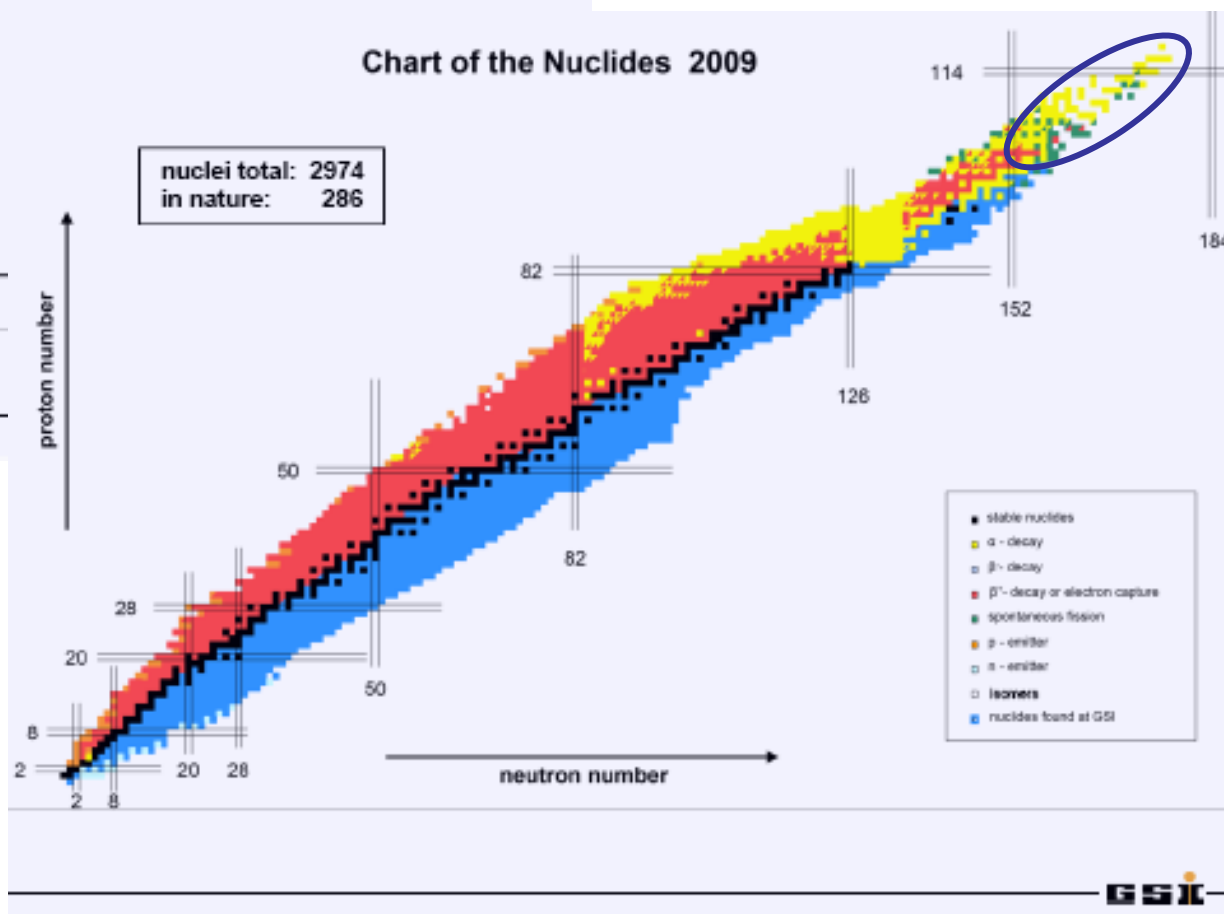
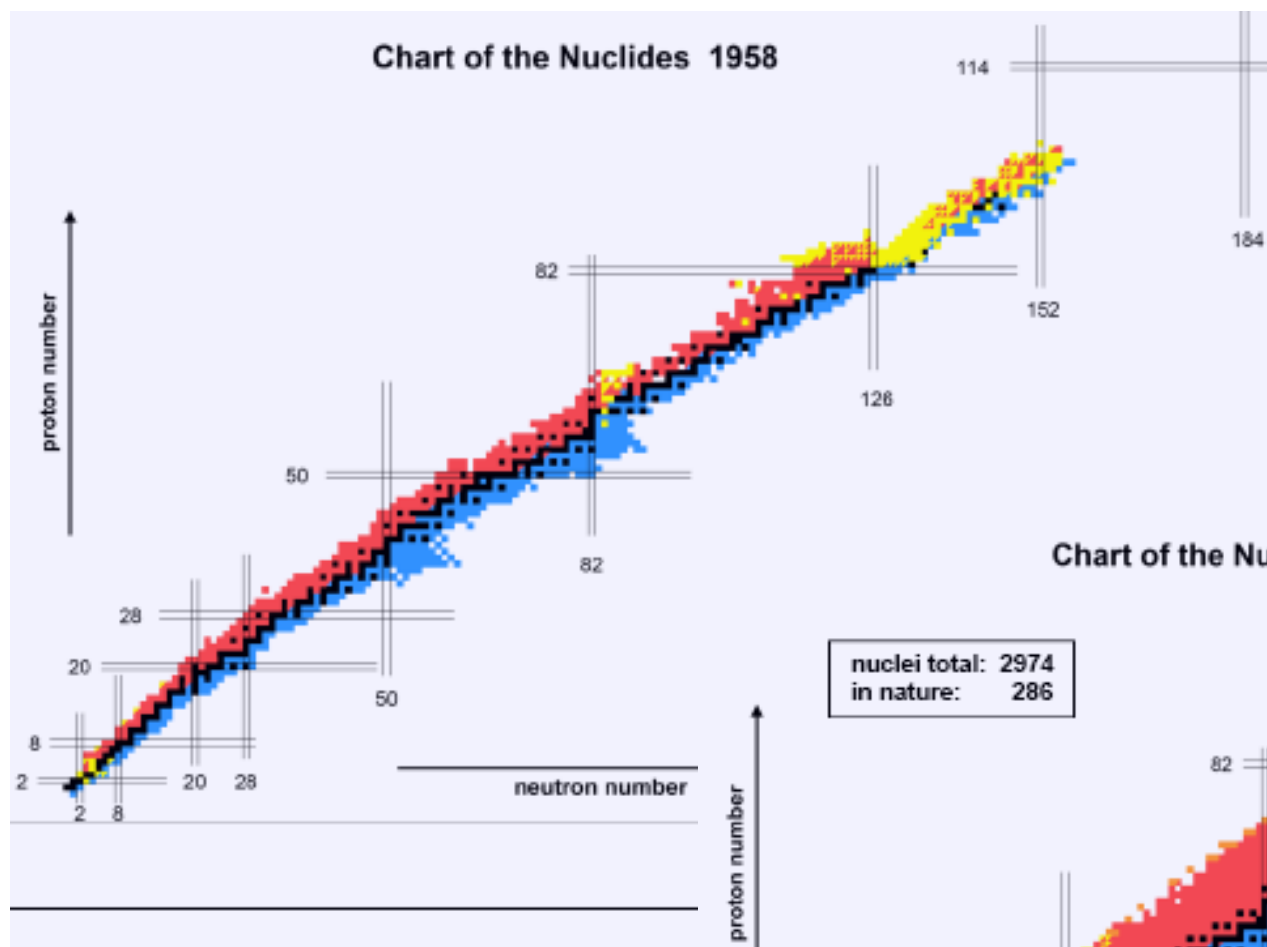




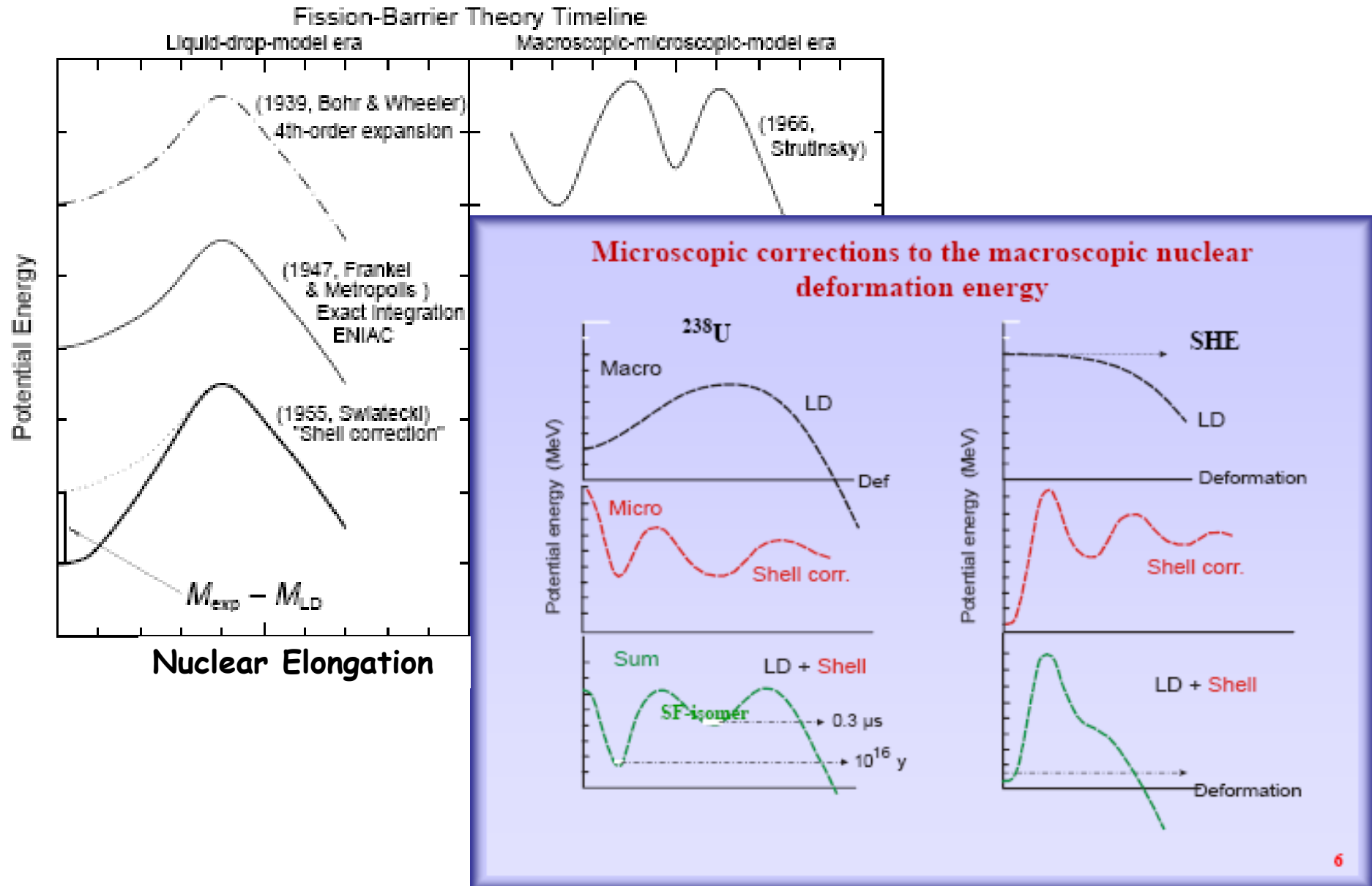
Modelowanie reakcji syntezy jąder superciężkich

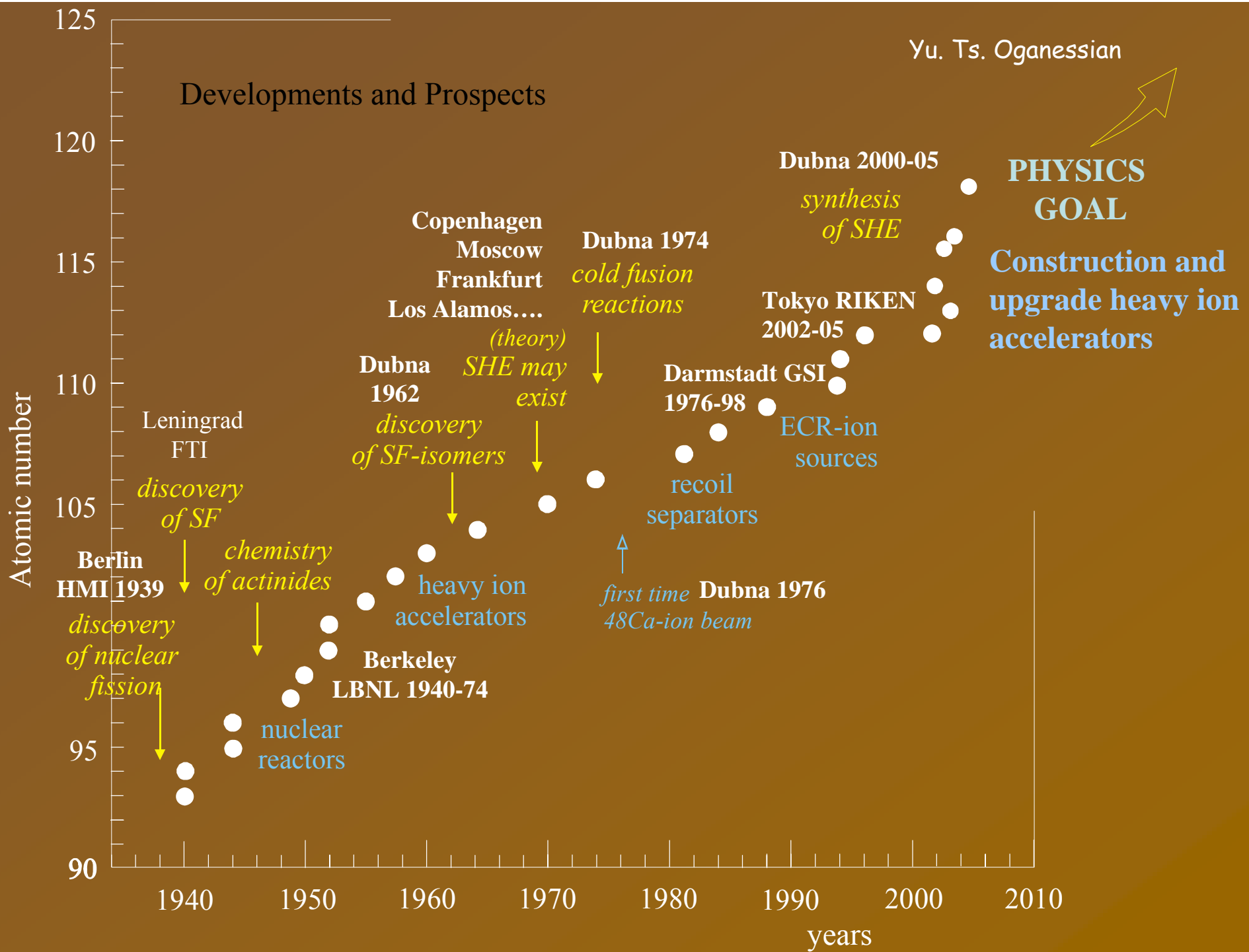
Seminarium Fizyki Jądra Atomowego

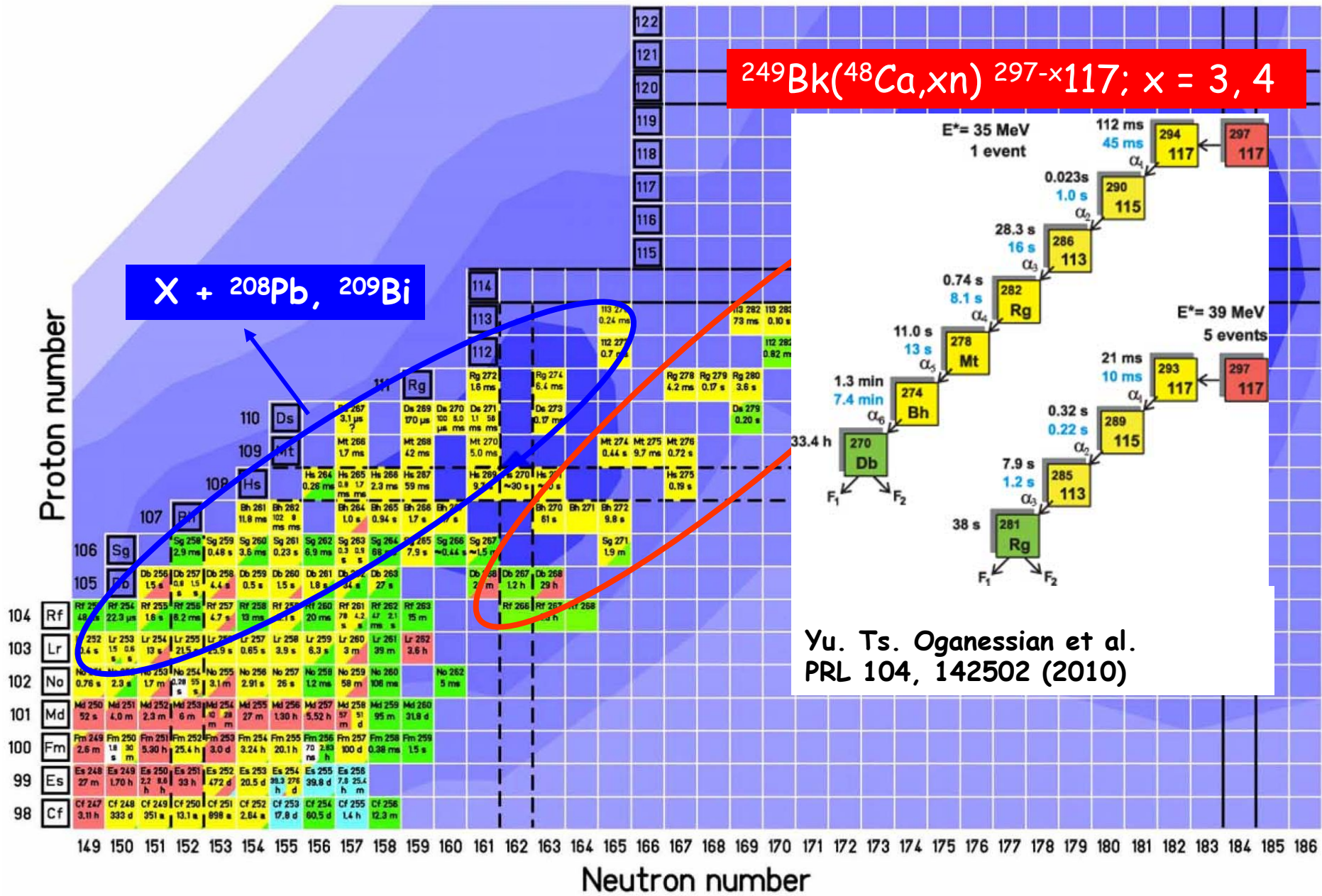
Mapa nuklidów



Możliwość obserwacji jąder ciężkich związana jest z istnieniem bariery na rozszczepienie







