

*Piotr Bednarczyk*

Instytut Fizyki Jądrowej  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
Polskiej Akademii Nauk



**Badania eksperymentalne kolektywnej  
struktury nuklidów z pobliza jąder  
magicznych -  $^{40}\text{Ca}$  i  $^{56}\text{Ni}$ ,  
przy wysokim spinie**

IFJ PAN, Zakład Spektroskopii Jądra Atomowego,  
Spektroskopia Wysokospinowa i Rozwój Aparatury:

P. Bednarczyk, M. Ciemata\*, A. Czermak, B. Dulny, B. Fornal,  
J. Grębosz, M. Kmiecik, M. Krzysiek\*, A. Maj, M. Matejska-  
Minda\*, K. Mazurek, W. Męczyński, B. Sowicki, J. Styczeń,  
M. Ziębliński

\*student PhD

Współpraca z laboratoriami akceleratorowymi:

IPHC-IRES, Strasbourg, Fr

LNL-INFN, Legnaro, It

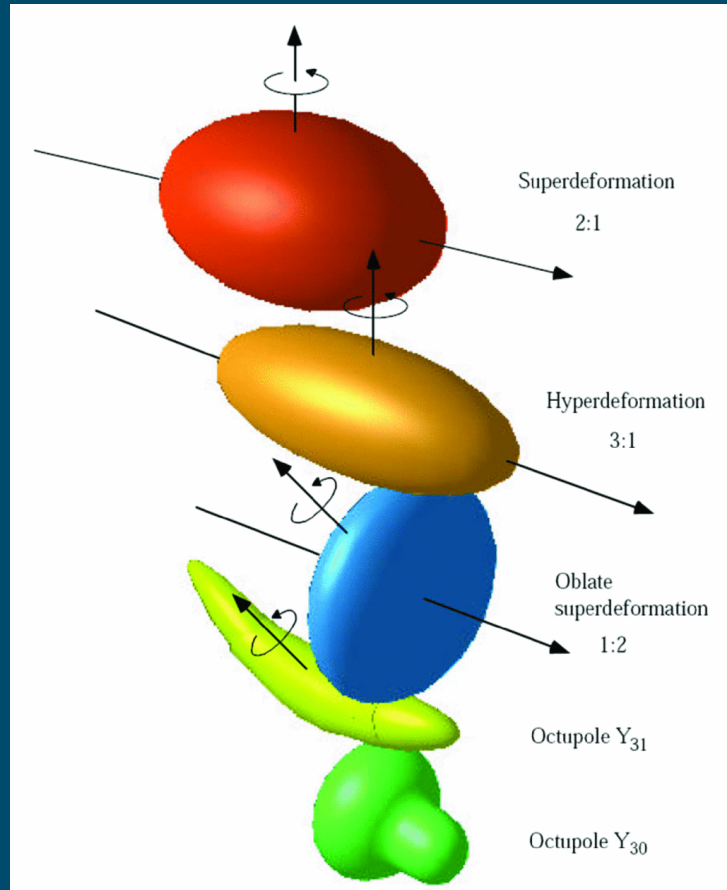
GANIL, Caen, Fr

ŚLCJ, Warszawa

# Program

- Wprowadzenie:
  - deformacja jądrowa na przykładzie pasm superzdeformowanych
  - rotacja a koherentny ruch jednocząstkowy
  - zakończenie pasm rotacyjnych
- Wielodetektorowe spektrometry gamma, przełom w badaniach struktury jądra
- Rola detektorów pomocniczych
  - krakowski Detektor Jąder Odrzutu (RFD)
- Wysokospinowa spektroskopia  $\gamma$  izobarów  $A=45$  (Sc, Ti, V),
  - Znaczenie wyników dla rozwoju metod średniego pola
- Identyfikacja silnej deformacji w obszarze jąder trójosiowych  $A\sim 70$
- Perspektywy pomiarów koincydencyjnych  $\gamma$ -jądro odrzutu na wiązkach stabilnych i radioaktywnych

