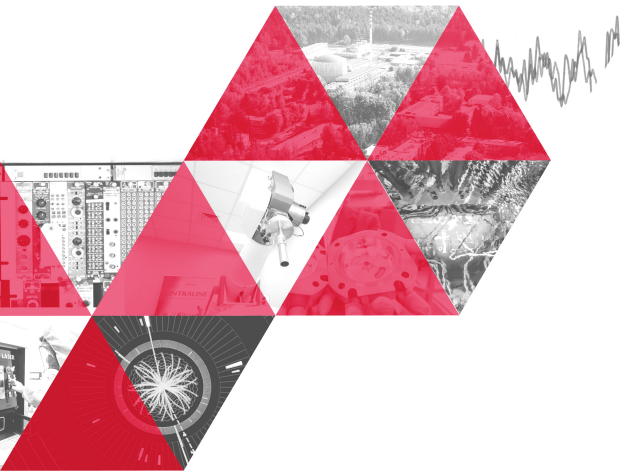


# Reakcje wielonukleonowego transferu i fragmentacji w zderzeniach niefuzyjnych układów jądrowych



NATIONAL  
CENTRE  
FOR NUCLEAR  
RESEARCH  
ŚWIERK

T. Cap





- Fizyka reakcji jądrowych przy niskich i pośrednich energiach bombardowania,  $E_{Coulomb} < E_{Pocisk} < E_{Fermi}$

- Układy niefuzyjne:  $P + T \nrightarrow CN^*$

Brak formalnej definicji  $\rightarrow$  układy dla których  $P_{fusion} \ll 1$  ( $P_{fusion} \approx 0$ )

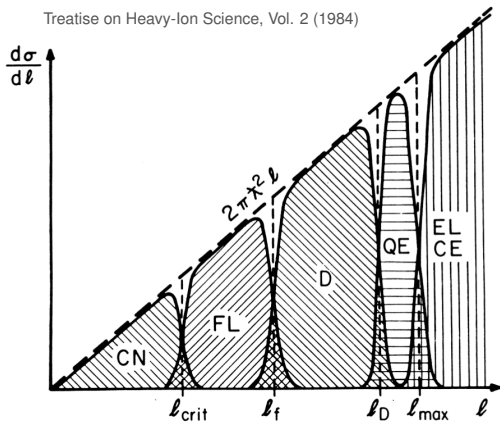
Głównie symetryczne, bardzo ciężkie układy, typu:

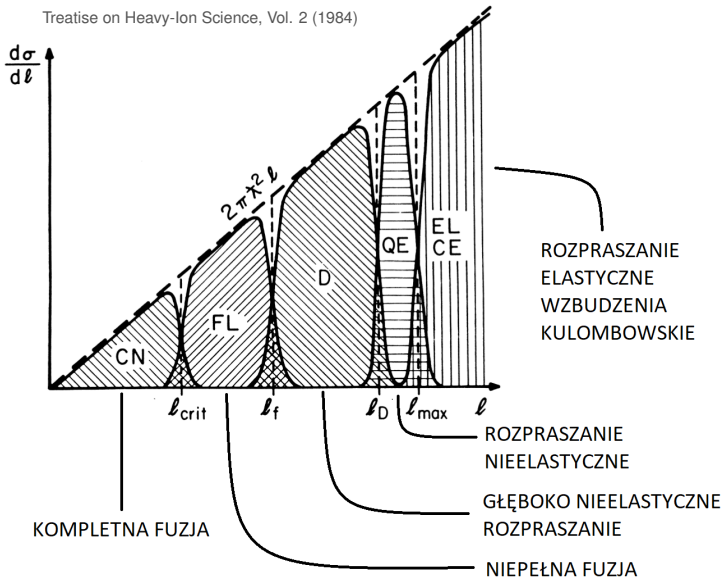


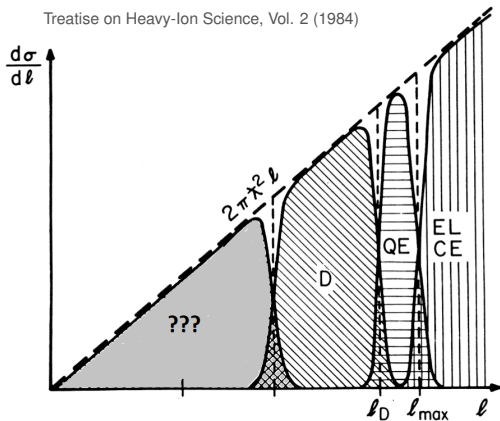
ale również  ${}_{54}^{136}\text{Xe} + {}_{54}^{136}\text{Xe}$  ( $P_{fusion} \approx 10^{-6}$ ), czy np.  ${}_{92}^{238}\text{U} + {}_{28}^{64}\text{Ni}$

- Transfer masy i energii  $\rightarrow$  Słabo zbadane kanały rozpadu



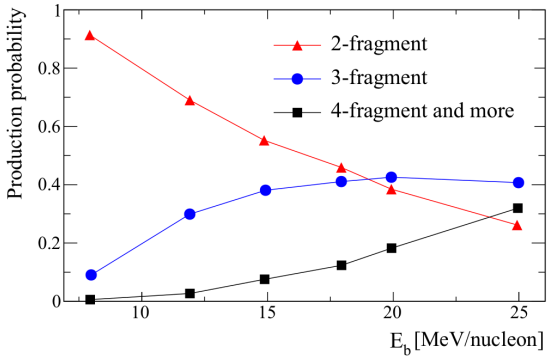






Dostęp do małych  $b$   
Obszar zderzeń centralnych

- Zderzenia silnie tłumione
- $P + T \rightarrow PLF^* + TLF^*$
- Dłuższy czas oddziaływania (orbitowanie)
- Znaczna dyssypacja energii ruchu względnego  $P + T$
- Masywny transfer nukleonowy
- Duże deformacje, spiny i  $E^*$
- Sekwencyjne rozpady  $PLF^*$  i  $TLF^*$
- Procesy nierównowagowe



$^{129}\text{Xe} + ^{\text{nat.}}\text{Sn}$

@GANIL, INDRA

Fragmety o  $Z \geq 10$

Średnia krotność LCP  
w zdarzeniach z 3 fragm.