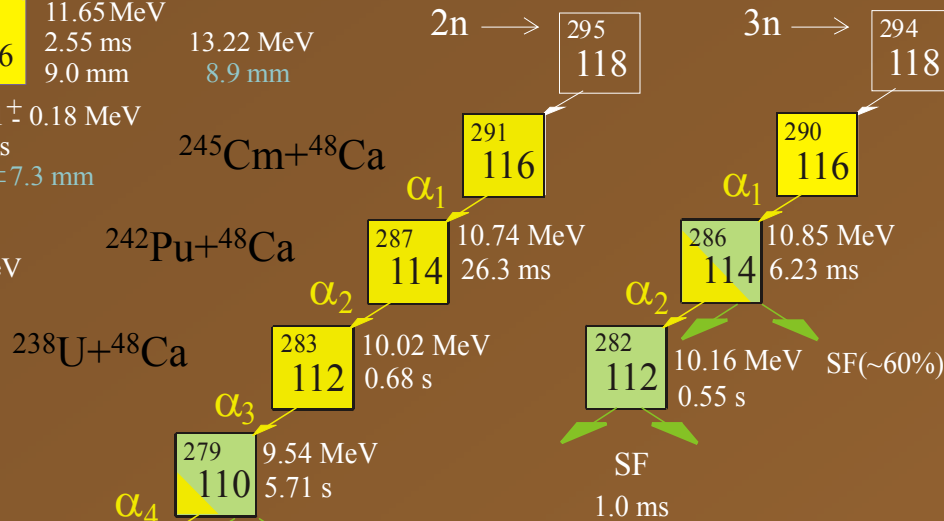
Yu. Ts. Oganessian et al.
 PRL 104, 142502 (2010)

2002

March 19, 2002
05:28

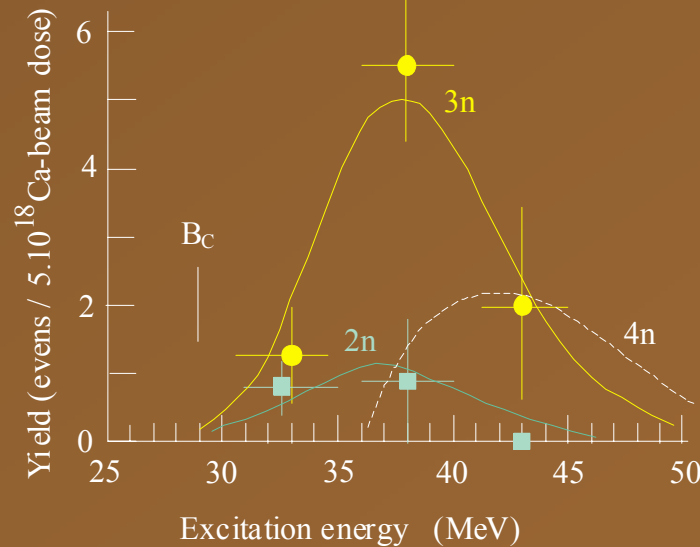
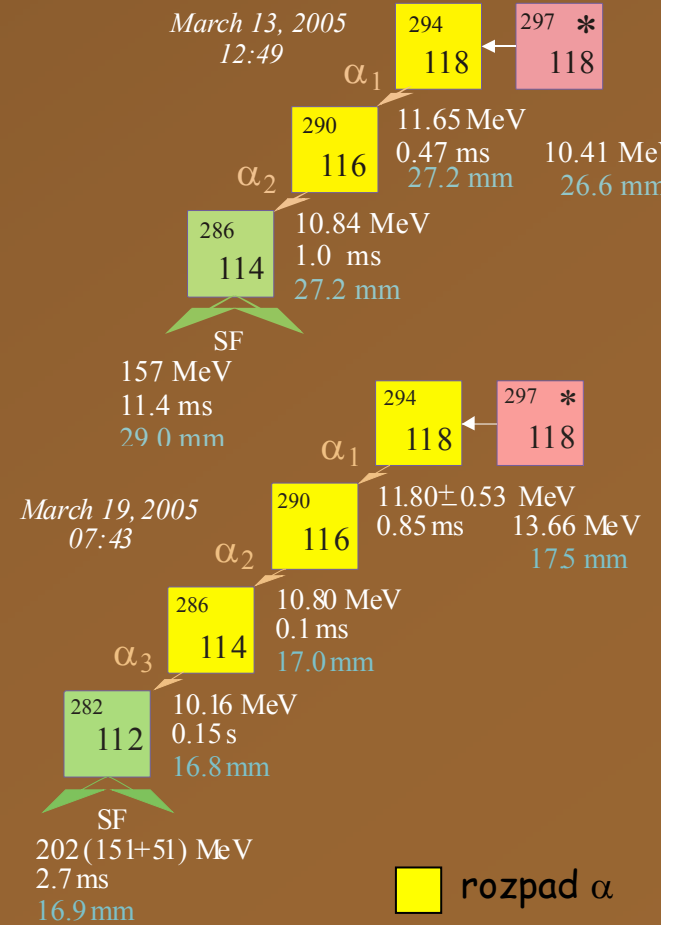


2002 - 2004



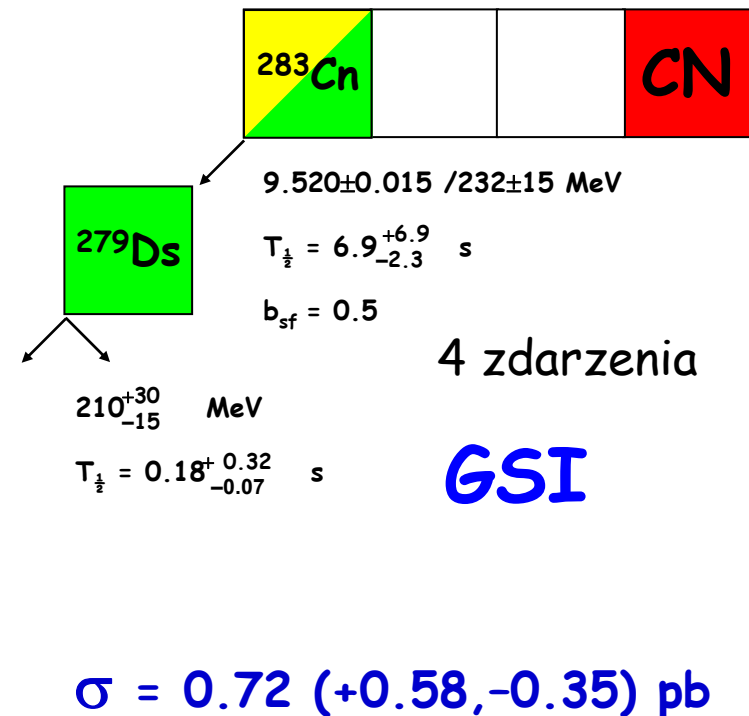
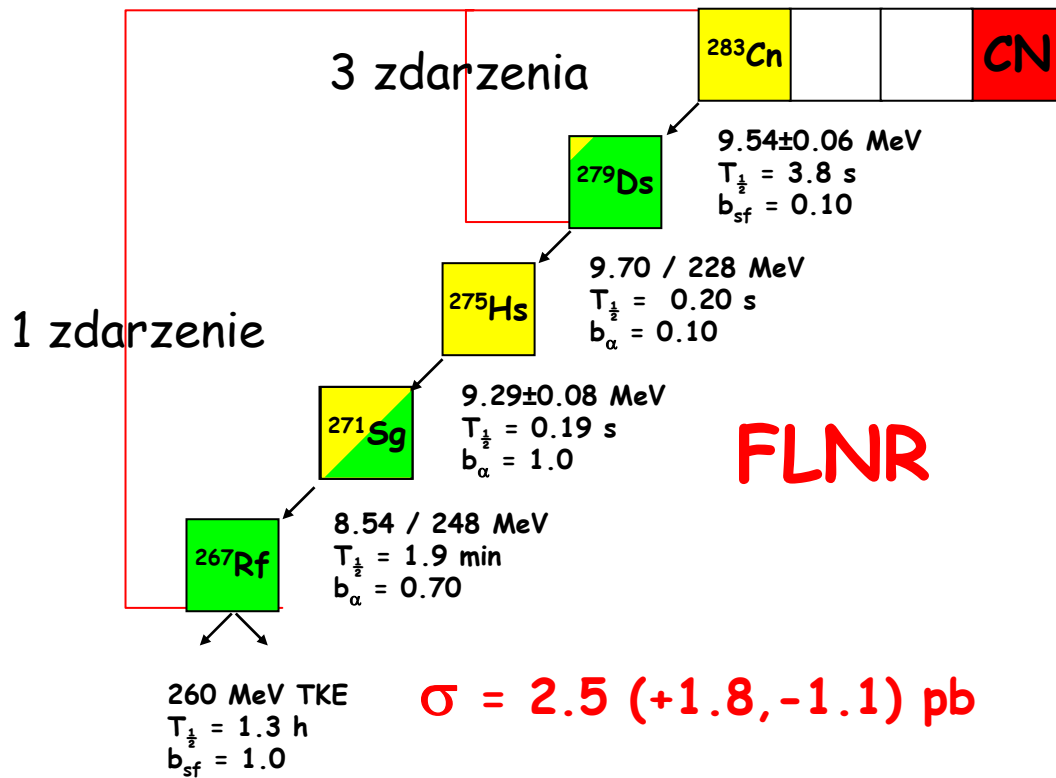
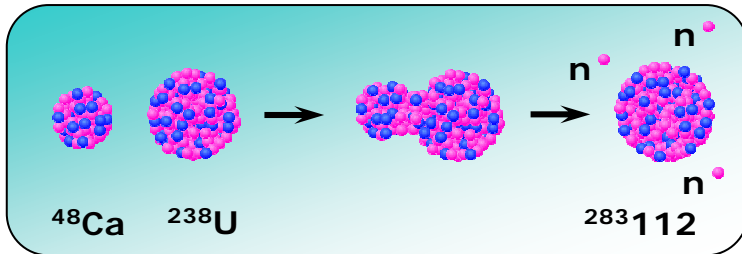
Synthesis of Element 118 in $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$ Reaction

2005

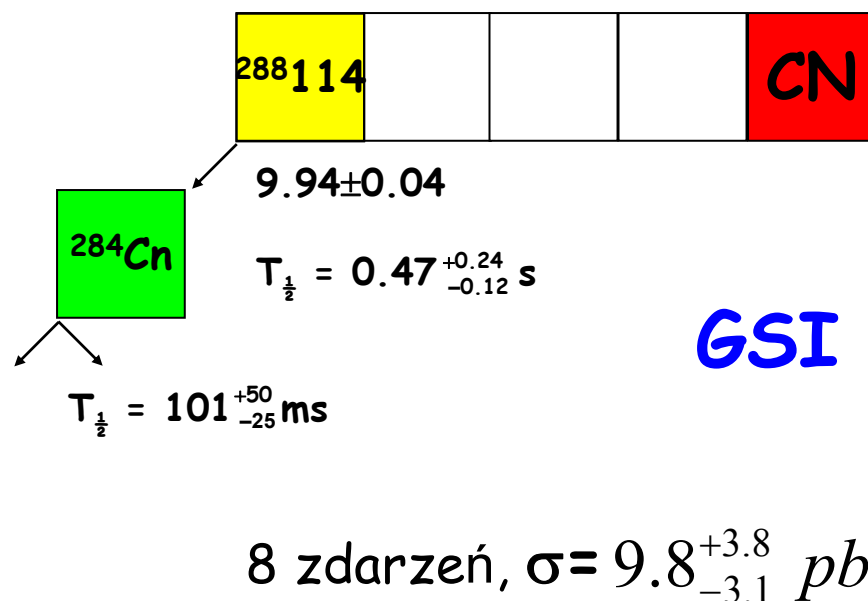
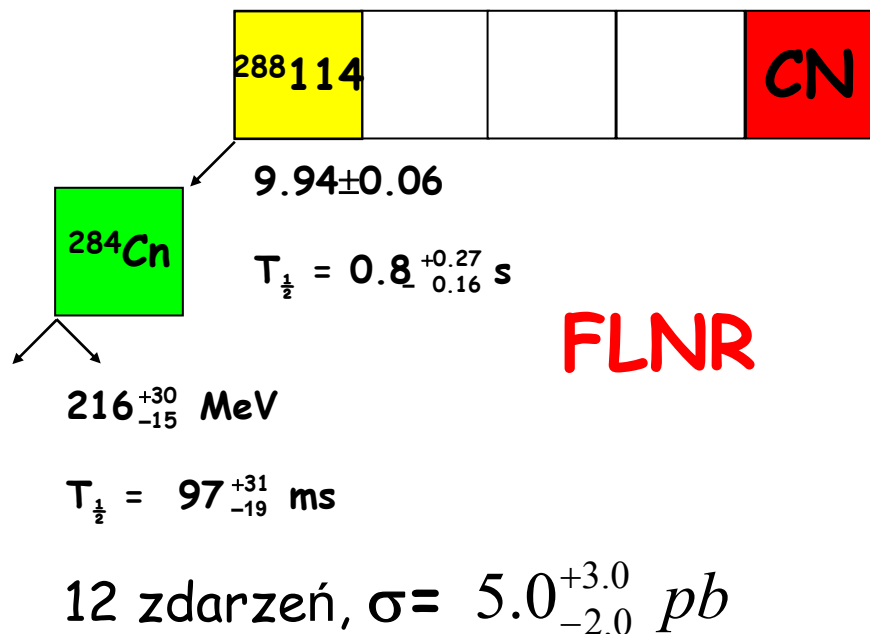
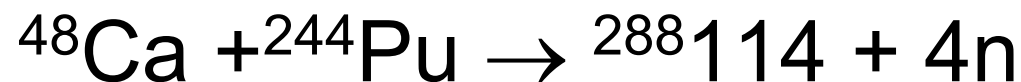
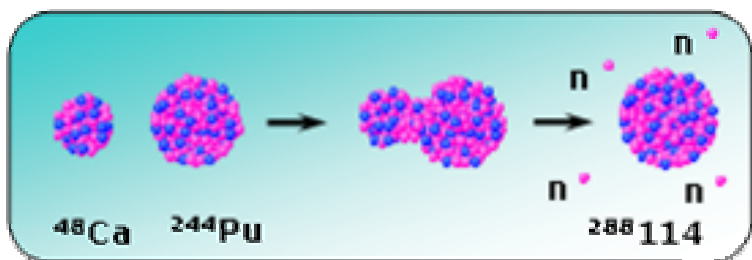


rozpad α
SF

Potwierdzenie wyników dubieńskich w GSI

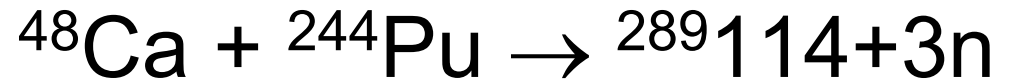
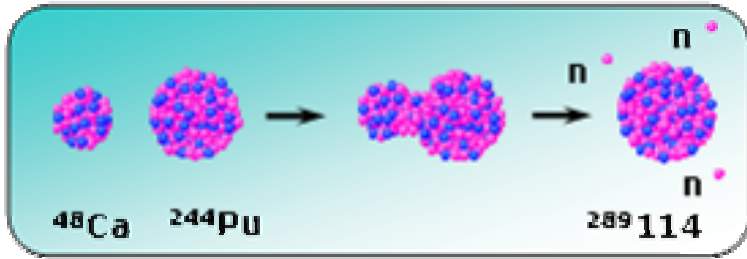