# Kształty jąder atomowych



Deformacja kwadrupolowa:

$$r \sim (1 + \beta_2 Y_{20}(\theta, \varphi))$$

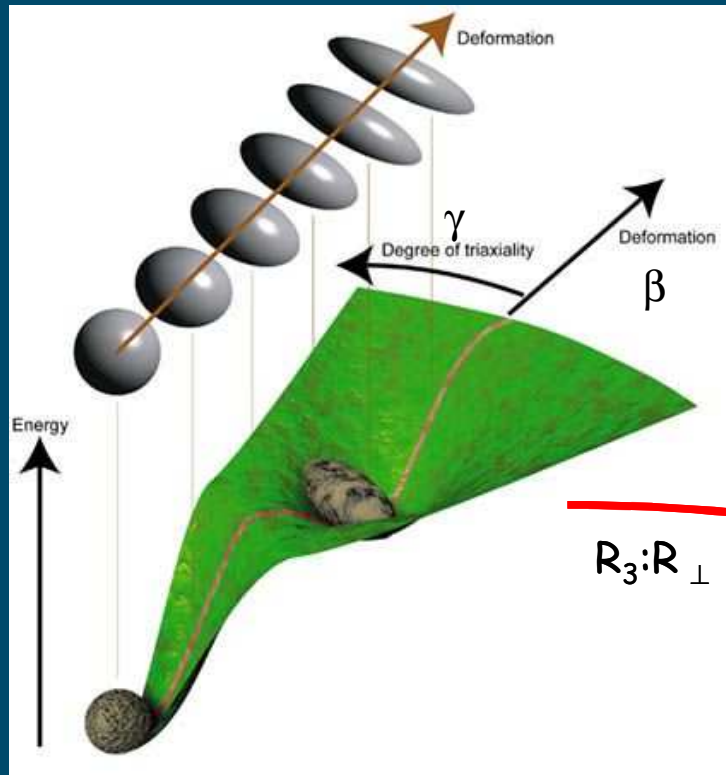
$$\beta_2 \sim \frac{\Delta R}{R}$$

Moment elektryczny kwadrupolowy:

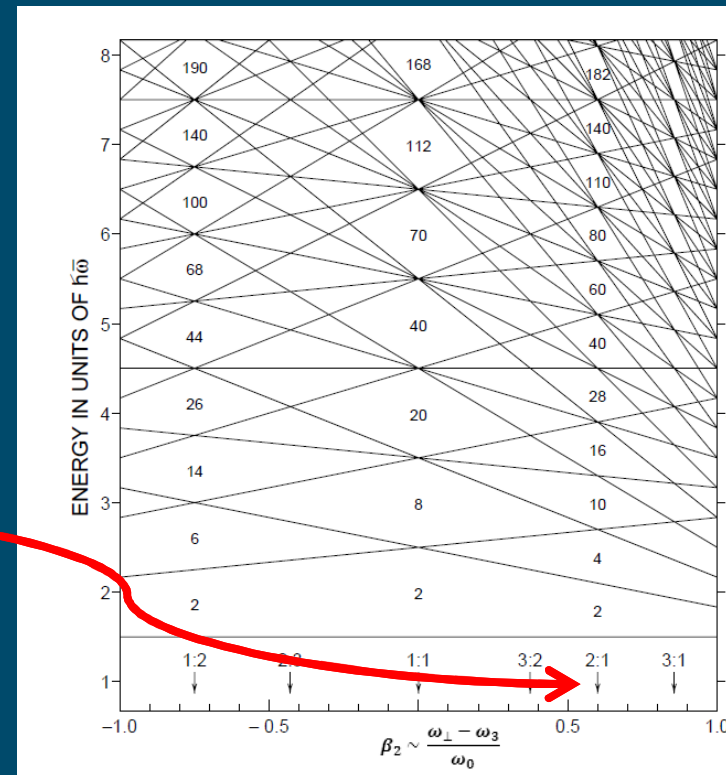
$$eQ_0 \cong \frac{3}{\sqrt{5\pi}} ZeR_0^2 \beta_2 (1 + 0.36\beta_2)$$

