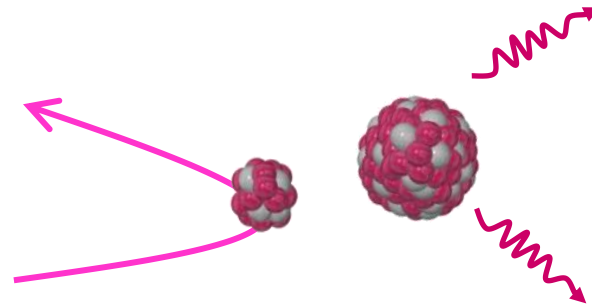


Wzbudzenia kulombowskie – narzędzie do badania struktury jąder atomowych



1. Rola komplementarnych danych spektroskopowych w analizie danych z eksperymentów wzbudzeń kulombowskich:

Przykłady: → ^{70}Se

→ $^{74,76}\text{Kr}$

→ ^{140}Sm

Rola danych spektroskopowych w eksperymentach wzbudzeń kulombowskich

1. Weryfikacja zgodności różnych danych eksperymentalnych.
2. Najprostsza metoda normalizacji danych wzbudzeń kulombowskich
→ wyznaczenie bezwzględnych przekrojów czynnych ze zmierzonych intensywności przejść γ .
3. Stanowią istotne więzy dla wielowymiarowej minimalizacji danych wzbudzeń kulombowskich → umożliwia to zwiększenie czułości na wyznaczenie momentów kwadrupolowych (znaki i wielkości) i względnych znaków przejściowych elementów macierzowych → kluczowa informacja dla określenia trójosiowości jądra atomowego.

- Przykłady:*
1. Wzbudzenie kulombowskie ^{70}Se i znany τ (2^+_1).
 2. Wzbudzenie kulombowskie $^{74,76}\text{Kr}$ i znane czasy życia w pasmie stanu podstawowego.
 3. Wzbudzenie kulombowskie ^{140}Sm i nieznany spin stanu wzbudzonego o energii 990 keV.

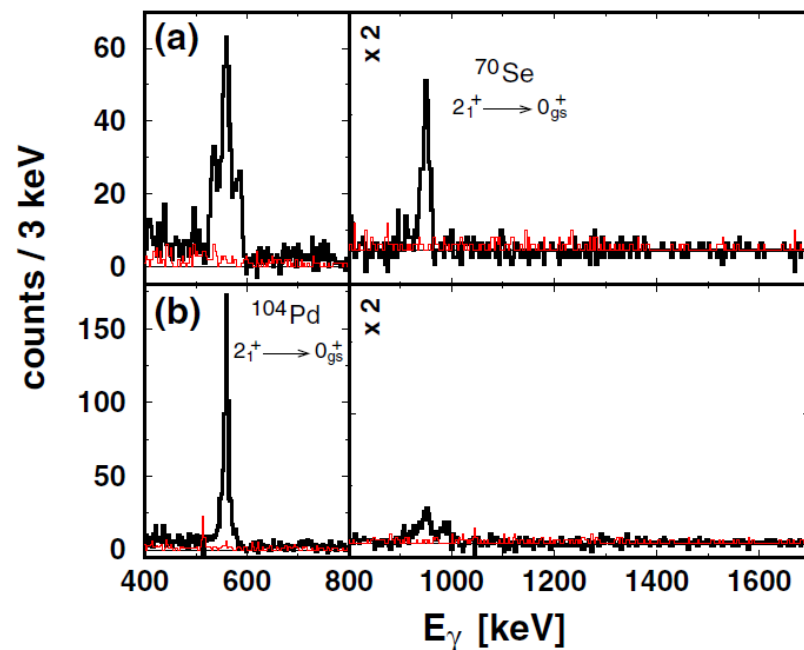
Przykład 1: Wzbudzenie kulombowskie ^{70}Se @ CERN / ISOLDE

➤ ^{104}Pd (^{70}Se , $^{70}\text{Se}^*$), $E_{\text{wiązki}} = 2.94 \text{ MeV/u}$.

$\tau_{\text{wzb}} \sim \text{ps}$ $t_{\text{tarcza-CD}} \sim \text{ns}$:

→ promieniowanie γ emitowane w locie

→ rejestrowane energie kwantów γ są przesunięte w wyniku efektu Dopplera:



$$E_{\text{lab}} = \frac{\gamma E_0}{1 - \beta \cos(\eta)}$$

energia kwantu γ
(nieprzesunięta Dopplerowsko)

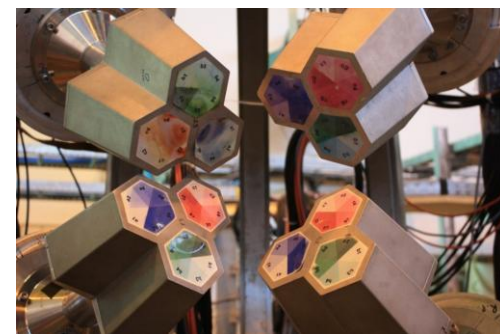
$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$

prędkość wzbudzonego jądra

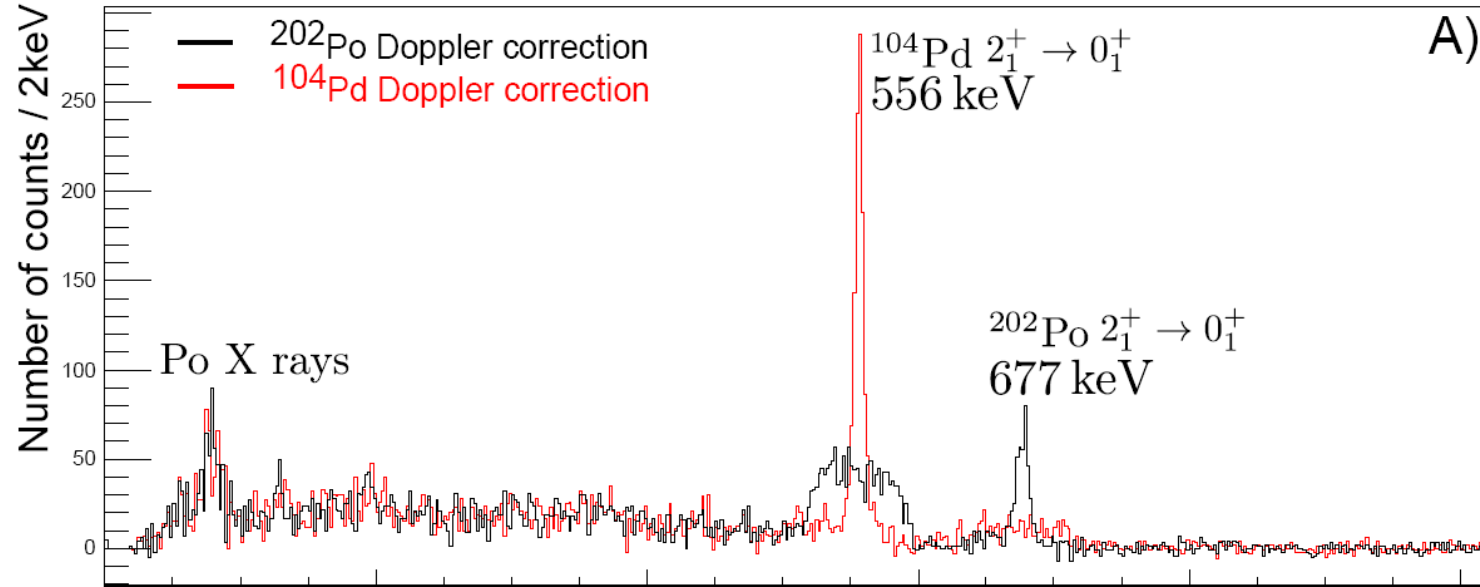
kąt między kierunkiem emisji kwantu γ a kierunkiem rozproszenia wzbudzonego jądra emitującego kwant γ

rejestrowana energia kwantu γ w detektorze Ge

$$\cos(\eta) = \sin(\theta_p) \sin(\theta_\gamma) \cos(\phi_p - \phi_\gamma) + \cos(\theta_p) \cos(\theta_\gamma)$$

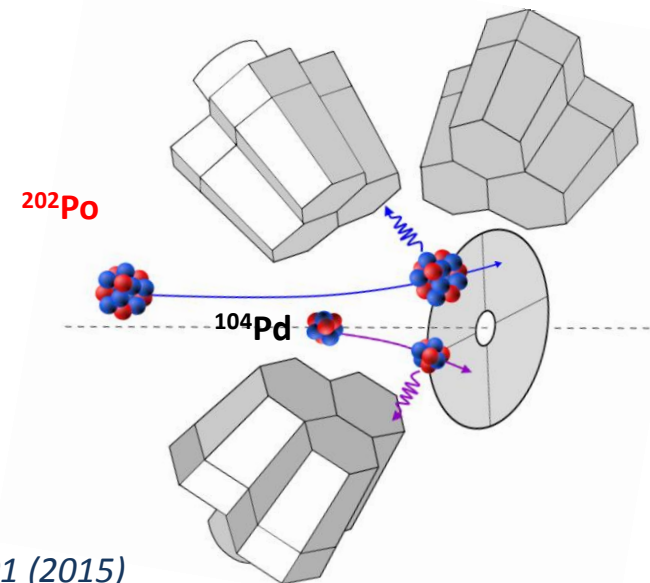


Korekta Dopplerowska: $^{202}\text{Po} + ^{104}\text{Pd}$



$$E_{lab} = \frac{\gamma E_0}{1 - \beta \cos(\eta)}$$

$$\cos(\eta) = \sin(\theta_p) \sin(\theta_\gamma) \cos(\phi_p - \phi_\gamma) + \cos(\theta_p) \cos(\theta_\gamma)$$

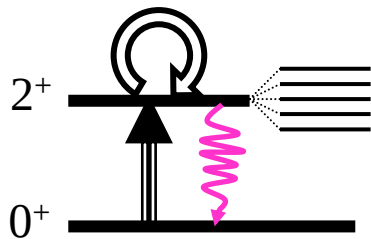


Przykład 1: Wzbudzenie kulombowskie ^{70}Se @ CERN / ISOLDE

- ^{104}Pd (^{70}Se , $^{70}\text{Se}^*$), $E_{\text{wiązki}} = 2.94 \text{ MeV/u}$.
- Prawdopodobieństwo wzbudzenia $P(2^+_1)$ w ^{70}Se wyznaczone poprzez normalizację do wzbudzenia jądra tarczy ^{104}Pd .