S. Hofmann et al.,
 Eur. Phys. J. A32,251 (2007)



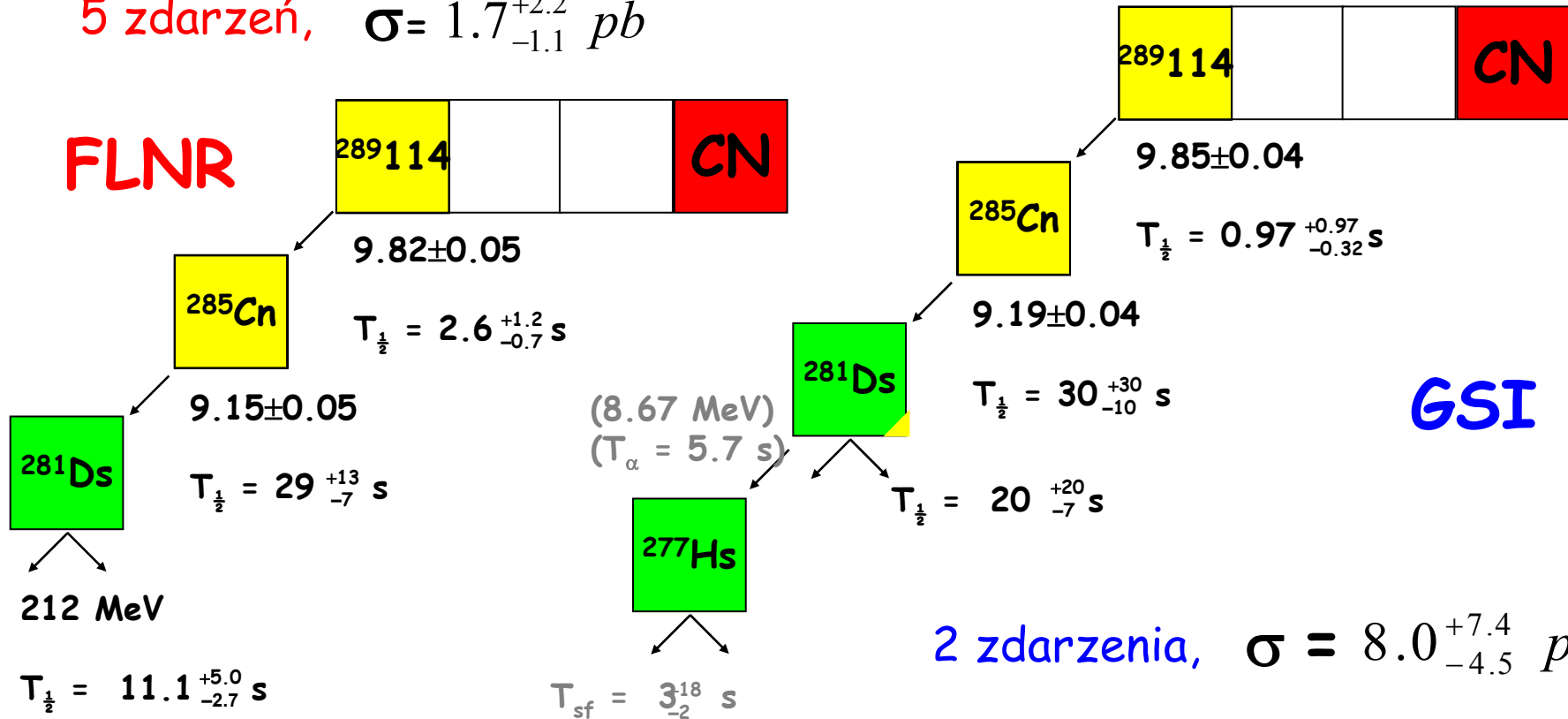
Yu.Ts. Oganessian, Phys. Rev. C 70, 064609 (2004)
 Yu.Ts. Oganessian, J. Phys. G 34 (2007) R165

Ch. Düllmann et al., PRL 104, 252701 (2010)



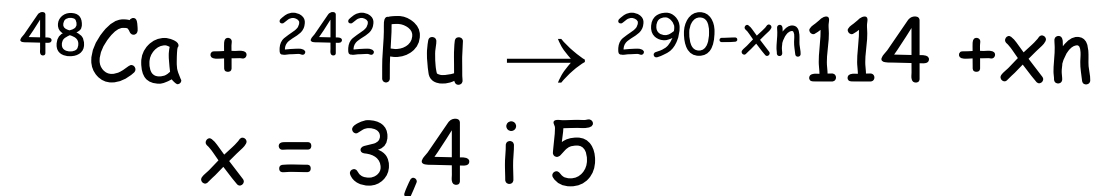
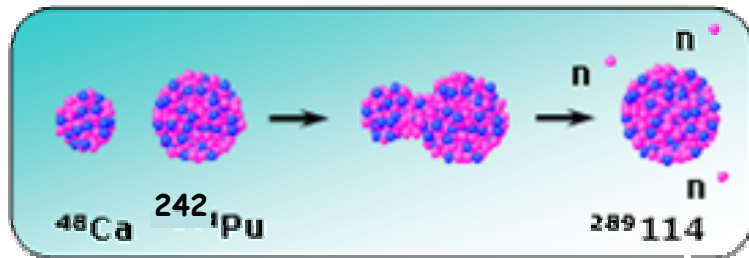
5 zdarzeń, $\sigma = 1.7^{+2.2}_{-1.1} \text{ pb}$

FLNR



2 zdarzenia, $\sigma = 8.0^{+7.4}_{-4.5} \text{ pb}$

Potwierdzenie wyników dubieńskich w LBNL



FLNR, DUBNA

2n - 1 zdarzenie, $\sigma=0.5$ (+1.0, -0.5) pb

3n - 15 zdarzeń, $\sigma=3.6$ (+2.4, -1.6) pb

4n - 9 zdarzeń, $\sigma=4.5$ (+2.5, -1.5) pb

Yu.Ts. Oganessian, Phys. Rev. C **70**, 064609 (2004)

Yu.Ts. Oganessian, J. Phys. G **34** (2007) R165

LBNL, Berkeley

3n - 1 zdarzenie, $\sigma=3.1$ (+4.9, -2.6) pb

4n - 1 zdarzenie, $\sigma=3.1$ (+4.9, -2.6) pb

5n - 1 zdarzenie, $\sigma=0.6$ (+0.9, -0.5) pb

L. Stavstera et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 132502 (2009)

P. A. Ellison et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 182701 (2010)

Czy i jak możemy wytworzyć pierwiastki o $Z > 118$?

Powazne problemy eksperymentalne

W reakcjach z ^{48}Ca potrzebne są tarcze o $Z > 98$.
możliwości :

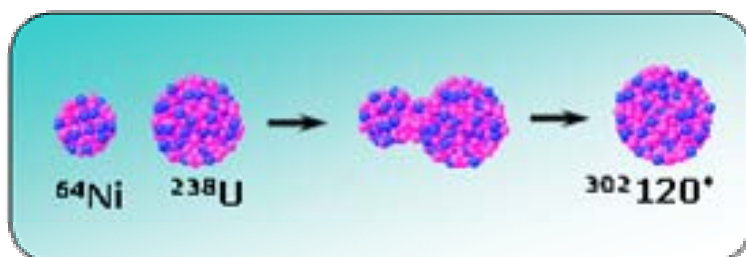


Co dalej?

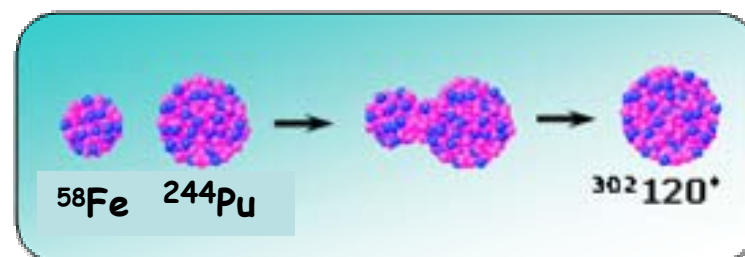
cięższe pociski → znacznie mniejsze przekroje czynne
inny typ reakcji

Próby wytworzenia pierwiastka o $Z = 120$

GSI



Dubna



Eksperymenty 2007/2008

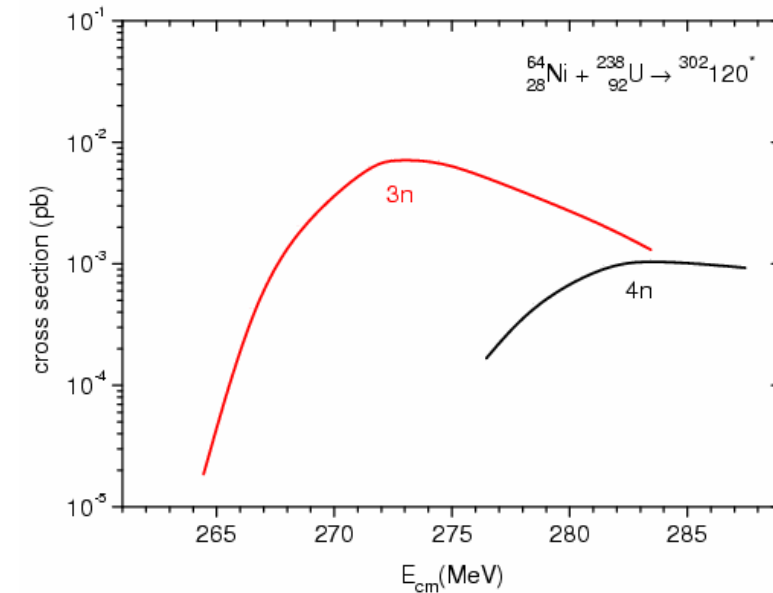
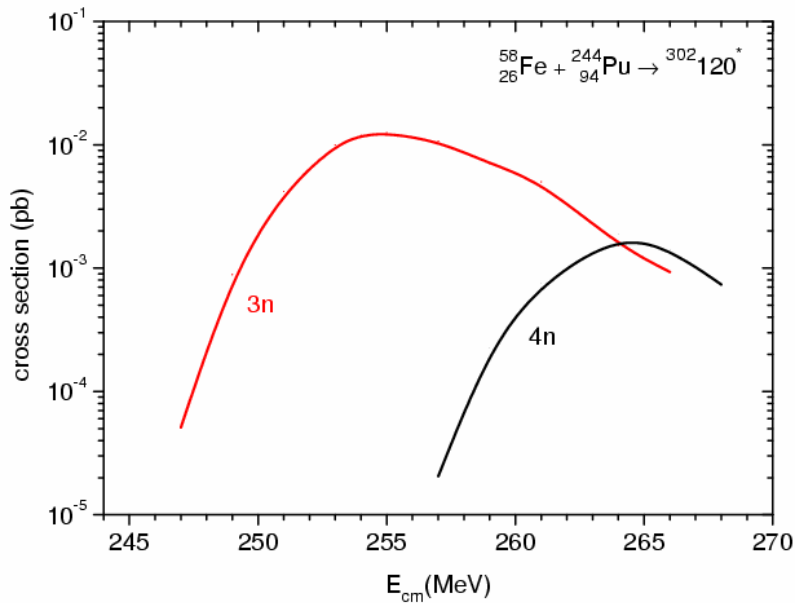
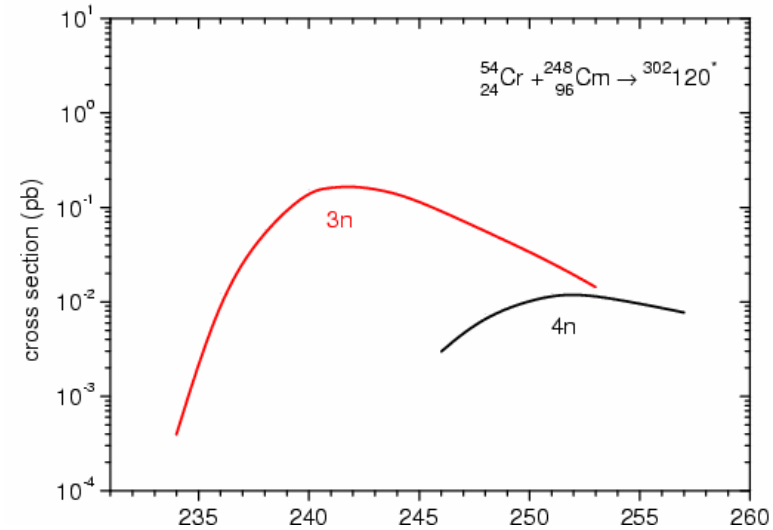
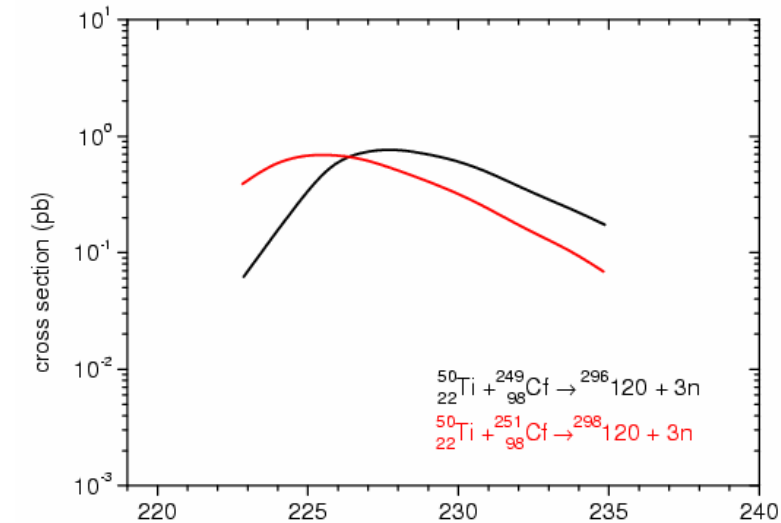
GSI
liczba dni wiązki na tarczy : **120 days**
energia wzbudzenia E^* : **36.0 MeV**
sumaryczna liczba cząstek : $\approx 2 \times 10^{19}$
liczba zdarzeń : **0**
ograniczenie przekroju czynnego : **< 0.1 pb**

Dubna

45.5 MeV
 7.1×10^{18}
0
< 0.4 pb

Yu. Ts. Oganessian et al.
Phys. Rev. C 79, 024603 (2009)

Przewidywane przekroje czynne dla Z=120



Wniosek: najbardziej obiecująca jest reakcja ${}_{24}^{54}\text{Cr} + {}_{96}^{248}\text{Cm}$.

2003 - formułowanie modelu

„Fusion by Diffusion model” - FBD

W.J. Świątecki, K. Siwek-Wilczyńska, J. Wilczyński
Acta Physica Polonica 34, 2049 (2003)
(53 cytowania)

2005 - wersja II FBD

W.J. Świątecki, K. Siwek-Wilczyńska, J. Wilczyński
Physical Review C 71, 014602 (2005)
(64 cytowania)

.....

