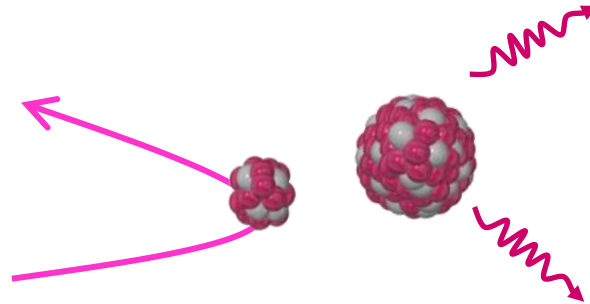


Wzbudzenia kulombowskie – narzędzie do badania struktury jąder atomowych



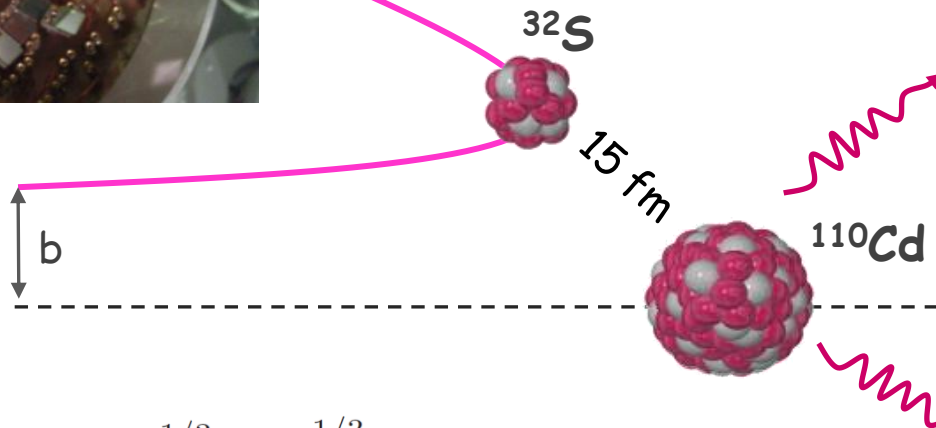
1. Co mierzymy ?
 - Eksperyment wzbudzenia kulombowskiego krok po kroku.
2. Eksperymenty wzbudzeń kulombowskich z wiązkami jąder stabilnych i jąder egzotycznych.
 - Kinematyka reakcji.
 - Geometria układów detekcyjnych → umiejscowienie detektora cząstek.
3. Detektory cząstek w eksperymentach wzbudzeń kulombowskich.

Eksperyment wzbudzenia kulombowskiego – podstawowe fakty

- ❑ W wyniku oddziaływania elektromagnetycznego jądro wzbudzone jest ze stanu $|i\rangle$ do stanu $|f\rangle$.
 - Kryterium Cline'a o zachowaniu odpowiednio dużej odległości (> 5 fm) pomiędzy zderzającymi się obiektami i związana z tym energia bezpieczna.
 - Prawidłowy opis procesu wzbudzenia i kinematyki rozproszenia → układ detektorów cząstek.
- ❑ Następnie obserwuje się rozpad na drodze emisji promieniowania γ lub elektronów konwersji.
 - Układ detektorów Ge (detektory elektronów: MINIBALL + SPEDE @ ISOLDE)
- ❑ Elementy macierzowe $\langle f | M(E2) | i \rangle$ opisują zarówno proces wzbudzenia jak i rozpadu → są bezpośrednio związane z mierzonymi w eksperymencie intensywnościami przejść γ .
- ❑ Elementy macierzowe $E2$ są związane z deformacją kwadrupolową jądra atomowego.

Wzbudzenie kulombowskie

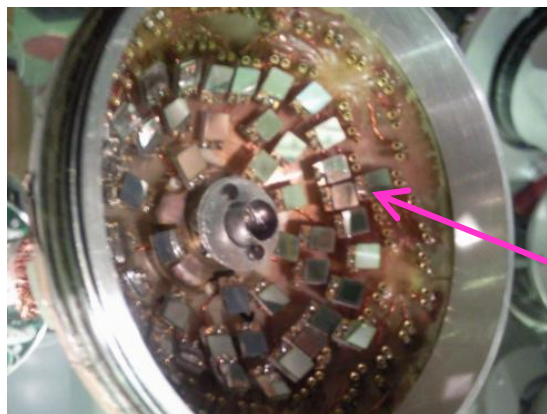
Energia wiązki tak dobrana, aby zachować odpowiednio dużą odległość między zderzającymi się jądrami → wyłącznie **oddziaływanie elektromagnetyczne**



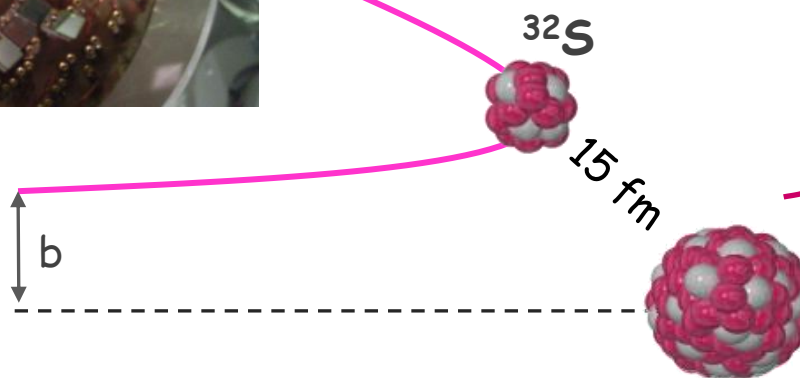
$$d_{min} = 1.25 \cdot (A_p^{1/3} + A_t^{1/3}) + 5.0 \quad [\text{fm}]$$