Prawdopodobieństwo wzbudzenia $P(2^+_1)$ w ^{70}Se zależy od:

- zredukowanego prawdopodobieństwa przejścia $B(E2) \sim M(E2)^2$
- elementu diagonalnego stanu $2^+_1 \sim Q_{sp}$

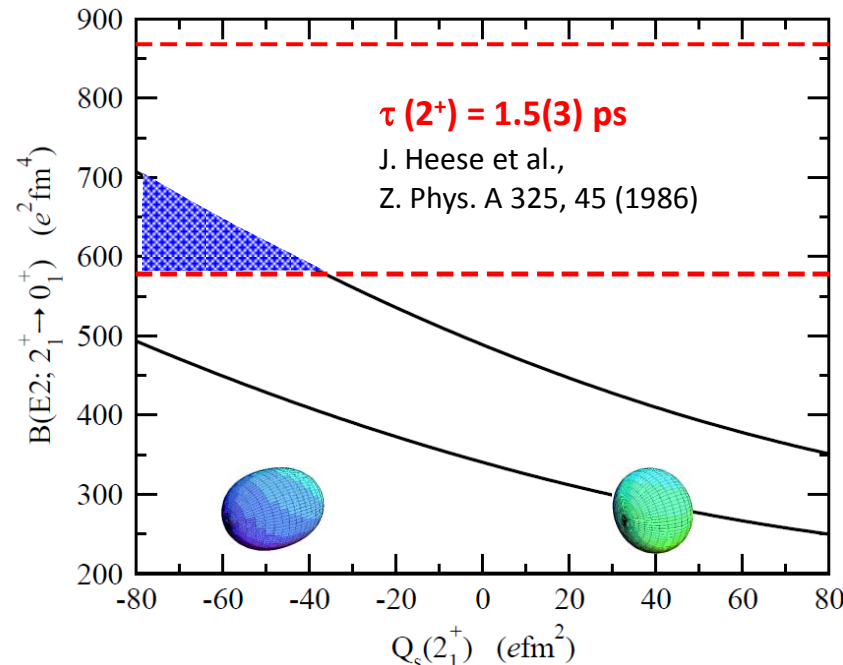
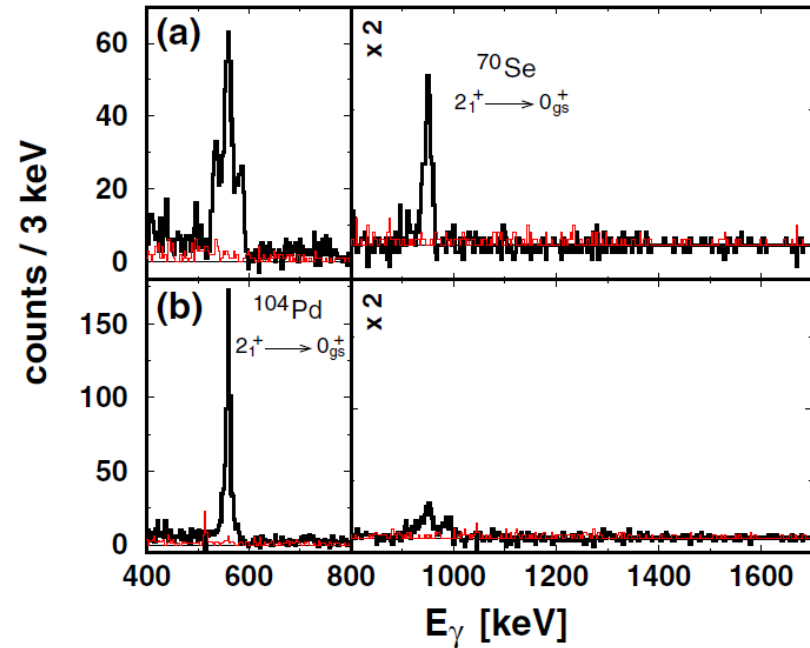


➤ jedna dana,
dwie niewiadome!

Mierzona intensywność przejścia γ $2^+_1 \rightarrow 0^+_1$ może być odtworzona dla różnych kombinacji

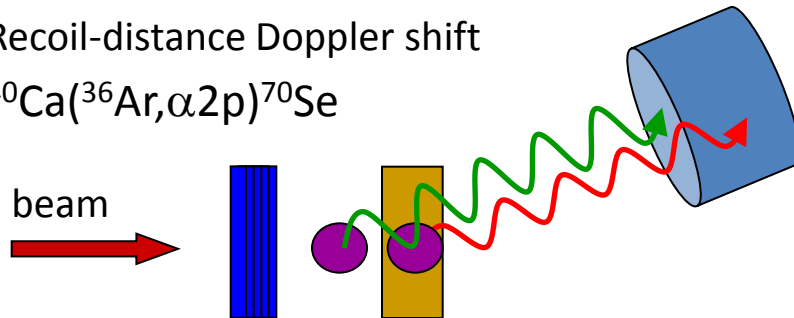
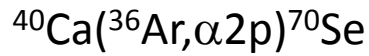
$$B(E2) \leftrightarrow Q_{sp}(2^+_1)$$

$$P(2^+_1) \sim B(E2) \cdot [1 + Q_{sp} \cdot f(\vartheta; E)]$$



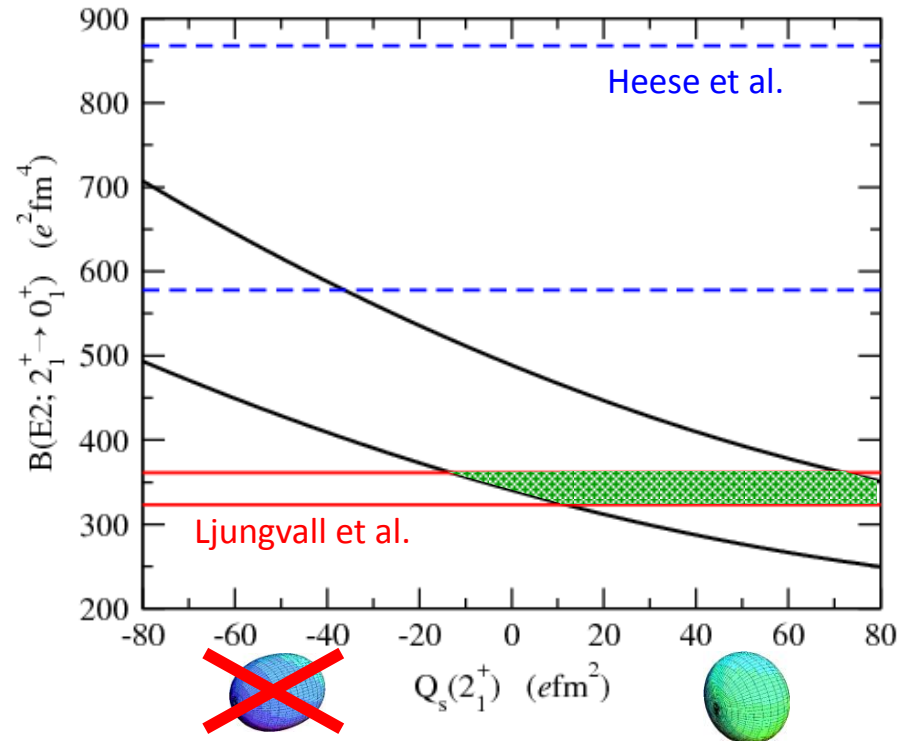
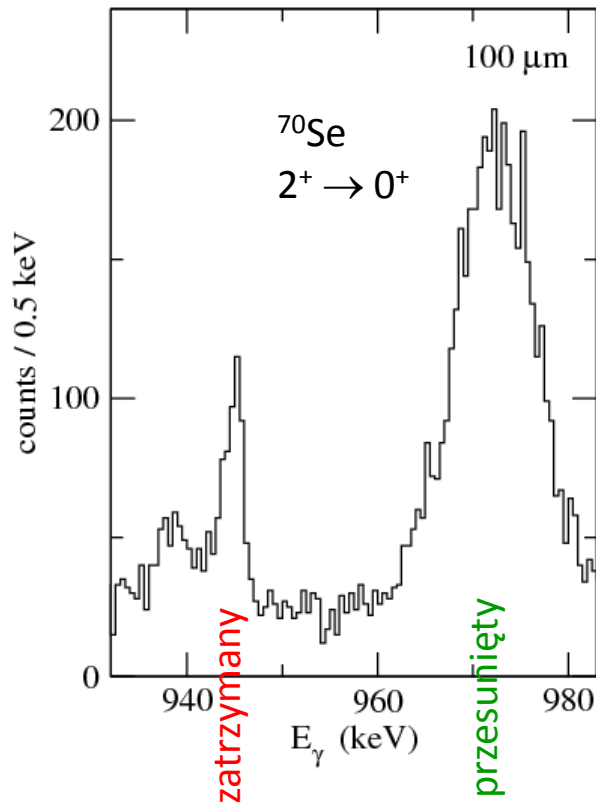
Pomiar czasów życia w ^{70}Se