Ostatni wspólny artykuł - styczeń 2010

W.J. Świątecki, K. Siwek-Wilczyńska, J. Wilczyński
Physical Review C 81, 019804 (2010)

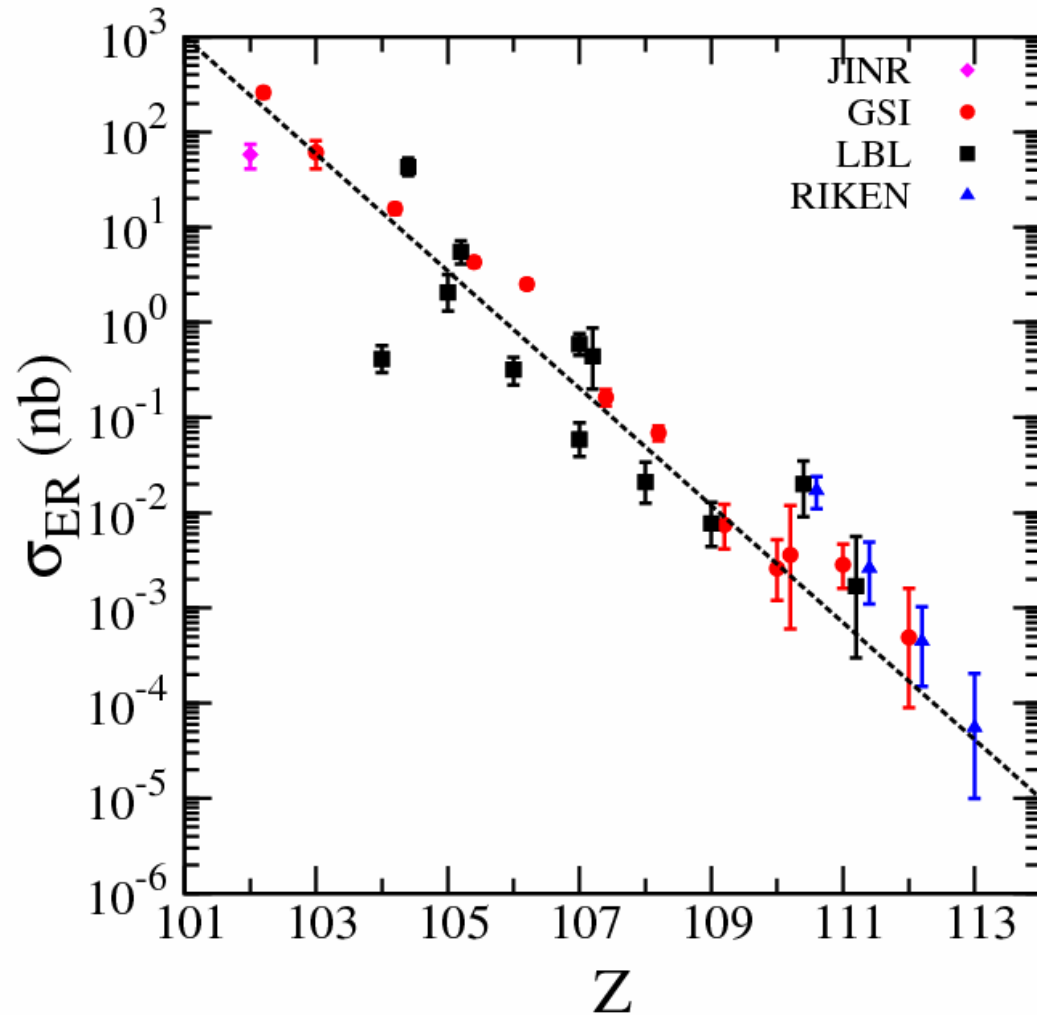
Prace kontynuujemy :

T. Cap, K. Siwek-Wilczyńska, J. Wilczyński, IJMP E 20,308 (2011)

T. Cap, K. Siwek-Wilczyńska, J. Wilczyński, PRC - przyjęte do druku

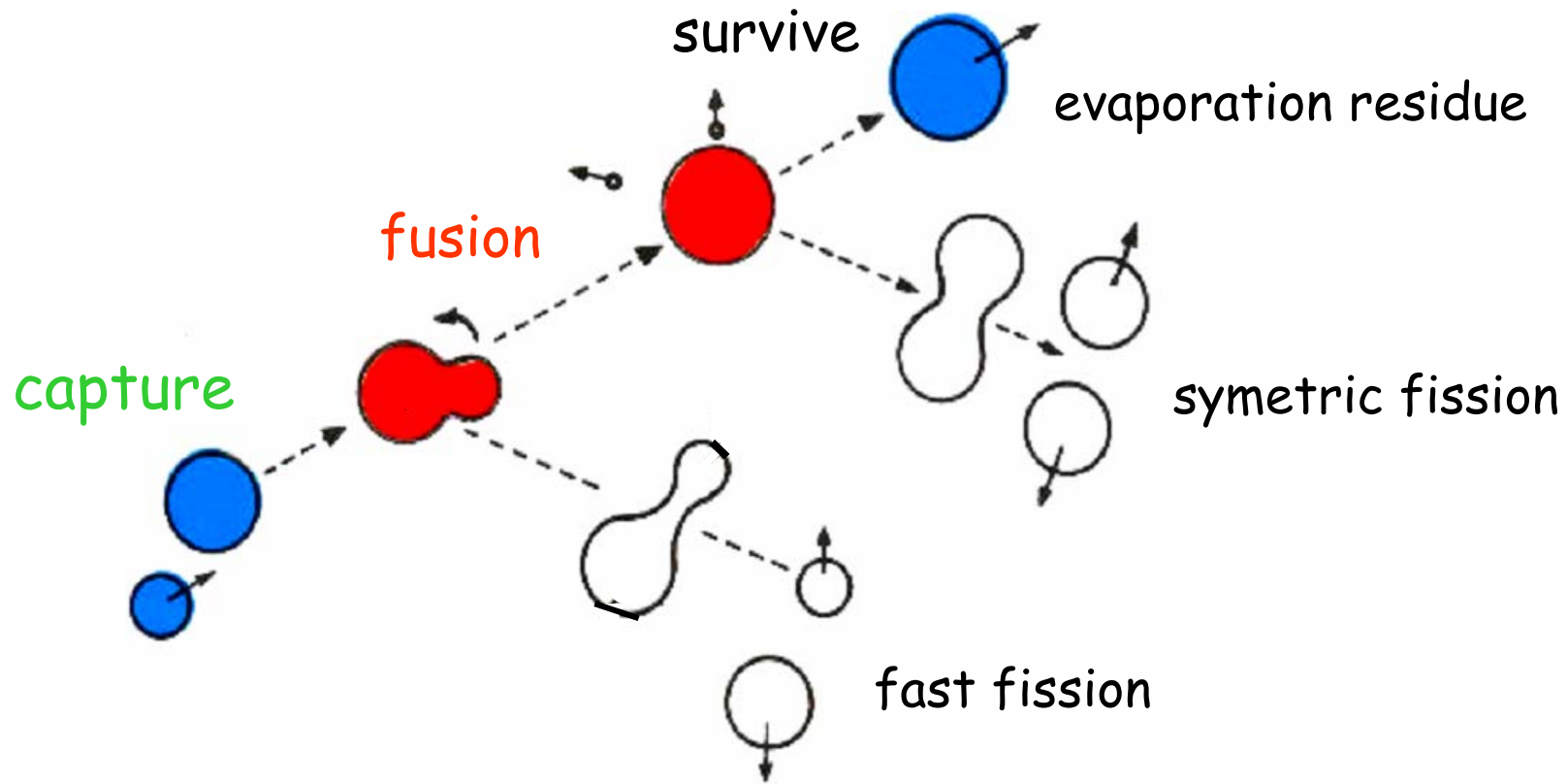


Reakcije zimnej fuziji



- $102 < Z < 113$
- target: ^{208}Pb or ^{209}Bi
- pocisk: $^{48}\text{Ca} \dots ^{70}\text{Zn}$
- $E^* = 10 - 20 \text{ MeV}$
- $1n$
- $10^2 < \sigma_{ER} < 10^{-5} \text{ nb}$

Zderzenie dwóch jąder prowadzące do utworzenia jądra super-ciężkiego



$$\sigma(\text{synthesis}) = \sigma(\text{capture}) \times P(\text{fusion}) \times P(\text{survive})$$

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).

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

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

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

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

Formuła wyprowadzona przy założeniu:

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

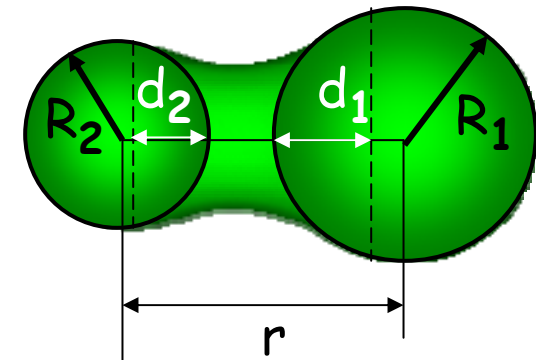
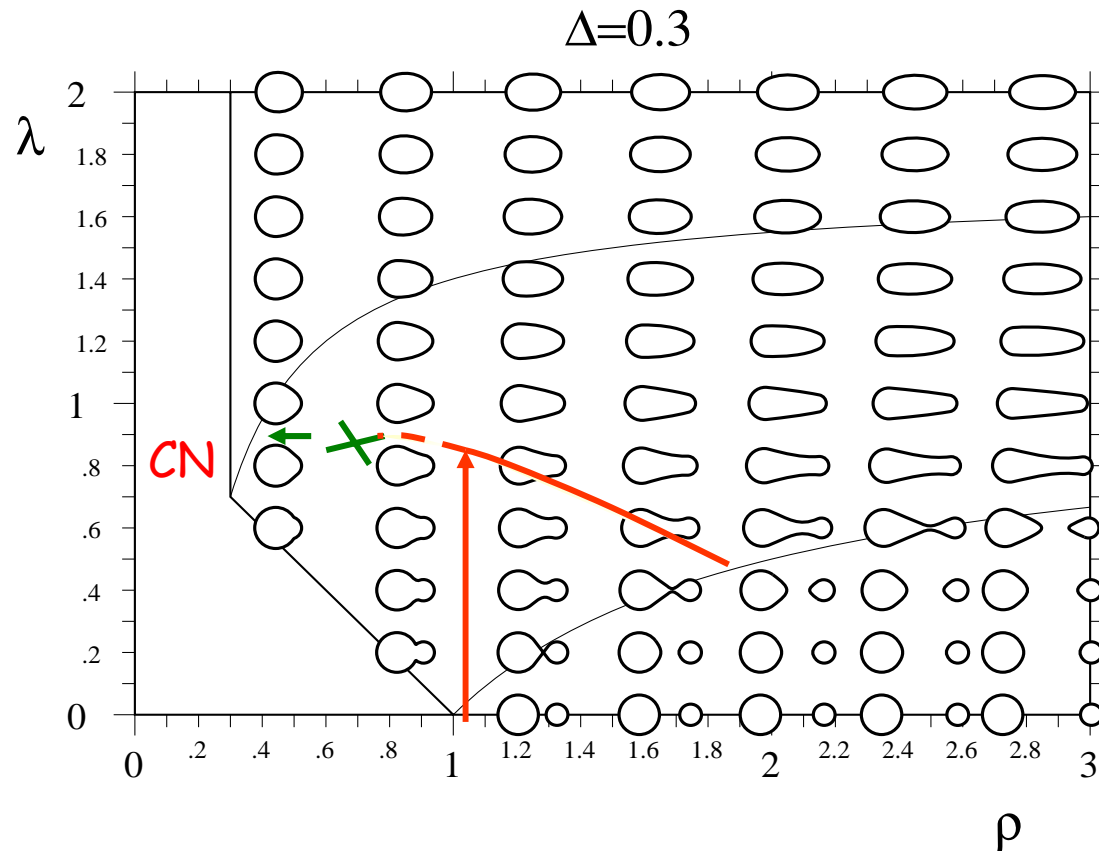
W. Świątecki, K. Siwek-Wilczyńska, J. Wilczyński Phys. Rev. C 71 (2005) 014602,
Acta Phys. Pol. B34(2003) 2049

Systematyka 3 parametrów B_0 , w , R_{σ} 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)

$P_i(\text{fusion})$

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

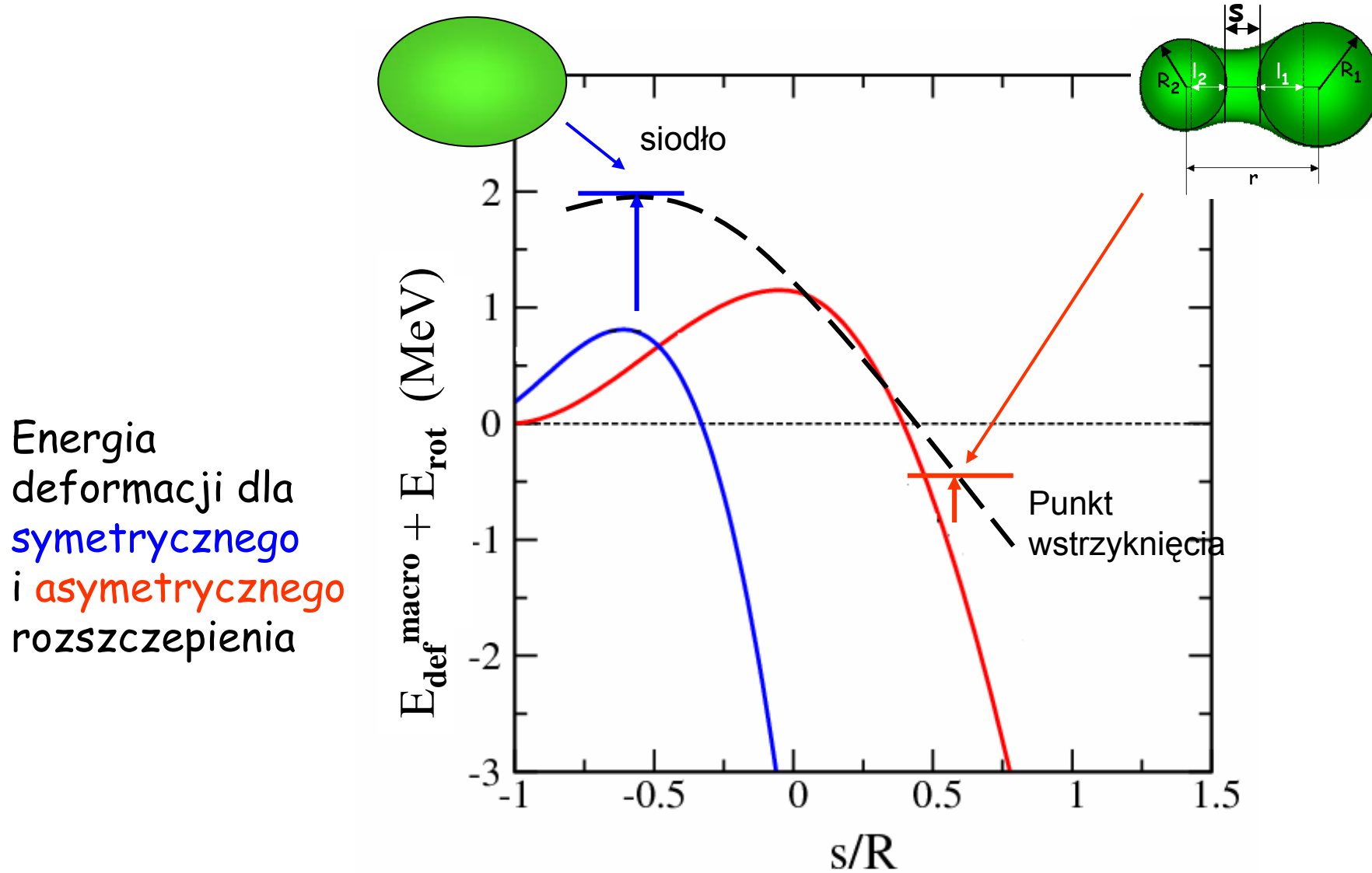


$\lambda = (d_1 + d_2) / (R_1 + R_2)$ - parametr charakteryzujący szyjkę

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

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

P_f (fusion)



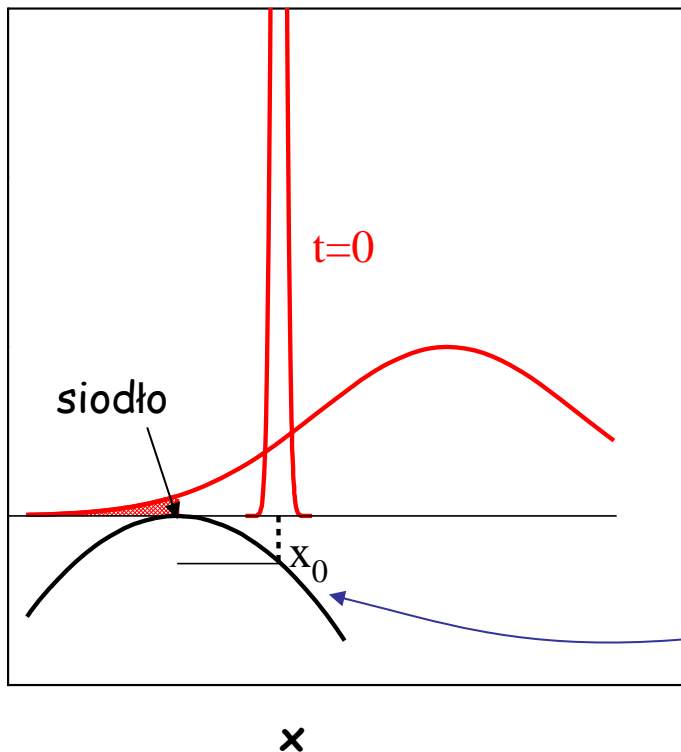
$P_f(\text{fusion}) \ll 1$ dla bardzo ciężkich układów

Równanie dyfuzji Smoluchowskiego

$$\gamma \frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} [bxW(x,t)] + T \frac{\partial^2}{\partial x^2} W(x,t)$$

współczynnik dyssypacji dryf dyfuzja

$W(x,t)$ = prawdopodobieństwo znalezienia układu w czasie t w pozycji x



Dokładne rozwiązanie dla potencjału $V(x) = -bx^2/2$ (odwrócona parabola) to rozkład Gaussa, który rozszerza się w czasie, zsuwając się w dół.