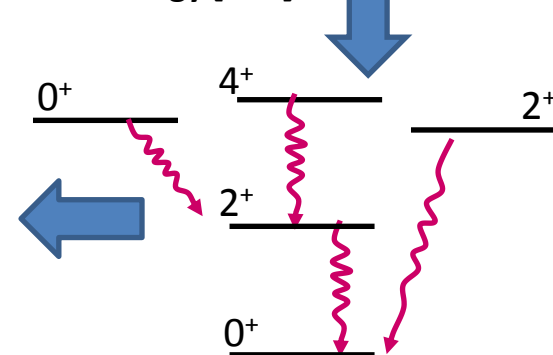
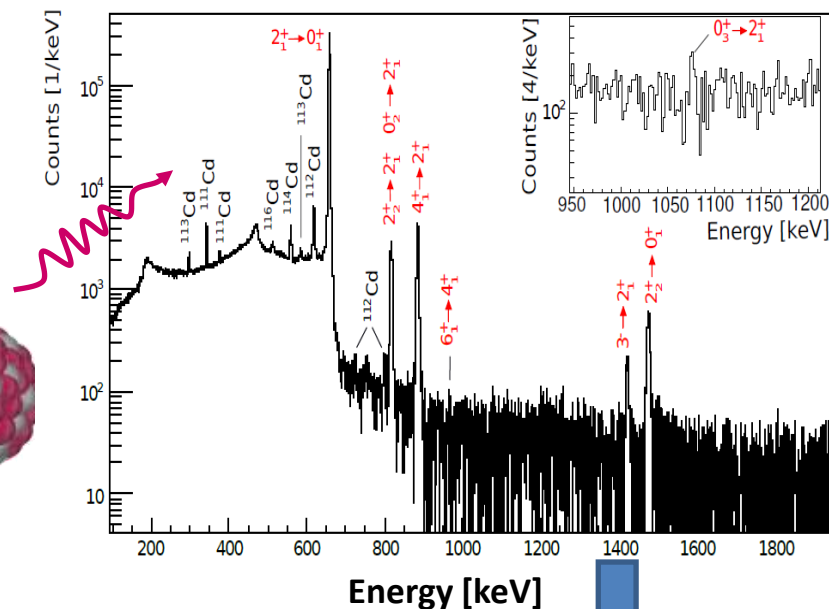
Wzbudzenie kulombowskie



wyłącznie oddziaływanie elektromagnetyczne



$$d_{min} = 1.25 \cdot (A_p^{1/3} + A_t^{1/3}) + 5.0 \quad [\text{fm}]$$



kształt jądra atomowego
w każdym stanie **niezależnie**

elementy macierzowe
przejść
elektromagnetycznych

Bezpośrednią obserwacją w eksperymentach
wzbudzeń kulombowskich jest **promieniowanie γ**
odpowiadające rozpraszaniu jąder pocisku/tarczy
pod zadany kąt.

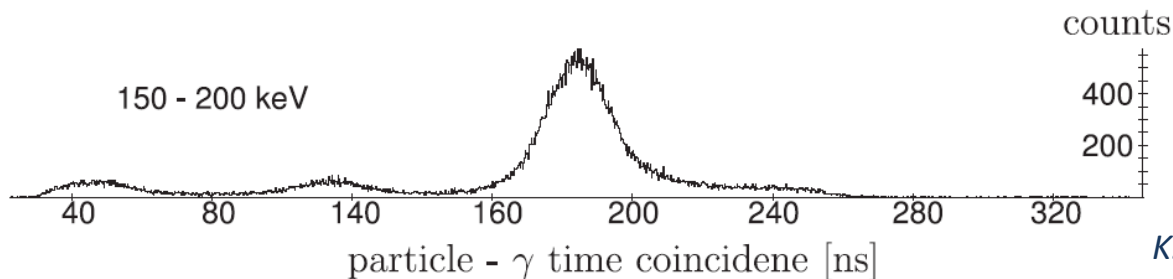
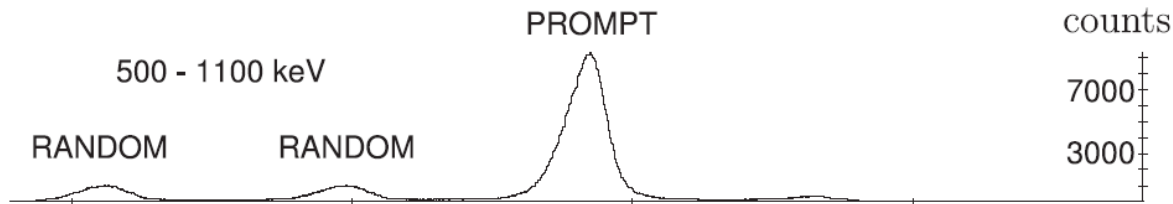
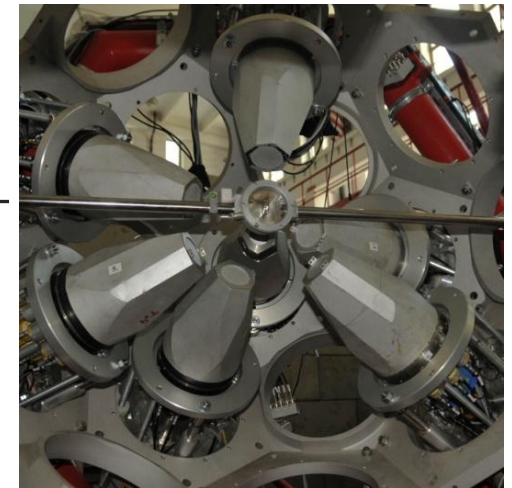
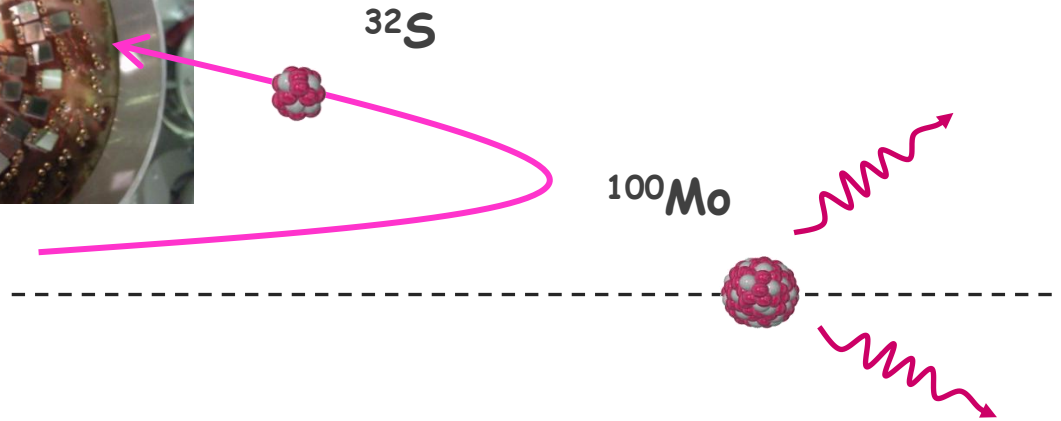
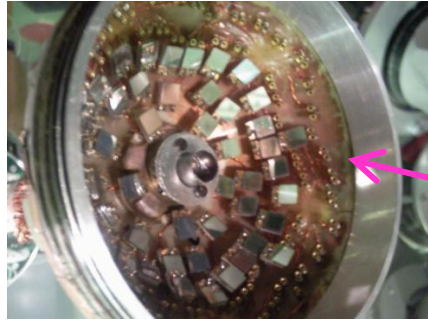