# Stabilizacja kształtu poprzez efekty powłokowe

$$V_{MHO}(r) = \frac{1}{2} M \omega^2 r^2$$

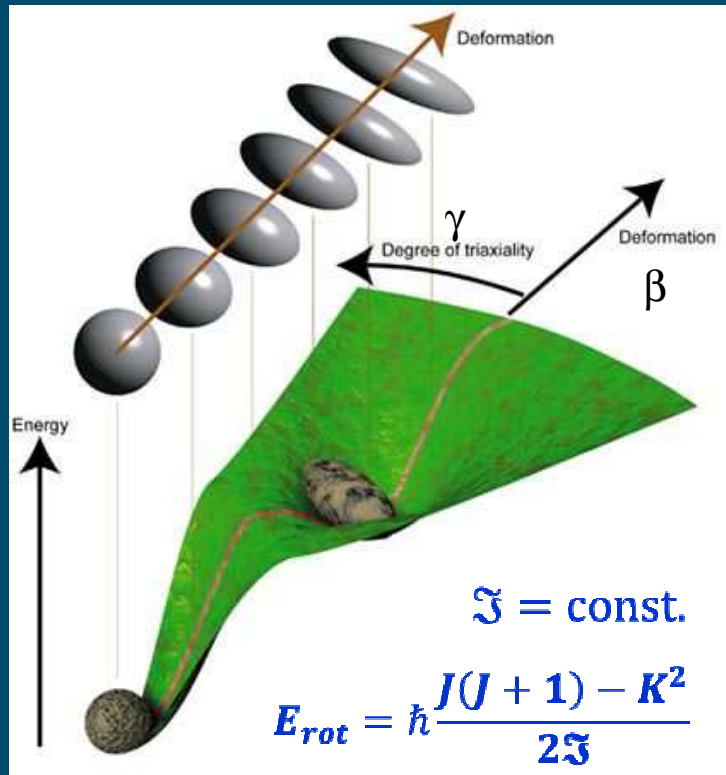


Stan metastabilny (izomer kształtu)



