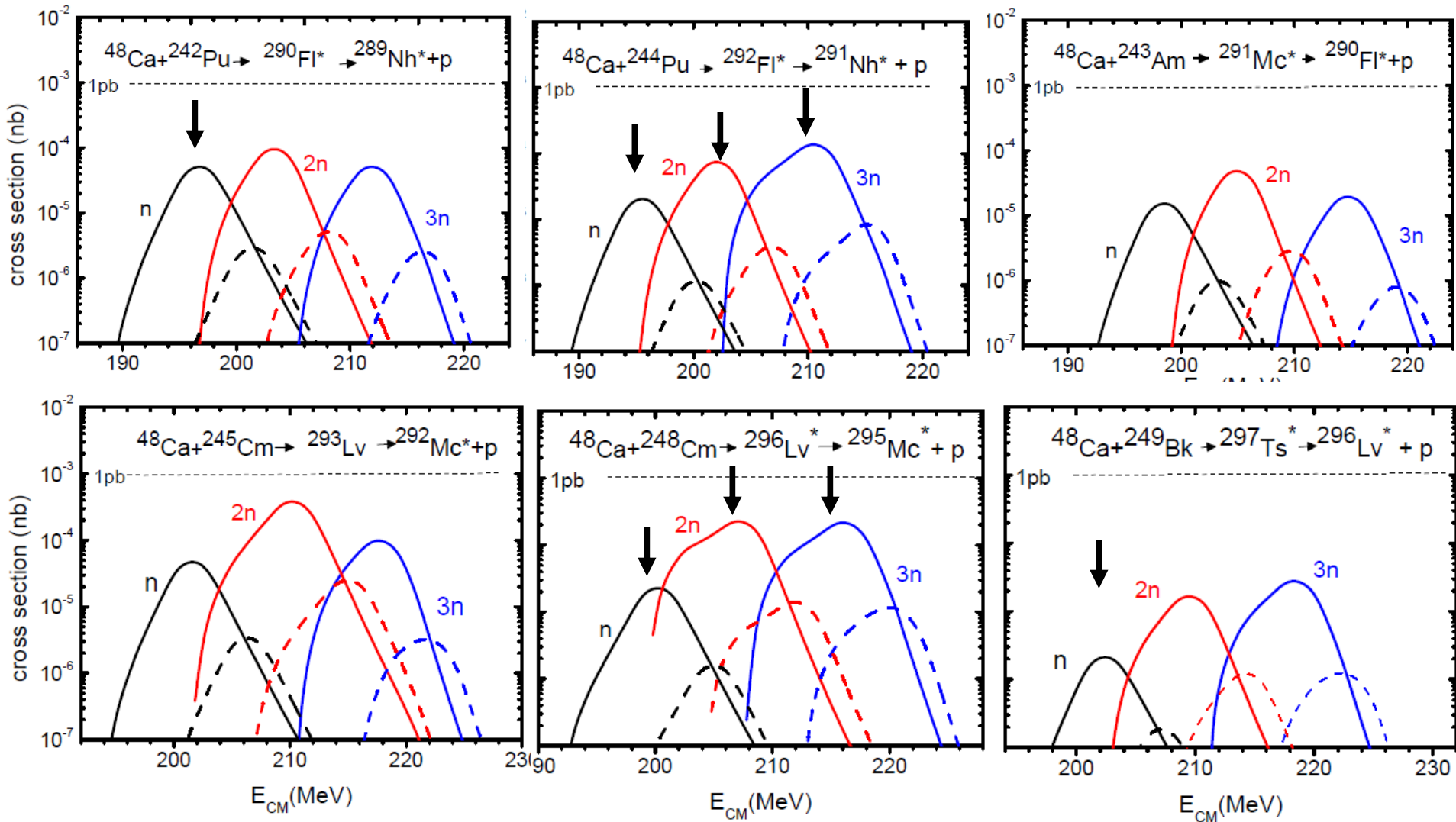
$$V_p = 0.106 (Z_{\text{CN}} - 1) - 0.9 \text{ (MeV)}$$

$$V_\alpha = 2.88 (Z_{\text{CN}} - 2) / [1.47 (A_{\text{CN}} - 4)^{1/3} + 4.642] \text{ (MeV)}$$

W. Parker et al. PRC 44 (1991) 774

- z systematycznych badań widm protonów i alf w procesach fuzja-wyparowanie w bardzo ciężkich układach.