obserwacja **przynajmniej jednego z partnerów reakcji**
rozproszonego nieelastycznie **pod zadany kąt**.

Eksperyment krok po kroku

1. Wektory prędkości partnerów reakcji (znajomość kąta rozproszenia, energii, czasu przelotu mierzonych przez detektory cząstek)
 - Wyselekcjonowanie zdarzeń związanych z procesem wzbudzenia kulombowskiego (eksperymenty z wysoką energią wiązki, eksperymenty z wiązkami egzotycznymi, eksperymenty z utlenionymi tarczami) .
 - Identyfikacja jąder odrzutu i jąder pocisku.
 - Opis procesu wzbudzenia (zależność od θ).
 - Korekta dopplerowska rejestrowanych przejść γ .
 - Możliwość badania korelacji cząstka-gamma.

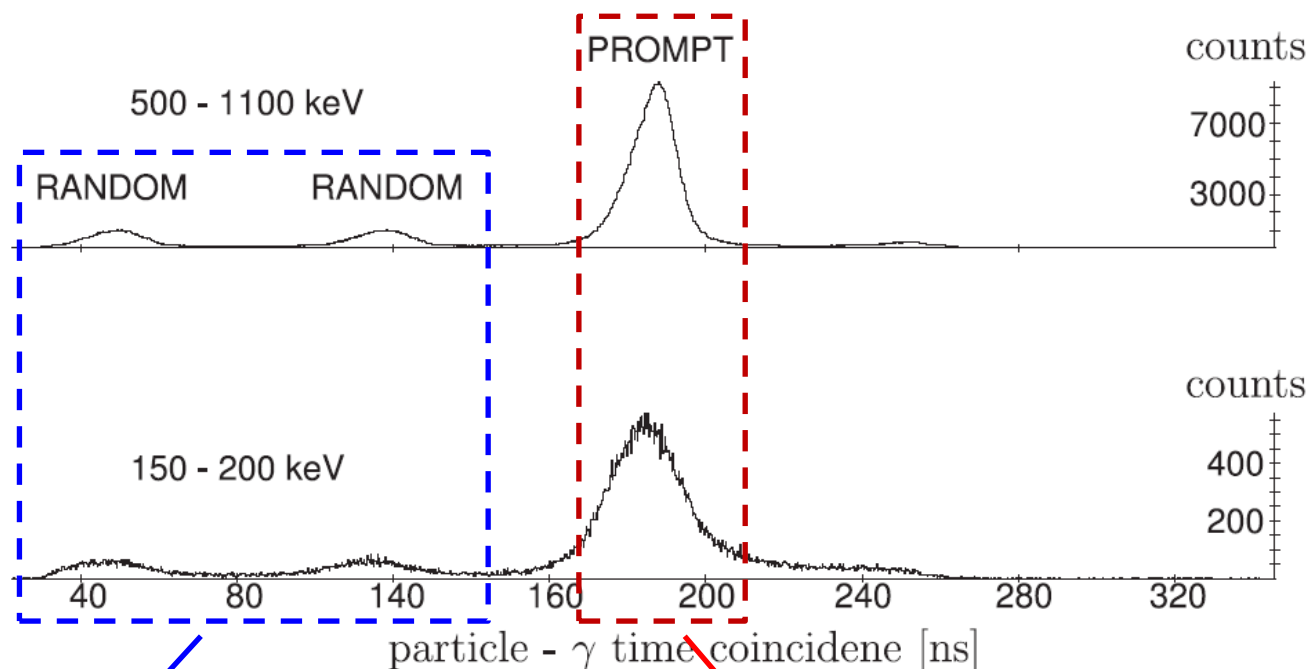
Identyfikacja przypadków związanych ze wzbudzeniem kulombowskim



Promieniowanie γ mierzone
w koincydencji czasowej
z rozproszonymi cząstkami.