@8A MeV:

$\langle M_p \rangle \approx 1$

$\langle M_\alpha \rangle \approx 1$

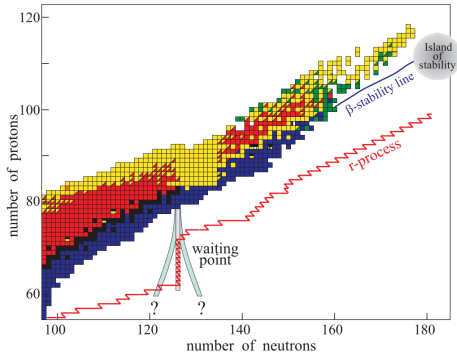
@25A MeV:

$\langle M_p \rangle \approx 5.5$

$\langle M_\alpha \rangle \approx 6$

Procesy sekwencyjne  $\rightarrow$  Procesy dynamiczne  
D. Gruyer *et al.*, Phys. Rev. C 92, 064606 (2015)

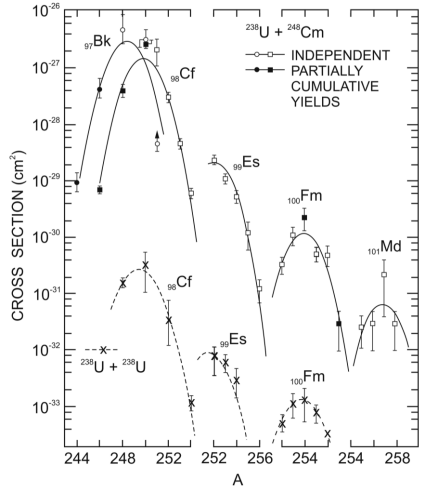




V. I. Zagrebaev and W. Greiner, PRC 83, 044618 (2011)

Transfer 10+ nukleonów  
Wzrost transferów z energią

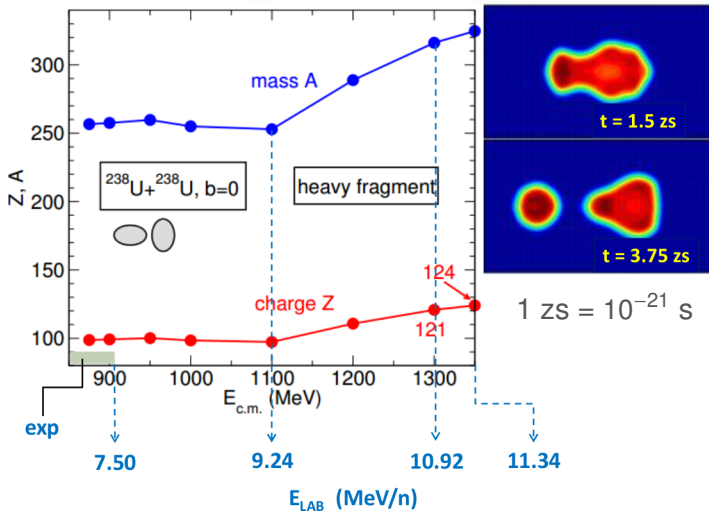
## U+Cm, U+U @ $E < 7.5A$ MeV



M.Schädel *et al.* PRL 48, 852 (1982)

J.V.Kratz *et al.* PRC 88, 054615 (2013)





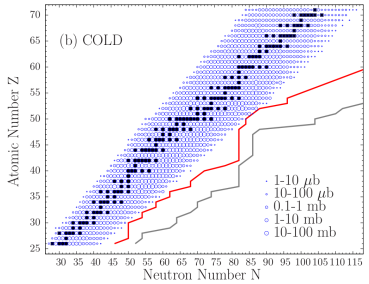
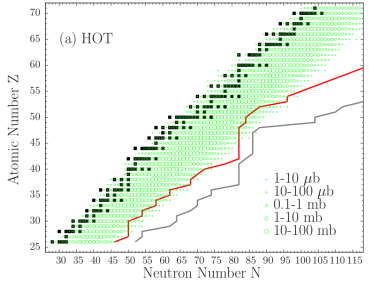
Yuri Oganessian SHE-2017, Sept. 10-14, 2017, Kazimierz Dolny, Poland

A. S. Umar, et al. (3D) TDHF, 2016





$^{238}\text{U}(20\text{MeV/nucleon}) + ^{64}\text{Ni}$



- Fragmentacja pocisku (PLF) - produktu reakcji wielonukleonowego transferu
- Fragmenty rozszczepienia PLF mogą być wysoce neutrono-nadmiarowe

Możliwy dostęp do:

- jąder istotnych dla astronomicznego procesu  $r$
- jąder z okolic linii oderwania neutronu

Model DIT/SMM

N. Vonta *et al.*, PRC 94, 064611 (2016)



## Wyzwania:

- Brak danych doświadczalnych
- Słabo zbadane mechanizmy produkcji fragmentów końcowych
- Małe przekroje czynne
- Identyfikacja fragmentów o niskich energiach

## Reakcje Au + Au @23A MeV oraz @15A MeV

I. Skiwra-Chalot *et al.*, PRL 101, 262701 (2008)

J. Wilczyński *et al.*, PRC 81, 024605 (2010)

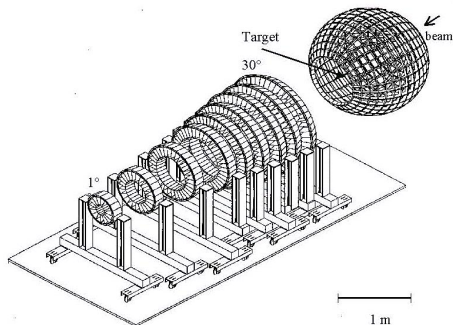
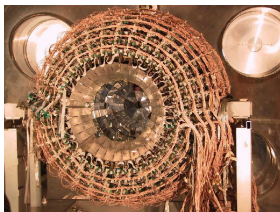
J. Wilczyński *et al.*, PRC 81, 067604 (2010)

- Badania mechanizmu reakcji
- Określenie wkładu od procesów nierównowagowych
- Skala czasowa procesów
  
- Rozwój modeli teoretycznych i lepsze zrozumienie dynamiki zderzeń ciężkich i symetrycznych układów jądrowych

# Multidetektor CHIMERA



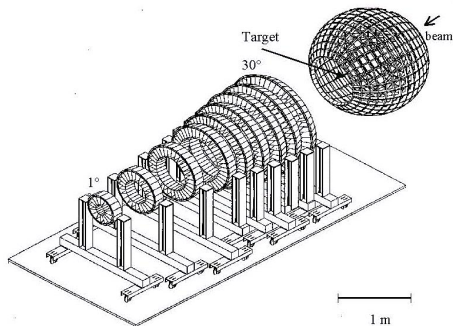
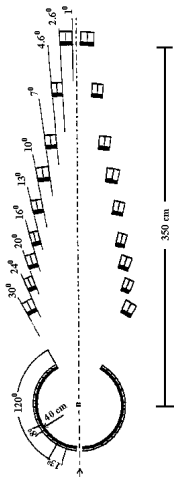
# Multidetektor **CHIMERA** (INFN LNS, Catania) **C**harged **H**eavy **I**on **M**ass and **E**nergy **R**esolving **A**rray