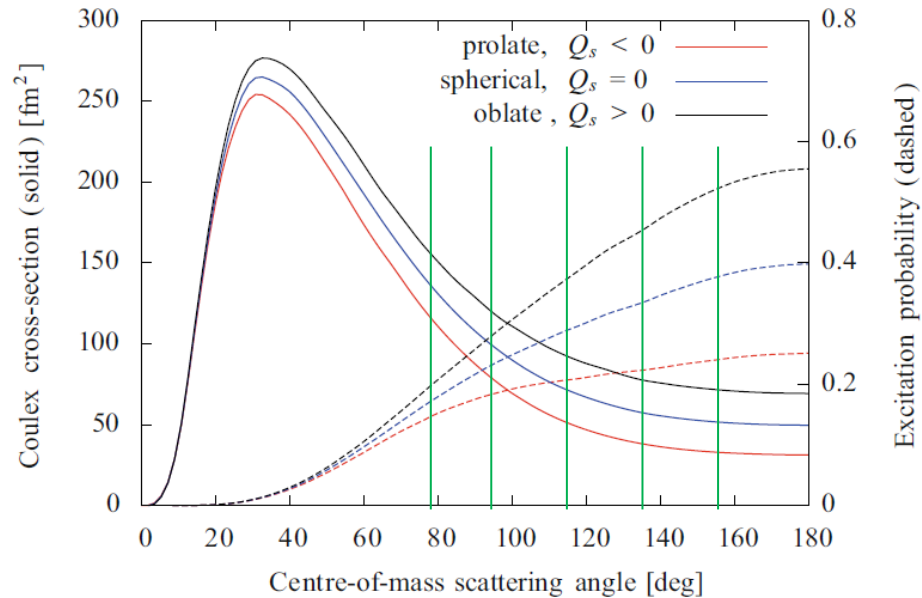
Recoil-distance Doppler shift



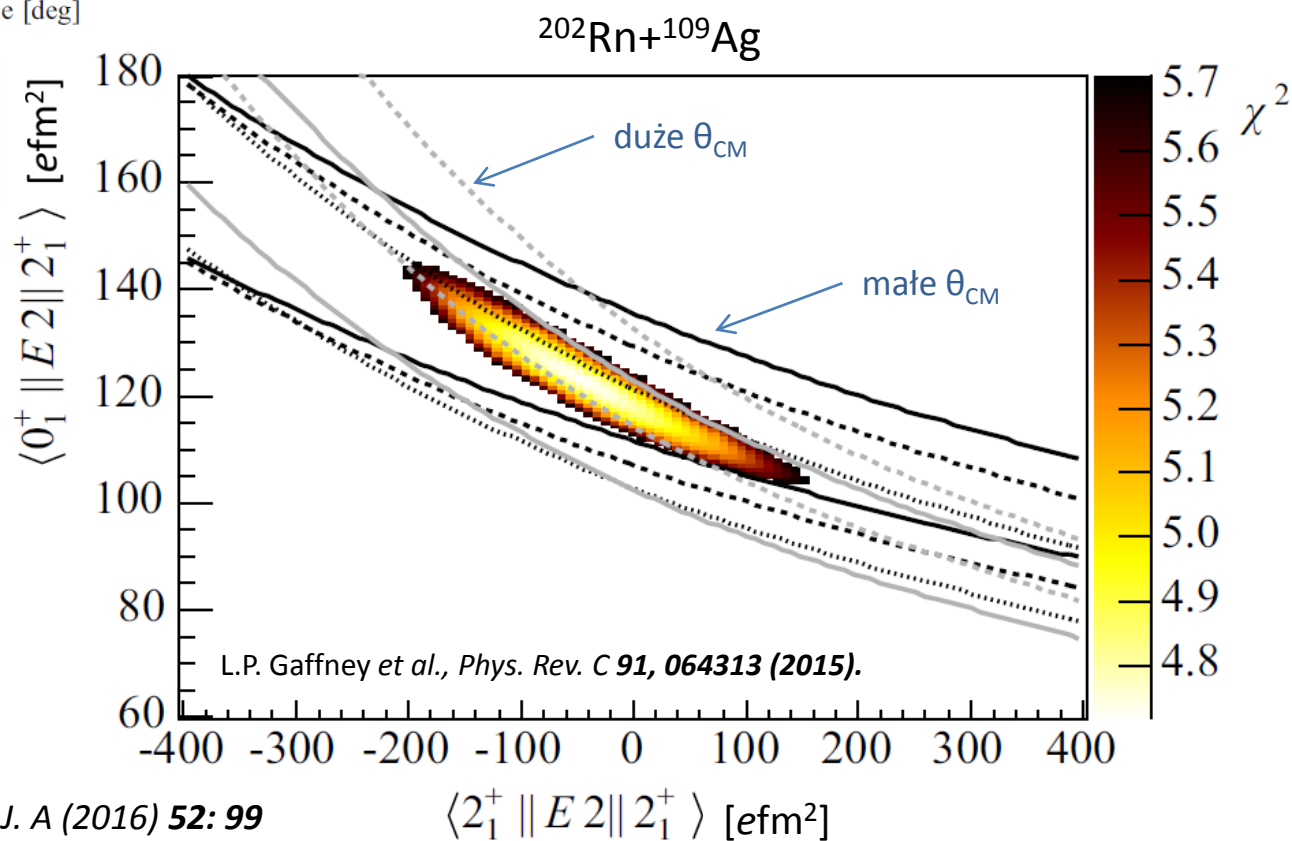
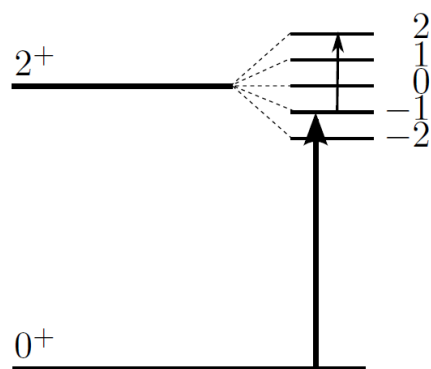
GASP and Köln Plunger at Legnaro

- **czas życia z 1986 roku: $\tau = 1.5(3)$ ps**
J. Heese et al., Z. Phys. A 325, 45 (1986)
- **nowy pomiar czasu życia stanu 2^+ w ^{70}Se : $\tau = 3.2(2)$ ps**
J. Ljungvall et al., Phys. Rev. Lett. 100, 102502 (2008)



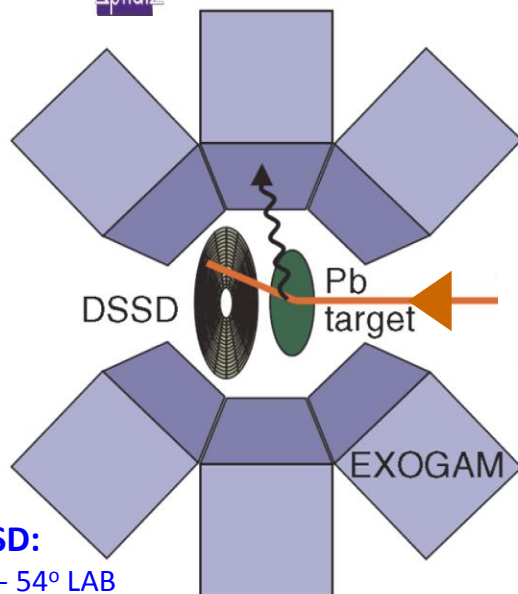


Wyznaczenie moment kwadrupolowego $Q_{sp}(2^+_1)$ niezależnie od czasu życia stanu $2^+_1 \rightarrow$ analiza danych w funkcji kąta rozproszenia cząstki



Przykład 2: Wzbudzenie kulombowskie $^{74,76}\text{Kr}$ @ GANIL

GANIL spiraliz



wiązki:

^{76}Kr 5×10^5 pps

^{74}Kr 10^4 pps

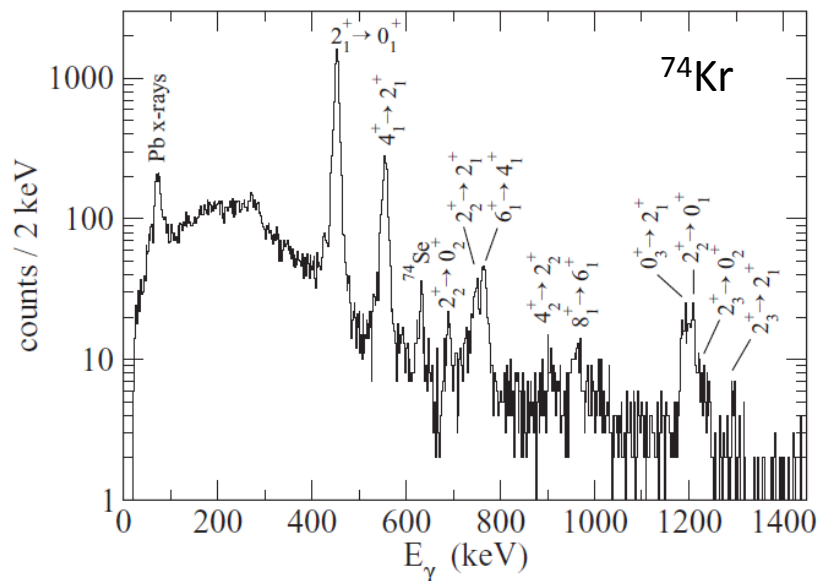
4.5 MeV/u

DSSD:

$24^\circ - 54^\circ$ LAB

$24^\circ - 145^\circ$ CM

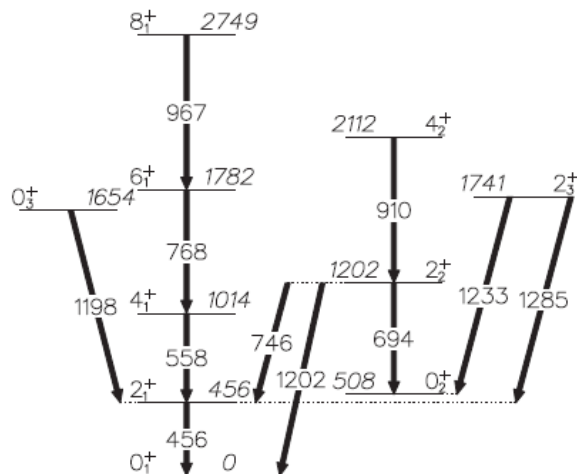
E. Clément et al., Phys. Rev. C 75, 054313 (2007)



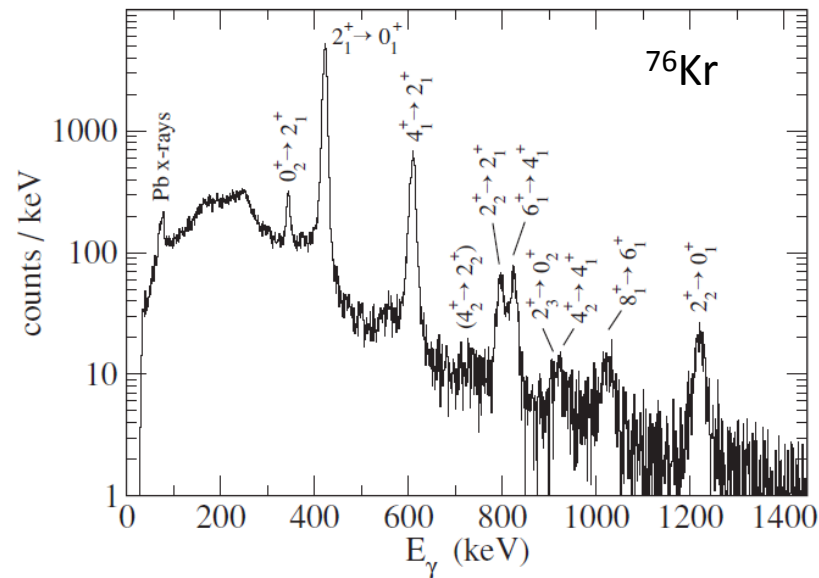
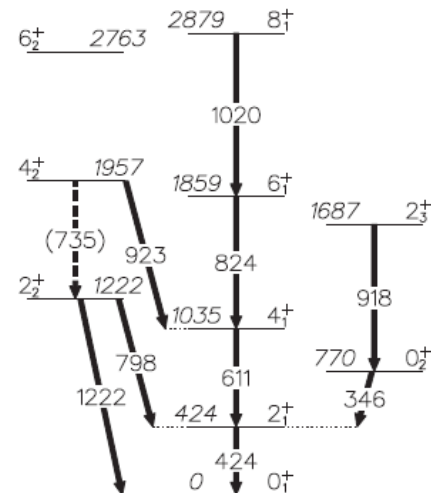
10_1^+ 3894

4068 10_1^+

^{74}Kr

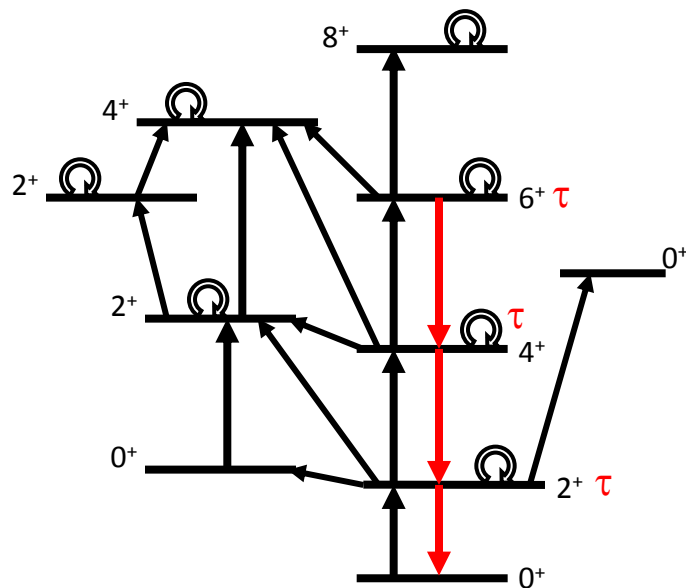
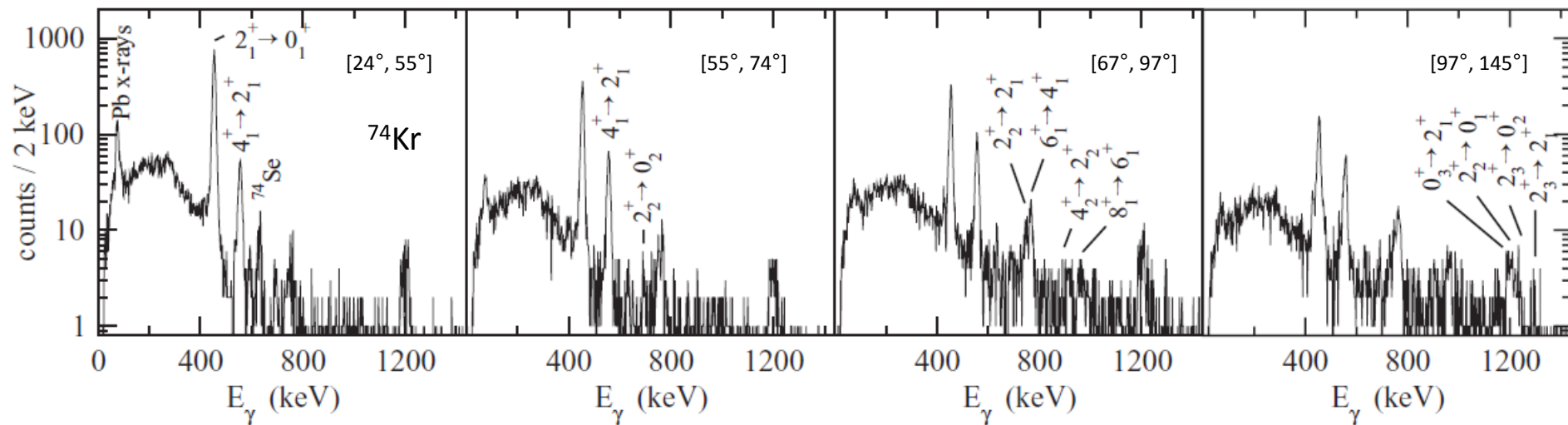


^{76}Kr



Promieniowania γ w funkcji kąta rozproszenia cząstki

E. Clément et al., Phys. Rev. C 75, 054313 (2007)



- $^{74}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ energia wiązki 4.7 MeV/u (SPIRAL)
 - ➔ wielostopniowe wzbudzenie kulombowskie
 - Promienowanie γ w funkcji kąta rozproszenia (➔ wyznaczanie różniczkowego przekroju czynnego na wzbudzenie danego stanu)
 - użyto znanych danych spektroskopowych (czasy życia, współczynniki rozgałęzień, współczynniki zmieszania E2/M1)
 - dopasowywano metodą minimalizacji funkcji χ^2
- 30 elementów macierzowych

Analiza danych

Wyniki z eksperymentów wzbudzeń kulombowskich
niezgodne z pomiarami czasów życia

[26] S. L. Tabor et al., *PRC* **41**, 2658 (1990)

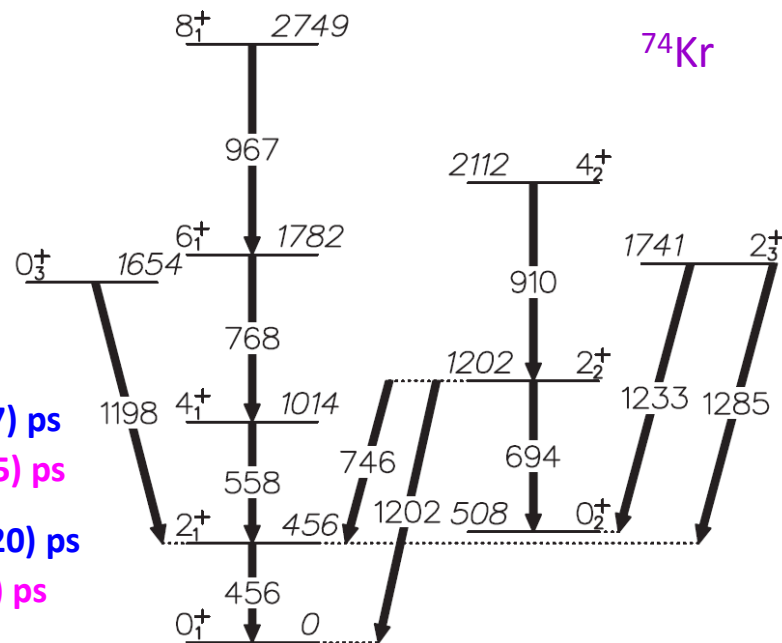
[27] J. Roth et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.* **10**, L25 (1984)