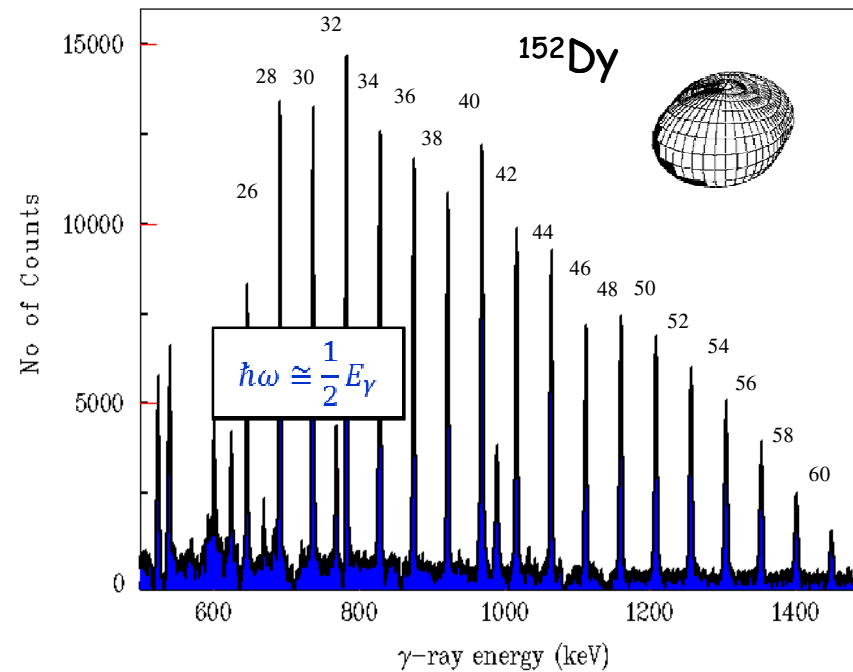
Cząstka w polu o osiowej deformacji

# Widmo emisyjne idealnego rotora (superdeformacja)



Pasmo SD

P.Twin et al., 1986