1192 teleskopy Si-CsI(Tl)  
Geometria  $4\pi$   
Identyfikacja  $\Delta E$ -E & TOF

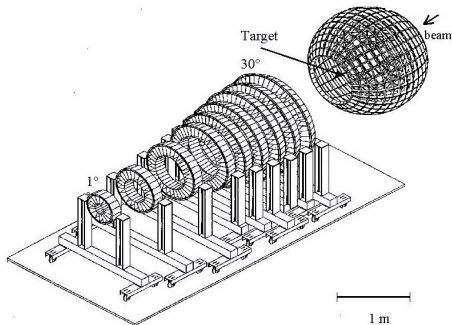
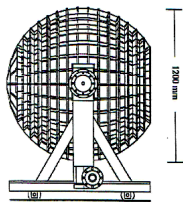
# Multidetektor **CHIMERA** (INFN LNS, Catania)

## Charged **H**eavy **I**on **M**ass and **E**nergy **R**esolving **A**rray



Część przednia:  
9 podwójnych pierścieni  
688 teleskopy,  $\theta_{LAB} \leq 30^\circ$

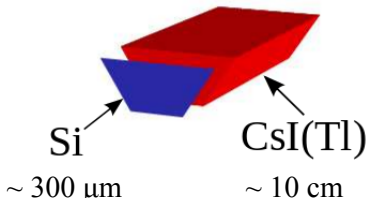
# Multidetektor **CHIMERA** (INFN LNS, Catania) Charged **H**eavy **I**on **M**ass and **E**nergy **R**esolving **A**rray



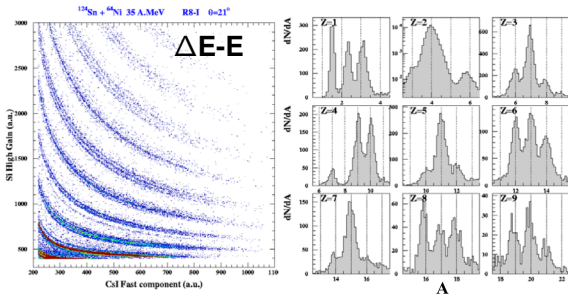
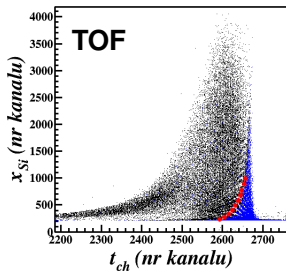
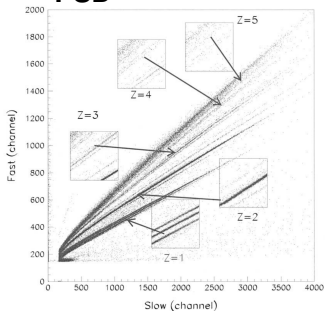
Sfera:

17 pojedynczych pierścieni  
504 teleskopy,  $30^\circ < \theta_{LAB} \leq 176^\circ$

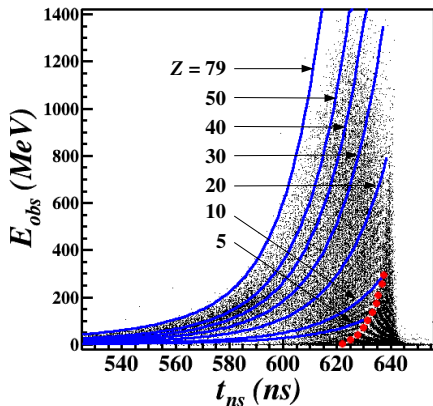
# Identyfikacja fragmentów



## PSD

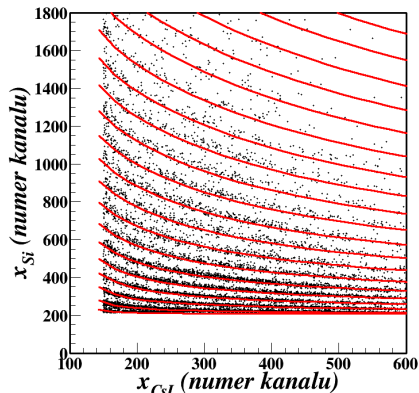


# Identyfikacja fragmentów



**Metoda TOF**

T.Cap *et al.*, Phys. Scr. T154, 014007 (2013)



**Metoda  $\Delta E$ -E**

N. Le Neindre *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A490, 251 (2002)





# Rejestracja produktów reakcji w trybie *event-by-event*

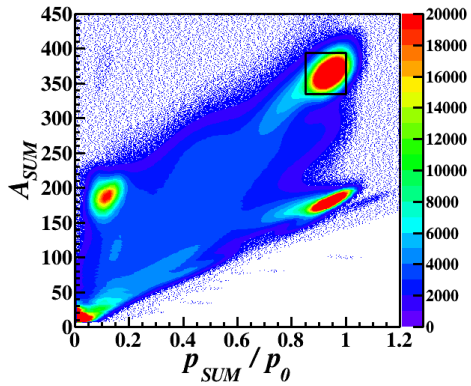
## Wielkości mierzone:

- krotność fragmentów naładowanych  $\rightarrow 2,3,4,\dots$
- kąty emisji każdego z fragmentów w układzie LAB  $\rightarrow \theta, \phi$
- energie fragmentów  $\rightarrow$  od kilku MeV do 4,5 GeV
- liczba masowa  $A$  i liczba atomowa  $Z$  fragmentów (określane na podstawie identyfikacji TOF lub  $\Delta E-E$ , dokładność kilku %)





# Charakterystyka reakcji $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$



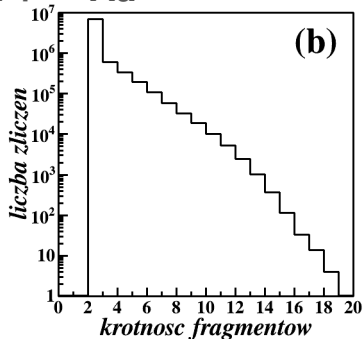
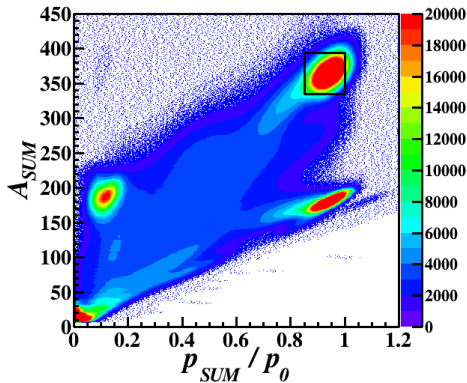
Zdarzenia kompletne:

$$\begin{cases} 335 \leq A_{SUM} \leq 394 \\ 0.85 \leq p_{SUM}/p_0 \leq 1.00 \end{cases}$$





