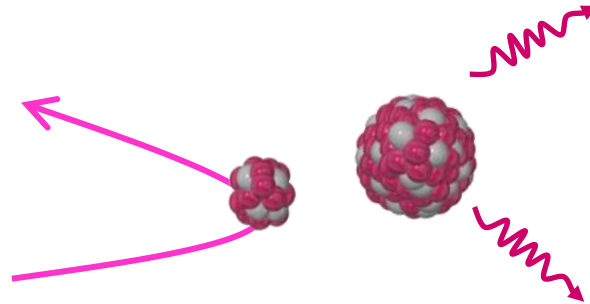


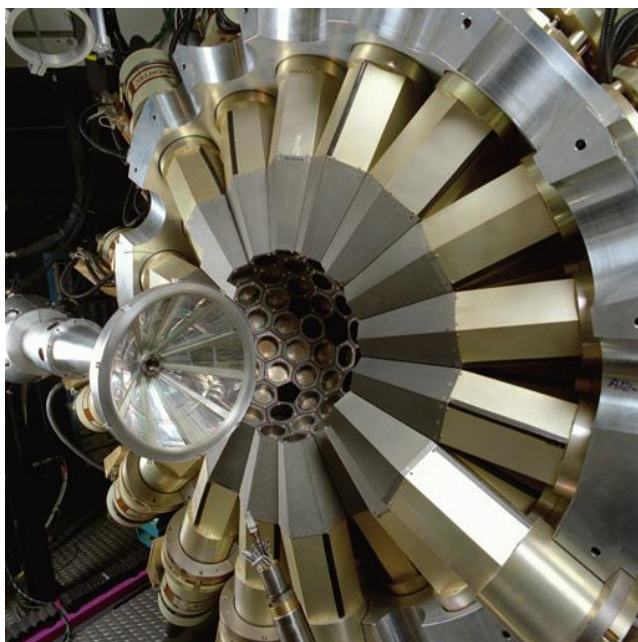
Wzbudzenia kulombowskie – narzędzie do badania struktury jąder atomowych



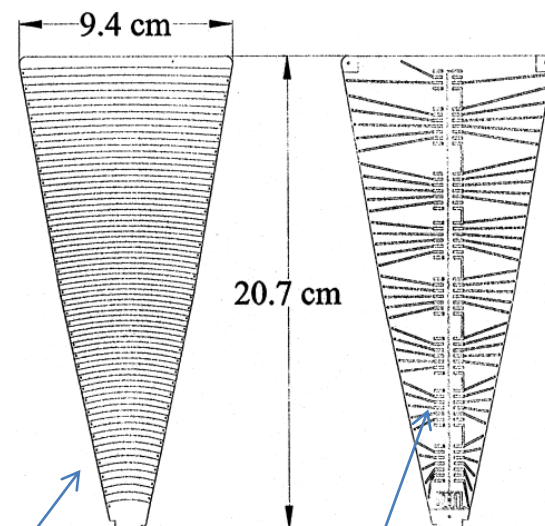
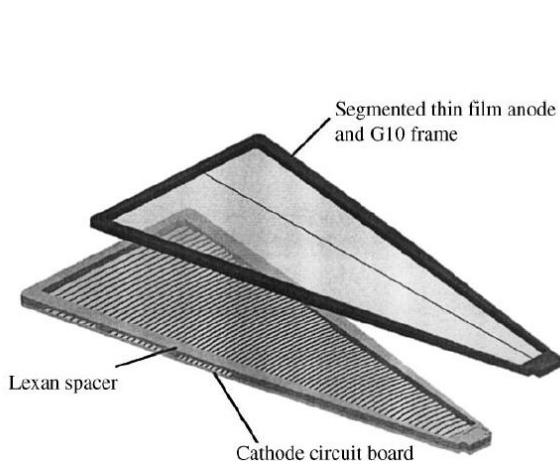
1. Detektory *PPAC* w eksperymentach wzbudzeń kulombowskich.
2. Program GOSIA:
 - proces wzbudzenia
 - proces rozpadu

Identyfikacja jądra pocisku/tarczy na podstawie różnicy czasu przelotu

- **CHICO:** układ 20 detektorów PPAC (*Parallel-Plate Avalanche Counter – lawinowe detektory gazowe*) : $12^\circ < \theta < 85^\circ$ i $95^\circ < \theta < 168^\circ$; 280° w kącie φ ; $\Delta\theta = 1^\circ$, $\Delta\varphi = 9^\circ$
- Zaprojektowany dla układu Gammasphere @ ANL.
- Średnica komory: 36 cm; odległość tarcza-detektor: 15 cm.
- Czasowa zdolność rozdzielcza: 500 ps.



PPAC: anoda (folia polipropylenowa+Al) + katoda (zestaw elektrod)



segmented into 1° wide traces
of constant polar angle ϑ

the delay line has
a delay of 1 ns per tap

Wzbudzenie kulombowskie ^{178}Hf jonami wiązki ^{136}Xe o energii 650 MeV

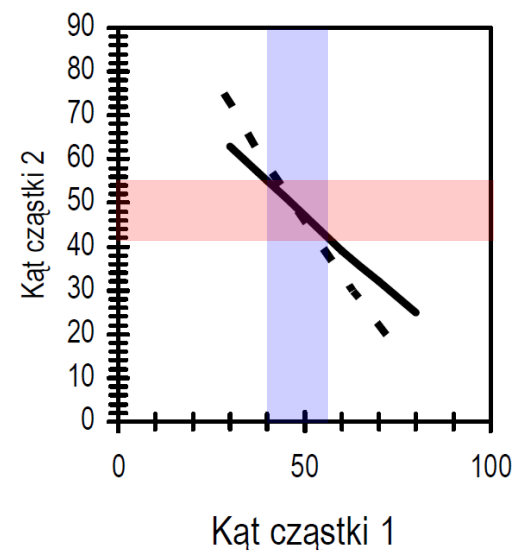
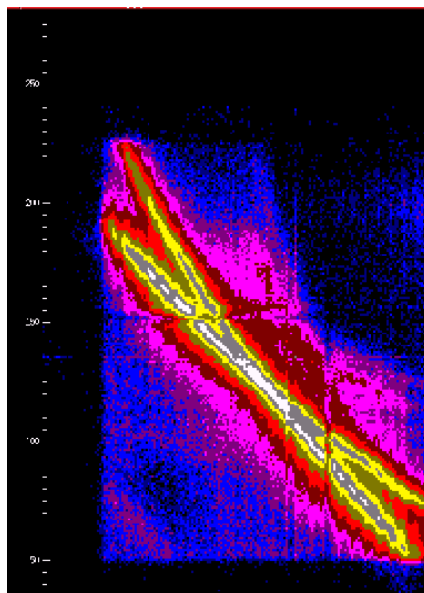
- Energia **650 MeV** jest **energiją bezpieczną** (spełniającą kryterium Cline'a) gdy kąt rozproszenia jąder pocisków jest **mniejszy niż 53°** .
- Rejestracji obu partnerów reakcji pod kątami „do przodu”.
- **Interpretacja kinematyki** rozproszenia oparta tylko na informacji geometrycznej **nie jest jednoznaczna** (nie jest możliwa poprawna rekonstrukcja prędkości obu partnerów reakcji).

Wykres kąta rejestracji cząstki
w funkcji kąta detekcji drugiego
partnera reakcji.



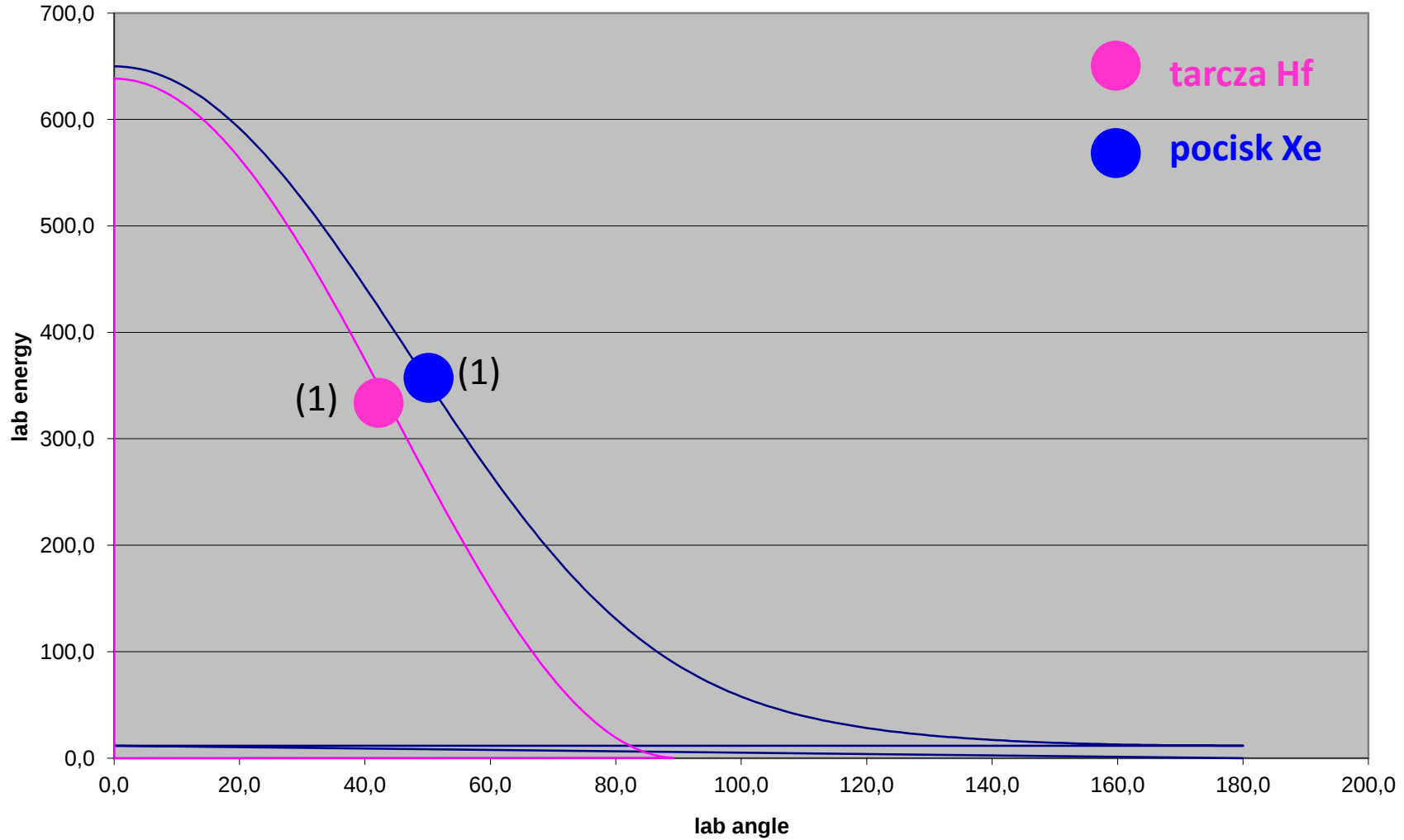
Z lewej: zmierzone dwuwymiarowe widmo.