Koincydencje czasowe cząstka-gamma

Przykład:



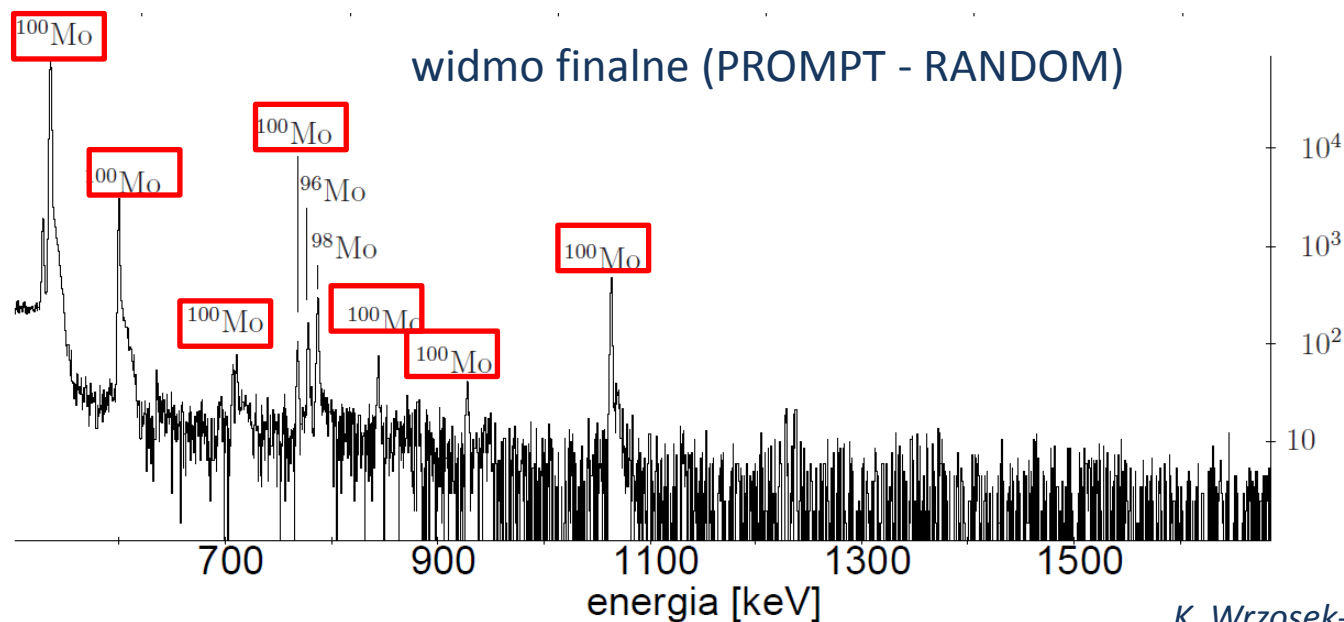
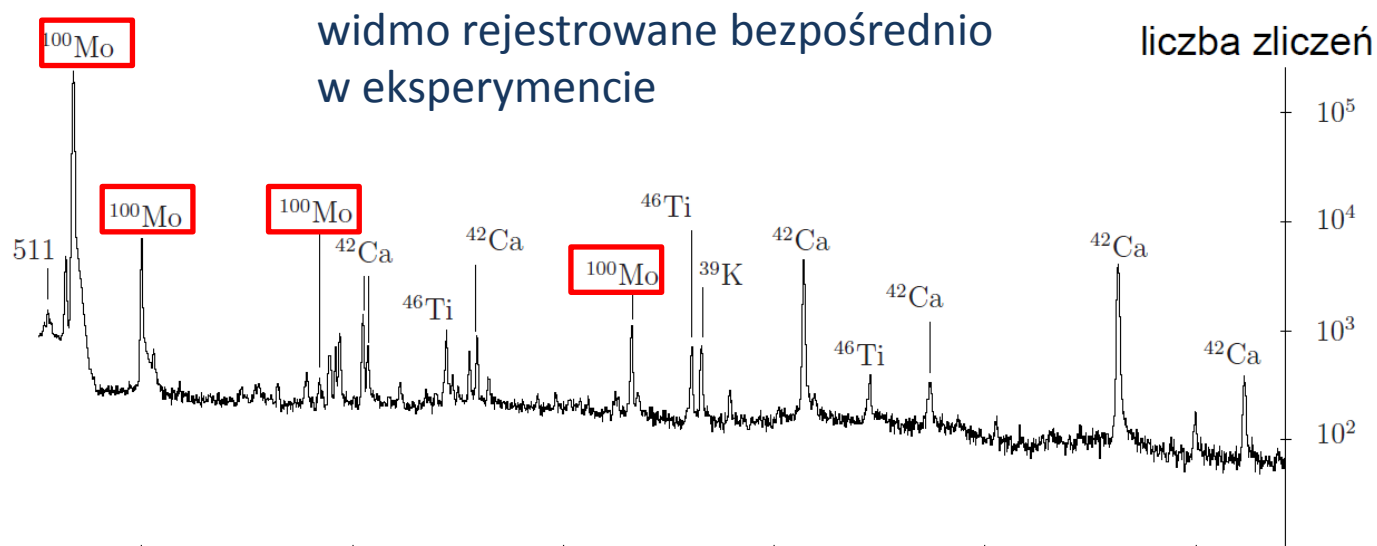
przypadkowe koincydencje cząstka γ (RANDOM):

zdarzenia nieskorelowane ze sobą czasowo;
np. w przypadku pomiarów w ŚLCJ UW
związane z detekcją kwantu γ pochodzącego ze
wzbudzenia jądra tarczy jonem z poprzedniego
lub następnego pulsu wiązki, zdarzenia
pochodzące z innej kinematyki rozproszenia.

prawdziwe koincydencje cząstka γ (PROMPT):

w zadanym przedziale czasu zarejestrowany
przez detektor rozproszony jon pocisku
wzbudził uprzednio jądro tarczy powodując
tym samym emisję kwantu γ zarejestrowanego
przez detektor Ge.