4_1^+ : 13.2(7) ps

CLX: 5.9 (5) ps

2_1^+ : 23.5(20) ps

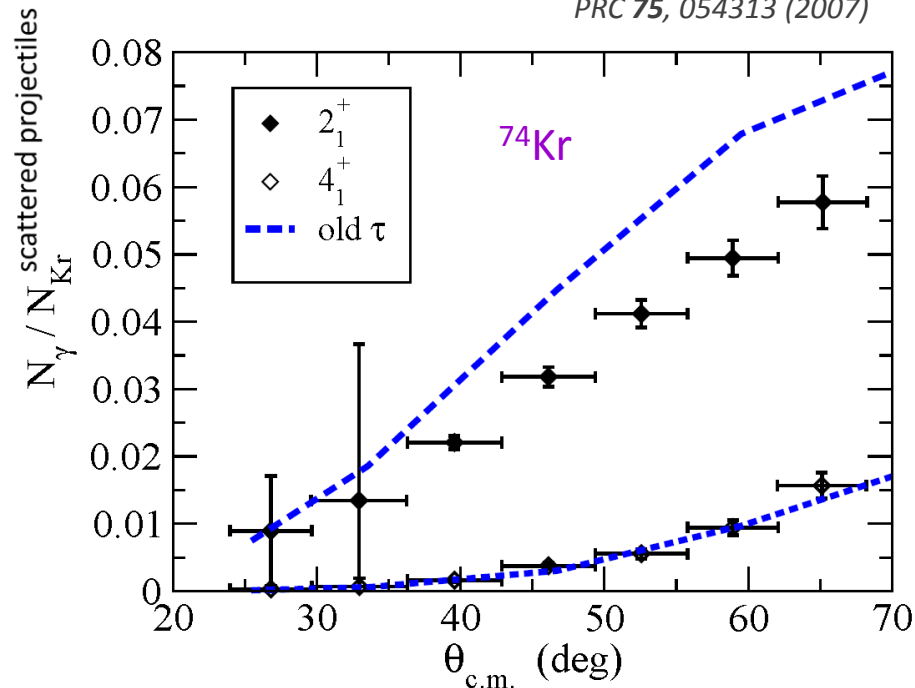
CLX: 30(2) ps



E. Clement et al.,
PRC **75**, 054313 (2007)

I^π	τ (ps)	Ref.	τ (ps) (GOSIA)
			Free
2_1^+	23.5(20)	[26]	29.6(2.1)
4_1^+	13.2(7)	[27]	5.9(5)

$$\tau \approx \frac{1}{P(T\lambda; I_i \rightarrow I_f)} \approx f(\lambda) \cdot \left(\frac{\hbar c}{E_\gamma} \right)^{2\lambda+1} \cdot \frac{1}{B(T\lambda; I_i \rightarrow I_f)}$$



Analiza danych

Wyniki z eksperymentów wzbudzeń kulombowskich
niezgodne z pomiarami czasów życia

[26] S. L. Tabor et al., *PRC* **41**, 2658 (1990)

[27] J. Roth et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.* **10**, L25 (1984)

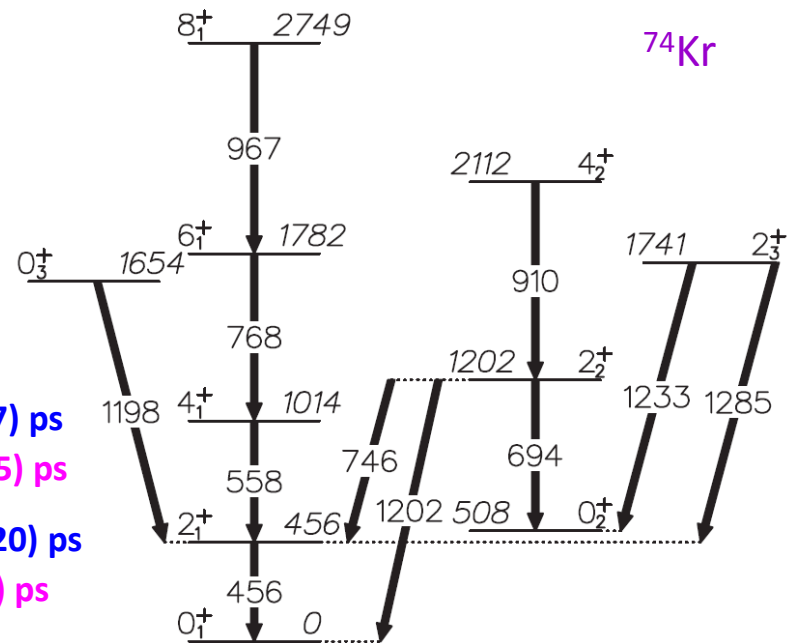
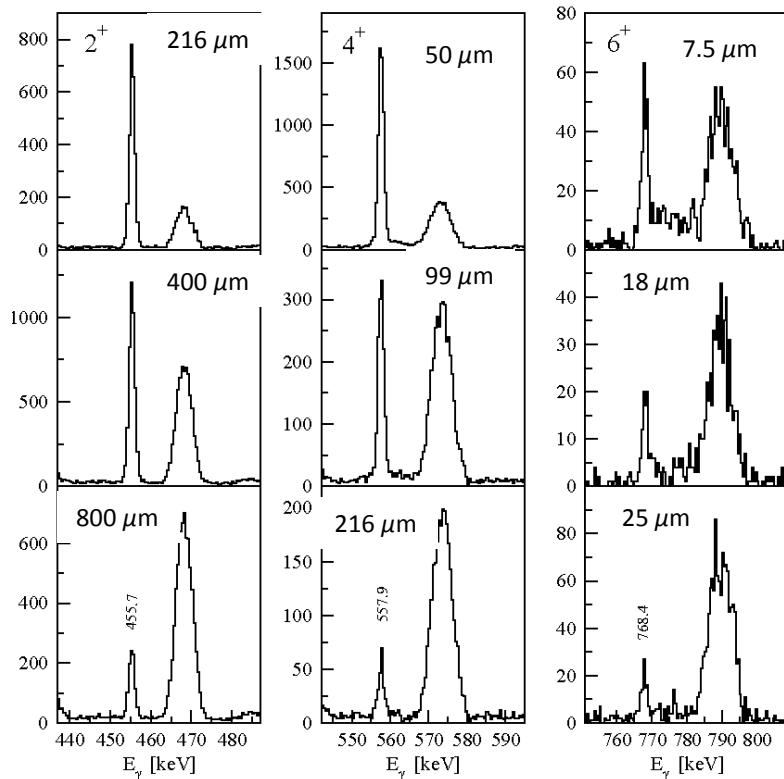
Nowy pomiar czasów życia (RDM):

Köln Plunger & GASP

^{40}Ca ($^{40}\text{Ca}, \alpha 2p$) ^{74}Kr

^{40}Ca ($^{40}\text{Ca}, 4p$) ^{76}Kr

A. Goergen et al., *EPJ A* **26**, 153 (2005)



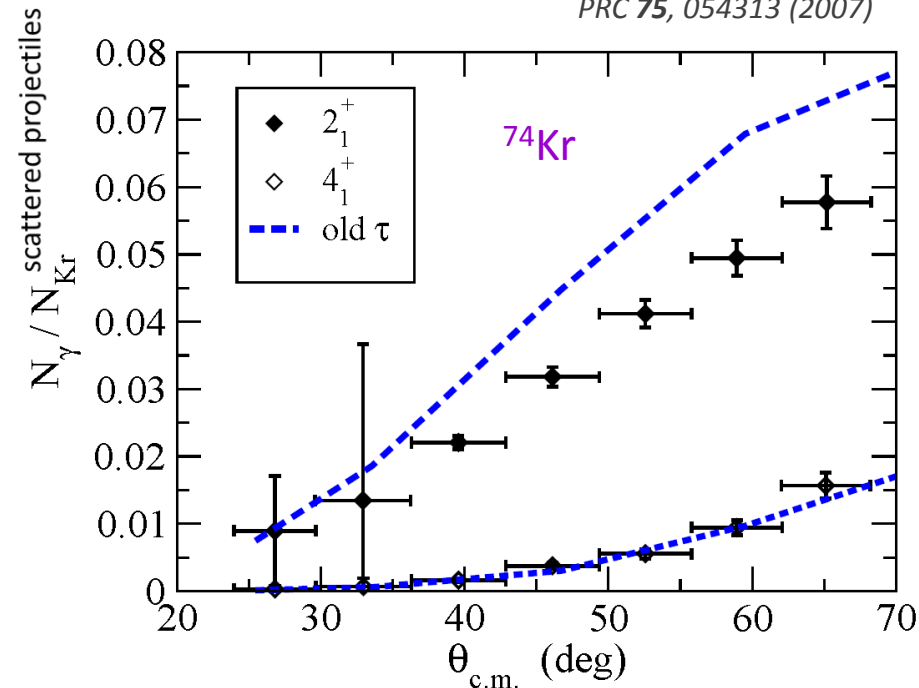
4^+_{11} : 13.2(7) ps

CLX: 5.9 (5) ps

2^+_{11} : 23.5(20) ps

CLX: 30(2) ps

E. Clement et al.,
PRC **75**, 054313 (2007)



Analiza danych

Wyniki z eksperymentów wzbudzeń kulombowskich
niezgodne z pomiarami czasów życia

[26] S. L. Tabor et al., *PRC* **41**, 2658 (1990)

[27] J. Roth et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.* **10**, L25 (1984)

Nowy pomiar czasów życia (RDM):