# Charakterystyka reakcji $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$

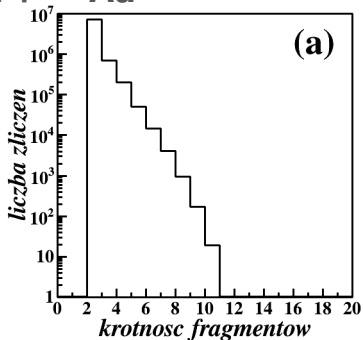
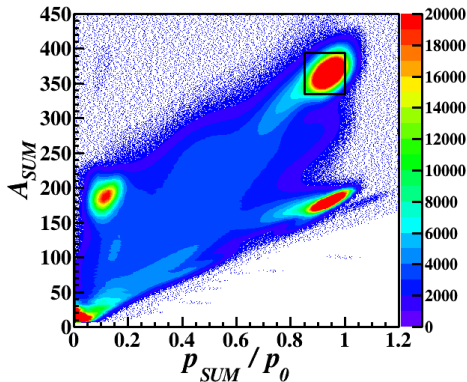


Zdarzenia kompletne:

$$\begin{cases} 335 \leq A_{SUM} \leq 394 \\ 0.85 \leq p_{SUM}/p_0 \leq 1.00 \end{cases}$$



# Charakterystyka reakcji $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$



Ciężkie fragmenty  $\geq {}^7\text{Li}$

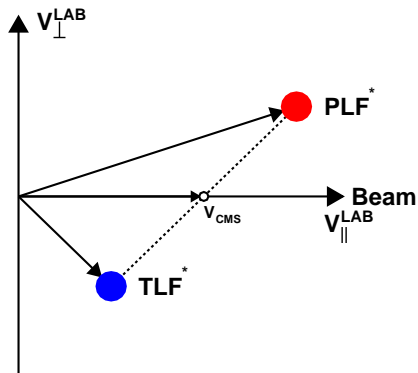
Zdarzenia kompletne:

$$\left\{ \begin{array}{l} 335 \leq A_{SUM} \leq 394 \\ 0.85 \leq p_{SUM}/p_0 \leq 1.00 \end{array} \right.$$

- 88.3% - zdarzenia binarne
- 8.5% - trzy fragmenty
- 2.5% - cztery fragmenty
- 0.7% - większe krotności



# Schemat reakcji binarnych



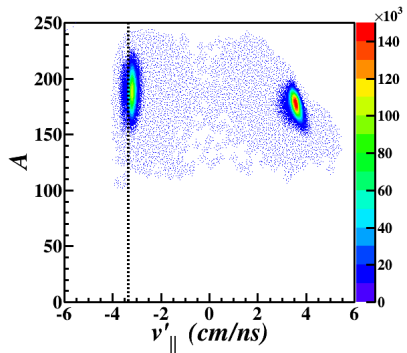
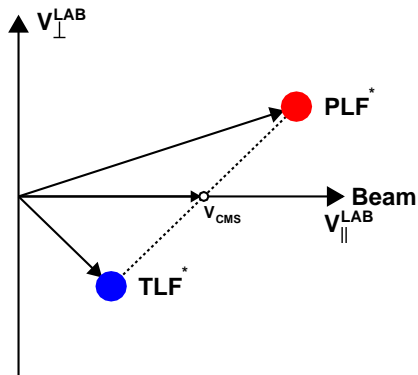
**PLF** - fragment pocisko-podobny

**TLF** - fragment tarczy-podobny





# Schemat reakcji binarnych

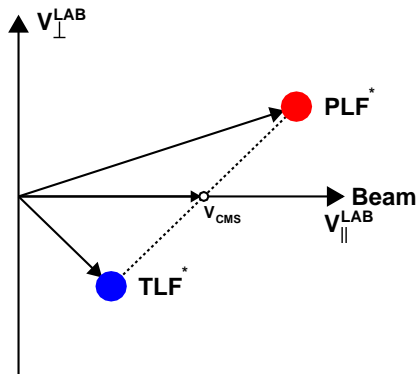


**PLF** - fragment pocisko-podobny

**TLF** - fragment tarczy-podobny



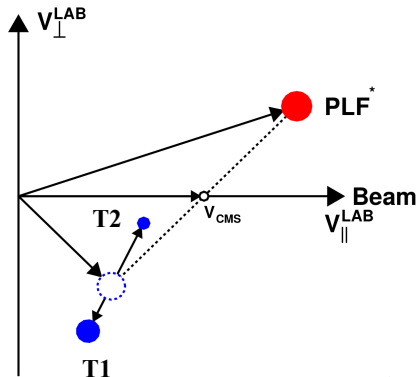
# Reakcje z trzema fragmentami



Reakcja dwustopniowa:



# Reakcje z trzema fragmentami

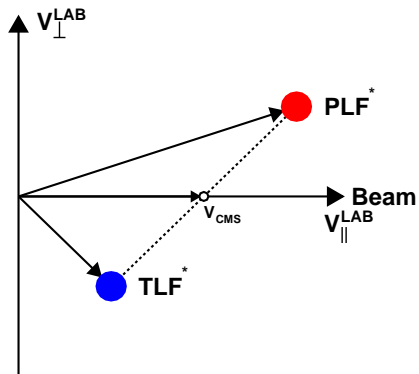


Reakcja dwustopniowa:





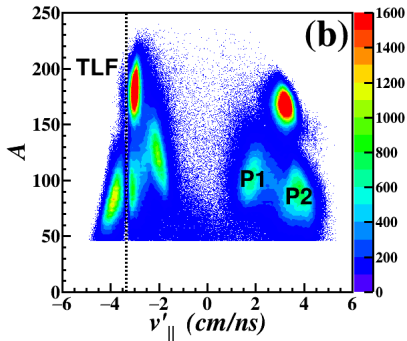
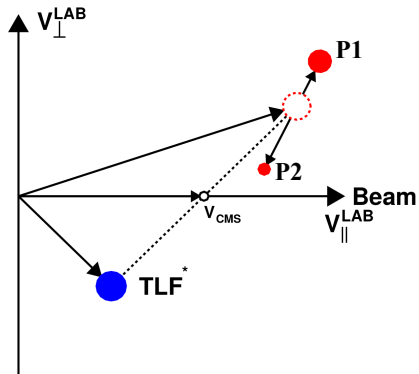
# Reakcje z trzema fragmentami