# Przewidywania dla reakcji $p xn$ - $Z = 113 - 116$



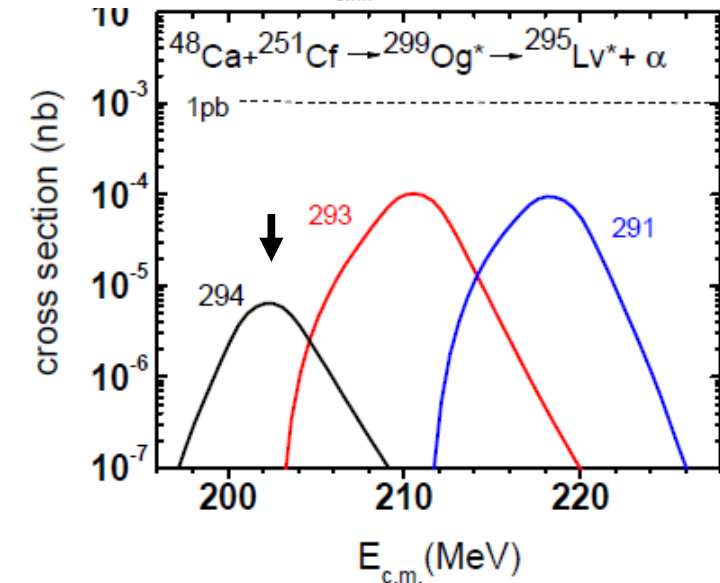
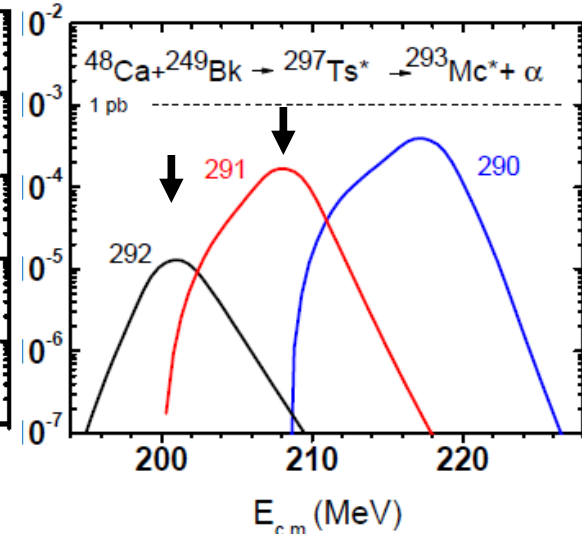
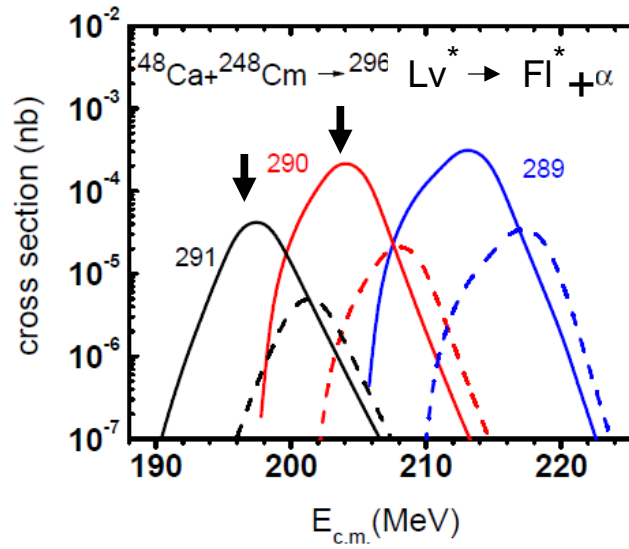
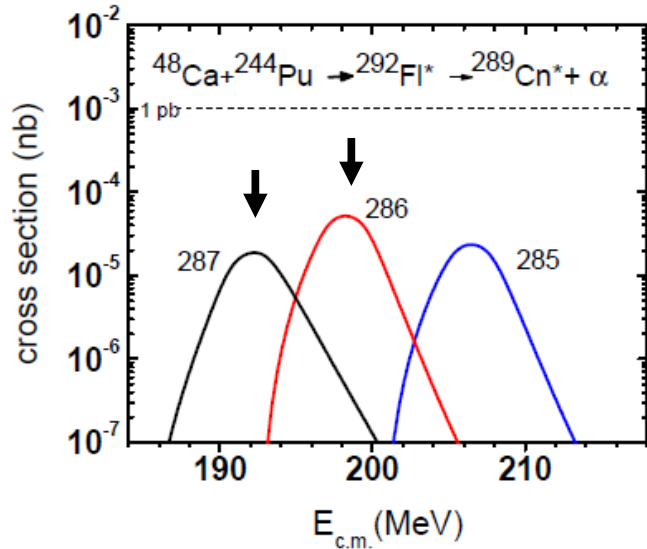
Solid lines  $V_c = 0.106 (Z_{CN} - 1) - 0.9$  (MeV) W. Parker et al.. PRC 44 (1991) 774