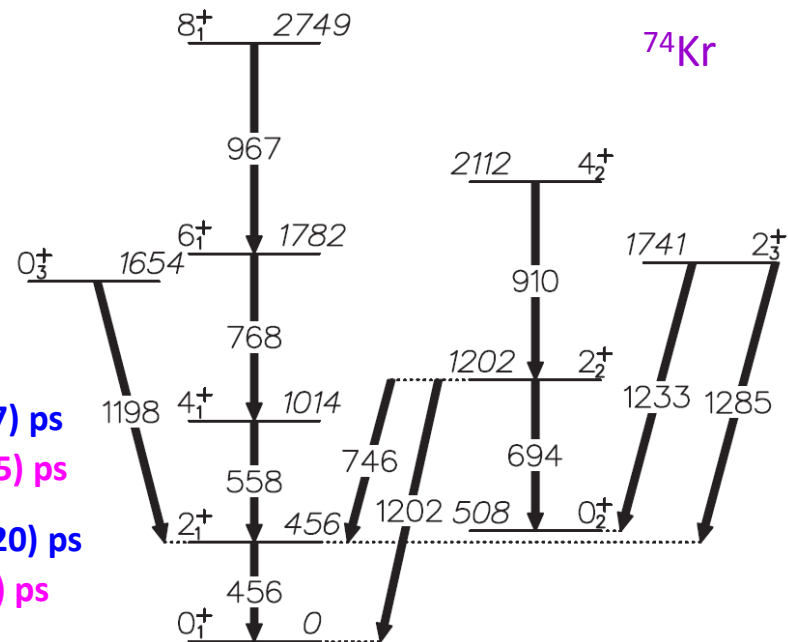
Köln Plunger & GASP

^{40}Ca ($^{40}\text{Ca}, \alpha 2p$) ^{74}Kr

^{40}Ca ($^{40}\text{Ca}, 4p$) ^{76}Kr

A. Goergen et al., *EPL A* **26**, 153 (2005)

I^π	τ (ps)	Ref.	τ (ps) [20]	τ (ps) (GOSIA)	
				Free	Constr.
2_1^+	23.5(20)	[26]	33.8(6)	29.6(2.1)	33.8(6)
4_1^+	13.2(7)	[27]	5.2(2)	5.9(5)	5.3(2)



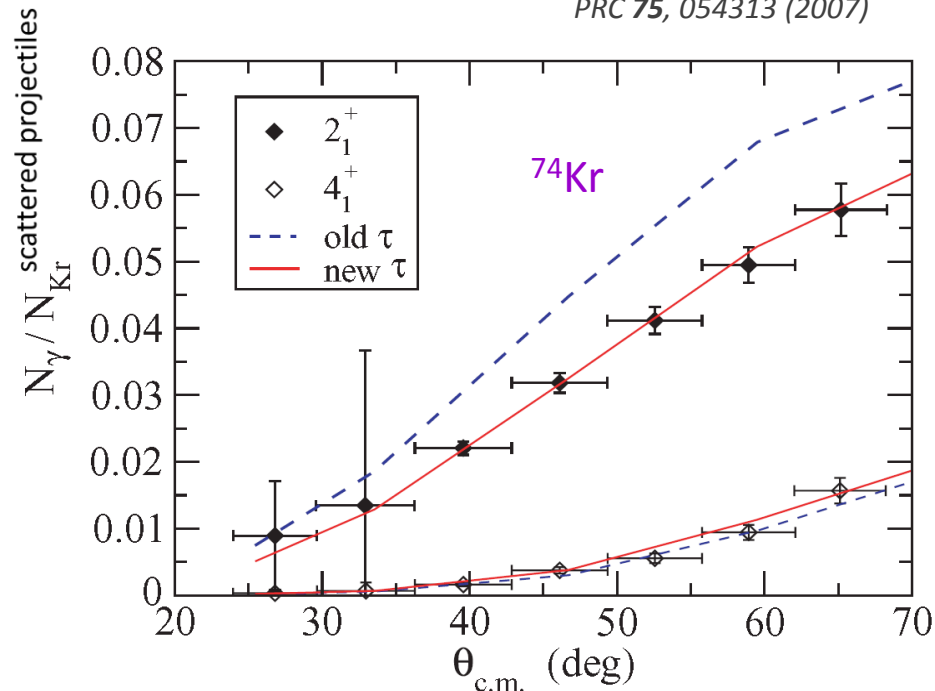
4_1^+ : 13.2(7) ps

CLX: 5.9 (5) ps

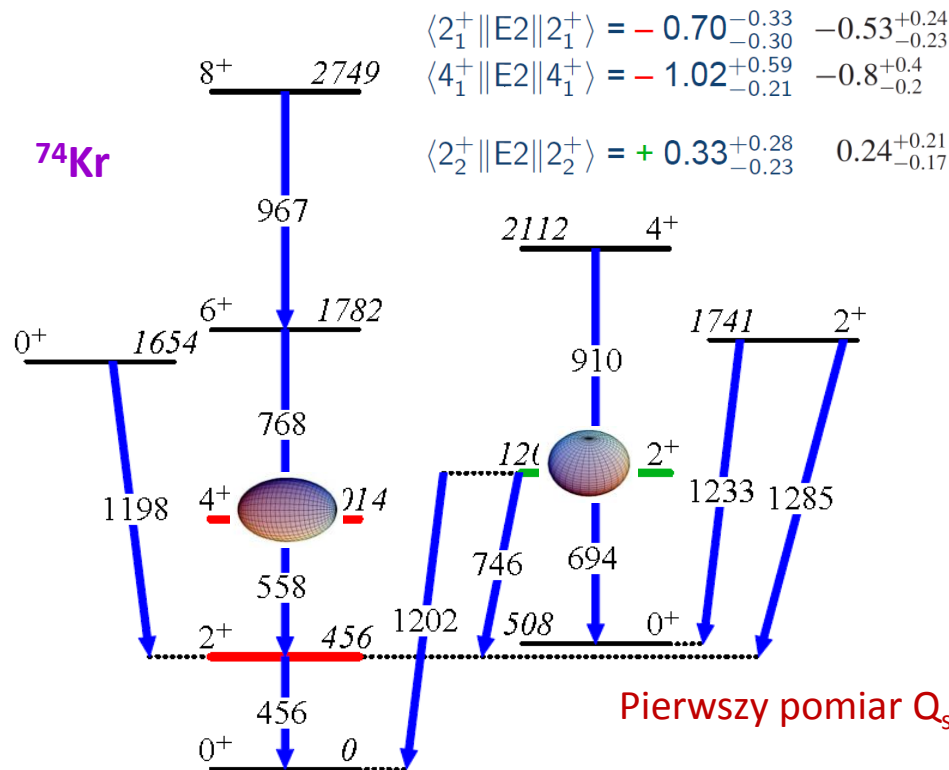
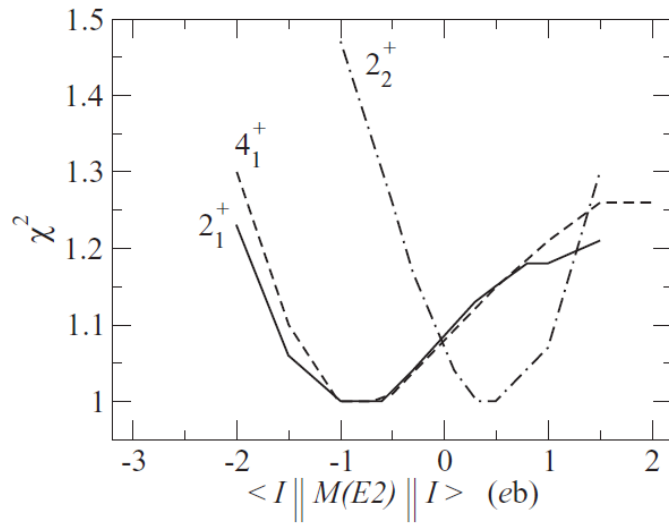
2_1^+ : 23.5(20) ps

CLX: 30(2) ps

E. Clement et al.,
PRC **75**, 054313 (2007)

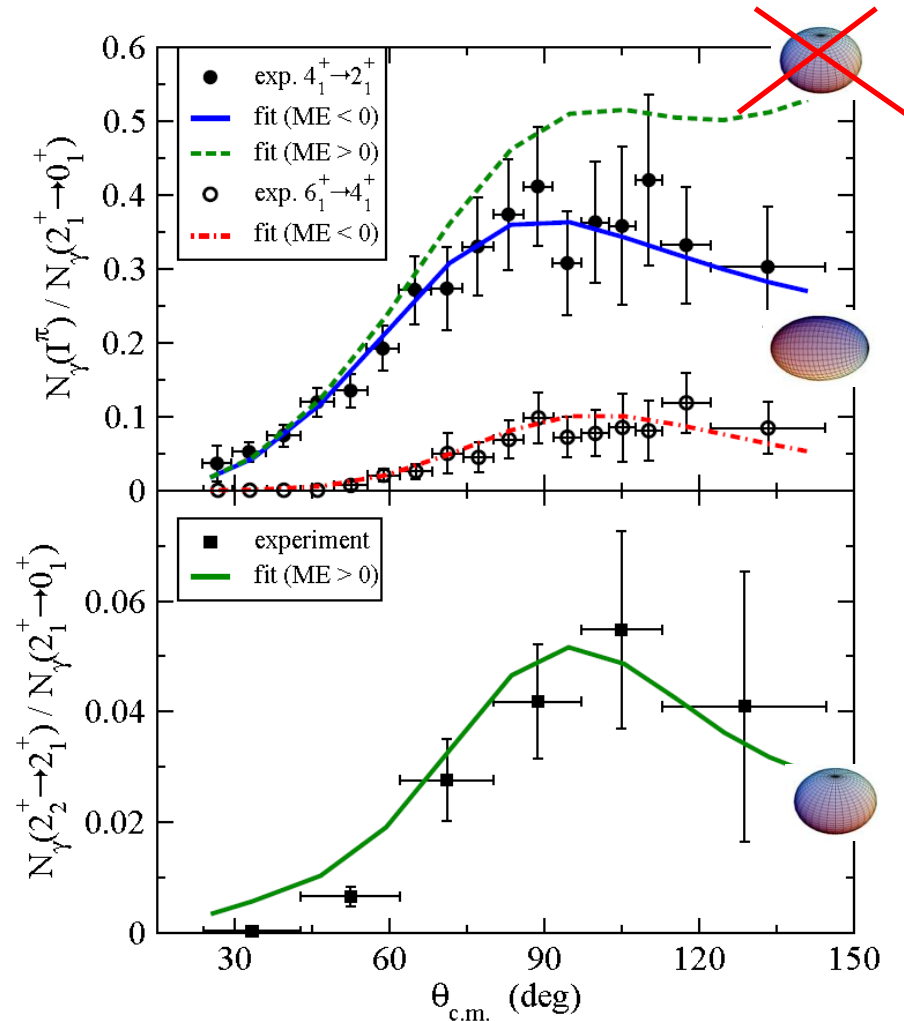


Wyniki: koegzystencja kształtu w jądrach $^{74,76}\text{Kr}$



^{76}Kr : 18 przejściowych + 5 diagonalnych ME

^{78}Kr : 14 przejściowych + 5 diagonalnych ME



Pierwszy pomiar Q_{sp} stanów wzbudzonych z wiązkami egzotycznymi !!

found in Table [XI](#). The inconsistency with the previously reported lifetimes illustrates a general difficulty that can arise in Coulomb excitation experiments with weak radioactive beams of rare isotopes, where the statistics is too limited to determine all parameters in the Coulomb excitation analysis alone, and where at the same time the access to spectroscopic information with complementary methods is difficult.