Z prawej: interpretacja danych doświadczalnych.



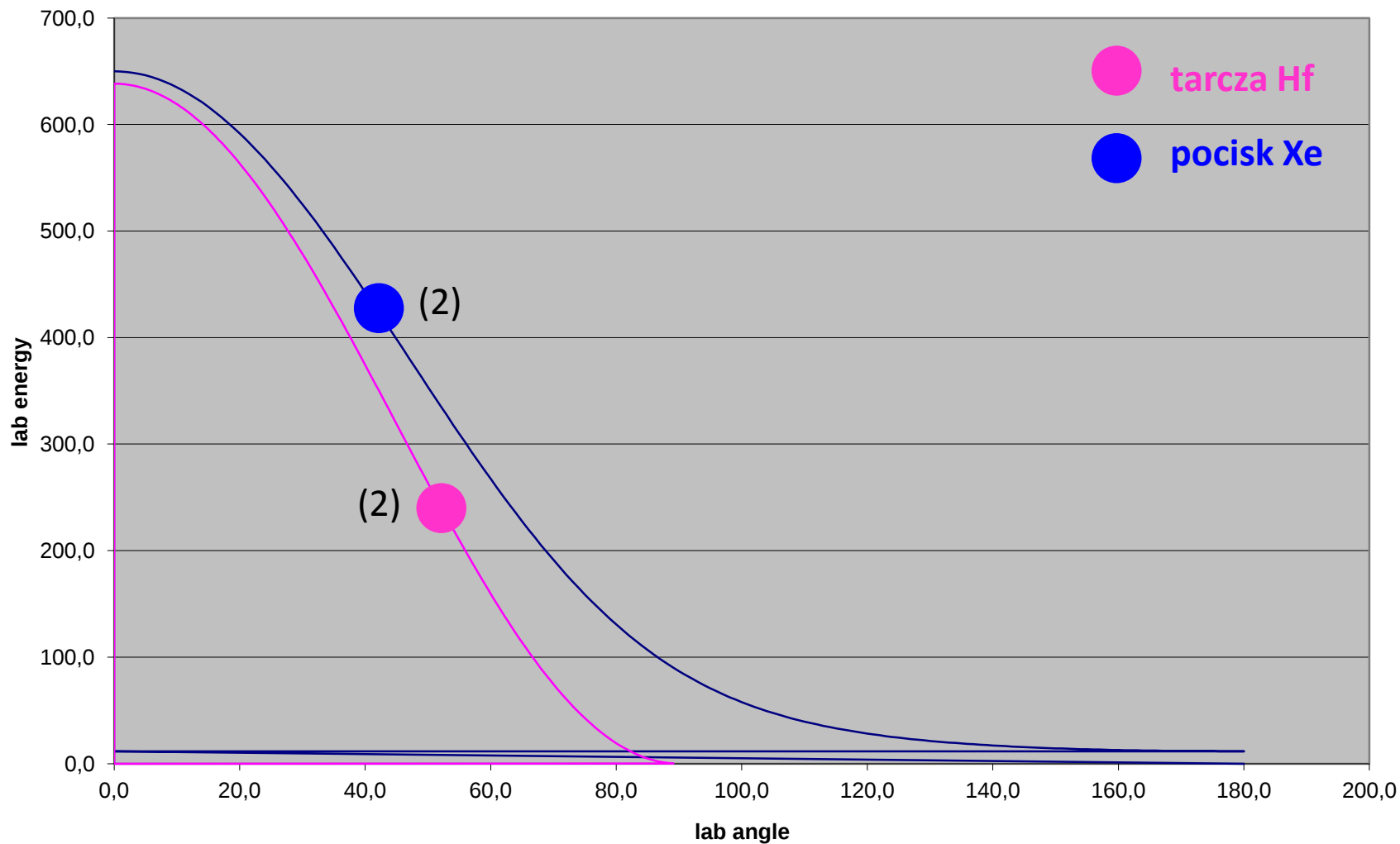
Kinematyka reakcji: $^{136}\text{Xe} + ^{178}\text{Hf}$

(1) : $\theta^{\text{Xe}} = 53^\circ$ $\theta^{\text{Hf}} = 45^\circ$



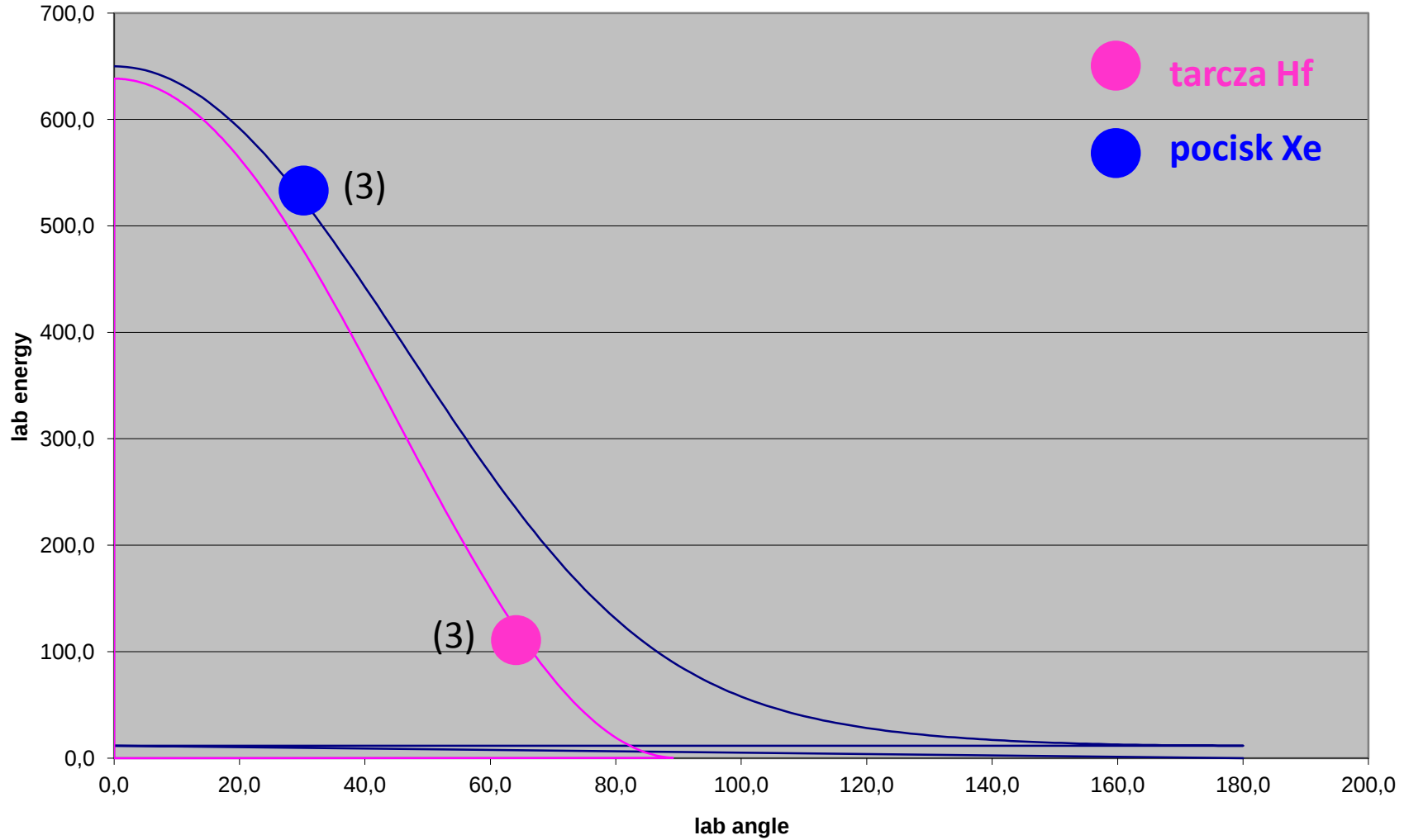
Kinematyka reakcji: $^{136}\text{Xe} + ^{178}\text{Hf}$

(1) : $\theta^{\text{Xe}} = 53^\circ$ $\theta^{\text{Hf}} = 45^\circ$ (2) : $\theta^{\text{Xe}} = 43^\circ$ $\theta^{\text{Hf}} = 53^\circ$