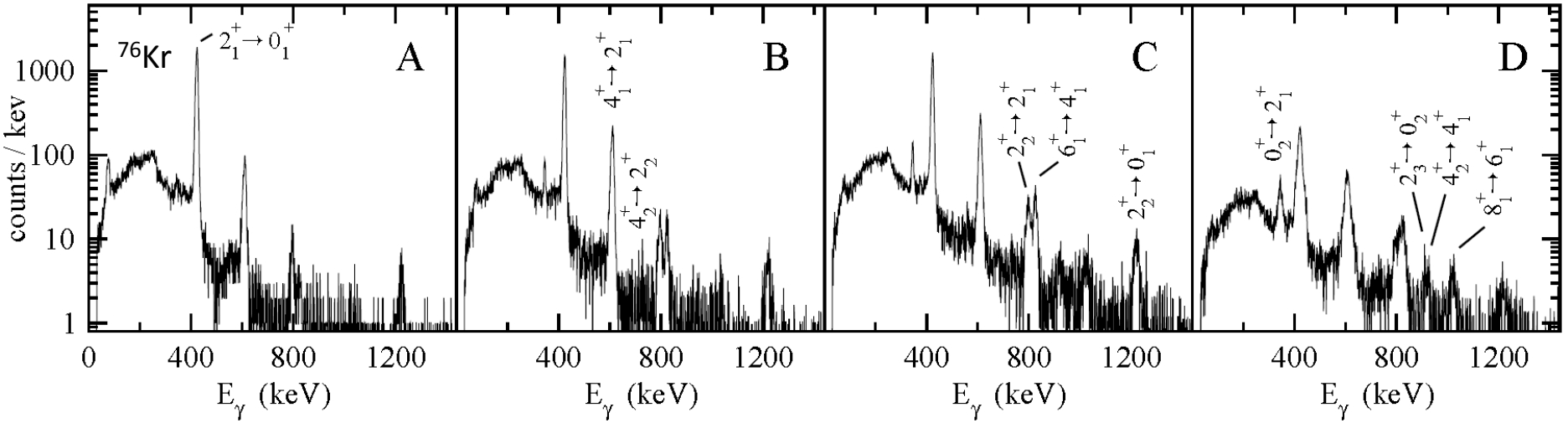
Selekcja zdarzeń



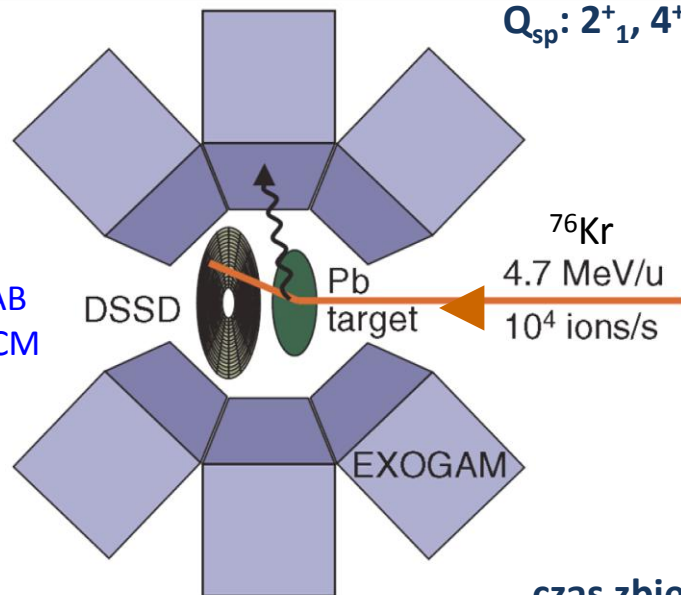
Eksperyment krok po kroku

1. Wektory prędkości partnerów reakcji (znajomość kąta rozproszenia, energii, czasu przelotu mierzonych przez detektory cząstek)
 - Wyselekcjonowanie zdarzeń związanych z procesem wzbudzenia kulombowskiego (eksperymenty z wysoką energią wiązki, eksperymenty z wiązkami egzotycznymi, eksperymenty z utlenionymi tarczami) .
 - Identyfikacja jąder odrzutu i jąder pocisku.
 - Opis procesu wzbudzenia (zależność od θ).
 - Korekta dopplerowska rejestrowanych przejść γ .
 - Możliwość badania korelacji cząstka-gamma.
2. Proces wzbudzenia kulombowskiego zależy od kąta rozproszenia
→ **pomiar promieniowania γ w funkcji kąta rozproszenia cząstki.**

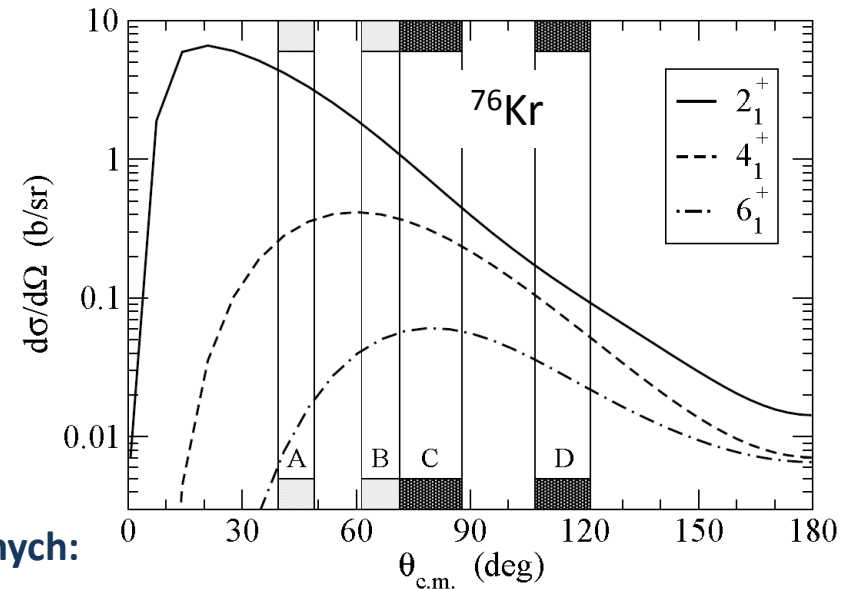
Promieniowania γ w funkcji kąta rozproszenia cząstki



DSSD:
 24° - 54° LAB
 24° - 145° CM



$Q_{sp}: 2_1^+, 4_1^+, 6_1^+, 2_2^+, 2_3^+$



czas zbierania danych:
50 godzin

Gdy już zmierzymy intensywności przejść promieniowania γ ...