$P_i(\text{fusion})$ - część rozkładu, która po czasie $t \rightarrow \infty$ przeniknęła poza barierę.

$$P_i(\text{fusion}) = \frac{1}{2}(1 - \text{erf} \sqrt{H/T}) \quad H = bx_0^2/2$$

dla $x_0 \geq 0$ (punkt wstrzyknięcia),

W.J. Świątecki, K. Siwek-Wilczyńska, J. Wilczyński
Acta Phys. Pol. B34 (2003)2049, IJMP E13 (2004) 261,
Phys.Rev.C71 (2005) 014602

Dla reakcji 1n

$$P_l(\text{survive}) = \frac{\Gamma_n}{\Gamma_n + \Gamma_f} \times P_{<}$$

← Prawdopodobieństwo, że po emisji 1n energia wzbudzenia jest mniejsza niż próg na emisję drugiego neutronu lub rozszczepienie

Parcjalna szerokość na **emisję lekkich cząstek** - formuła Weisskopf'a

$$\Gamma_i = \frac{m_i}{\pi^2 \hbar^2} (2s_i + 1) \int_0^{E_i^{\max}} \varepsilon_i \sigma_i \frac{\rho_i(E_i^{\max} - \varepsilon_i)}{\rho(E^*)} d\varepsilon_i$$

gdzie: $E_i^{\max} = E^* - E_{rot}^i - B_i - V_i^C - P$

Maksymalna termiczna energia wzbudzenia jądra końcowego (po emisji cząstki i)

σ_i - przekrój czynny na produkcję jądra złożonego w procesie odwrotnym

m_i, s_i, ε_i - masa, spin i energia kinetyczna emitowanej cząstki

ρ, ρ_i - gęstość poziomów jąder początkowego i końcowego

Szerokość na **rozszczepienie** (metoda stanów przejściowych),

$$\Gamma_{fiss} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{E_f^{\max}} \frac{\rho_{fiss}(E_f^{\max} - K)}{\rho(E^*)} dK$$

$E_f^{\max} = E^*(saddle) - E_{rot}(saddle) - P$

Maksymalna termiczna energia wzbudzenia w siodle

Gęstość poziomów jądrowych liczona formułą dla gazu Fermiego

$$\rho(E) \propto \exp(2\sqrt{aE})$$

• uwzględnienie efektów powłokowych

według Ignatyuk'a (A.V. Ignatyuk et al., Sov. J. Nucl. Phys. 29 (1975) 255)

$$a = a_{macro} \left[1 + \frac{\delta_{shell}}{U} \left(1 - e^{-U/E_d} \right) \right]$$

gdzie: U - energia wzbudzenia, E_d - parametr tłumienia

δ_{shell} - poprawka powłokowa, δ_{shell} (g.s.) (Möller et al., At. Data Nucl. Data Tables 59 (1995) 185),

$\delta_{shell}(\text{saddle}) \approx 0$

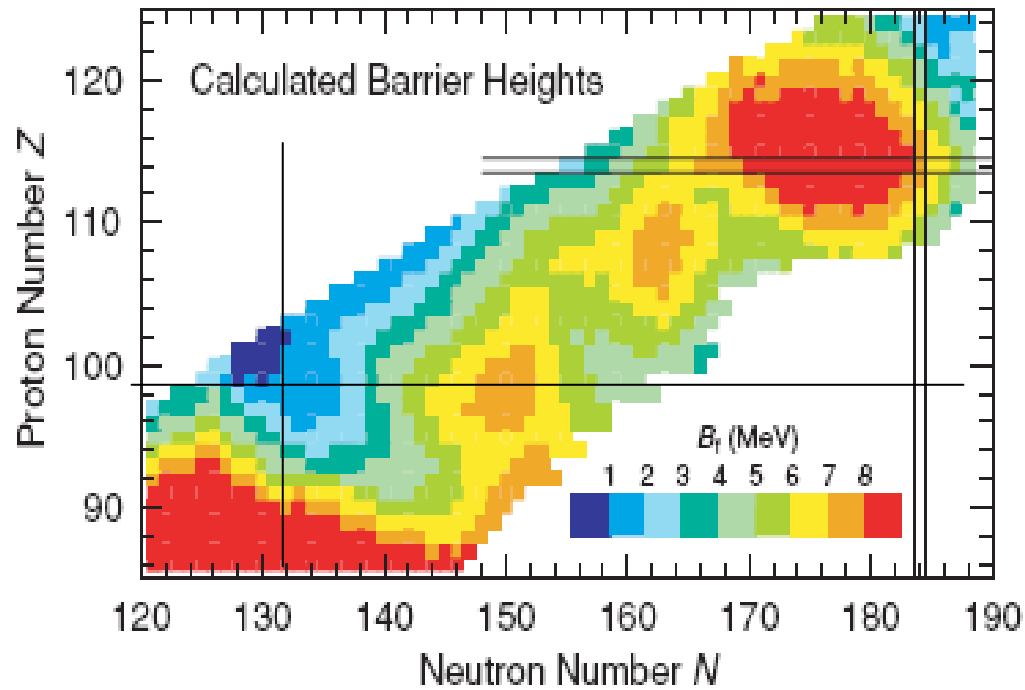
$$a_{macro} = 0.04543 r_0^3 A + 0.1355 r_0^2 A^{2/3} B_s^j + 0.1426 r_0 A^{1/3} B_k^j$$

$$r_0 = 1.153 \text{ fm} \quad (\text{W. Reisdorf, Z. Phys. A. - Atoms and Nuclei 300 (1981) 227})$$

$$E_d = 18.5 \text{ MeV}$$

$$B_s, B_k \quad (\text{W.D. Myers and W.J. Świątecki, Ann. Phys. 84 (1974) 186})$$

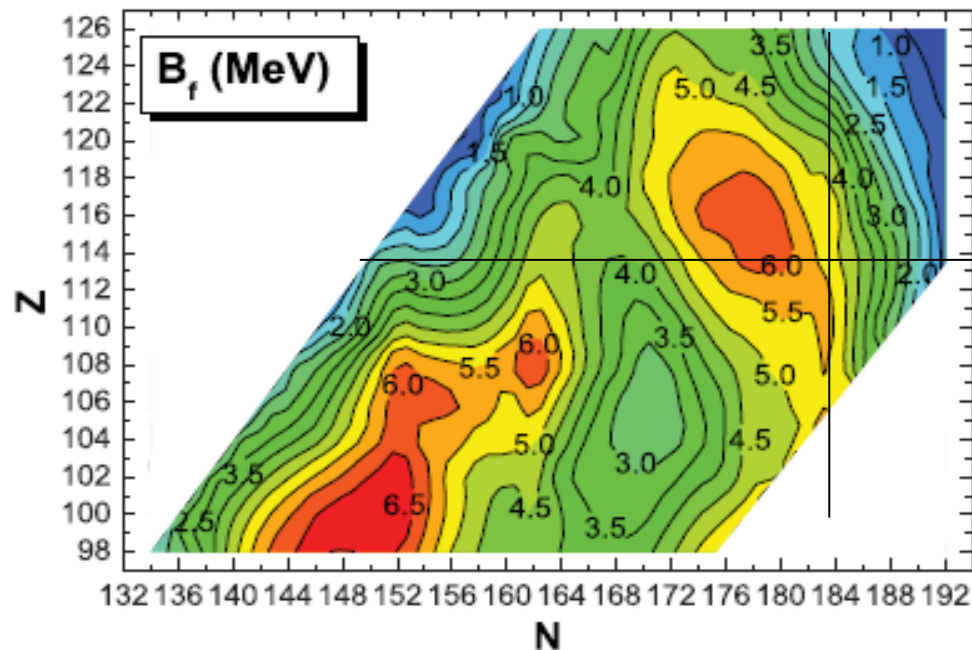
Do wyznaczenia $P(\text{survive})$ musimy znać **masy** uczestniczących w procesie jąder, wysokości **barier na rozszczepienie**, wartości **poprawek powłokowych** oraz **parametry deformacji** w stanie podstawowym i w siodle.



P. Möller et al., PRC 79, 064304 (2009)

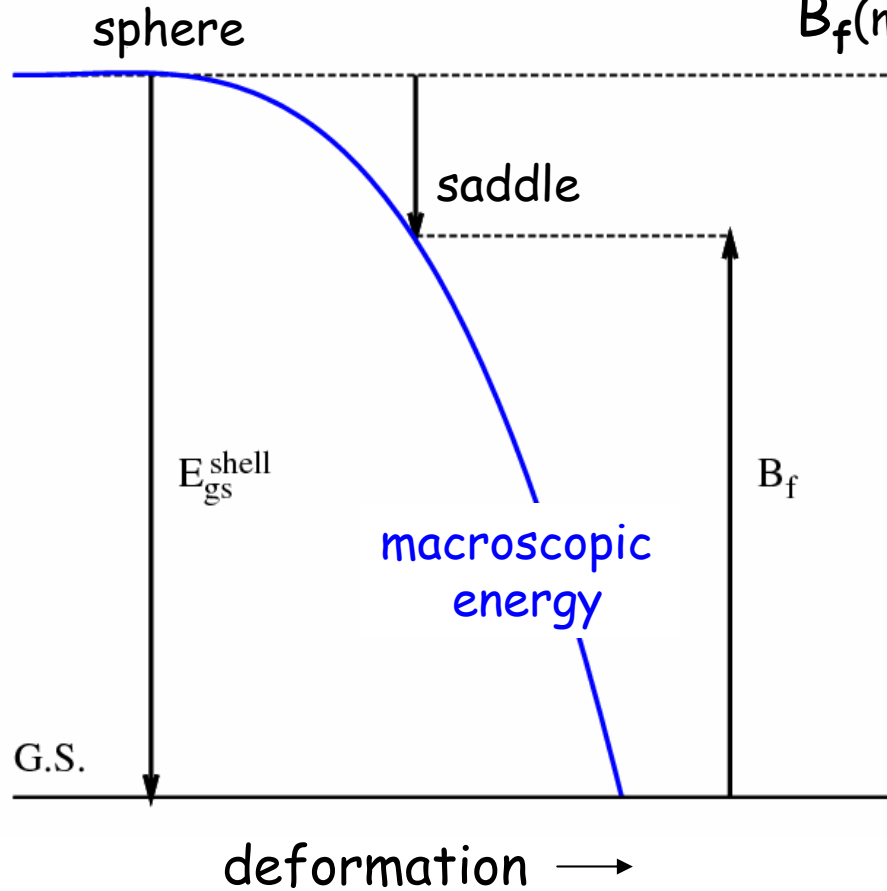
TABLE IV. Comparison of fission barrier heights (in MeV) with other theoretical evaluations: SHF [58], FRLDM [19], ETFSI [60], HN (present paper), and experimental data taken from Ref. [61].

| Nucleus | SHF | FRLDM | ETFSI | HN | EXP |
|-------------------|------|-------|-------|------|-----|
| $^{284}_{112}172$ | 6.06 | 7.41 | 2.2 | 4.29 | 5.5 |
| $^{286}_{112}174$ | 6.91 | 8.24 | 3.6 | 5.01 | 5.5 |
| $^{288}_{114}174$ | 8.12 | 9.18 | 6.1 | 5.53 | 6.7 |
| $^{290}_{114}176$ | 8.52 | 9.89 | 6.6 | 5.83 | 6.7 |
| $^{292}_{114}178$ | — | 9.98 | 7.2 | 6.34 | 6.7 |
| $^{292}_{116}176$ | 9.35 | 9.26 | 6.5 | 6.22 | 6.4 |
| $^{294}_{116}178$ | 9.59 | 9.46 | 7.2 | 6.28 | 6.4 |
| $^{296}_{116}180$ | — | 9.10 | 7.2 | 6.07 | 6.4 |
| $^{294}_{118}176$ | — | 8.48 | 6.6 | 5.99 | — |
| $^{296}_{118}178$ | — | 8.36 | 7.0 | 6.04 | — |
| $^{298}_{118}180$ | — | 8.05 | 7.4 | 5.72 | — |
| $^{296}_{120}176$ | — | 7.69 | 6.2 | 5.64 | — |
| $^{298}_{120}178$ | — | 7.33 | 6.6 | 5.50 | — |
| $^{300}_{120}180$ | — | 7.01 | 6.8 | 5.05 | — |
| $^{302}_{120}182$ | — | 6.07 | 7.2 | 4.66 | — |
| $^{304}_{120}184$ | — | 4.86 | 6.8 | 4.20 | — |



M. Kowal, P. Jachimowicz, A. Sobiczewski, PRC 82, 014303 (2010)

Bariera na rozszczepienie



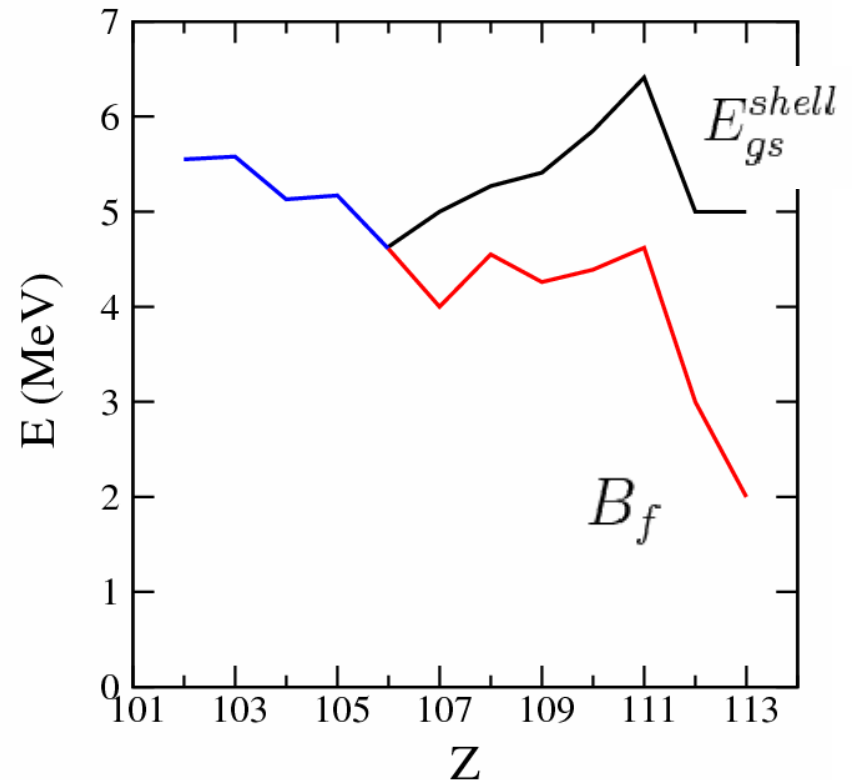
makroskopowa energia w siodle →
deformacja w siodle (A. Sobiczewski
et al.)