Dash lines  $V_c + 4.0$  MeV ( $\sim 15$  MeV)

# Nowe izotopy znanych pierwiastków od Cn do Lv produkowane w procesie $\alpha Xn$

Solid line

$$V_c = 2.88(Z_{CN}-2)/[1.47(A_{CN}-4)^{1/3}+4.642]$$



Dash line  $V_c + 4.0$  MeV

New:

286Cn (15 fb)

290Fl (45 fb)

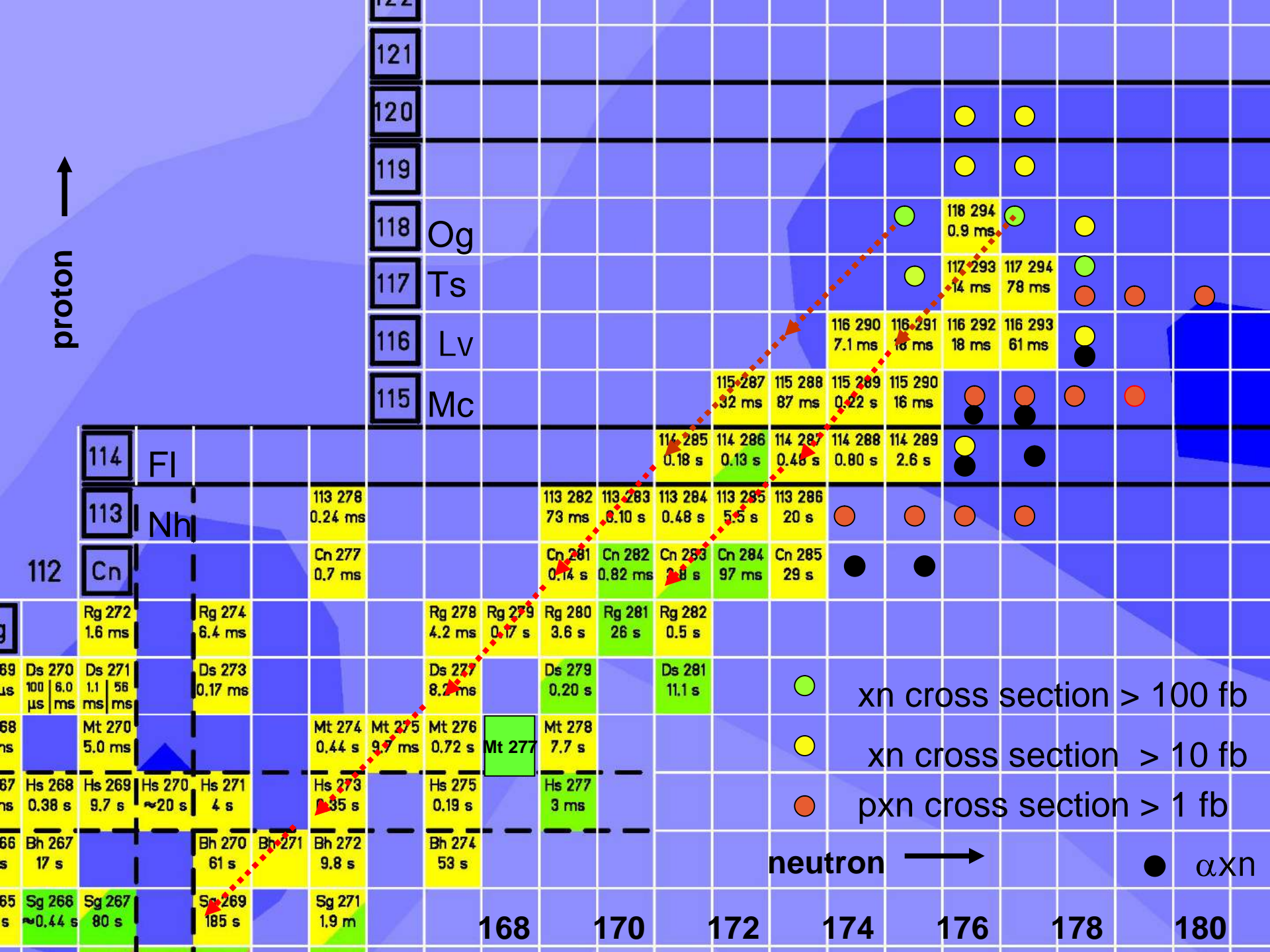
291Mc (13 fb)