- ... należy je przeliczyć na bezwzględne przekroje czynne:
 - normalizacja do przekroju czynnego na rozpraszanie Rutherforda (wymaga precyzyjnej znajomości intensywności wiązki, czasu martwego układu,...)
 - normalizacja do znanego $B(E2)$ w jądrze pocisku,
 - normalizacja do znanego $B(E2)$ w jądrze tarczy.

M. Zielińska, L. P. Gaffney, K. Wrzosek-Lipska et al., Eur.Phys.J. A 52, 99 (2016)

- Etap finalny: wyznaczenie zredukowanych elementów macierzowych przejść elektromagnetycznych na podstawie zmierzonych intensywności przejść γ .

Badanie jąder stabilnych: eksperymenty wzbudzeń kulombowskich z wiązkami jąder stabilnych



- Stany jądrowe populowane są na drodze **wzbudzeń wielostopniowych**.
- Intensywności wiązek $\sim 10^{10}$ **cząstek/s** $\rightarrow$ detektory cząstek ustawione w **kątach wstecznych** względem kierunku padania wiązki.

 $\rightarrow$ możliwość badania efektów drugiego rzędu:

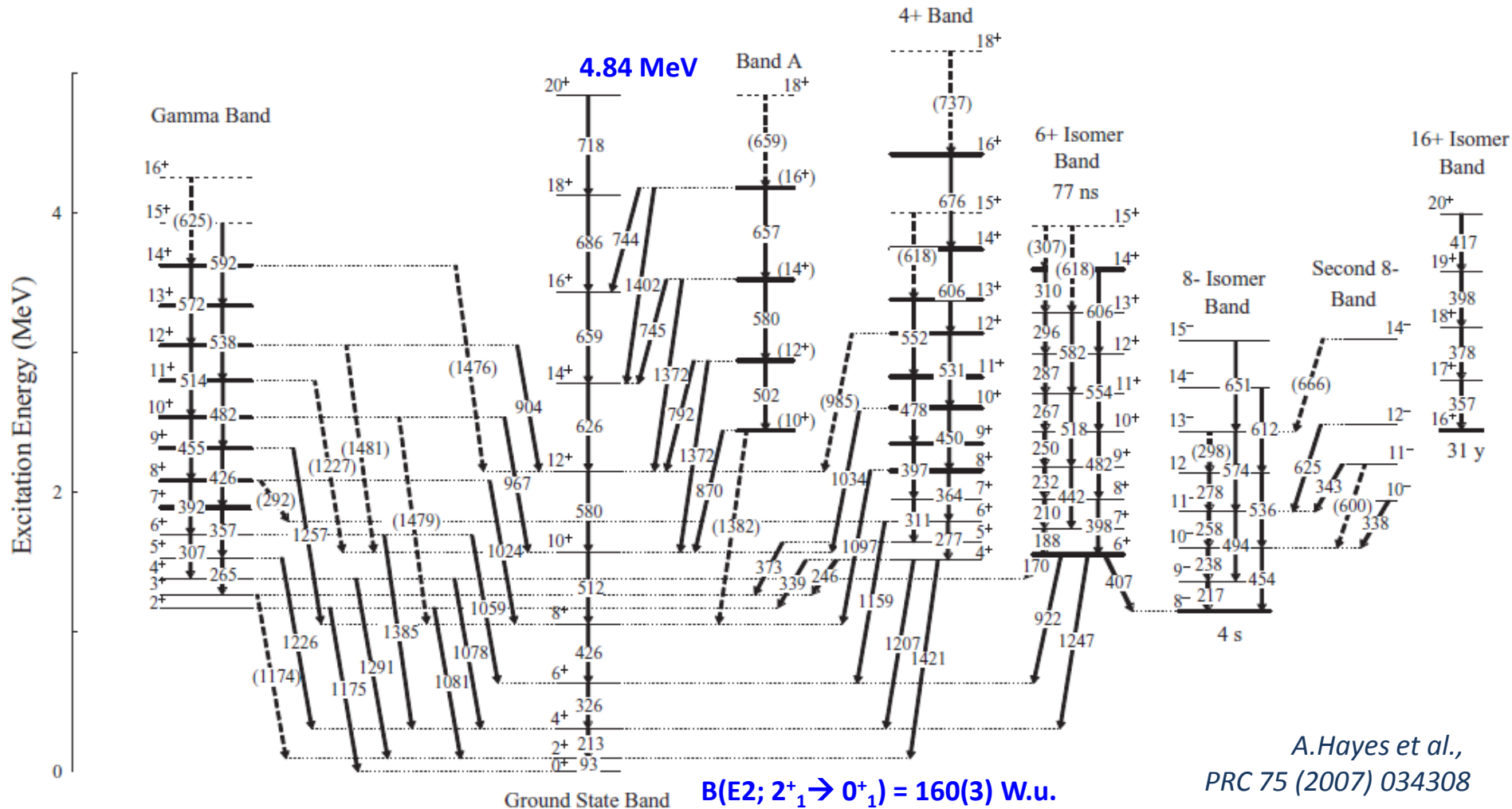
momenty kwadrupolowe stanów wzbudzonych, względne znaki elementów macierzowych
- Dla jąder stabilnych znane są komplementarne dane spektroskopowe, m.in. **czasy życia** stanów wzbudzonych $\rightarrow$ nie ma potrzeby wprowadzania innych form normalizacji (związanych z przekrojem czynnym na rozpraszanie nieelastyczne lub znajomością $B(E2)$ jądra partnera reakcji).
- Uzyskiwane w eksperymentach statystyki wystarczające do badania **korelacji cząstka- γ** (możliwe do wykonania gdy liczba zliczeń dla danego przejścia gamma jest rzędu kilku tysięcy).