$$B_f = E_{saddle} - E_{gs}$$

$$B_f \approx B_f(\text{macro}) - E_{gs}^{shell}$$

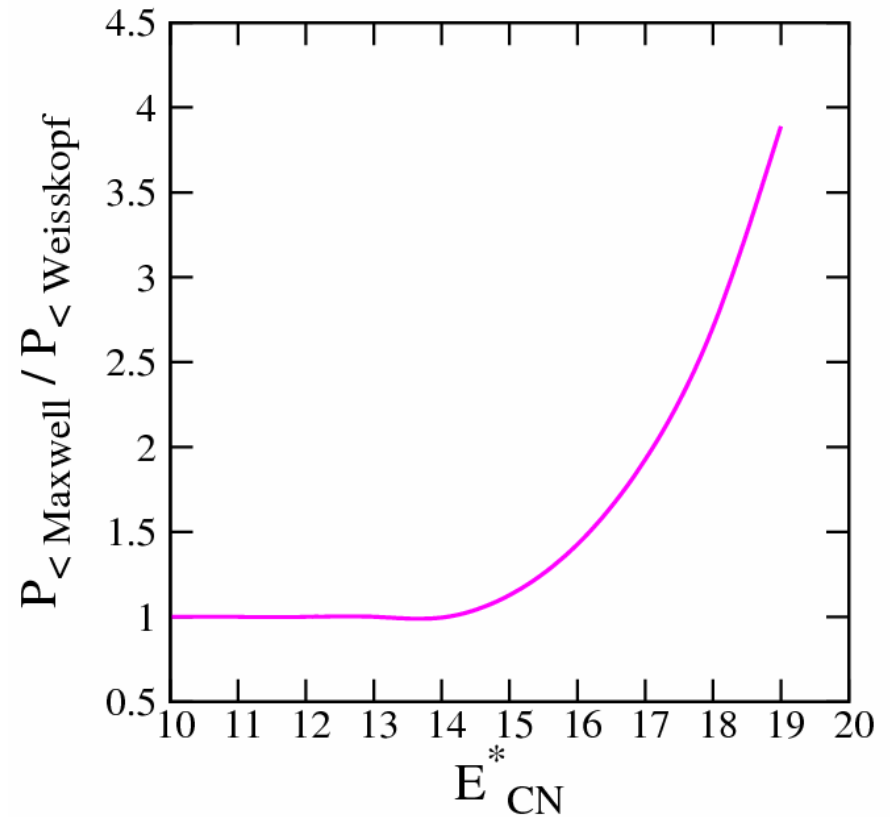
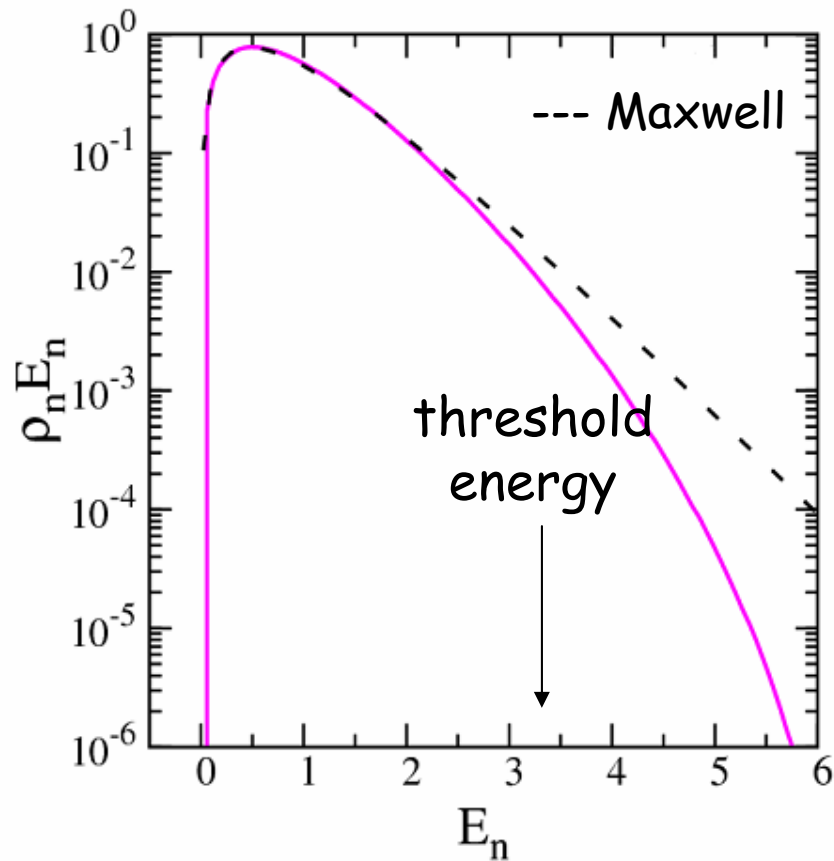
$$B_f(\text{macro}) = E_{saddle}(\text{macro}) - E_{sphere}(\text{macro})$$

Jądra o $Z > 106$ nie mają
barier makroskopowych



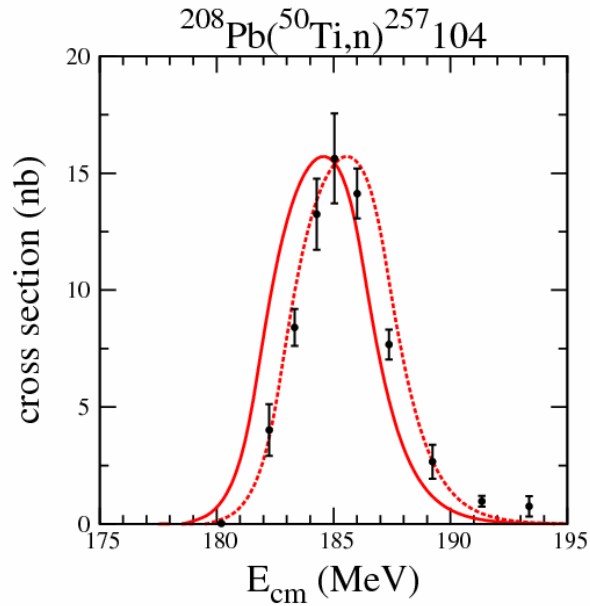
$$\sigma(\text{synthesis}) = \pi \hat{\lambda}^2 \sum_{l=0}^{l_{\max}} (2l+1) P_l(\text{fusion}) \frac{\Gamma_n}{\Gamma_{\text{tot}}} P_{<}$$

$P_{<}$ Kształt widma neutronów
 $\rho(A-1, E^*) E_n$

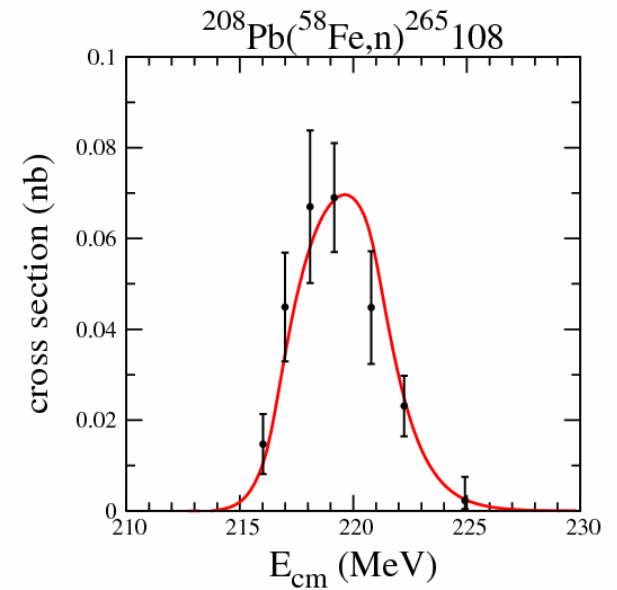
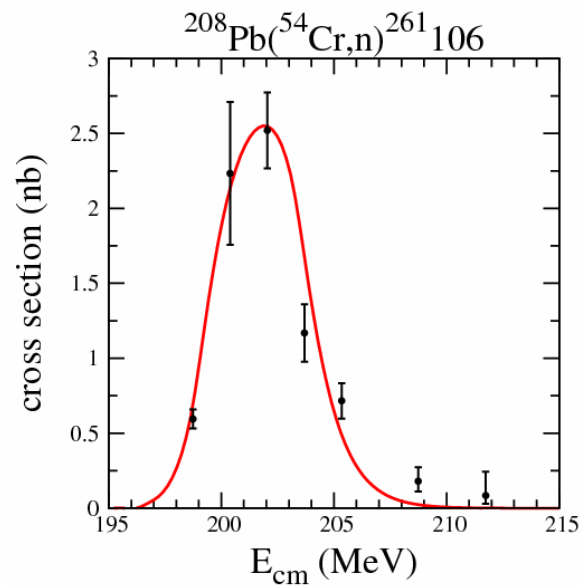
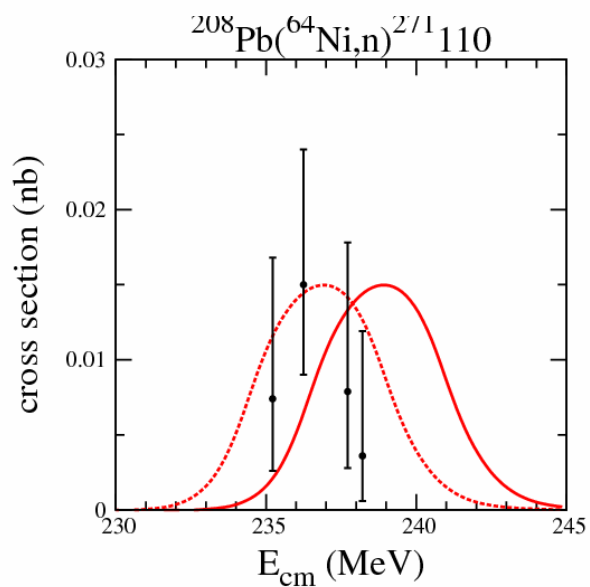
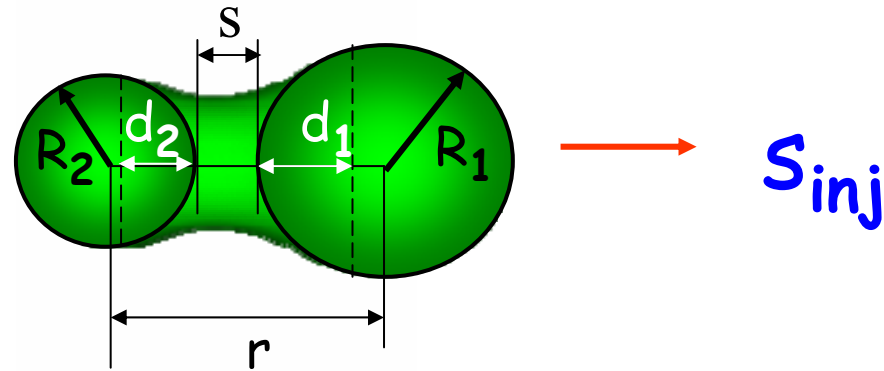


Prawdopodobieństwo $P_{<}$

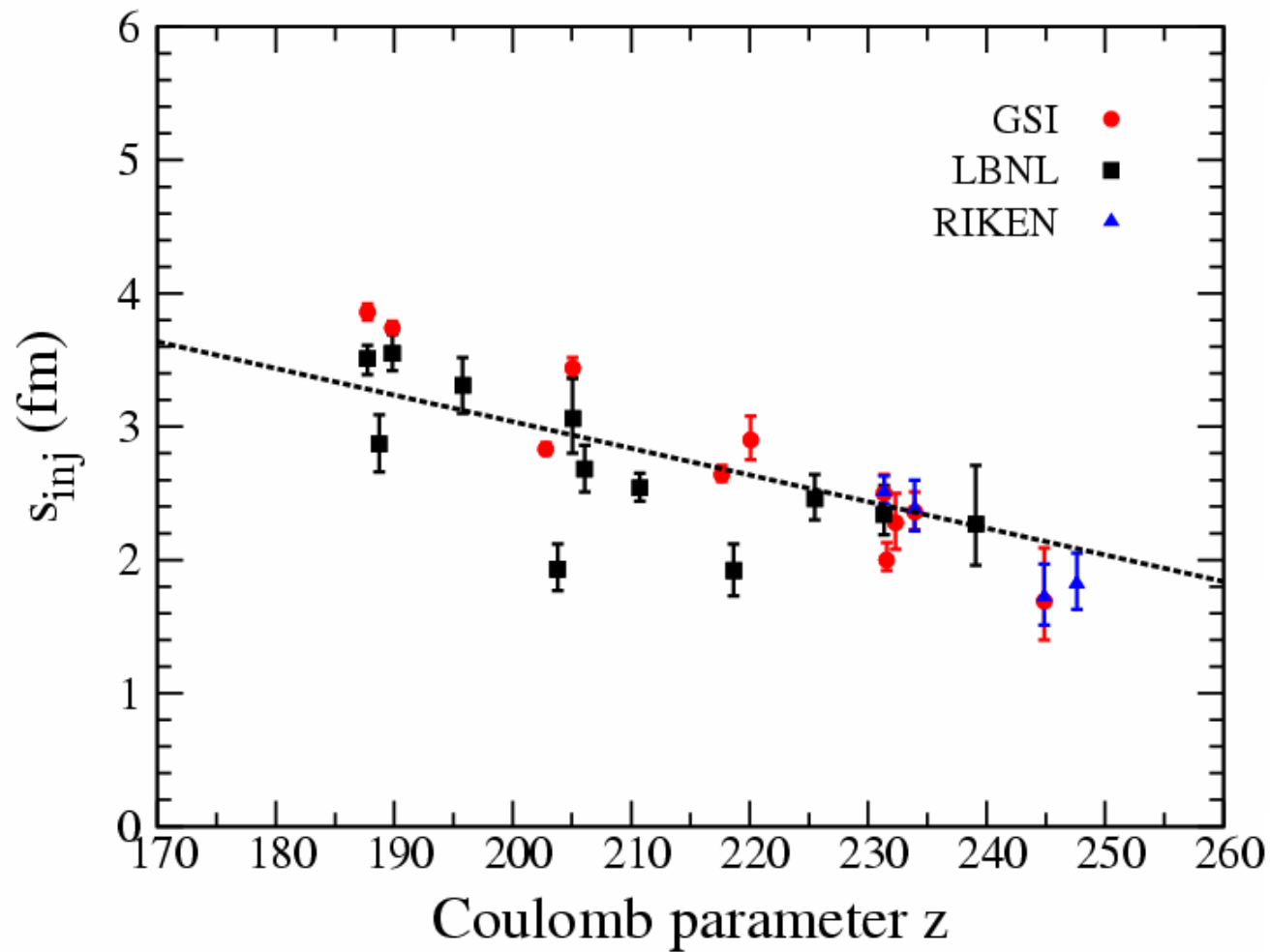
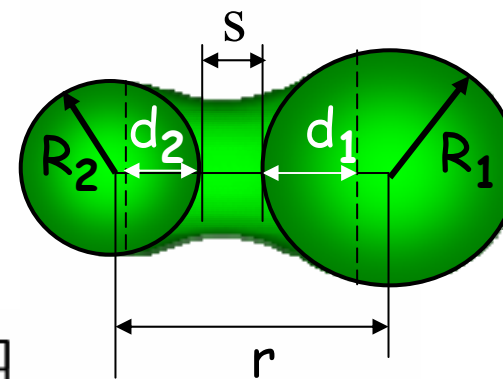
$$\sigma(\text{synthesis}) = \pi \hat{\lambda}^2 \sum_{l=0}^{l_{\max}} (2l+1) P_l(\text{fusion}) P_l(\text{survive})$$