294Lv (6.5 fb)

287Cn (60 fb)

291Fl (215 fb)

292Mc (170 fb)



# SHE Factory



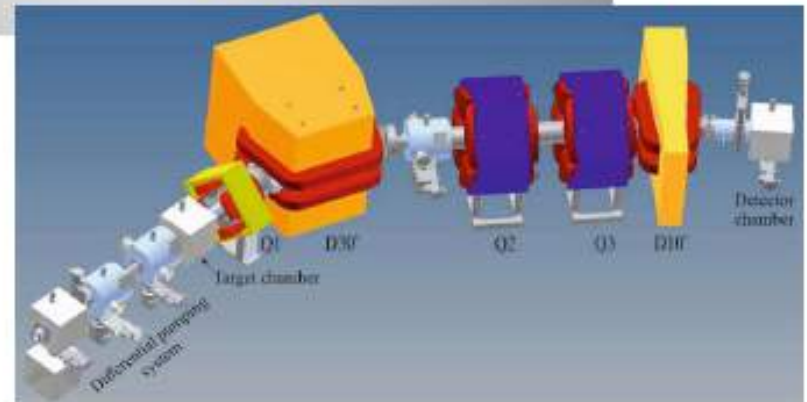
SHE Factory Building

High-current cyclotron DC-280



## New facilities:

- New gas-filled separator
- Preseparator
- SHELS
- Etc.