Wzbudzenie kulombowskie ^{178}Hf :

^{136}Xe (650 MeV) + ^{178}Hf , GAMMASPHERE + PPAC (CHICO)

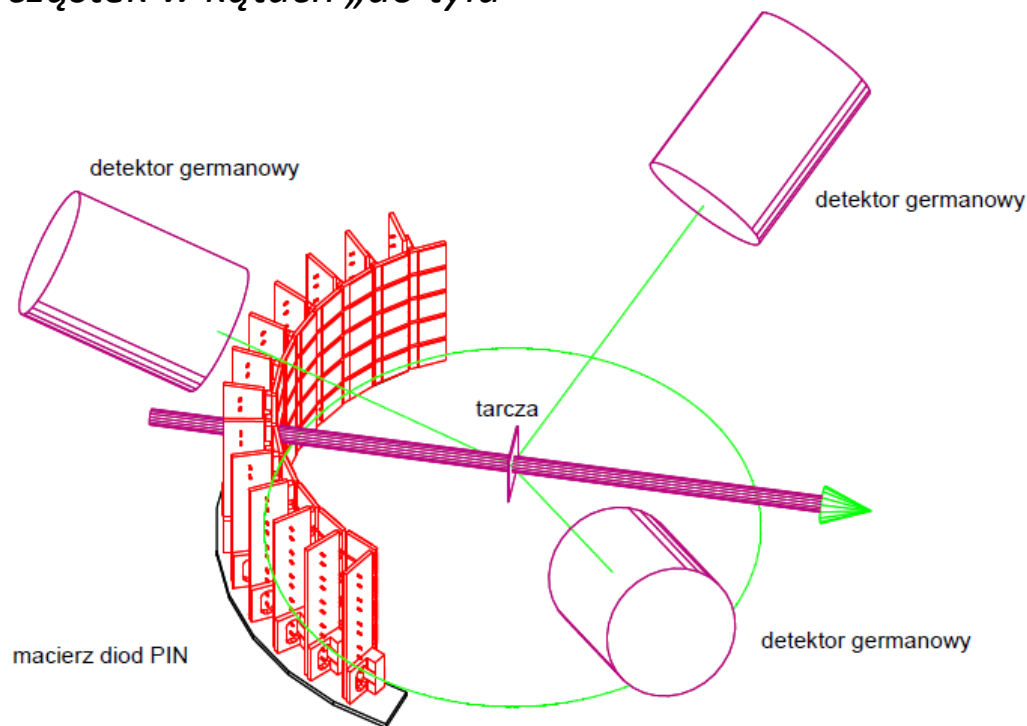
Gammasphere: całkowita wydajność 9% dla 1.3 MeV

CHICO: $12^\circ < \theta < 85^\circ$ and $95^\circ < \theta < 168^\circ$



„Klasyczny” eksperyment wzbudzenia kulombowskiego z wiązką jąder stabilnych:

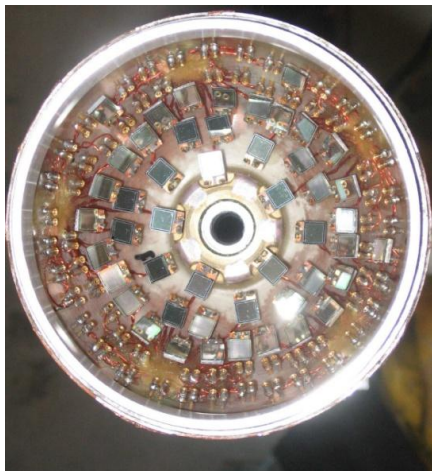
detektor cząstek w kątach „do tyłu”



- Rejestrowane są jedynie jony wiązki rozproszone pod zadaniem kątem (w ogólności pomiar ich energii nie jest wymagany).
- detektory cząstek: Si (poddzielone na segmenty lub Pin-diody), detektory plastikowe, MCP (*Micro-Channel Plate*).

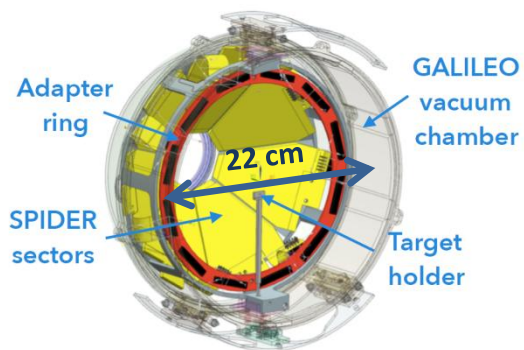
Detektory cząstek w eksperymentach wzbudzeń kulombowskich:

Komora rozprożeń ŚLCJ UW

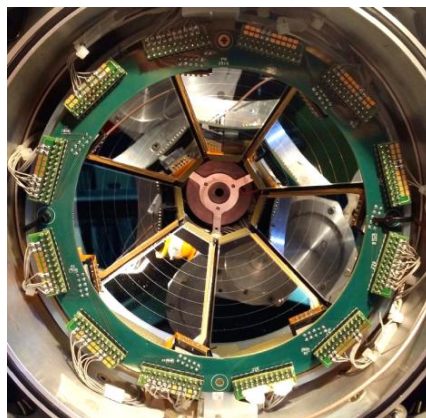


- promień: 5 cm
- do 110 PiN-diod: $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$
- zakres kątowy: $110^\circ - 165^\circ$ w LAB

Silicon Ple DEtectoR



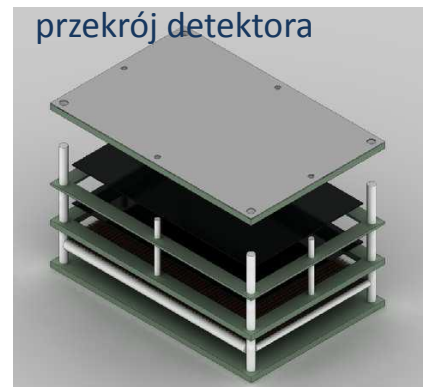
from M. Rocchini, INFN



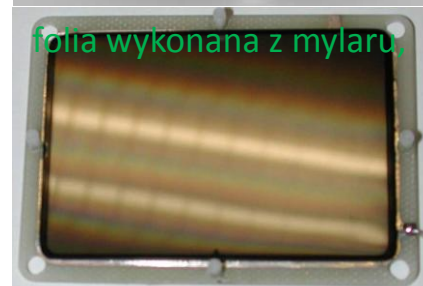
- 7 sectors, 8 strips
- detector thickness $\sim 300 \text{ um}$