Reakcja dwustopniowa:



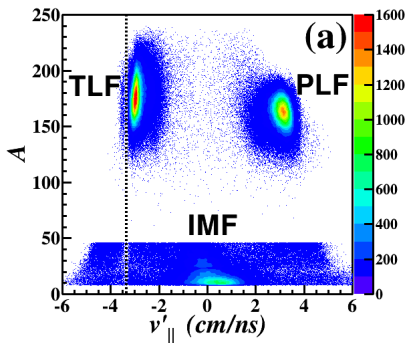
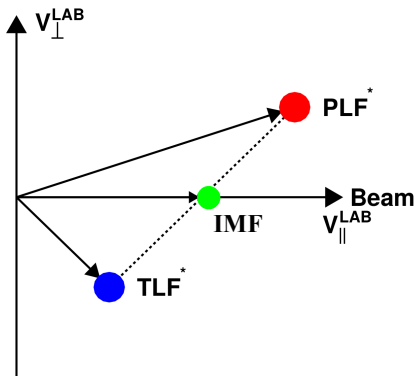
# Reakcje z trzema fragmentami



Reakcja dwustopniowa:



# Reakcje z trzema fragmentami - emisja z szyjki

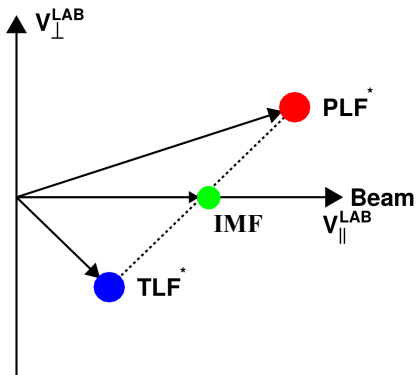


Nieźrównoważony, szybki podział na trzy fragmenty:



$\text{IMF}$  - fragment o masie pośredniej

# Reakcje z trzema fragmentami - emisja z szyjki

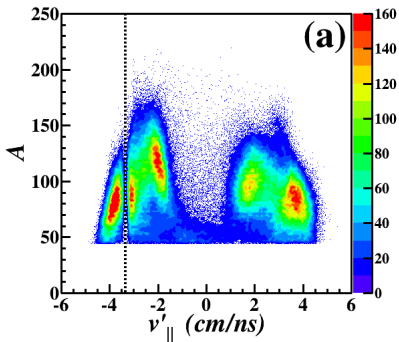


Nieźrównoważony, szybki podział na trzy fragmenty:

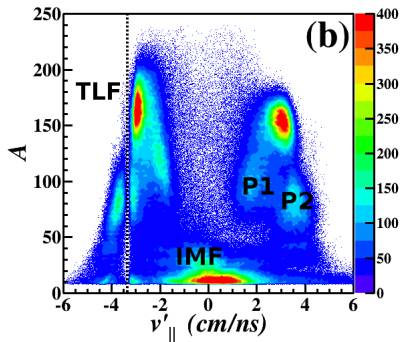
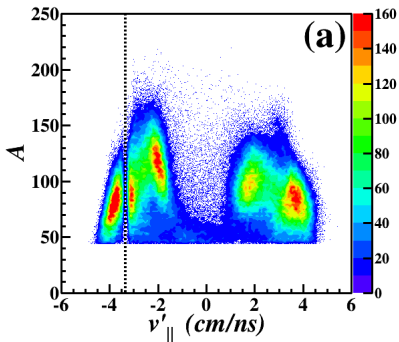


**IMF** - fragment o masie pośredniej

# Reakcje z czterema i więcej fragmentami



# Reakcje z czterema i więcej fragmentami



# Podejście semi-inkluzywne

Mamy (co najmniej) trzy typy reakcji z trzema ciężkimi fragmentami w stanie końcowym:



Reakcja  $\text{Au} + \text{Au}$  jest symetryczna, więc rozpady



przebiegają identycznie.





# Podejście semi-inkluzywne

- Koncentrujemy się na rozpadzie fragmentu pocisko-podobnego

$$PLF^* \rightarrow P1 + P2$$

- Fragmentację szyjki traktujemy w sposób uproszczony (jako szybki proces sekwencyjny):

$$PLF^* = (PR + IMF)^* \rightarrow PR + IMF$$

gdzie:

**PR** - pozostałość pocisku

**(PR+IMF)** - układ krótkożyjący







## Podejście semi-inkluzywne

Badamy proces:  $PLF^* \rightarrow F1 + F2$

- Selekcja kinematyczna fragmentów F1 i F2
- Rekonstrukcja kinematyczna  $PLF^*$
- Wielkości charakteryzujące pierwszy krok reakcji:



określane są na podstawie praw zachowania





# Podójście semi-inkluzywne



$A_{F1}$  - masa cięższego fragmentu

$A_{F2}$  - masa lżejszego fragmentu

Parametr symetrii:

$$f = \frac{A_{F2}}{A_{F1} + A_{F2}}$$

$f = 0.5$  oznacza podział  
symetryczny



# Podejście semi-inkluzywne

$$F1 + F2 \rightarrow PLF$$

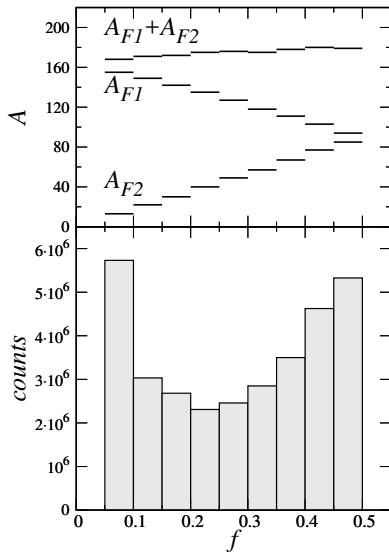
$A_{F1}$  - masa cięższego fragmentu

$A_{F2}$  - masa lżejszego fragmentu

Parametr symetrii:

$$f = \frac{A_{F2}}{A_{F1} + A_{F2}}$$

$f = 0.5$  oznacza podział  
symetryczny



## Lokalizacja w przestrzeni momentu pędu kanału wejściowego

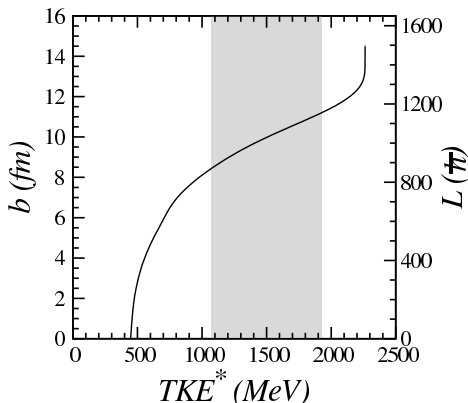
$F1 + F2 \rightarrow PLF$

Prawa zachowania  $\rightarrow TLF$

Odtwarzanie  $PLF^*$ ,  $TLF^*$   
(procedura iteracyjna,  
"odwrócona" ewaporacja)