Dopasowanie do 27 krzywych wzbudzenia



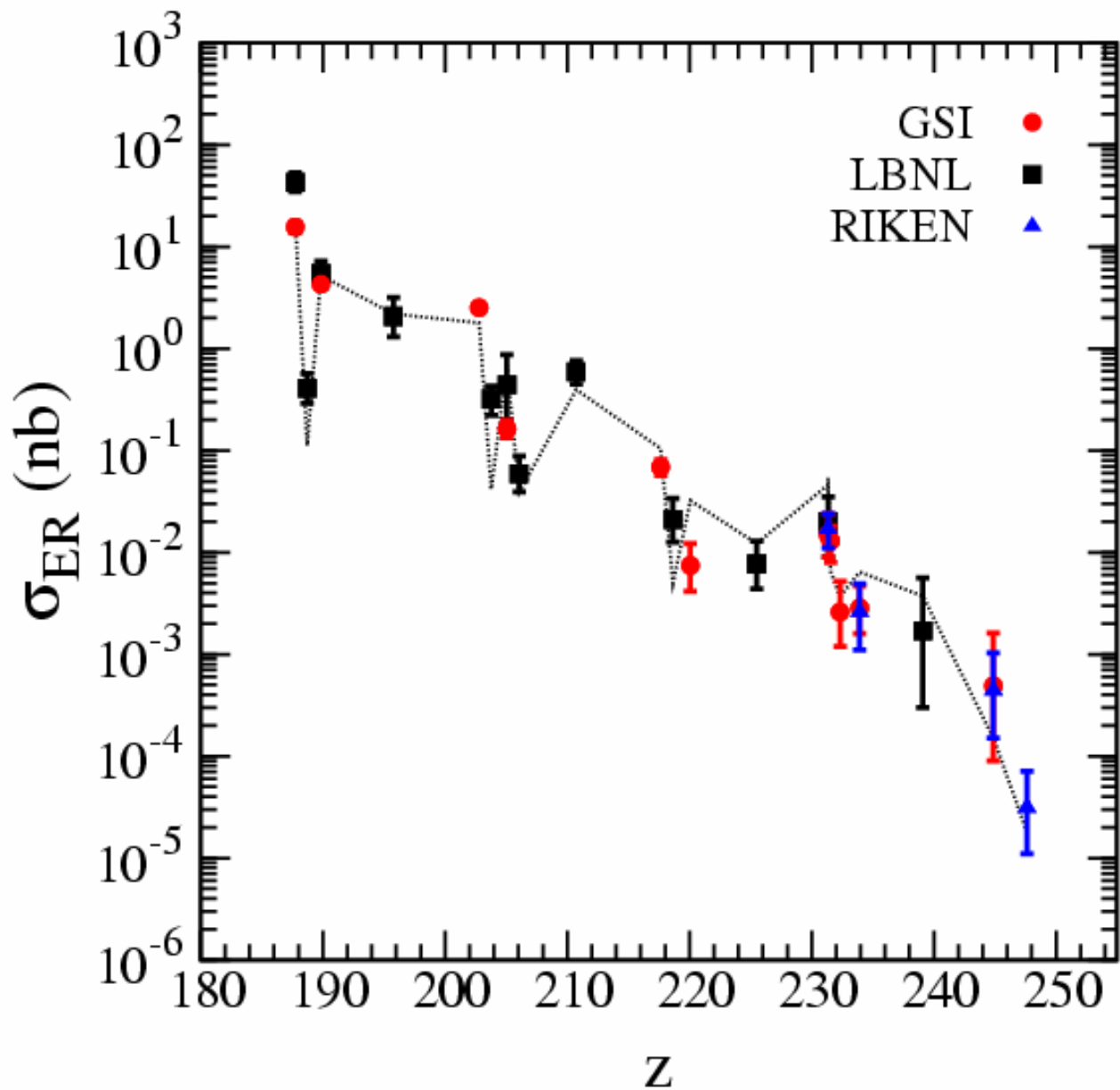
Parametryzacja s_{inj}



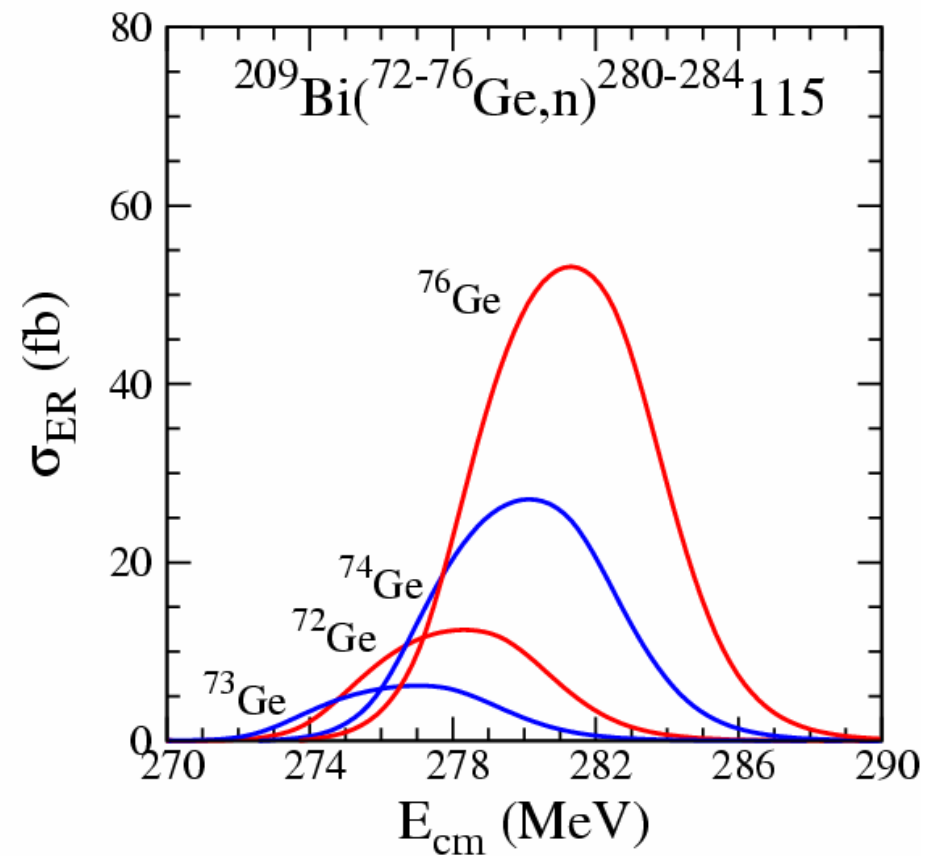
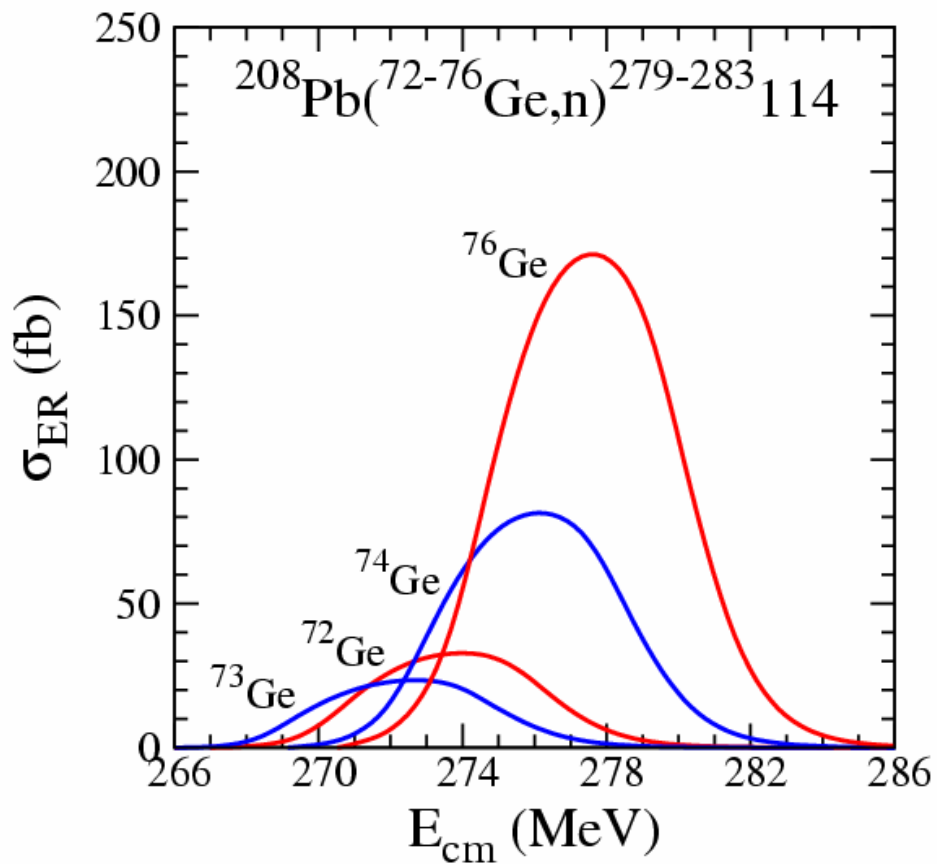
Coulomb parameter

$$z = \frac{Z_p Z_T}{A_P^{1/3} + A_T^{1/3}}$$

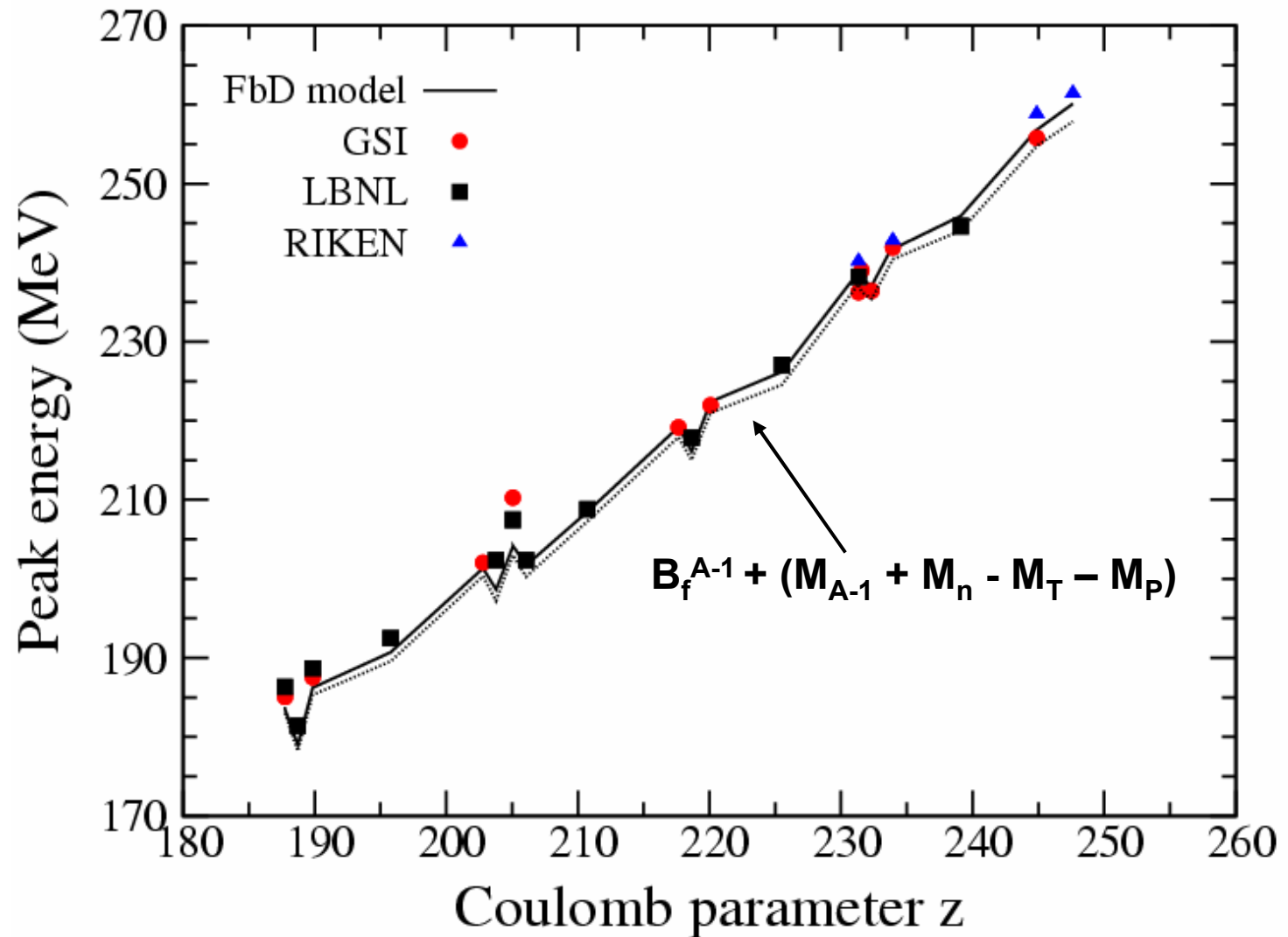
wyniki



Przewidywania dla $Z = 114$ i 115



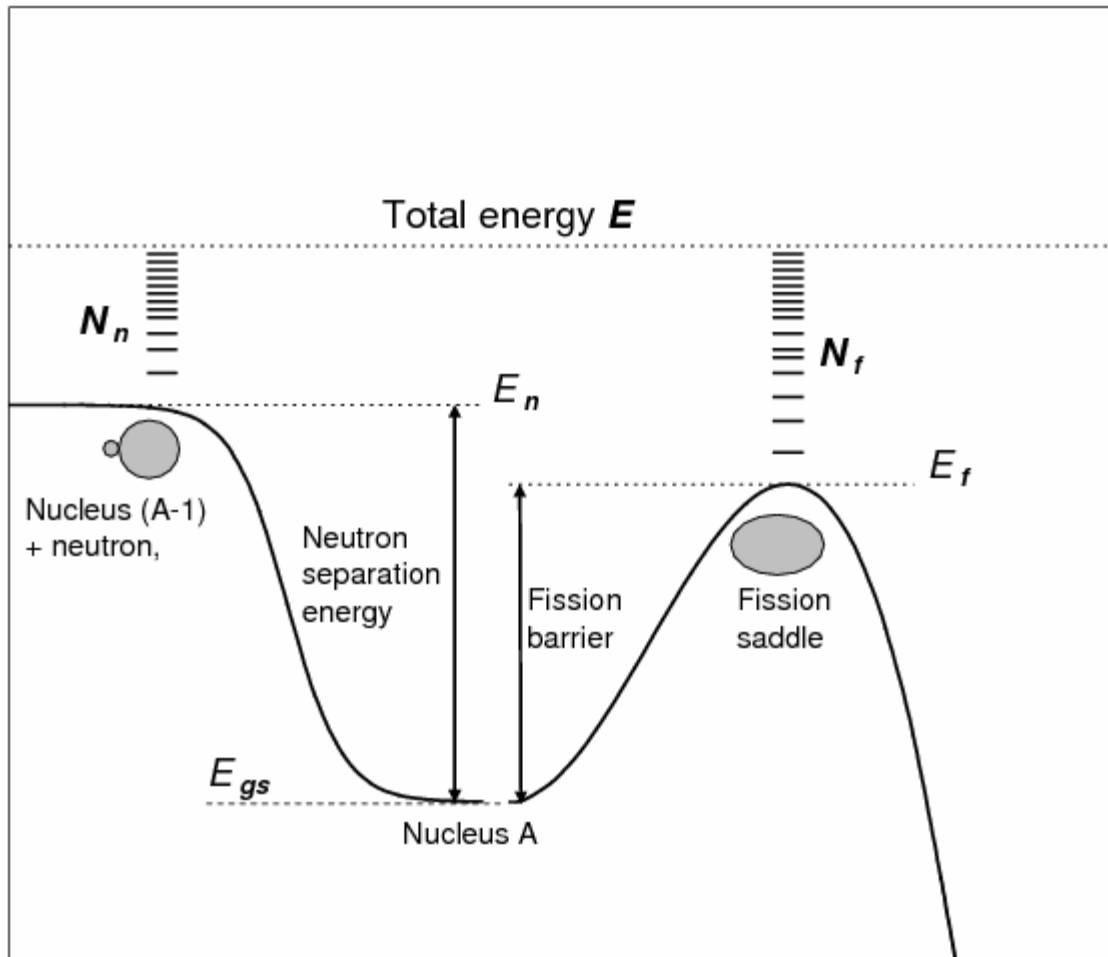
Możliwość wyznaczenia wysokości bariery na rozszczepienie poprzez określenie położenia maksimum przekroju czynnego dla reakcji $1n$



Podsumowanie

Przedstawiono **model** umożliwiający wyznaczenie przekrojów czynnych na reakcje **syntezy jąder superciężkich** w reakcjach zimnej fuzji. Uzyskano bardzo dobrą zgodność z wynikami eksperymentalnymi.