E. Clement et al., PRC 75, 054313 (2007)

Wzbudzenie kulombowskie ^{140}Sm

http://www.phynu.cea.fr/science_en_ligne/carte_potentiels_microscopiques/carte_potentiel_nucleaire_eng.htm

$N \sim 78$ and $Z > 62$:

Rejon występowania **zjawiska koegzystencji** kształtu oraz nagłych zmian deformacji stanu podstawowego

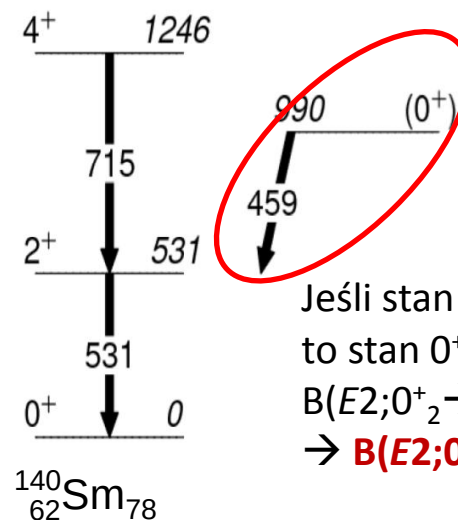
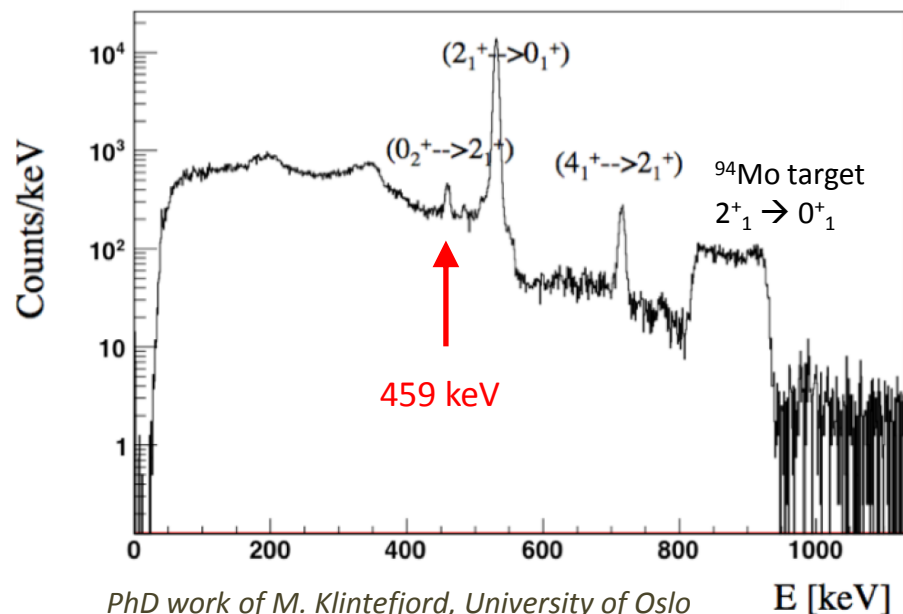
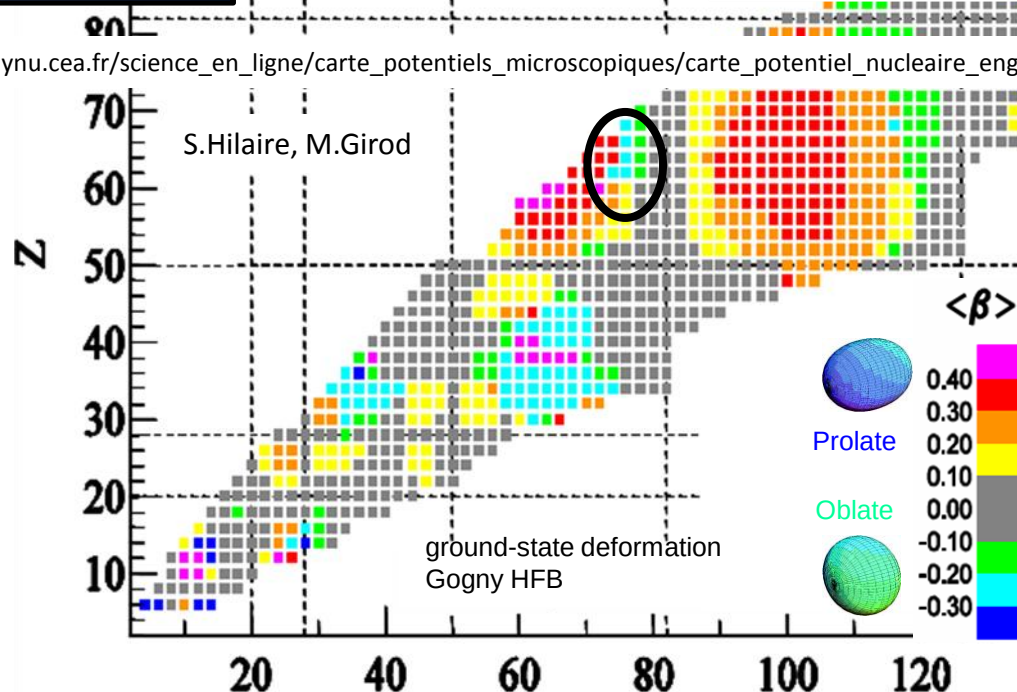
- zaobserwowano przejście γ o **energii**

459 keV $(0_2^+) \rightarrow 2_1^+$

- spin i parzystość stanu o energii 991 keV

→ nisko-leżący stan (0^+) state ?

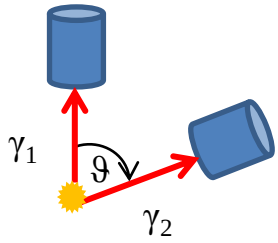
→ koegzystencja kształtu w ^{140}Sm ?



Jeśli stan o energii 991 keV to stan 0^+ wówczas:

$$B(E2; 0_2^+ \rightarrow 2_1^+) = 1.02(15) e^2 b^2$$

$$\rightarrow B(E2; 0_2^+ \rightarrow 2_1^+) = 236 \text{ W.u. !!!}$$

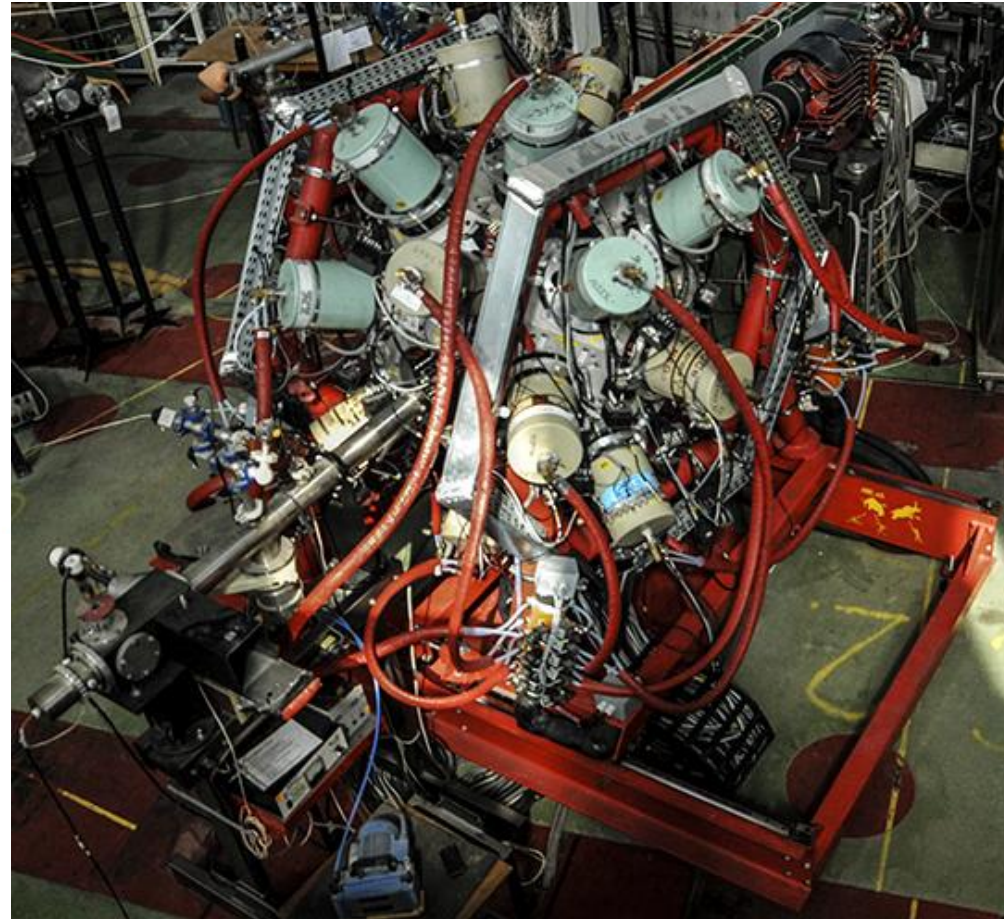


- β/EC decay of $^{140}\text{Gd} \rightarrow ^{140}\text{Eu} \rightarrow ^{140}\text{Sm}$