# Plan of SHE search experiments

Hideto En'yo  
RIKEN



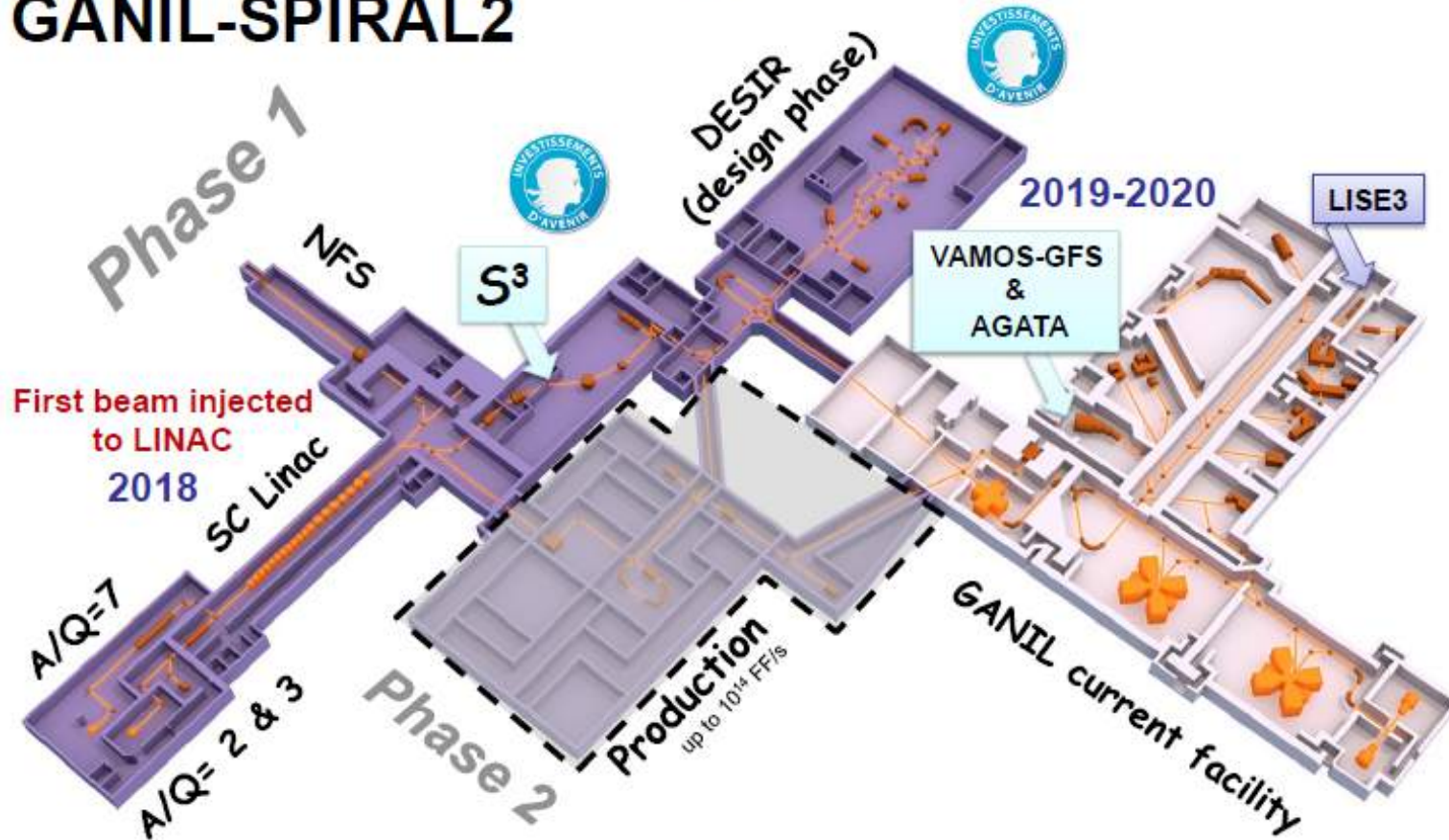
## Time line

YEAR	Reaction	ECR IS	ACC.	Spectrometer	Beam	Intensity (pA)
2017	Fusion Barrier	18GHz	RILAC1	GARIS1	Cocktail	0.5
	$^{248}\text{Cm} + ^{50}\text{Ti} \rightarrow \text{Og}$	18GHz	RILAC1	GARIS2	50-Ti	~0.5
	$^{248}\text{Cm} + ^{51}\text{V} \rightarrow \mathbf{119}$ from this December	28GHz	RILAC2 +RRC	GARIS2	51-V	~5
2018	$^{248}\text{Cm} + ^{51}\text{V} \rightarrow \mathbf{119}$	28GHz @RRC	RILAC2 +RRC	GARIS2	51-V	~5
2019	$^{248}\text{Cm} + ^{51}\text{V} \rightarrow \mathbf{119}$	28GHz @RRC	RILAC2 +RRC	GARIS2	51-V	~5
	$^{248}\text{Cm} + ^{51}\text{V} \rightarrow \mathbf{119}$	28GHz @RILAC	RILAC1 +SCC	GARIS3	51-V	~5
2020	$^{248}\text{Cm} + ^{51}\text{V} \rightarrow \mathbf{119}$ $^{248}\text{Cm} + ^{51}\text{V} \rightarrow \mathbf{119}$	RUN in parallel until discovery				