Układ DANTE (LNL): MCP (Micro-Channel Plate)

przekrój detektora



folia wykonana z mylaru



Linia opóźniająca



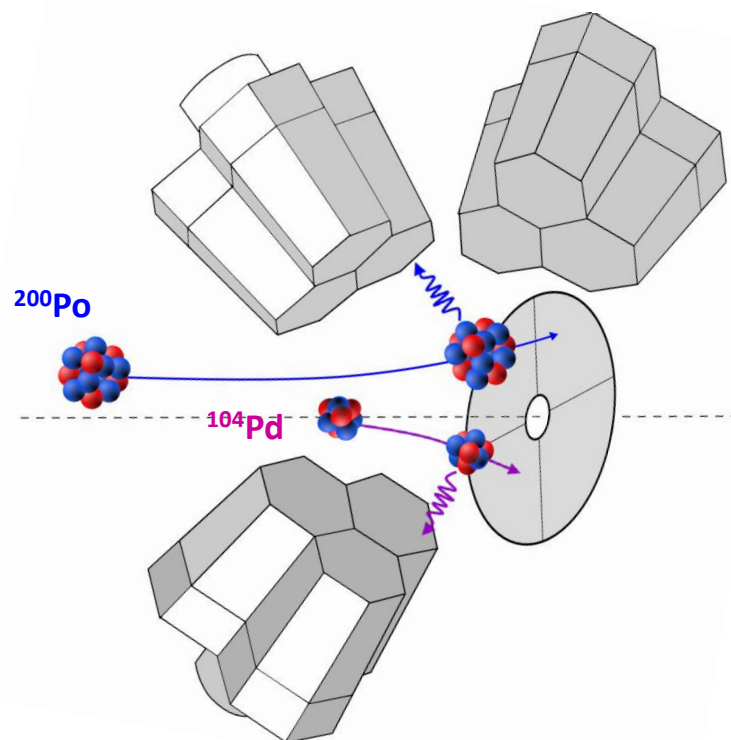
- rozmiar: $40 \times 60 \text{ mm}^2$, grubość: 13 mm;
- określenie położenia cząstki na podstawie różnicy czasu rejestracji sygnału;
- pozycyjna zdolność rozdzielcza $\sim 1 \text{ mm}$.

Eksperymenty wzbudzeń kulombowskich z wiązkami jąder egzotycznych

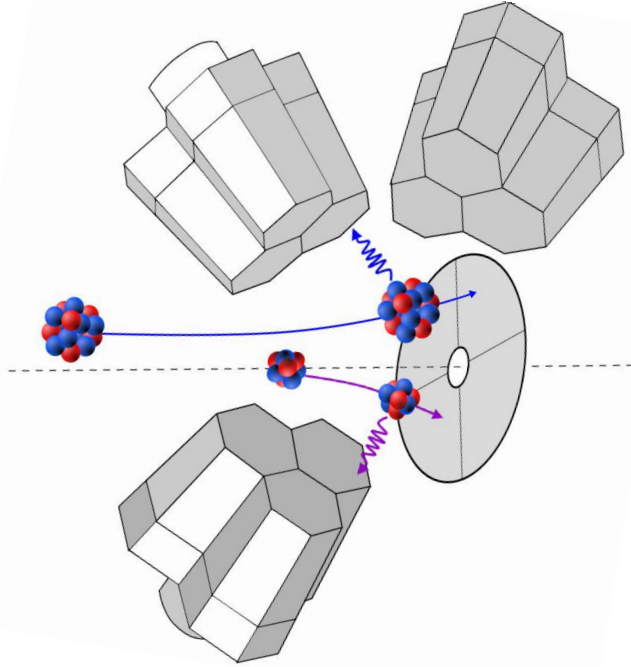
- Stany jądrowe populowane są zazwyczaj na drodze **wzbudzeń 1- lub 2- stopniowych** → układy poziomów słabo znane, szczególnie w przypadku jąder bogatych w neutrony.
- Intensywności wiązek nieduże $\sim 10^{5-6}$ **cząstek/s** → detektory cząstek ustawione w **kątach przednich** względem kierunku padania wiązki aby możliwie jak najbardziej zwiększyć statystykę.
- **Czasy życia** stanów wzbudzonych są zazwyczaj **nieznane** (m.in. w przypadku jąder egzotycznych bogatych w neutrony)
→ potrzebna jest normalizacja do przekroju czynnego na rozpraszanie nieelastyczne lub do wzbudzenia jądra tarczy
(wybór partnera reakcji o precyzyjnie znanym $B(E2)$).
- Uzyskiwane w eksperymentach **statystyki są nieduże** → niekiedy analiza danych z podziałem na różne kąty rozproszenia na granicy wykonywalności.
- Duże tło pochodzące z **rozpadów β** jąder egzotycznych.

Wzbudzenie kulombowskie z wiązkami jąder egzotycznych: detektor cząstek w kątach przednich

- Jednoczesna rejestracja jąder tarczy i jąder pocisku.
- Jednoznaczna identyfikacja cząstki potrzebna do prawidłowego opisu procesu wzbudzenia kulombowskiego i wykonania korekty dopplerowskiej.
- Detektory:
PPAC (*Parallel-Plate Avalanche Counter* – lawinowe detektory gazowe),
DSSSD (*Double-Sided Silicon Strip Detector*).



MINIBALL + DSSSD@ REX-ISOLDE



DSSSD:
4 kwadranty, każdy podzielony
na 12 sektorów (radialnie)
i 16 pierścieni



rozkład kątowy jąder pocisku
i jąder tarczy