Kinematyka reakcji: $^{136}\text{Xe} + ^{178}\text{Hf}$

(1) : $\theta_{\text{Xe}} = 53^\circ$ $\theta_{\text{Hf}} = 45^\circ$ (2) : $\theta_{\text{Xe}} = 43^\circ$ $\theta_{\text{Hf}} = 53^\circ$ (3) : $\theta_{\text{Xe}} = 30^\circ$ $\theta_{\text{Hf}} = 64^\circ$



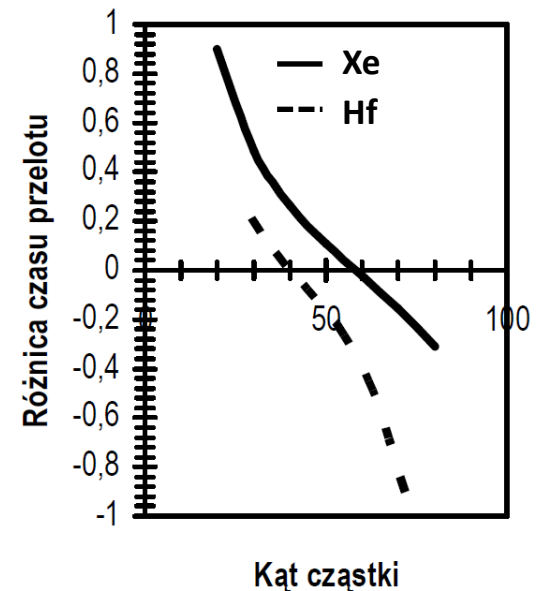
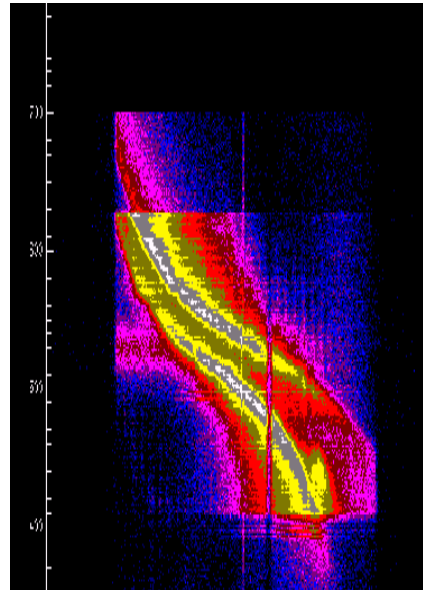
Wzbudzenie kulombowskie ^{178}Hf jonami wiązki ^{136}Xe o energii 650 MeV

- Do identyfikacji partnerów reakcji wykorzystano dobrą czasową zdolność rozdzielczą detektorów PPAC.
- Mierzono **czas między sygnałami z anod naprzeciwległych detektorów** cząstek w CHICO, czyli **różnicę czasu przelotu** obu partnerów reakcji po rozproszeniu.
- Informacja ta w połączeniu z **pomiarem kąta** rozproszenia jednej z cząstek pozwala na **jednoznaczną identyfikację** jąder pocisku/tarczy i tym samym prawidłową rekonstrukcję zdarzenia.

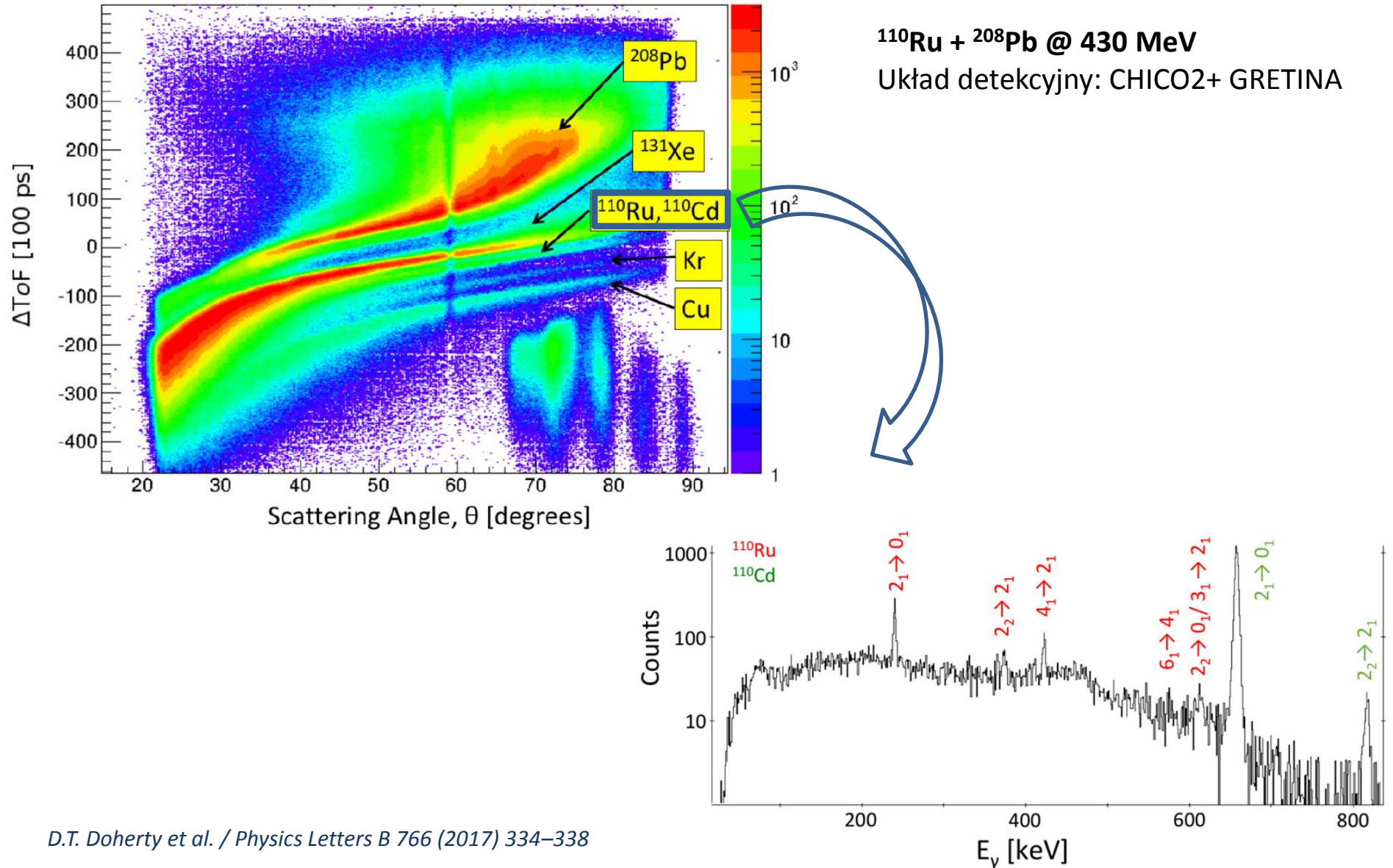
Wykres czasu detekcji cząstek w naprzeciwległych detektorach w funkcji kąta rejestracji jednej z cząstek.

Z lewej: zmierzone dwuwymiarowe widmo.

Z prawej: interpretacja danych doświadczalnych.

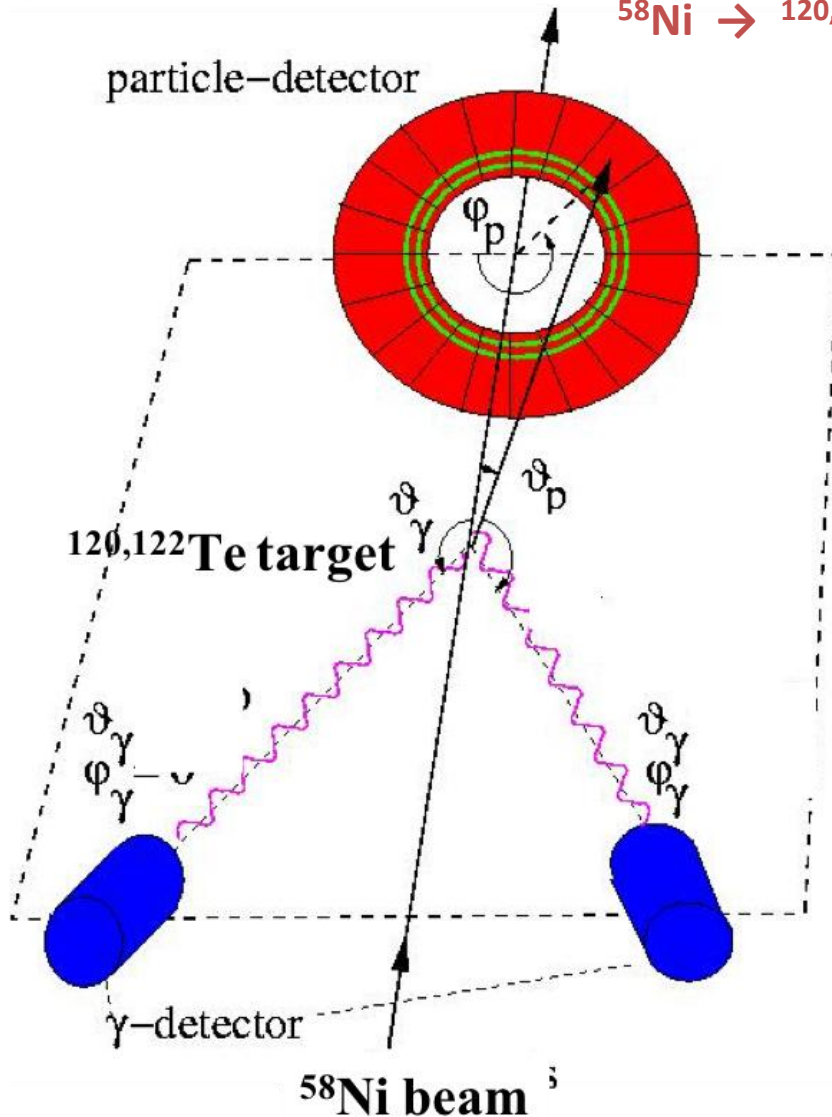


CHICO2 @ CARIBU (cAlifornium Rare Isotope Breeder Upgrade): wzbudzenia kulombowskie jader egzotycznych w ANL