Całkowita energia kinetyczna:

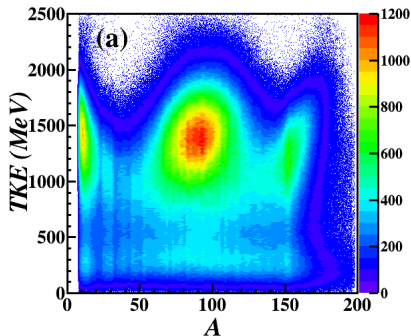
$$TKE^* = E_{PLF^*} + E_{TLF^*}$$



Model **HICOL**, H. Feldmeier,  
Rep. Prog. Phys. 50, 915 (1987)

$$R_{Au} \approx 7 \text{ fm} \quad (TKE^* \approx 800 \text{ MeV})$$

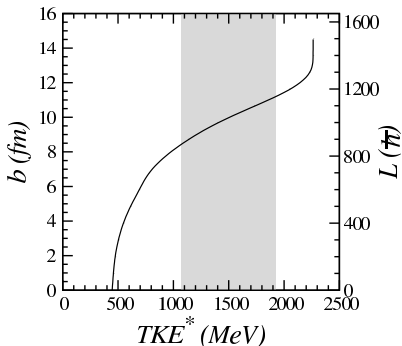
# Kanały podziału



Przedstawione są oba fragmenty z *eventu*:

...  $\rightarrow$  P1 + P2

...  $\rightarrow$  IMF + PR



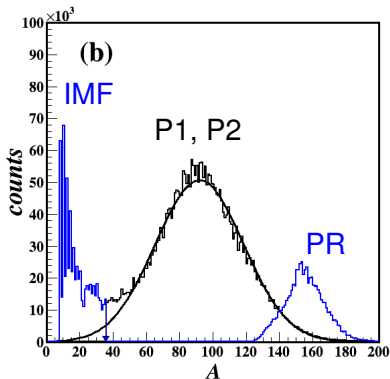
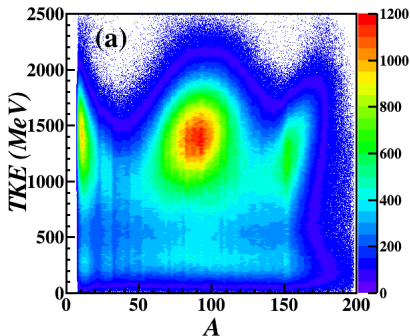
Zdarzenia z trzema fragmentami występują dla:

$1000 \text{ MeV} < TKE^* < 2000 \text{ MeV}$

$-1250 \text{ MeV} < Q < -250 \text{ MeV}$

$0.7 \text{ MeV} < E^*/A < 3.2A \text{ MeV}$

# Kanały podziału



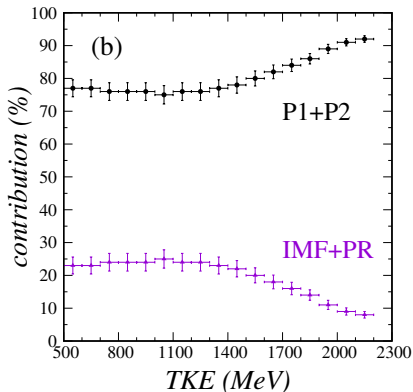
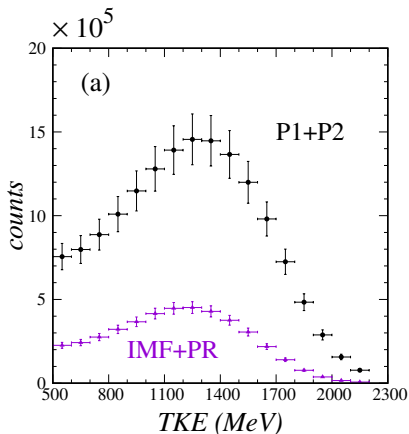
Przedstawione są oba fragmenty z *eventu*:

... → P1 + P2

... → IMF + PR

Rzut na oś x dla  
 $TKE \geq 500$  MeV

# Kanały podziału

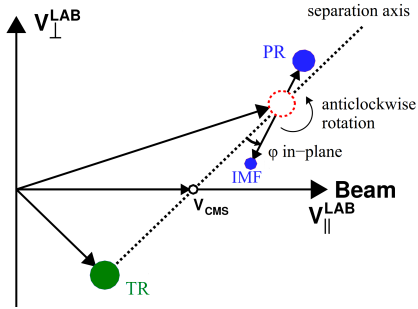


- Proces fragmentacji szyjki jest procesem konkurencyjnym do fragmentacji PLF\* w całym zakresie  $TKE \rightarrow$  trzeba go uwzględnić w modelach.
- Wkład od procesu fragmentacji szyjki  $> 20\%$  dla  $TKE < 1700$  MeV.



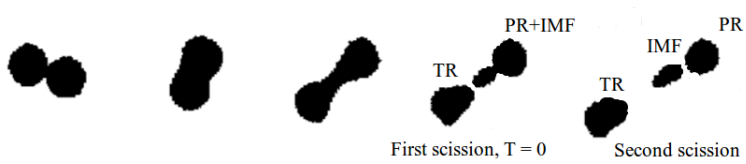


# Skala czasowa procesu fragmentacji szyjki



Rzut na płaszczyznę reakcji

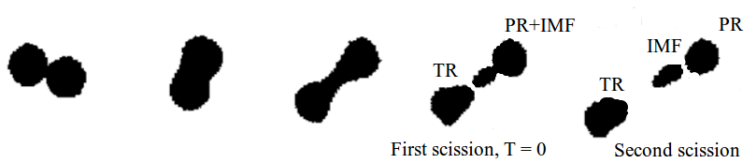
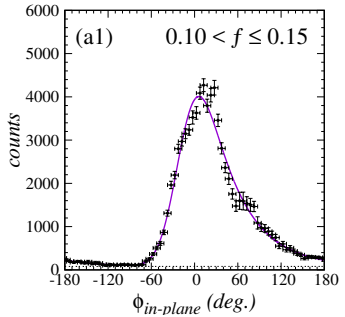
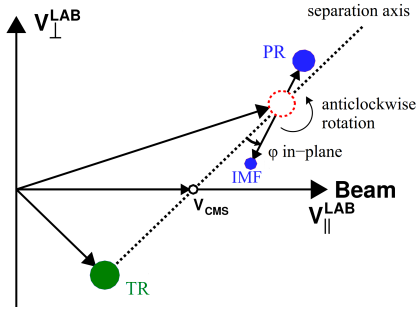
$\phi_{in-plane}$  - kąt emisji IMF w płaszczyźnie reakcji, liczony względem osi separacji