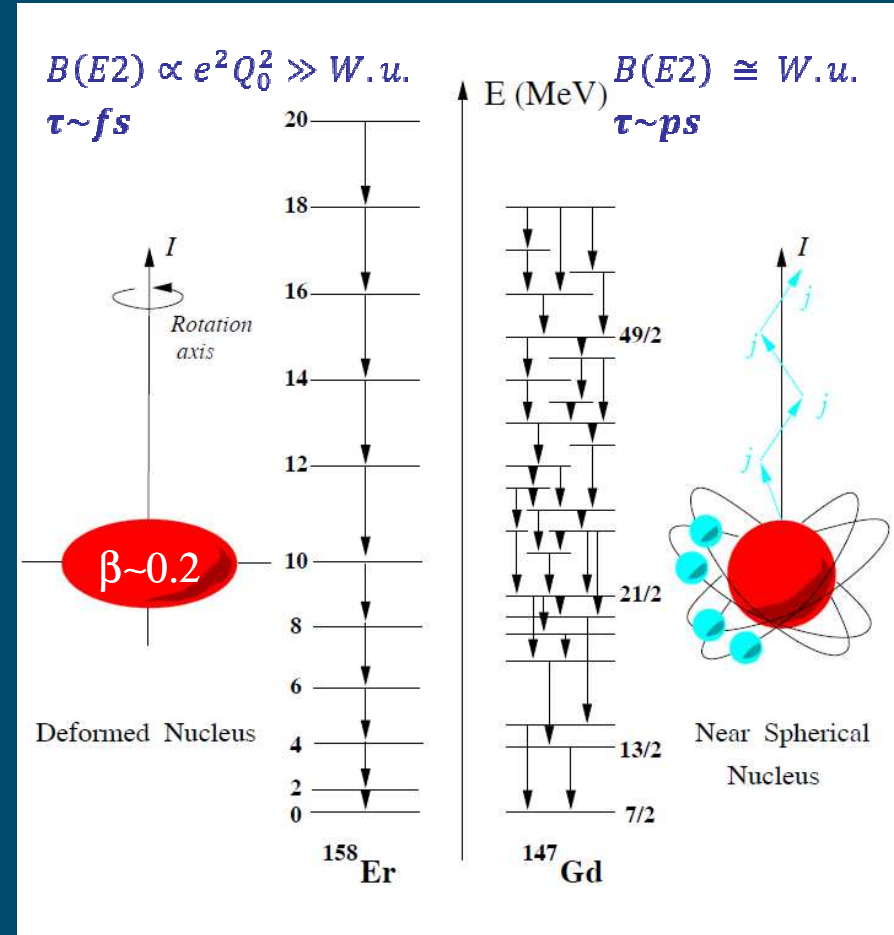


# Rotacja czy koherentny ruch nukleonów ?

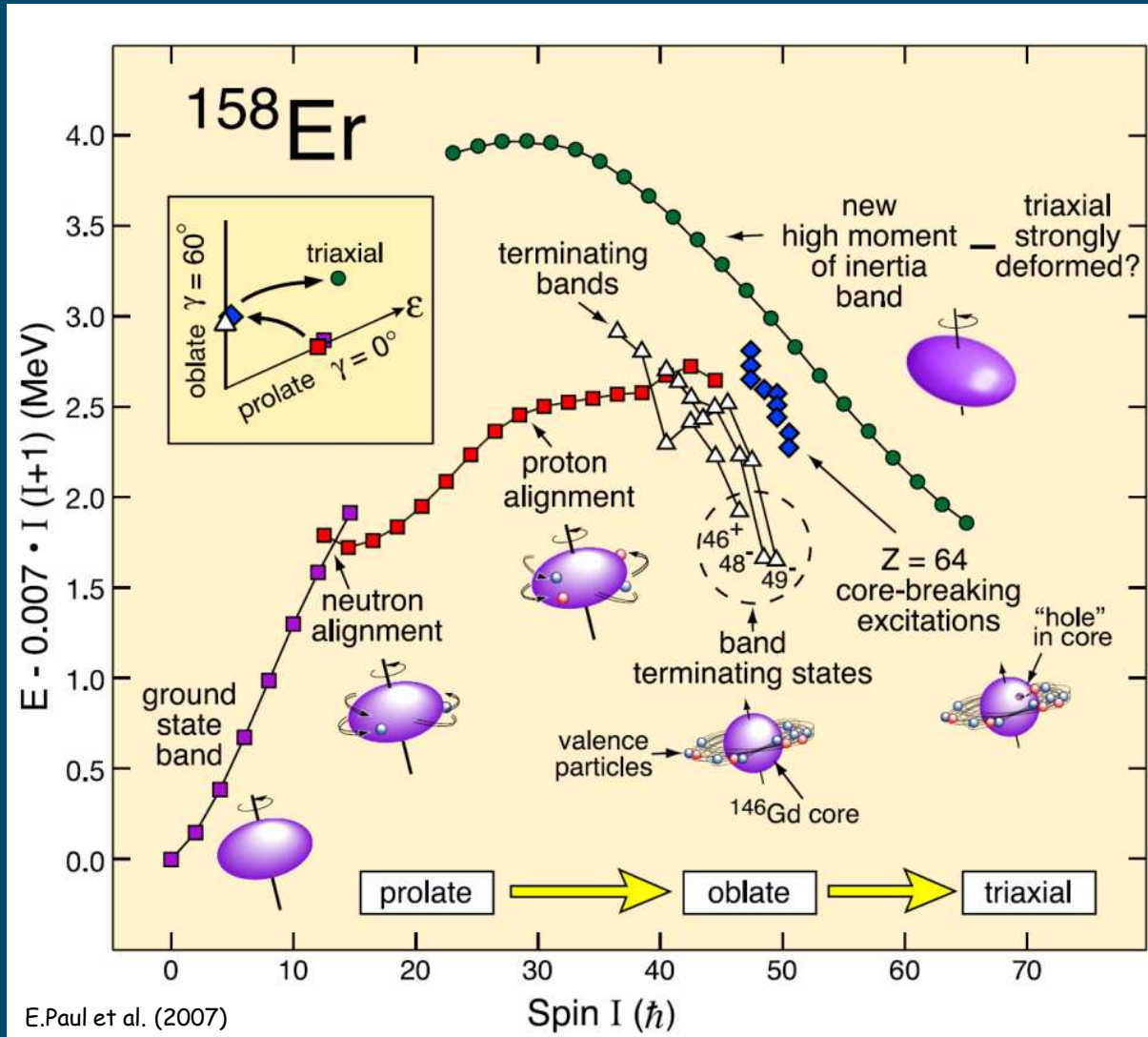
$$B(E2) \propto \frac{1}{E_\gamma^5 \tau}$$