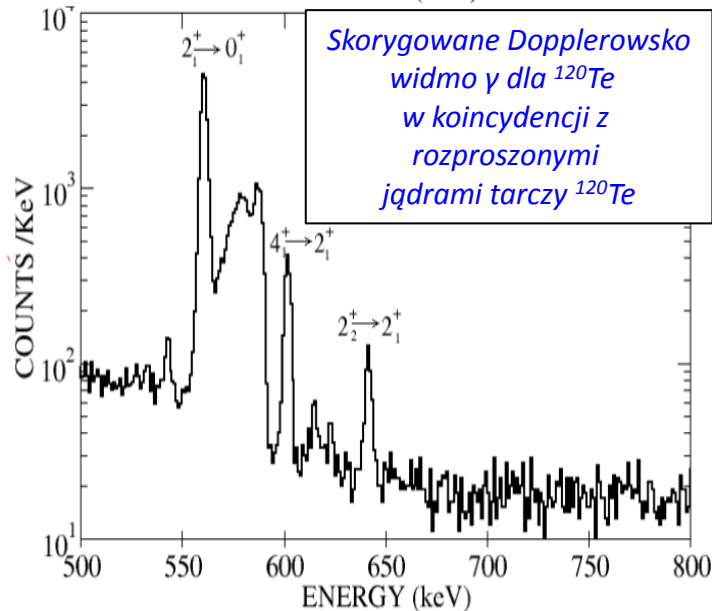
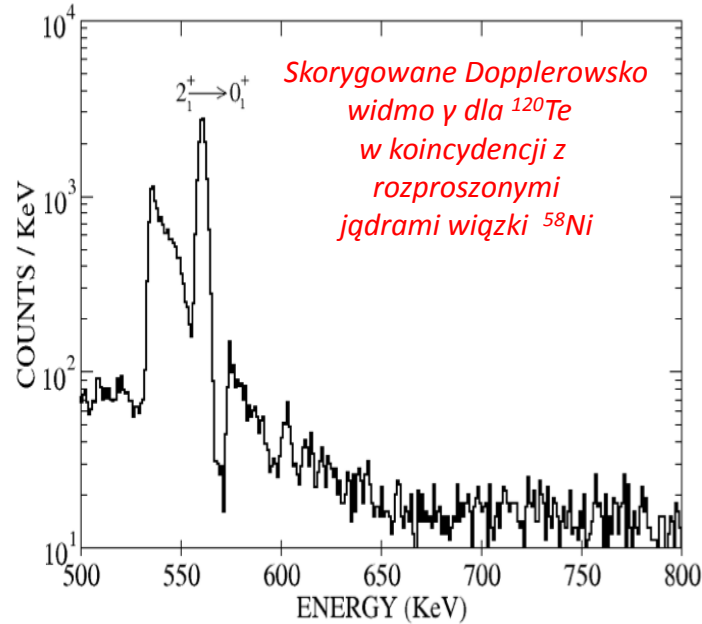
Wzbudzenia kulombowskie: IUAC New Delhi

$^{58}\text{Ni} \rightarrow ^{120,122,124}\text{Te} (\sim 0.15 \text{ mg/cm}^2 \text{ thickness}) @ 175\text{MeV}$



- Rozproszone jądra pocisku i tarczy rejestrowane w detektorach **PPAC** .
- Zakres kątowy: $\vartheta_{\text{lab}} = 15^\circ - 45^\circ$
- PPAC: 20 segmentów, $\Delta\Phi=18^\circ$.
- Promieniowanie γ rejestrowane przez **4 detektory Ge typu clover** zamontowanymi pod kątami $\vartheta_\gamma \sim 135^\circ$ względem kierunku padania wiązki.
- Promieniowanie γ rejestrowane w **koincydencji czasowej** z rozproszonymi jądrami pocisku/tarczy.

- W detektorach PPAC ustawionych w kątach przednich względem kierunku wiązki rejestrowane są zarówno rozproszone **jądra pocisku (Ni)** jak i **tarczy (Te)**.

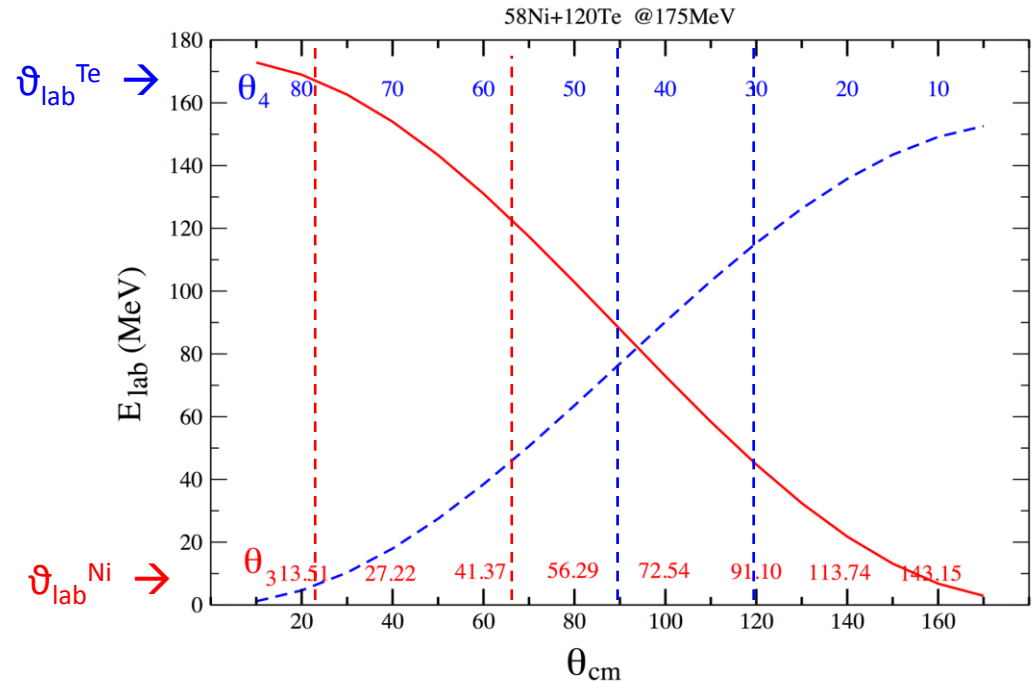


distant collisions (considering ^{58}Ni in PPAC)