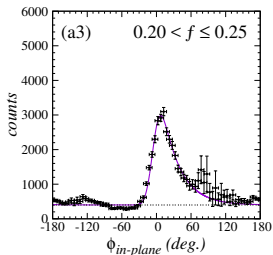
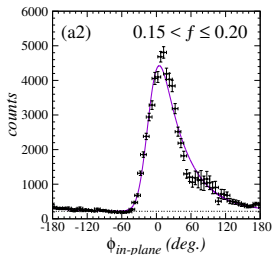
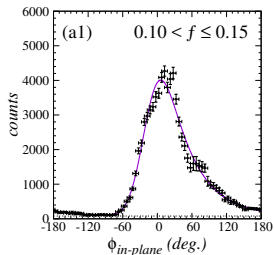


# Skala czasowa procesu fragmentacji szyjki



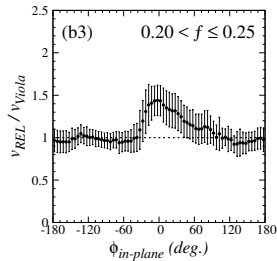
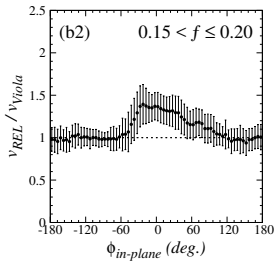
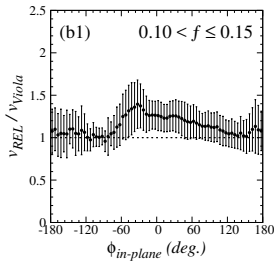
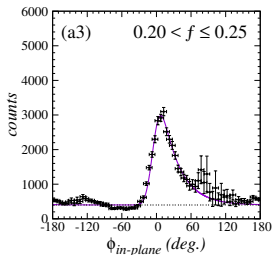
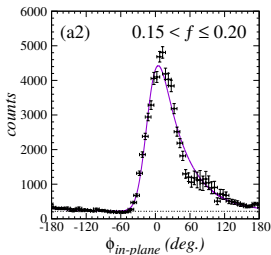
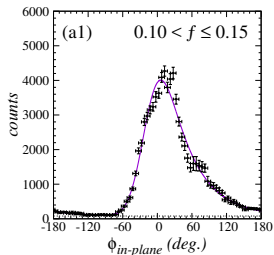


# Skala czasowa procesu fragmentacji szyjki





# Skala czasowa procesu fragmentacji szyjki





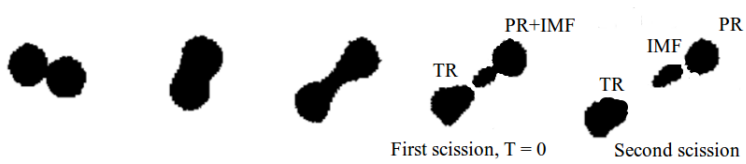
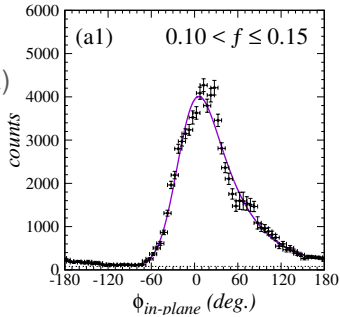
# Skala czasowa procesu fragmentacji szyjki

$$T = \frac{\Delta\phi_{in-plane}}{\omega} = \Delta\phi_{in-plane} \times \frac{1}{J}$$

$\Delta\phi_{in-plane}$  - średni obrót układu (IMF+PR) od pierwszego do drugiego podziału (z dopasowania do danych)

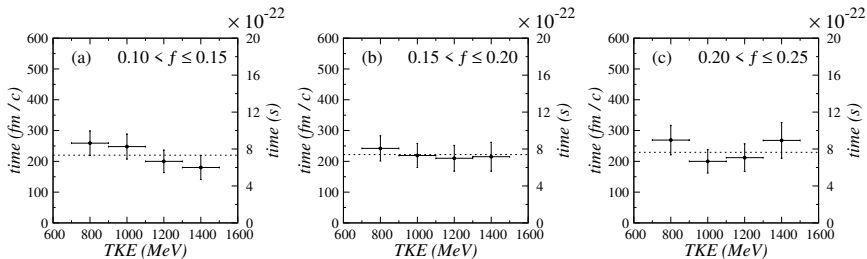
$I$  - moment bezwładności układu (obliczony)

$J$  - spin układu (z modelu **HICOL**)





# Skala czasowa procesu fragmentacji szyjki



Średni czas od podziału binarnego do oderwania szyjki jest w przybliżeniu taki sam dla wszystkich symetrii podziału i nie zależy od  $TKE$ .

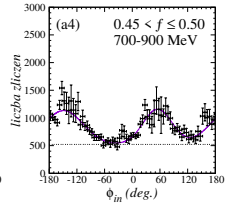
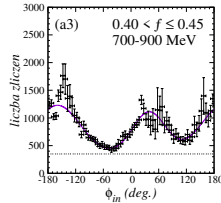
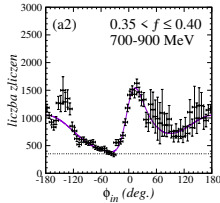
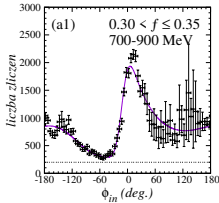
$$\langle T \rangle = (230 \pm 40) \text{ fm/c} = (7.7 \pm 1.3) \times 10^{-22} \text{ s} = (0.77 \pm 0.13) \text{ zs}$$