Zaproponowano **modelowo niezależną** metodę wyznaczenia (w przyszłości) **wysokości barier** na rozszczepienie poprzez eksperymentalne wyznaczenie wartości energii odpowiadającej położeniu maksimum krzywej wzbudzenia w reakcji syntezy z emisją 1 neutronu. (Trzeba będzie znać precyzyjnie energię wiązki).



$$E = E_{gs} + E^* - \text{total energy}$$

$$E_n = (M_n + M_{A-1}) c^2 = E_{gs} + B_n$$

E_f - the saddle-point energy

Aby obliczyć

$$\Gamma_n / \Gamma_f$$

musimy wyznaczyć gęstość stanów jądra (A-1)

$$\rho(E - E_n)$$

oraz gęstość stanów w siodle dla jądra A

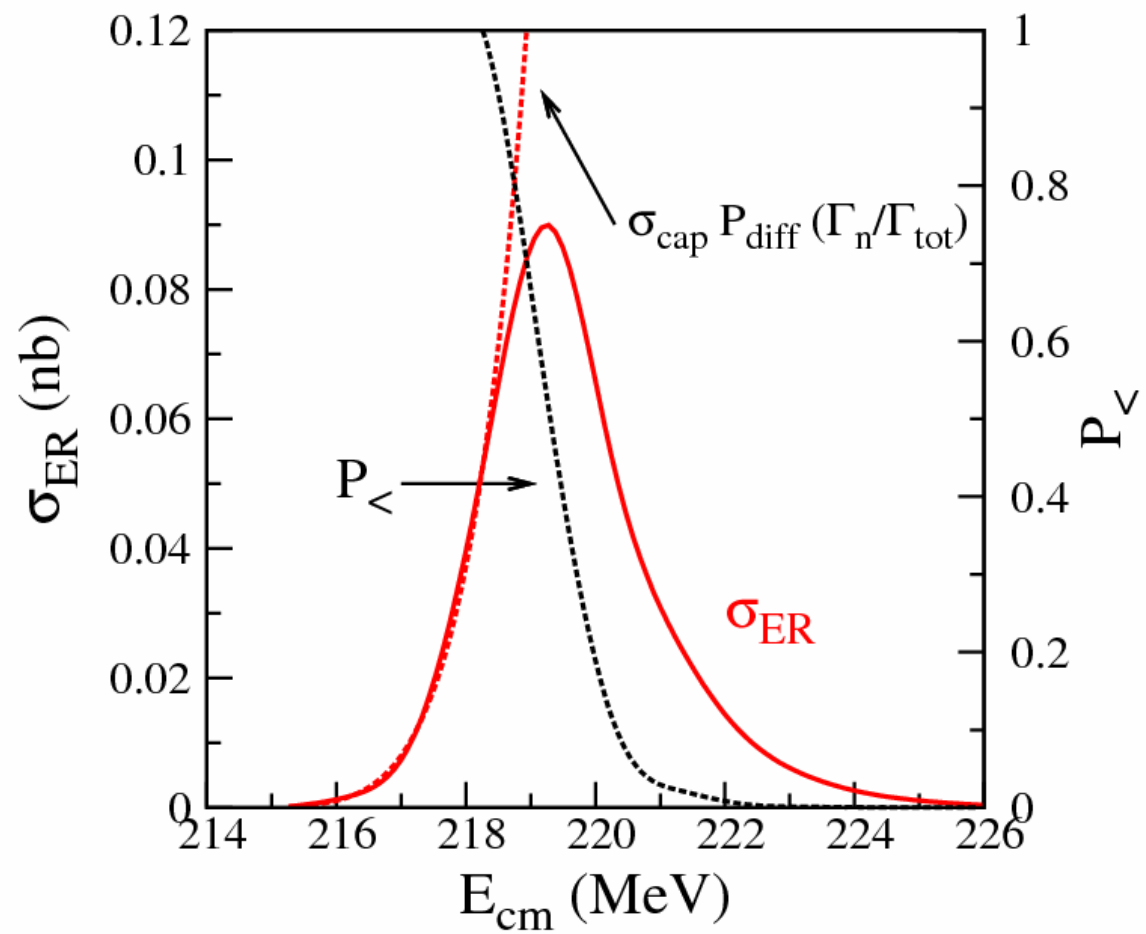
$$\rho(E - E_f)$$

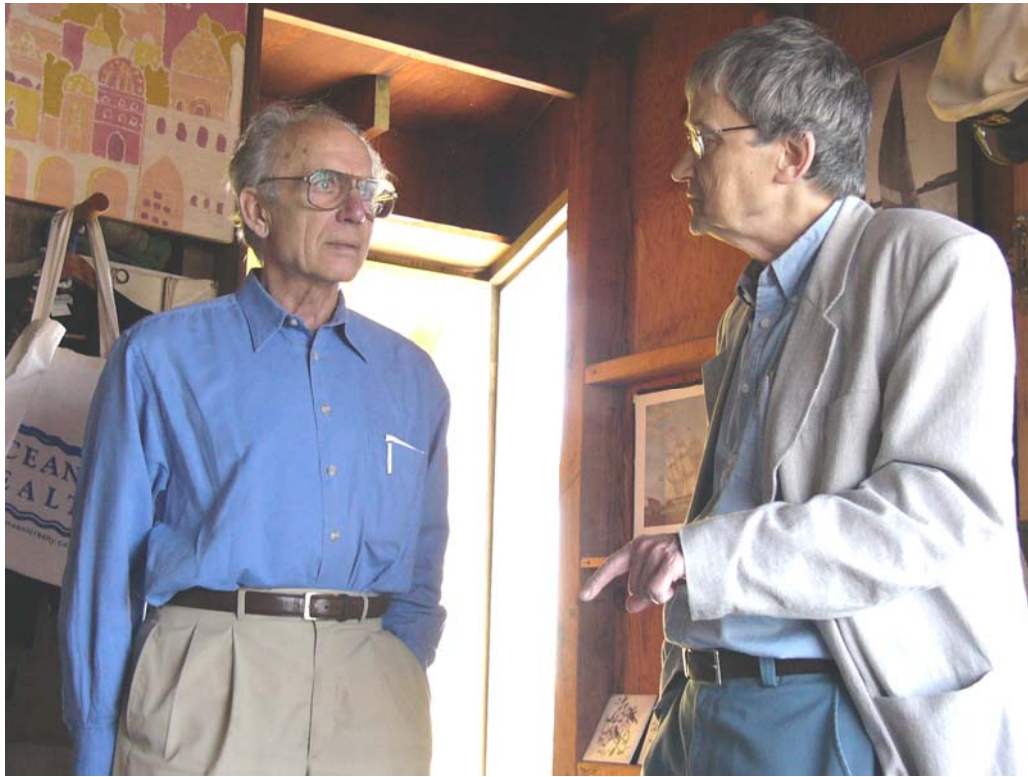
$$E - E_n = E_{gs} + E^* - E_{gs} - B_n = E^* - B_n$$

$$E - E_f = E_{gs} + E^* - E_f = E^* - (E_f - E_{gs})$$

$$= E^* - B_f$$

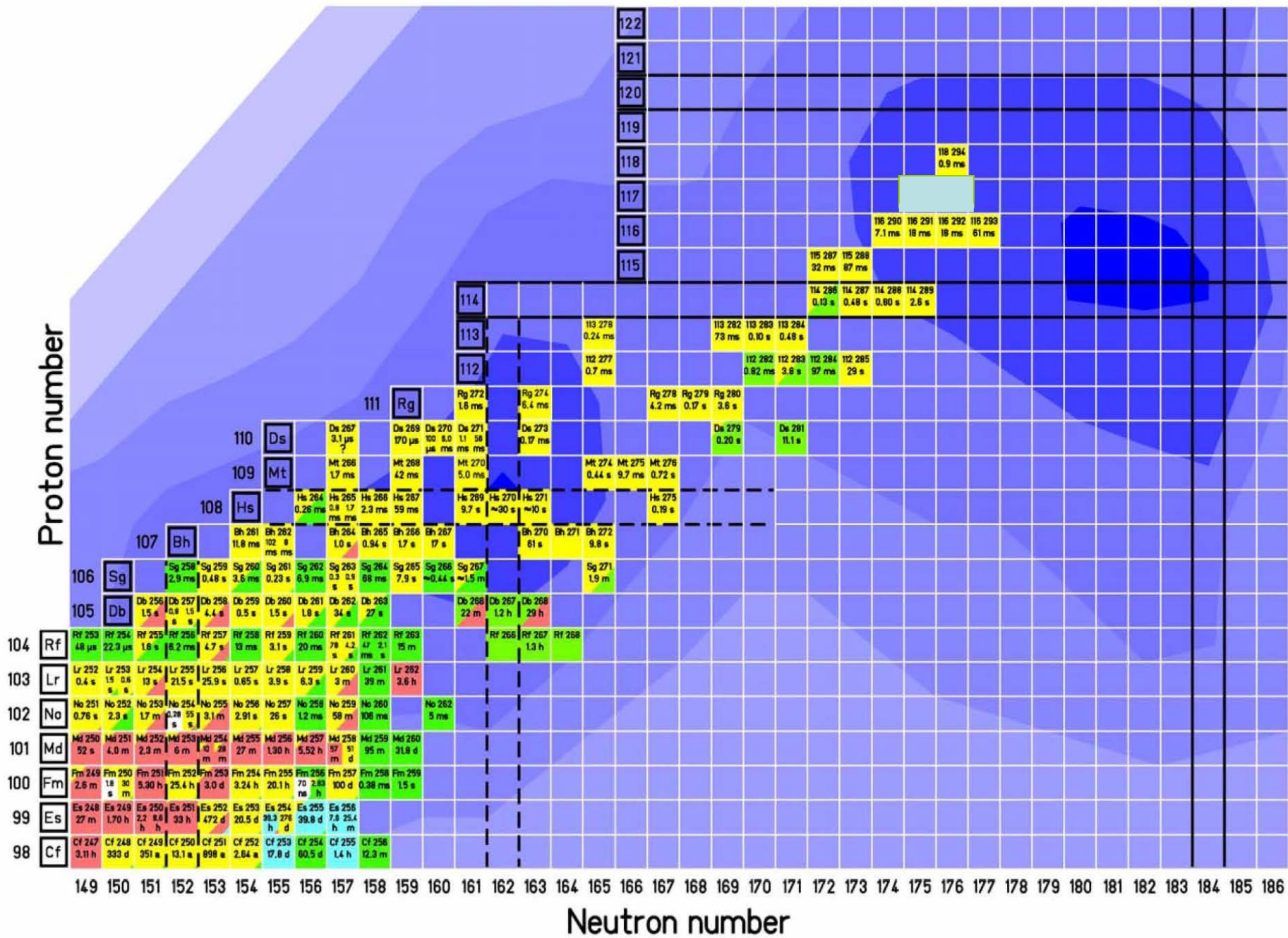
Do wyznaczenia Γ_n / Γ_f musimy znać masy uczestniczących w procesie jąder, wartości barier na rozszczepienie, wartości poprawek powłokowych w stanie podstawowym i w siodle, parametry deformacji...



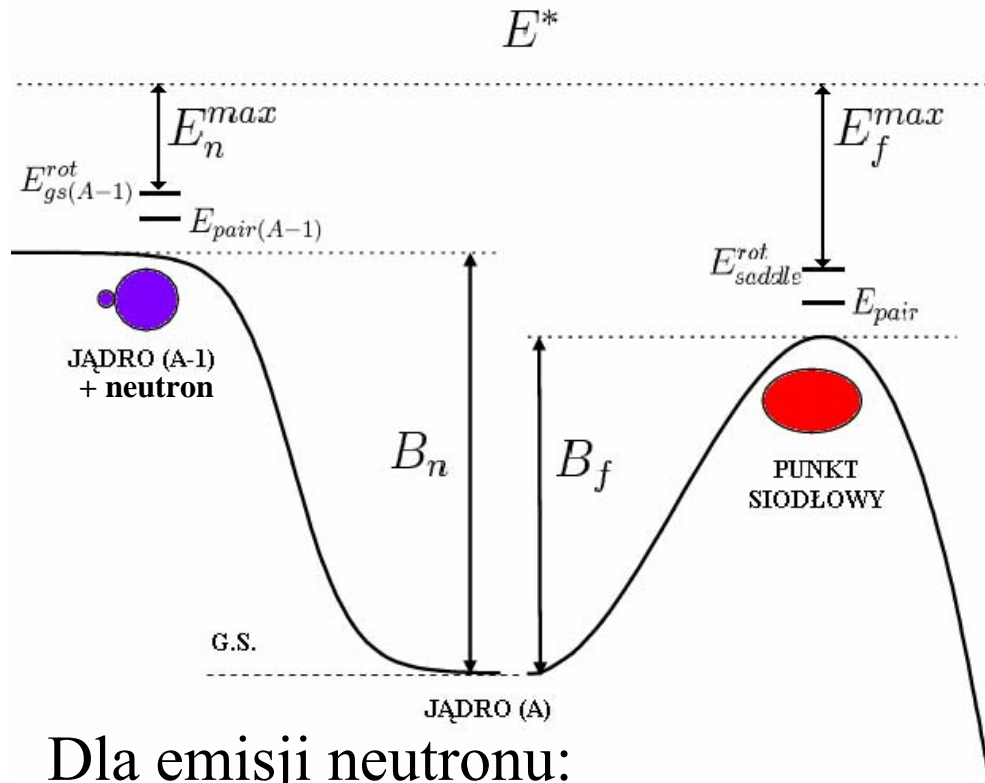


on Wlodek's boathouse





Wpływ spinu na stosunek Γ_n / Γ_{tot}



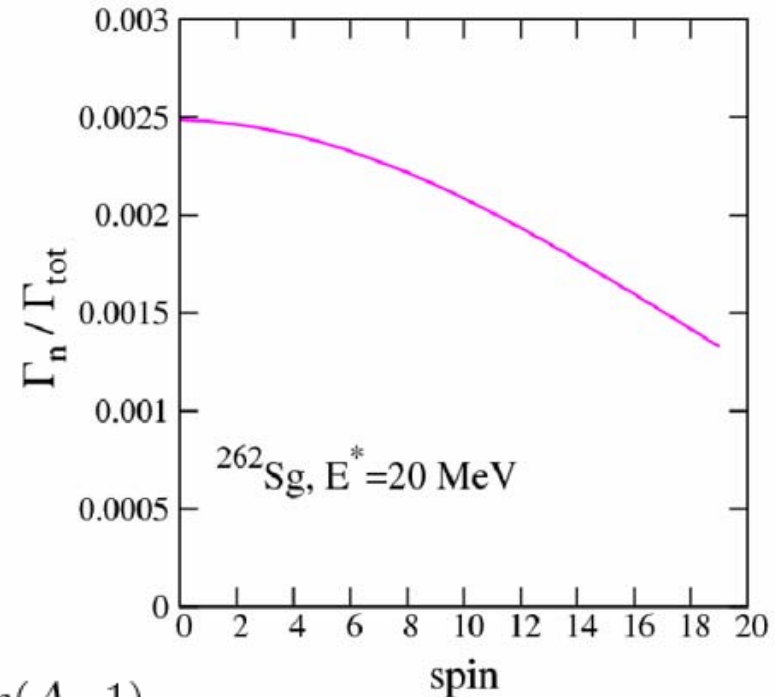
Dla emisji neutronu:

$$E_n^{max} = E^* - B_n - E_{gs(A-1)}^{rot} - E_{pair(A-1)}$$

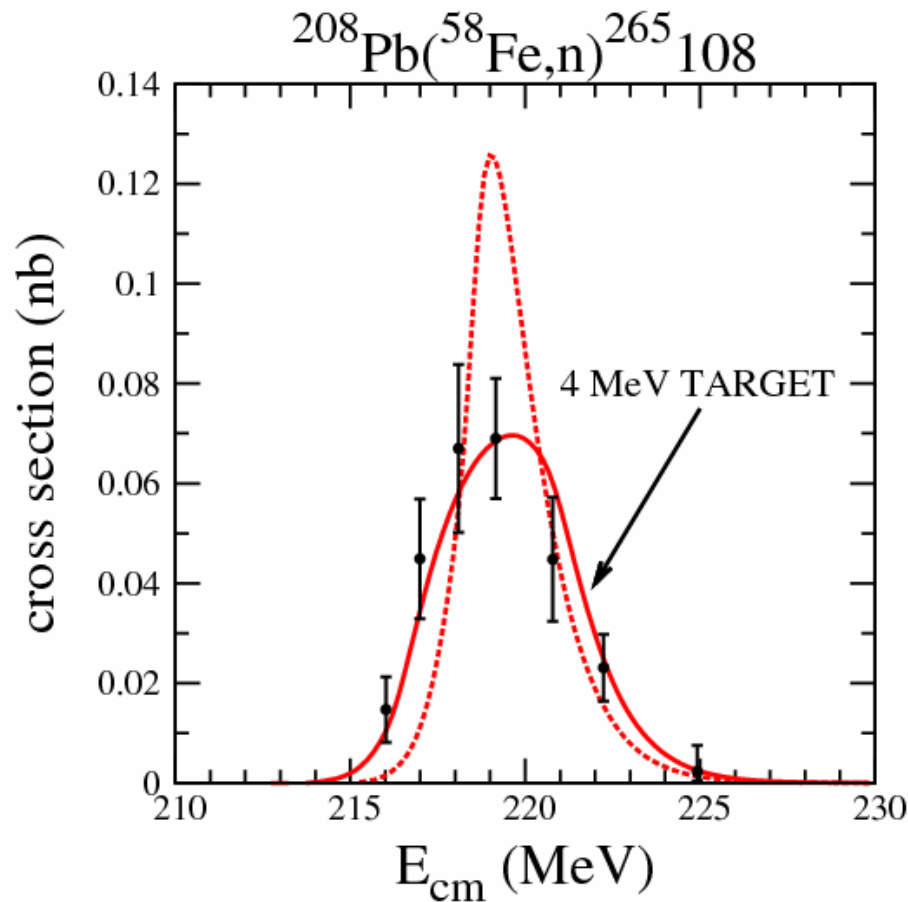
Dla rozszczepienia:

$$E_f^{max} = E^* - B_f - E_{saddle}^{rot} - E_{pair}$$

Słaba zależność od spinu



Systematyka



Eksperymenty:

- Mała statystyka (czasami kilka zdarzeń w eksperymencie)
- Duże różnice w zmierzonych przekrojach czynnych w różnych ośrodkach
- Niepewna kalibracja energetyczna
- Grubość tarcz: 3 – 6 MeV