$$\Theta_{\text{cm}} = 22^\circ - 65^\circ$$

$$\vartheta_{\text{lab}}^{\text{Ni}} = 15^\circ - 45^\circ$$

Kinematics of ^{58}Ni on ^{120}Te @ 175 MeV

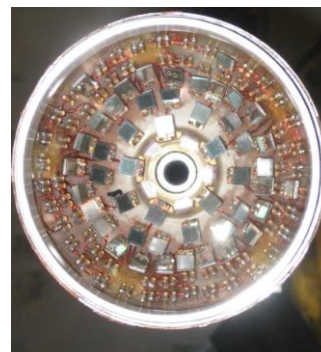
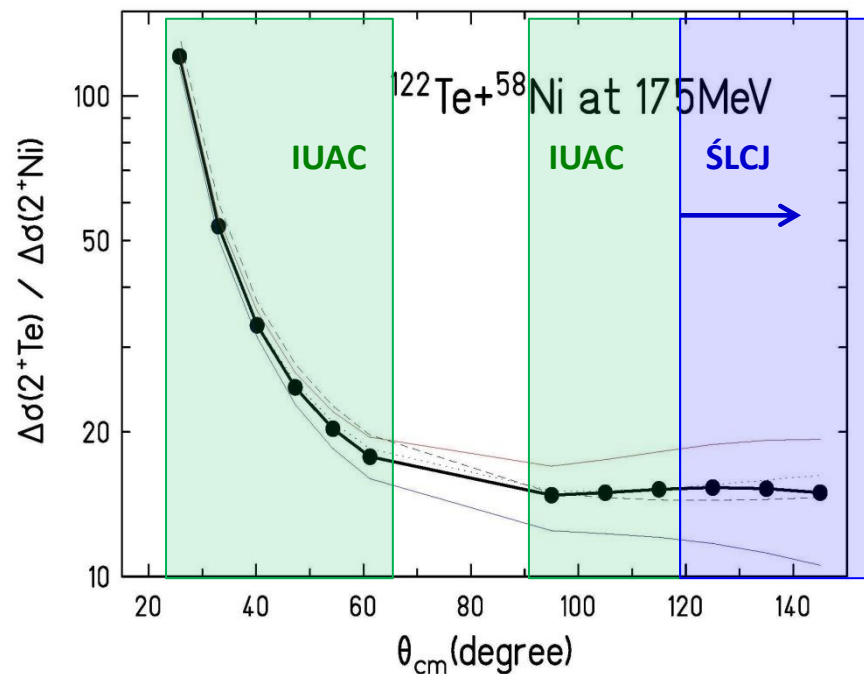
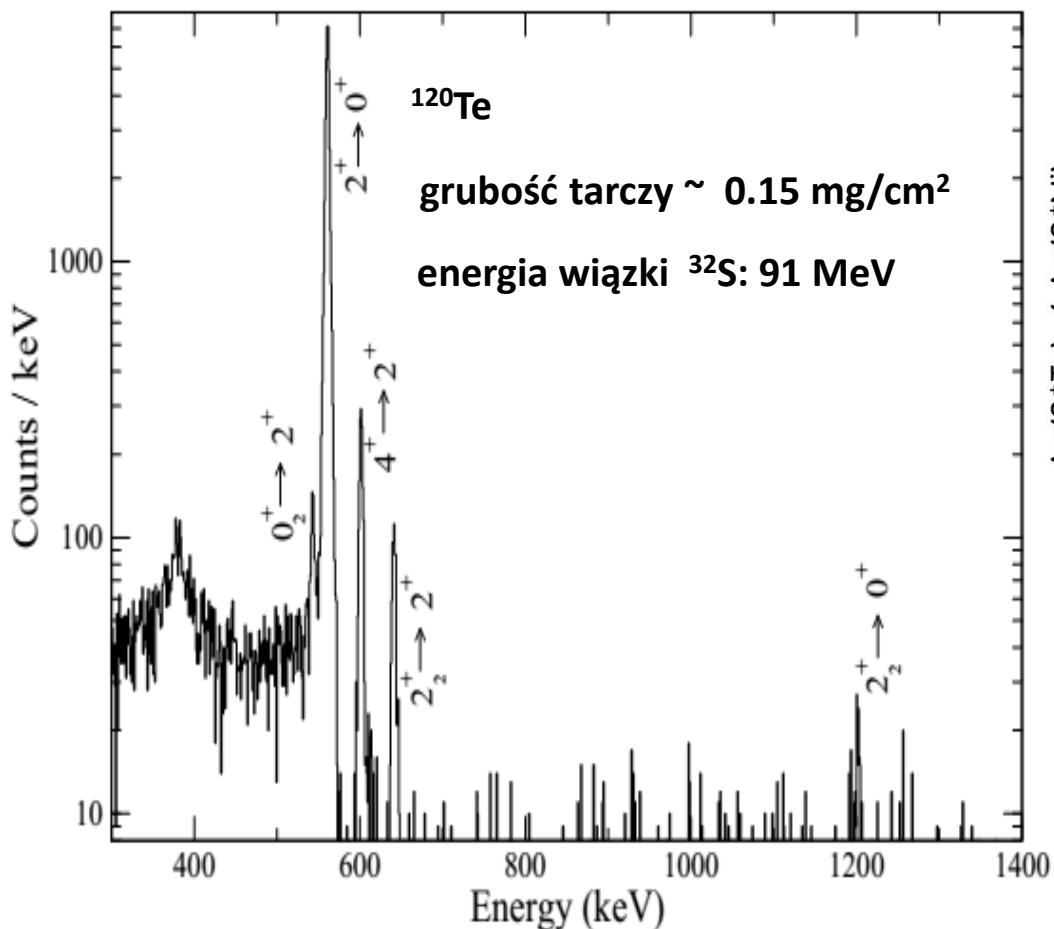


close collisions (considering ^{120}Te in PPAC)

$$\Theta_{\text{cm}} = 90^\circ - 120^\circ$$

$$\vartheta_{\text{lab}}^{\text{Te}} = 30^\circ - 45^\circ$$

Wzbudzenie kulombowskie jądra ^{120}Te w ŚLCJ UW



ŚLCJ UW:

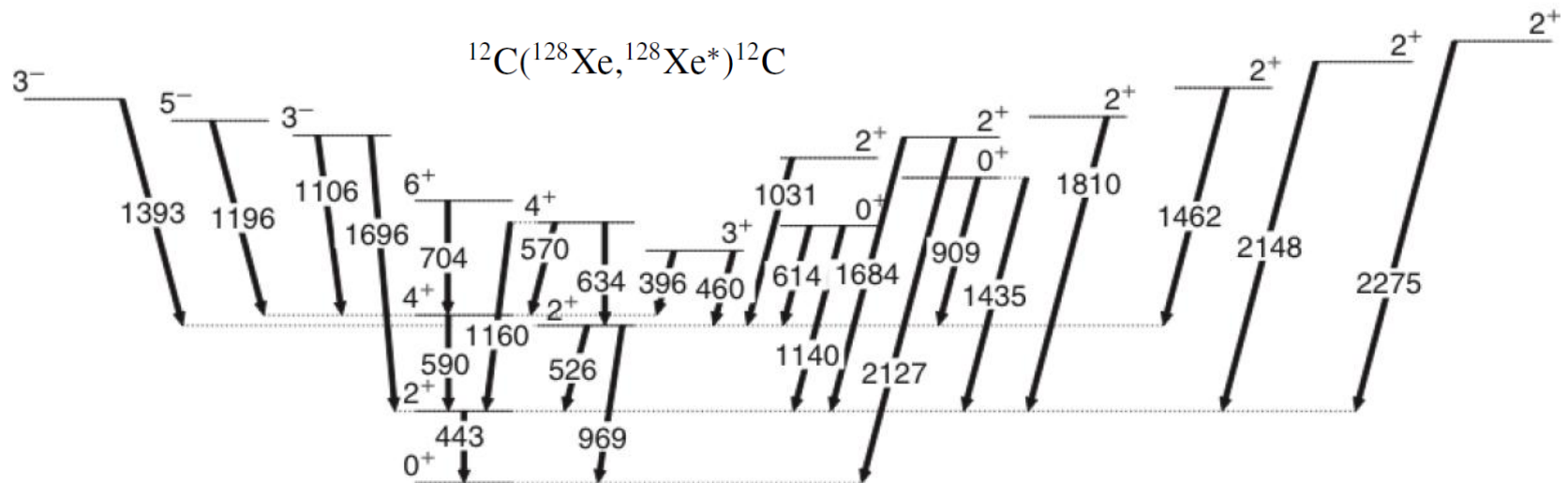
$\theta_{\text{cm}}: 130^\circ \div 170^\circ$



wyznaczono
 $Q_s(2^+_1)$ w ^{120}Te

Eksperyment wzbudzenia kulombowskiego bez detektora cząstek...

- Brak możliwości wykonania korekty Dopplerowskiej energii kwantów gamma emitowanych w locie.
- Pomiar przy użyciu „grubej tarczy” → czasy życia stanów wzbudzonych długie w porównaniu z czasem hamowania.
- Silnie asymetryczna, odwrotna kinematyka reakcji → wzbudzenia głównie na drodze jednostopniowej.

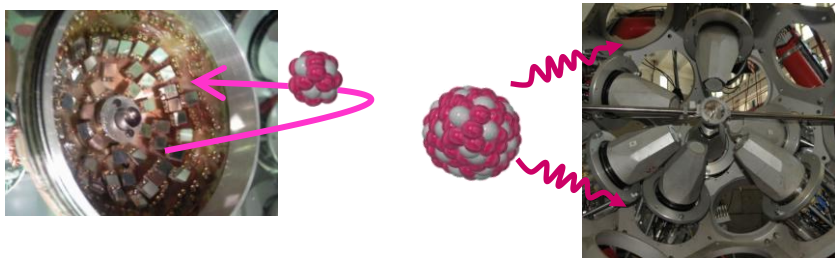


Układy pomiarowe w eksperymentach wzbudzeń kulombowskich

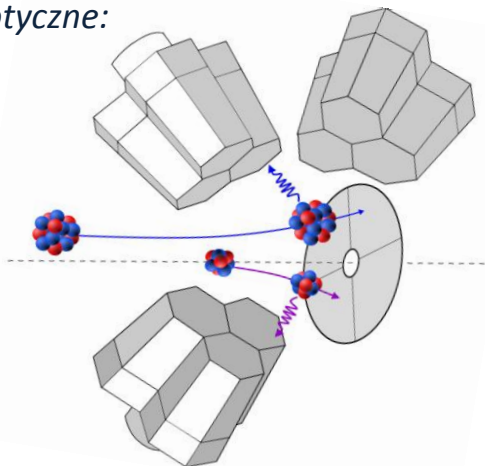
➤ Identyfikacja partnerów reakcji

- pomiar kąta rozproszenia i energii w detektorach Si
- pomiar różnicy czasu przelotu (PPAC)

wiązki stabilne:



wiązki egzotyczne:



➤ Różniczkowy przekrój czynny

- segmentowane detektory cząstek
- detekcja jąder pocisku i/lub tarczy

$$\rightarrow 40^\circ < \theta_{CM} < 175^\circ$$

($^{182}\text{Hg} + ^{112}\text{Cd}$; MINIBALL@ISOLDE)

$$\rightarrow 110^\circ < \theta_{CM} < 170^\circ \text{ (} ^{32}\text{S} + ^{110}\text{Cd} \text{ ; ŚLCJ UW)}$$

➤ Identyfikacja stanów wzbudzonych

- Detektory Ge (HPGe)
 - ➔ duża energetyczna zdolność rozdzielcza (few keV)

➤ korekta Dopplerowska

- segmentowane detektory cząstek
- segmentowane detektory Ge

➤ warunek *trigera*

- koincydencje cząstka- γ :
 - prawidłowy opis wzbudzenia,
 - różniczkowy przekrój czynny,
 - redukcja tła zdarzeń przypadkowych.