# Podziały o większej symetrii

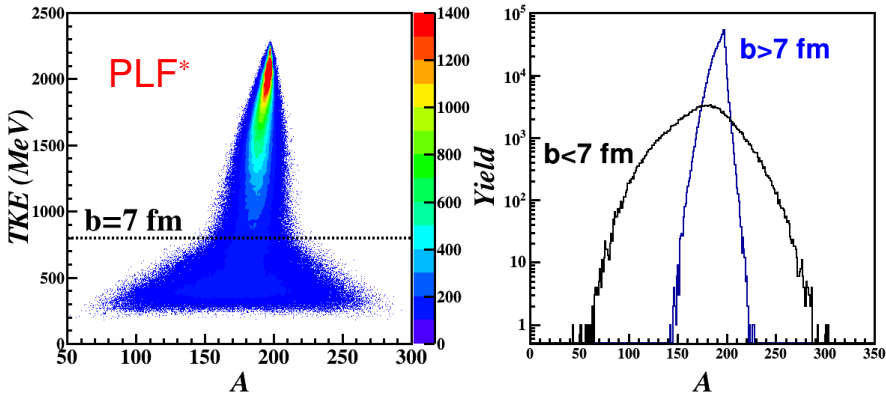
Przykład dla  $b \approx R_{Au}$



- Silne efekty kulomowskie - rozkłady kątowe nie są płaskie
- Pojawiają się inne nierównowagowe procesy
- Wraz ze wzrostem  $b$  rośnie wkład procesów zrównoważonych, a maleje rola procesów dynamicznych
- Proces fragmentacji szybszy dla ciężkich fragmentów,  $A_{IMF} \approx 50$  !



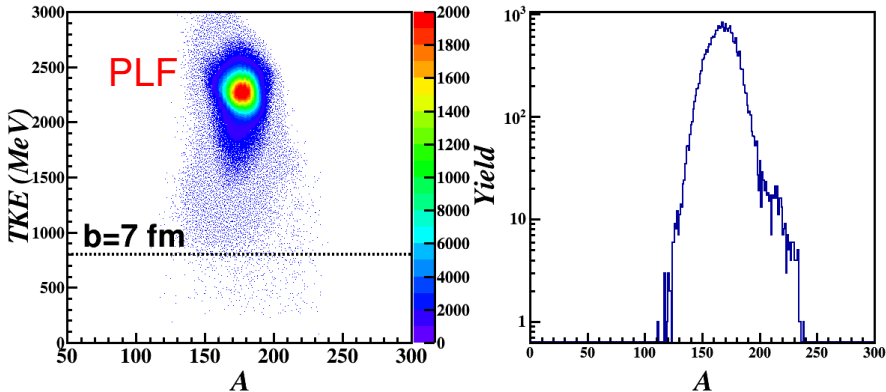
# Obliczenia w ramach modelu QMD



Model Kwantowej Dynamiki Molekularnej

J. Łukasik and Z. Majka, Acta Phys. Pol. B 24, 1959 (1993)

# Zdarzenia binarne (kompletne) z eksperymentu

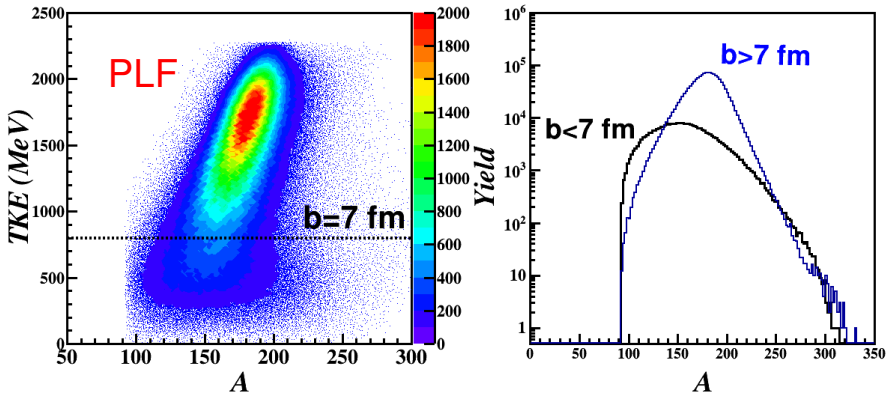


Nie ma chłodnych PLF dla mniejszych  $b$



# Rekonstrukcja: $F1 + F2 \rightarrow \text{PLF}$

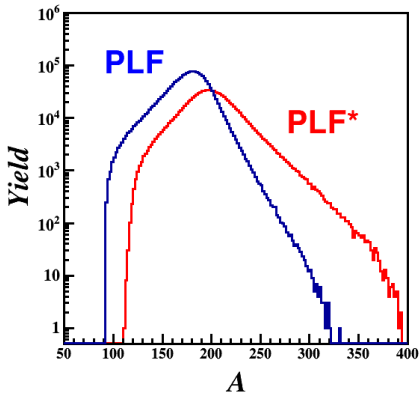
$$A_{F1}, A_{F2} \geq 45$$



Mniejsze  $b$  - większa wyparowana masa

# Rekonstrukcja: $F1 + F2 \rightarrow PLF$

masa  $PLF^*$  odtworzona iteracyjnie (“odwrócona” ewaporacja)




Transfery kilkudziesięciu nukleonów

# Podsumowanie

- Układ Au+Au daje możliwość badania nierównowagowych procesów.
- Analiza skoncentrowana była na **zdarzeniach z trzema ciężkimi fragmentami** ( $>^7\text{Li}$ ) w stanie końcowym.

Dla **procesu fragmentacji szyjki** pokazano, że:

- jest to proces konkurencyjny do fragmentacji pocisku w całym zakresie  $TKE$ ,
- wkład od tego procesu wynosi około 20%,
- skala czasowa jest w przybliżeniu taka sama dla wszystkich symetrii podziału, nie zależy od  $TKE$  i wynosi  $(230 \pm 40)$  fm/c,
- masy fragmentów IMF sięgają 50 jednostek masowych.
- **Wielonukleonowe transfery** zachodzą do stanów wzbudzonych fragmentów pierwotnych (PLF\* lub TLF\*).
- Chłodne fragmenty o masie znacznie przekraczającej masę Au nie są obserwowane.



# Reakcje wielonukleonowego transferu i fragmentacji w zderzeniach niefuzyjnych układów jądrowych

**T. Cap, K. Siwek-Wilczyńska, J. Wilczyński,  
F. Amorini, L. Auditore, G. Cardella, E. De Filippo,  
E. Geraci, L. Grassi, A. Grzeszczuk, E. La Guidara,  
J. Han, T. Kozik, G. Lanzalone, I. Lombardo,  
R. Najman, N. G. Nicolis, A. Pagano, M. Papa,  
E. Piasecki, S. Pirrone, R. Płaneta, G. Politi,  
F. Rizzo, P. Russotto, I. Skwira-Chalot, A. Trifiró,  
M. Trimarchi, G. Verde, W. Zipper**