Can only be done with strong commitment of collaboration with ORNL



# Excellent perspectives for Heavy and SHE Experiments at GANIL-SPIRAL2



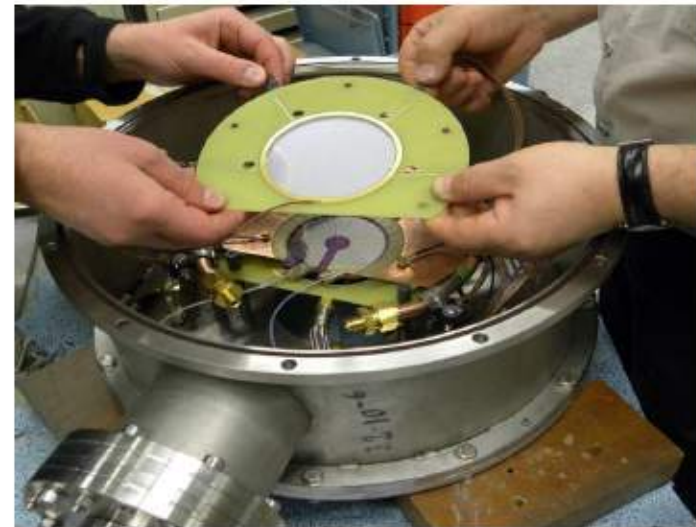
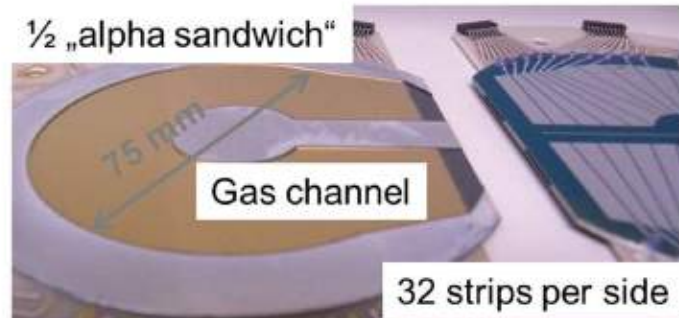
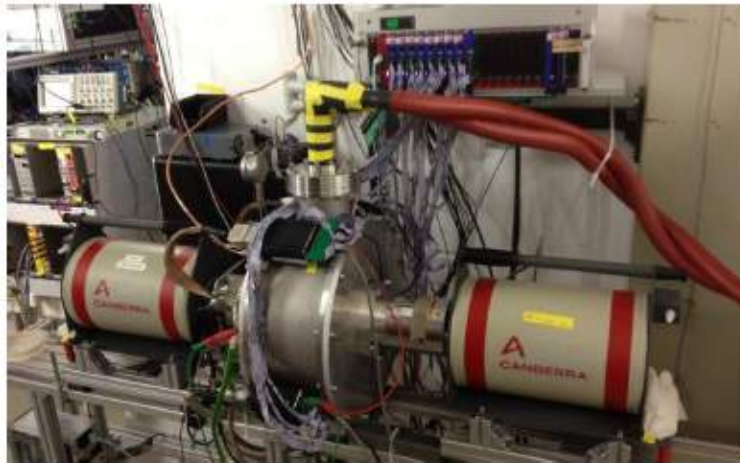
# ALBEGA - a new device for alpha-beta-gamma spectroscopy

## Decay spectroscopy after chemistry:

$^{265}\text{Sg}$  as  $\text{Sg}(\text{CO})_6$

$^{269}\text{Hs}$  as  $\text{Hs}(\text{CO})_5$  or  $\text{HsO}_4$

$^{288,289}\text{Fl}$  as volatile metal



# The goals for all of us in 30 years



Hideto En'yo

- Synthesize 119,120<sup>th</sup> elements
- Complete the 8<sup>th</sup> row
- Reach the island of stability
  - We do not know how (YET).
  - Need new Ideas.
- We need to satisfy the governments to get facility better. **?WORLD COMPETITION?**
- We do not need to do such among us.
- We collaborate. Share the beams/ targets/ expertise.
- We avoid overlap. We need efficient approaches.



Element 117Ts tennessee