Wyniki eksperymentalne

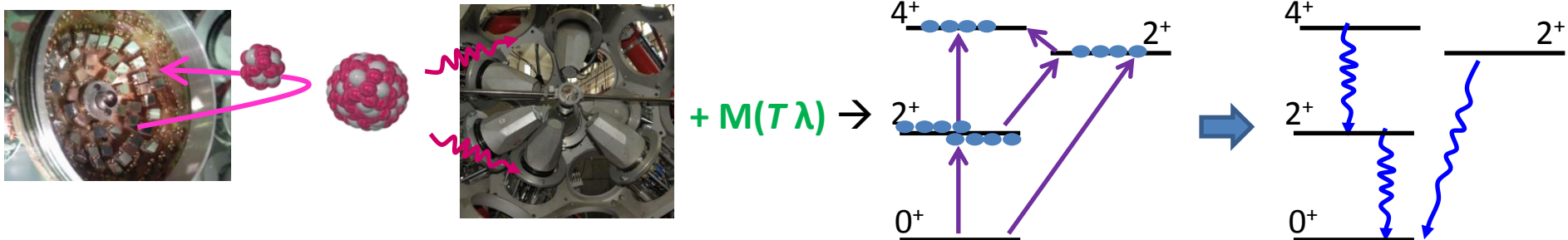
Do wyznaczenia z pomiaru:

- Wektory prędkości partnerów reakcji.
- Korekta przesuniętych Dopplerowsko energii emitowanych kwantów γ .
- Identyfikacja rejestrowanych przejść γ w jądrze tarczy/pocisku.
- Pomiar promieniowania γ w funkcji kąta rozproszenia cząstki (parametru zderzenia).
- Wyznaczenie bezwzględnych przekrojów czynnych na wzbudzenie danego stanu jądrowego na podstawie zmierzonych intensywności przejść γ ($\rightarrow$ normalizacja do znanego $B(E2)$ jądra tarczy / pocisku).
- Wyznaczenie poszczególnych zredukowanych elementów macierzowych przejść elektromagnetycznych ze zmierzonych intensywności przejść $\gamma \rightarrow$ GOSIA

Spodziewane / możliwe wyniki:

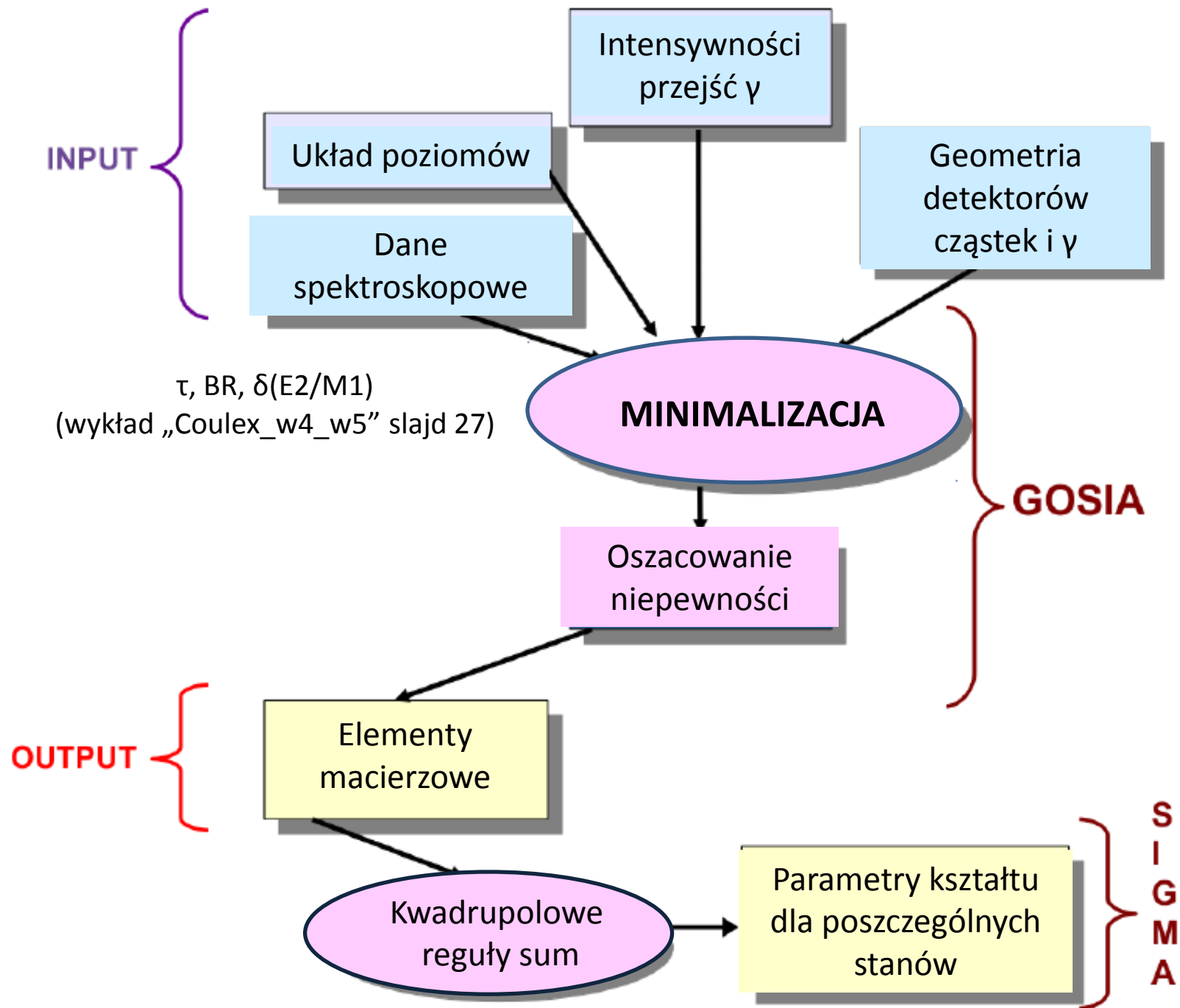
- Obserwacja (nowych) stanów wzbudzonych.
- $B(E2)$ i $B(M1)$ pomiędzy stanami wzbudzonymi, również $B(E\lambda)$ dla $\lambda > 2$.
- Znaki i wartości momentów kwadrupolowych stanów wzbudzonych.
- Znaki i wartości członów interferencyjnych (względne znaki elementów macierzowych).

- Dla zadanego schematu poziomów jądrowych program GOSIA pozwala na **dopasowanie zestawu elementów macierzowych do zmierzonych intensywności przejść γ** , uwzględniając także inne dostępne **dane spektroskopowe** charakteryzujące badane jądro.
- Dla określonej **kinematyki rozproszenia** (zdefiniowanej poprzez geometrię detektorów)



i dla danego zestawu **elementów macierzowych** rozwiązywany jest metodami numerycznymi układ sprzężonych równań różniczkowych na **amplitudy wzbudzeń**, wyliczana jest **populacja** stanów oraz **intensywności przejść promieniowania γ** .

- Wyliczone intensywności porównuje się ze **zmierzonymi w eksperymencie**.
- Dodatkowo bada się zgodność innych eksperymentalnych danych spektroskopowych.



χ^2 in GOSIA

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N \text{ exp}} \sum_{j=1}^{N \text{ det}} w_{ij} \sum_{k(ij)}^{N \gamma \text{ exp}} \frac{1}{\sigma_k^2} (C_{ij} I_k^c - I_k^e)^2 + \sum_d w_d \sum_{n_d} \frac{1}{\sigma_{n_d}^2} (D_{n_d}^c - D_{n_d}^e)^2$$

Diagram illustrating the components of the χ^2 function in GOSIA:

- w_{ij} : wagi (weights)
- C_{ij} : stała normalizacyjna (normalization constant)
- I_k^e : intensywności przejść γ (gamma transition intensities)
- $D_{n_d}^e$: dane spektroskopowe (spectroscopic data)

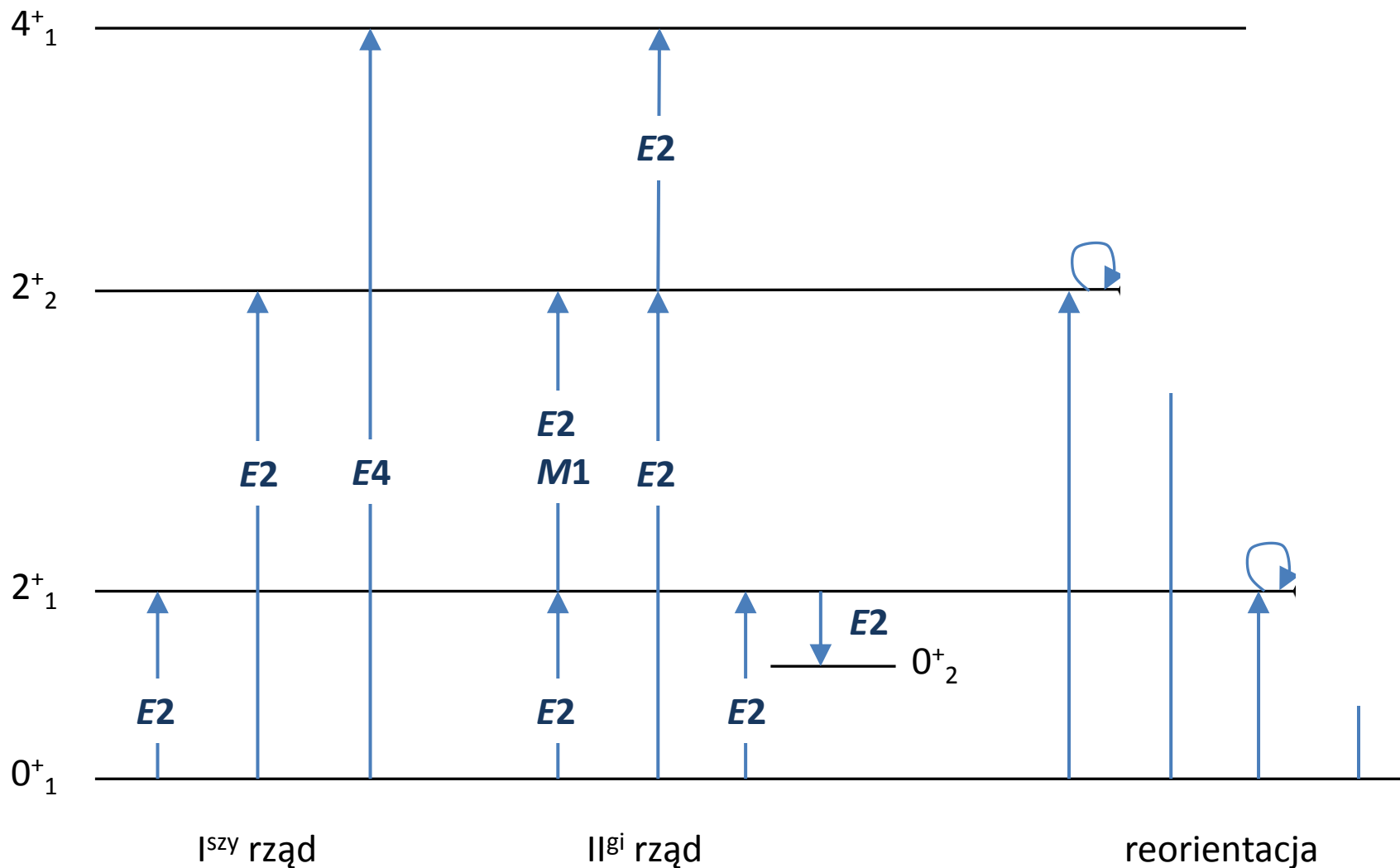
I) Proces wzbudzenie jądra atomowego:



- 1) **Przybliżenie półklasyczne** i oddziaływanie **czysto elektromagnetyczne**
 - rozbieżność pomiędzy przybliżeniem półklasycznym a ściśle kwantowymi rachunkami rozpraszania $\sim 1/\eta$ (max. 5% gdy $\eta \sim 30$).
- 2) **Ruch po klasycznych trajektoriach hiperbolicznych**
 - symetryzacja trajektorii w celu uwzględnienia wpływu przekazu energii rozpraszanej cząstki na jej tor.
- 3) **Wirtualne wzbudzenia nieobserwowanych stanów jądrowych**
 - Wzbudzenia E1 poprzez gigantyczny rezonans dipolowy GDR wysoko leżących stanów jądrowych
→ korekta kwadrupolowej części oddziaływania (wykład 4 i 5, slajd 24)
- 4) **Wzbudzenie oddziaływujących jąder tarczy/pocisku**
 - Oddziaływanie monopol-multipol w rozwinięciu potencjału oddziaływania w szereg multipolowy dla jądra tarczy lub pocisku.
(oddziaływanie kulombowskie **monopolu** jądra powodującego wzbudzenie z **multipolem** badanego jądra → wykład 3)
➔ wpływ związany z oddziaływaniem multipol-multipol zaniechany (mały ($\sim 0.5\%$))
- 5) **Uwzględnienie rozmiarów detektorów cząstek i wpływu hamowania wiązki w tarczy:**
 - Całkowanie numeryczne po energiach pocisku i kącie bryłowym pokrywanych przez detektor cząstek

Proces wzbudzenia w GOSI

Przykład:



$2^+_2 \rightarrow 2^+_1$: przejście mieszane E2/M1, przejścia E2 dominują w procesie wzbudzenia, M1 istotne w procesie rozpadu

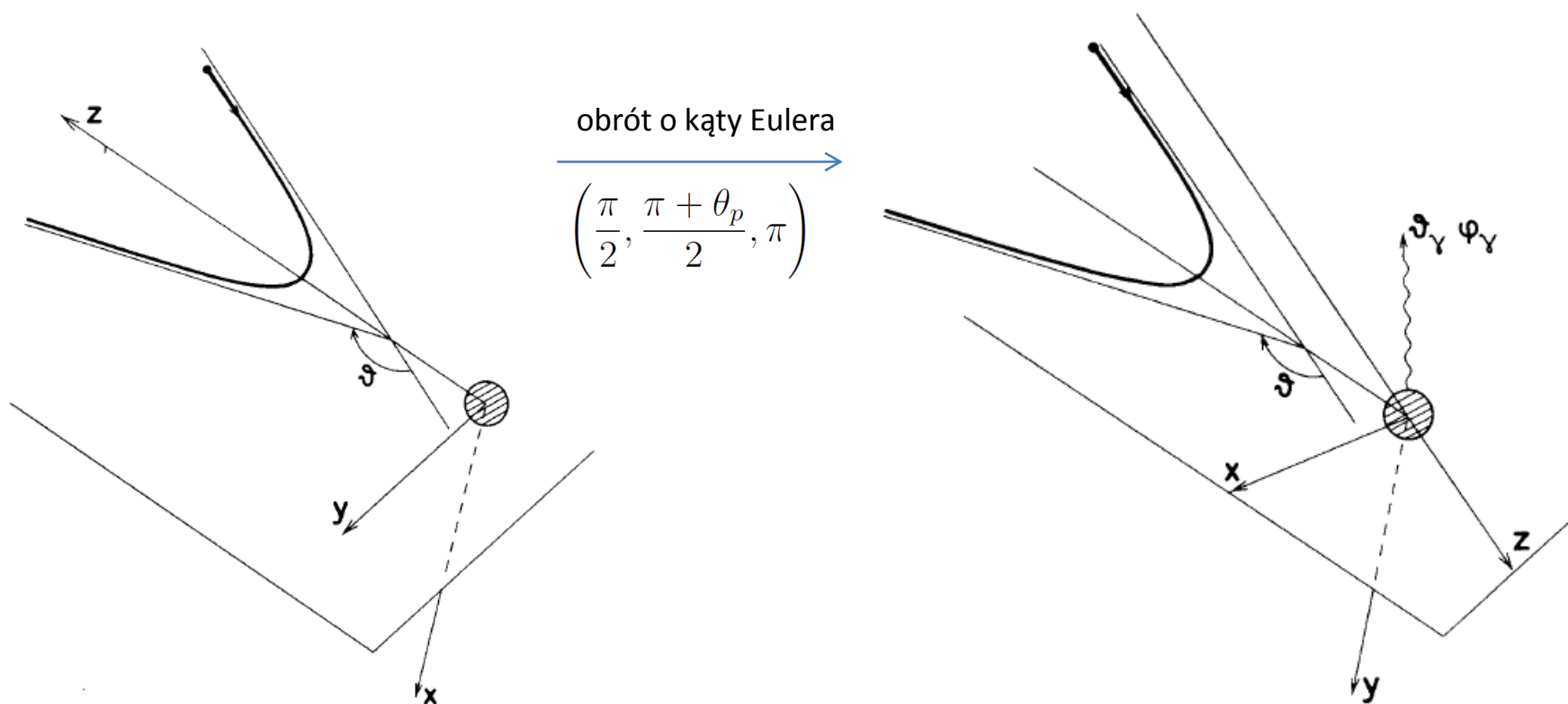
II) Proces rozpadu:

- 1) Promieniowanie γ nie jest emitowane w sposób izotropowy ze wzbudzonego jądra atomowego.
- 2) Do opisanie rozkładów kątowych promieniowania γ istotna jest znajomość multipolowości przejścia γ oraz polaryzacji jądra po procesie wzbudzenia.
- 3) Polaryzację jądra atomowego opisuje tzw. **tensor statystyczny ρ_{kk}** (tensor polaryzacji), wyznaczany na etapie liczenia procesu wzbudzenia jądra atomowego $\rightarrow$ informacja o prawdopodobieństwach wzbudzenia i populacji podstanów magnetycznych.

II) Proces rozpadu - układ odniesienia

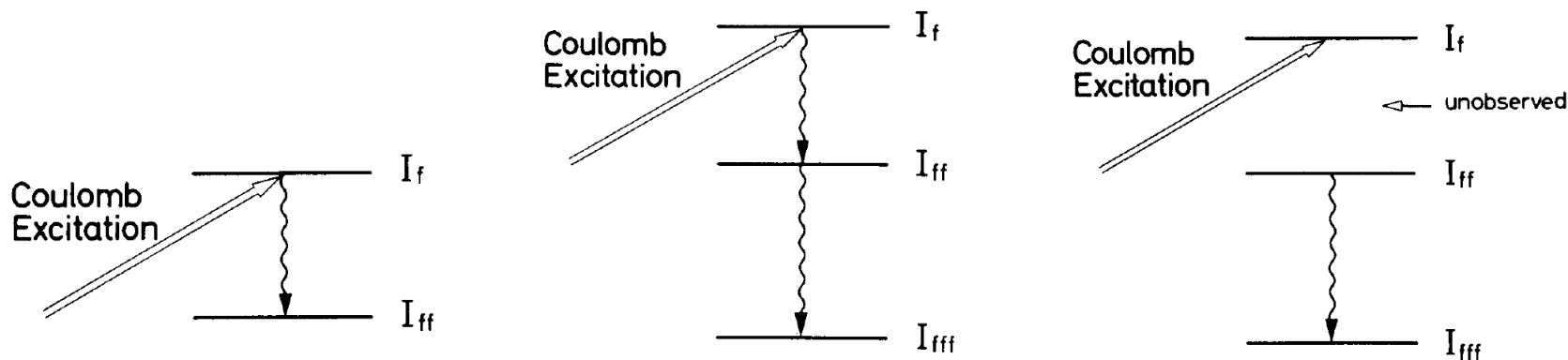
Osie układu, w którym liczymy amplitudy wzbudzeń,
(tensor statystyczny) zależne od trajektorii:

rozkłady kątowe promieniowania γ muszą być
wyznaczone w niezależnym od kąta rozproszenia
układzie laboratoryjnym:



II) Proces rozpadu

- 4) W wyliczanym rozkładzie kątowym promieniowania γ uwzględnia się również:
- wpływ związany z **rozpadem wyżej położonych stanów jądrowych** wzbudzonych w procesie rozpraszania kulombowskiego **na populację stanu końcowego** (*cascade deexcitation feeding*)
 → szczególnie istotne w przypadku wzbudzeń wielostopniowych

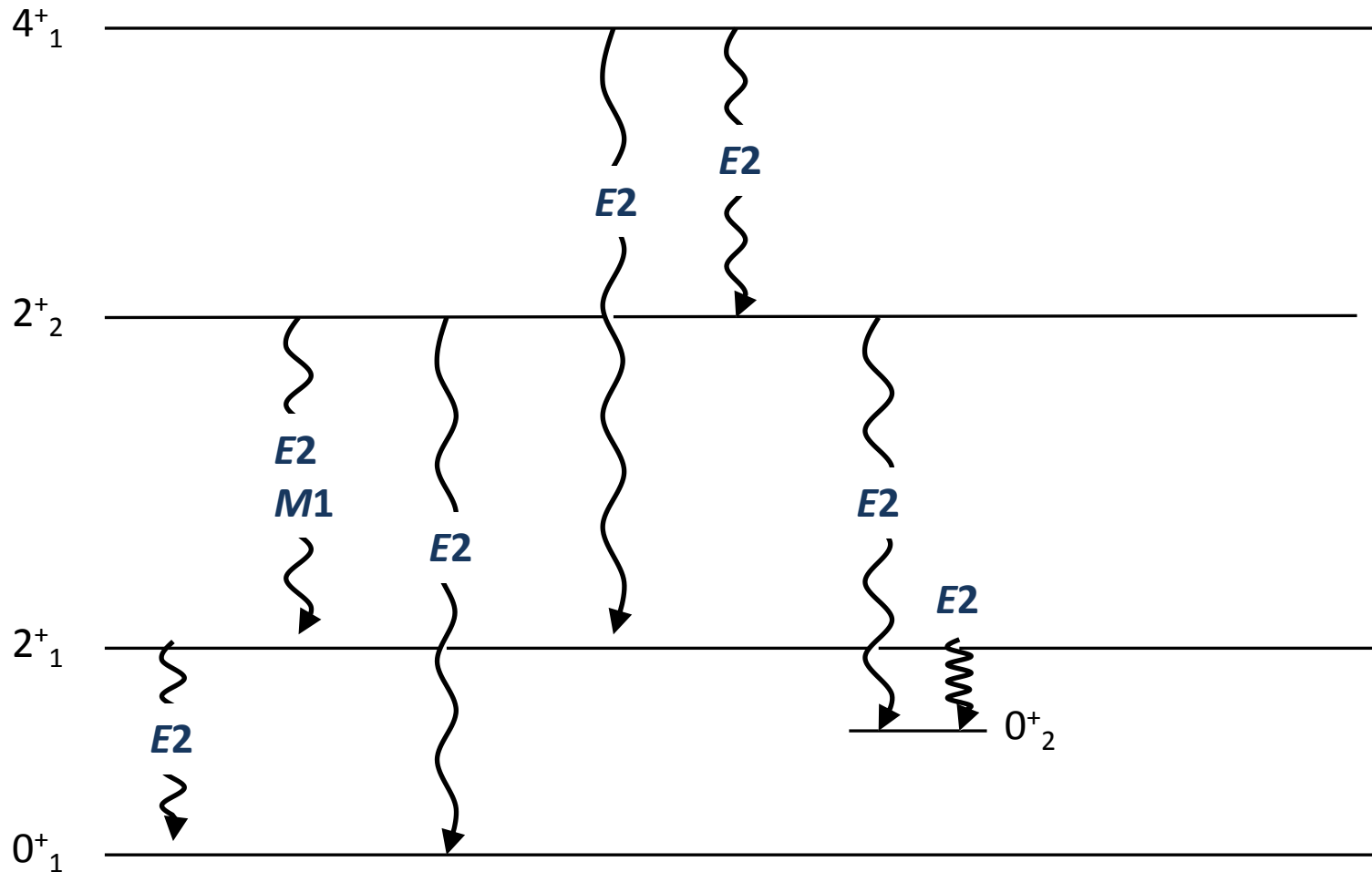


II) Proces rozpadu:

5) Inne zjawiska wpływające na rozkład kątowy promieniowania γ :

- efekt jądrowej deorientacji*
związany z oddziaływaniem momentu magnetycznego jądra z elektronami przechodzącymi na niższe dostępne powłoki w wybitym z tarczy, silnie zjonizowanym atomie → czas, w którym zachodzą przejścia między powłokami elektronowymi $\sim$ ps podobnie jak czasy życia stanów jądrowych → depolaryzacje jądrowych stanów wzbudzonych przed emisją kwantu γ → rozmycie rozkładów kątowych promieniowania γ .
- Korekta rozkładu kątowego związana z efektami relatywistycznymi: eksperymenty z wiązkami ciężkich jonów, przy użyciu cienkich tarcz → prędkości jąder odrzutu $\sim 10\% c$.
- Skończone rozmiary detektorów γ → współczynniki rozmycia rozkładu kątowego.
- Zjawisko konwersji wewnętrznej.

Proces rozpadu w GOSI



Czasy życia, współczynniki rozgałęzień i współczynniki zmieszania
z niezależnych pomiarów bardzo pomocne w wielowymiarowej analizie.

E(level) [†]	J ^π #	T _{1/2} [‡]	XREF	Comments
695.109 ^d 25	0 ⁺	1.62 ns 4	AB EFGHI KL 0	J ^π : E0 transition to 0 ⁺ . T _{1/2} : weighted average of 1.58 ns 4 (βγγ(t), 1990Ma01), 1.65 ns 4 (βγγ(t) quoted by 1990Ma01 from a later report of 1989OhZY), 1.7 ns 2 (p ce(t) in (p,p'γ) 1972AnZP), 2.2 ns 3 (B(E2) in Coul. ex. 1972Ba90). Other: 3.0 ns 1 (p ce(t) in (p,t) 1987Es01).
1063.776 ^c 22	2 ⁺	6.6 ps 5	AB EFGHIJKL Q	J ^π : L(t,p)=L(p,p')=L(α,α')=2. T _{1/2} : other: 5.0 ps 4 from B(E2) values in Coul. ex. β ₂ =0.037 (from (p,p') and (α,α')).
1136.09 ^a 5	4 ⁺	3.8 ps 2	AB DE GHIJKLM PQ	J ^π : L(t,p)=L(p,p')=4. β ₄ =-0.027 (from (p,p')). B(E4)(W.u.)=0.99 21 (from (p,p') and (d,d') 1992Pi08).
1463.90 ^d 3	2 ⁺	2.9 ps 7	AB EFGHI KL	J ^π : L(t,p)=L(p,p')=2.



τ

γ(¹⁰⁰Mo)

E _i (level)	J _i ^π	E _γ [†]	I _γ [‡]	E _f	J _f ^π	Mult.	δ	α [#]	I _(γ+ce)	Comments
535.561	2 ⁺	535.60 3	100	0.0	0 ⁺	E2				B(E2)(W.u.)=37.0 7 E _γ : weighted average of 535.666 34, 535.5 1, 535.7 1 and 535.547 13. The first three values are from ¹⁰⁰ Nb β ⁻ decay and the last one from (n,n'γ).
695.109	0 ⁺	159.547 13	100 1	535.561	2 ⁺	E2		0.222		Mult.: ΔJ=2, E2 γ to 0 ⁺ . B(E2)(W.u.)=92 4

Comments

B(E2)(W.u.)=37.0 7

E_γ: weighted average of 535.666 34, 535.5 1, 535.7 1 and 535.547 13. The first three values are from ¹⁰⁰Nb β⁻ decay and the last one from (n,n'γ).

Mult.: ΔJ=2, E2 γ to 0⁺.

B(E2)(W.u.)=92 4

$$B(E\lambda; I_i \rightarrow I_{gs}) = \frac{(1.2)^{2\lambda}}{4\pi} \left(\frac{3}{\lambda+3} \right)^2 A^{2\lambda/3} e^2 (fm)^{2\lambda}$$

$$B(M\lambda; I_i \rightarrow I_{gs}) = \frac{10}{\pi} (1.2)^{2\lambda-2} \left(\frac{3}{\lambda+3} \right)^2 A^{(2\lambda-2)/3} \mu_N^2 (fm)^{2\lambda-2}$$

1063.776	2 ⁺	368.8 3	1.7 2	695.109	0 ⁺	[E2]			
528.24 2			100 2	535.561	2 ⁺	E2+M1	+4.4 +15-9		
1063.76 3			38 1	0.0	0 ⁺	E2			

$$B(E1; I_i \rightarrow I_{gs}) = 6.446 \cdot 10^{-4} A^{2/3} e^2 (barn)$$

$$B(E2; I_i \rightarrow I_{gs}) = 5.940 \cdot 10^{-6} A^{4/3} e^2 (barn)^2$$

$$B(E3; I_i \rightarrow I_{gs}) = 5.940 \cdot 10^{-8} A^2 e^2 (barn)^3$$

$$B(E4; I_i \rightarrow I_{gs}) = 6.285 \cdot 10^{-10} A^{8/3} e^2 (barn)^4$$

$$B(M1; I_i \rightarrow I_{gs}) = 1.790 \left(\frac{e\hbar}{2Mc} \right)^2$$