- $^{112}\text{Cd}(^{32}\text{S}, \text{p}3\text{n})^{140}\text{Eu}$
 $^{112}\text{Cd}(^{32}\text{S}, 4\text{n})^{140}\text{Gd}$

Energia wiązki: 155 MeV

- HPGe θ : 42°, 70°, 109°, 138°, 180°



▪ β/EC decay of $^{140}\text{Gd} \rightarrow ^{140}\text{Eu} \rightarrow ^{140}\text{Sm}$

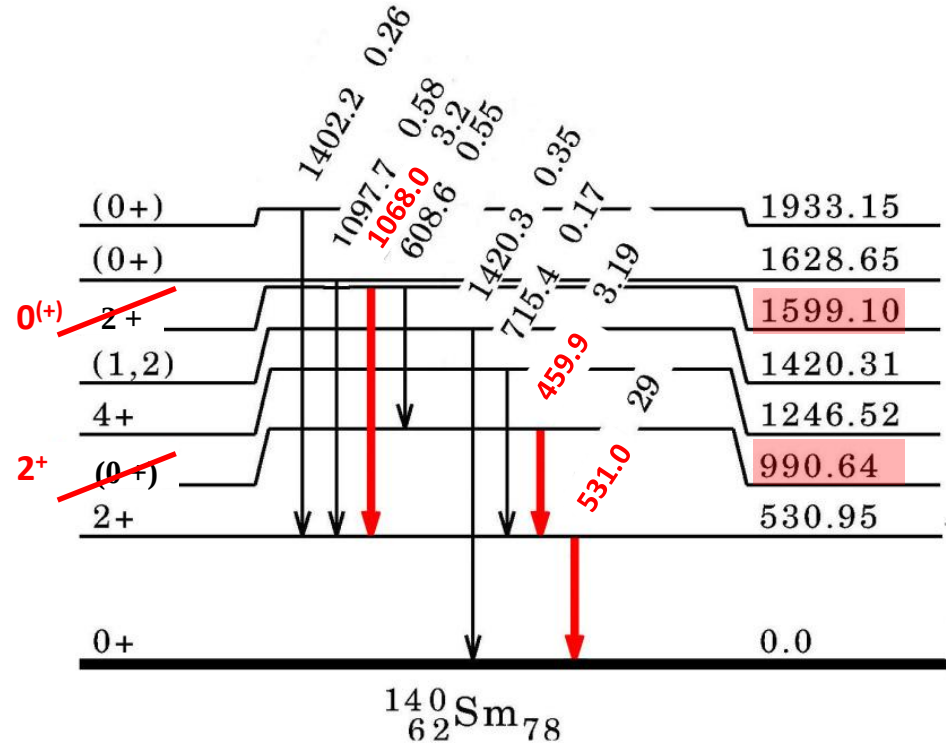
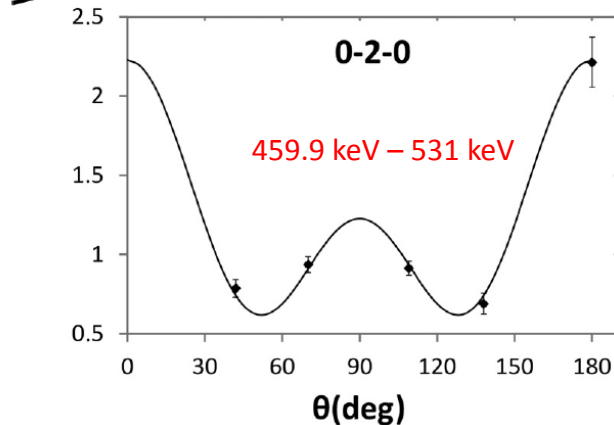
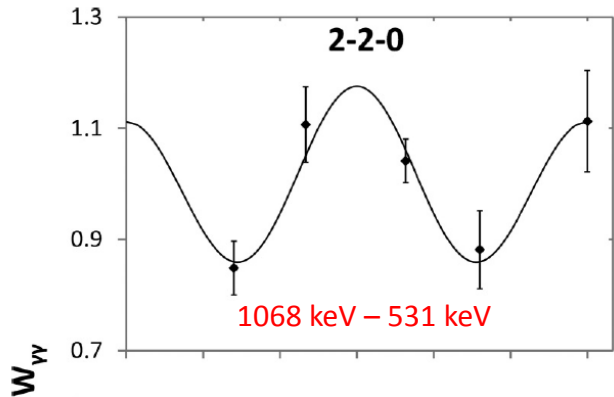
Poprzednie pomiary: R.B. Firestone et. al. PRC 43, 1066 (1991)

▪ $^{112}\text{Cd}(^{32}\text{S}, \text{p}3\text{n})^{140}\text{Eu}$
 $^{112}\text{Cd}(^{32}\text{S}, 4\text{n})^{140}\text{Gd}$

Energia wiązki: 155 MeV

▪ HPGe θ : $42^\circ, 70^\circ, 109^\circ, 138^\circ, 180^\circ$

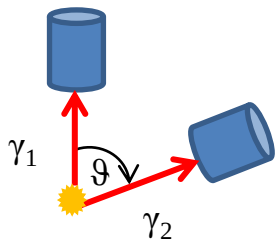
$$W_{\gamma\gamma} = 1 + A_{22}P_2(\cos\theta) + A_{44}P_4(\cos\theta)$$



- stan 2^+ o energii 991 keV; czyste przejście $E2$ $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$
- stan $0^{(+)}$ o energii 1599 keV

$$^{140}\text{Sm}: B(E2; 2^+_2 \rightarrow 2^+_1) = 0.35(5) e^2b^2 \rightarrow 82 \text{ W.u.}$$

$$\text{RDDS@HIL}: B(E2; 2^+_1 \rightarrow 0^+_1) = 51(4) \text{ W.u.} \rightarrow \tau(2^+_1) = 9.1(6) \text{ ps}$$



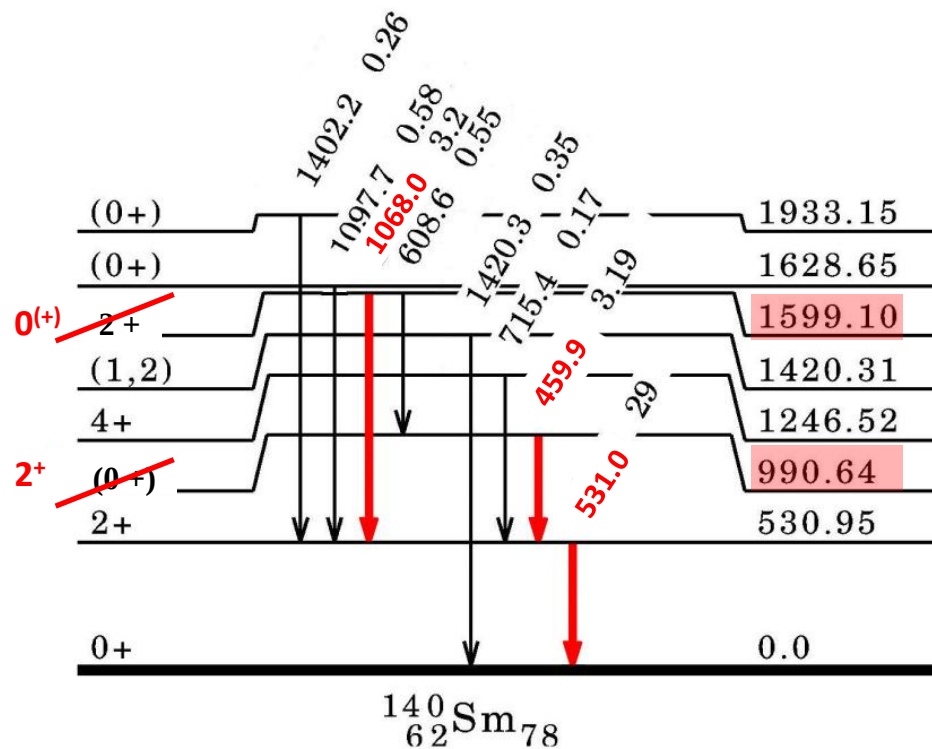
▪ β/EC decay of $^{140}\text{Gd} \rightarrow ^{140}\text{Eu} \rightarrow ^{140}\text{Sm}$

▪ $^{112}\text{Cd}(^{32}\text{S}, \text{p}3\text{n})^{140}\text{Eu}$

$^{112}\text{Cd}(^{32}\text{S}, 4\text{n})^{140}\text{Gd}$

Energia wiązki: 155 MeV

▪ HPGe θ : 42°, 70°, 109°, 138°, 180°



data. The results indicate that ^{140}Sm shows considerable γ softness, but in contrast to earlier speculation no signs of shape coexistence at low excitation energy. This work sheds more light on the onset of deformation and collectivity in this mass region.

M. Klintefjord et al., PRC 93, 054303 (2016)