wysycenie rotacji ( $^{158}\text{Er}$ :  $\sim 50\hbar$  )-

Specyficzna własność jądra atomowego



# Przywrócenie kolektywności przy najwyższych spinach





# Obszary jąder zdeformowanych

*Experimental Chart of Nuclides 2000*  
*Number of Rotational Bands (Audi 1995)*

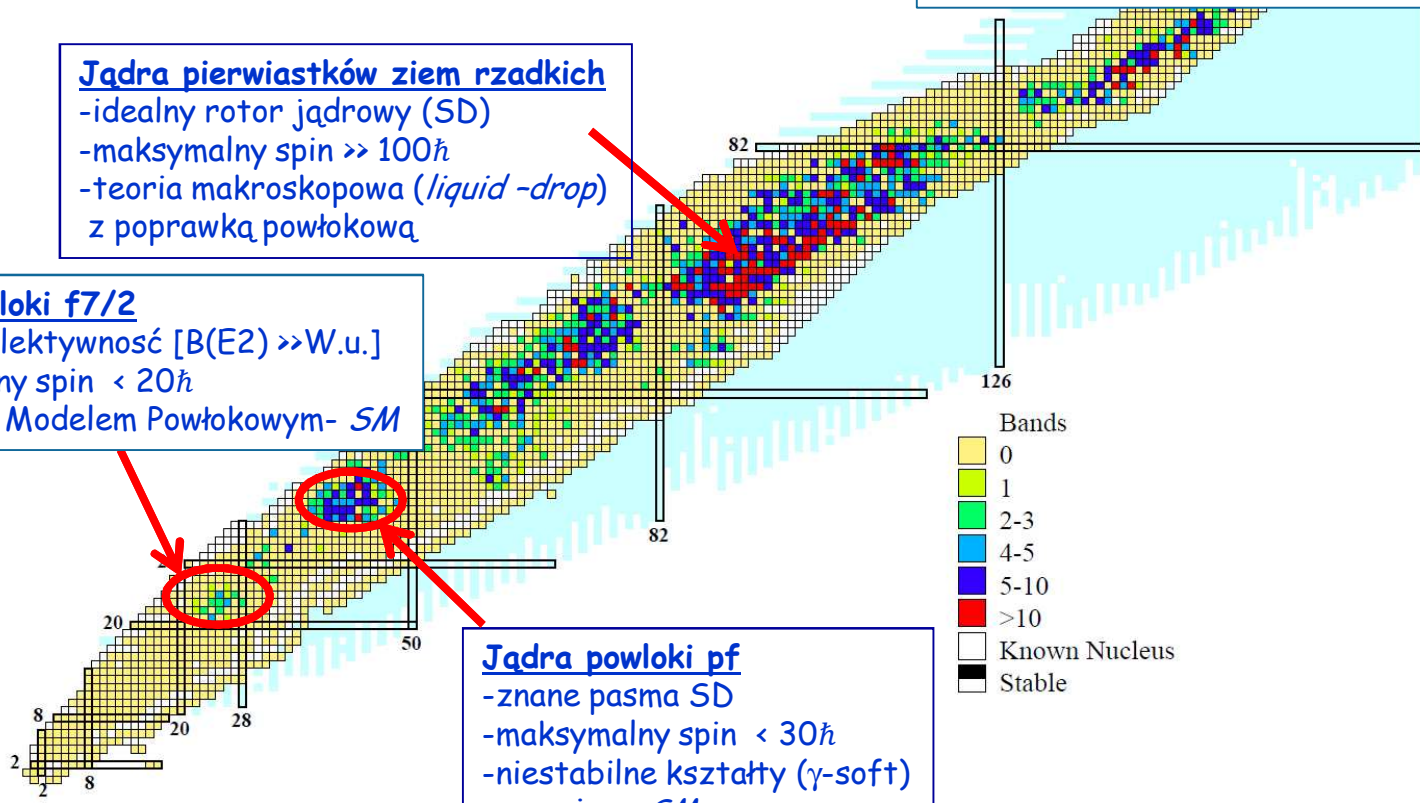
**Jądra pierwiastków ziem rzadkich**  
 -idealny rotor jądrowy (SD)  
 -maksymalny spin  $\gg 100\hbar$   
 -teoria makroskopowa (*liquid-drop*)  
 z poprawką powłokową

**Jądra powłoki f7/2**  
 -wysoka kolektywność [ $B(E2) \gg W.u.$ ]  
 -maksymalny spin  $< 20\hbar$   
 -pełny opis Modelem Powłokowym- *SM*

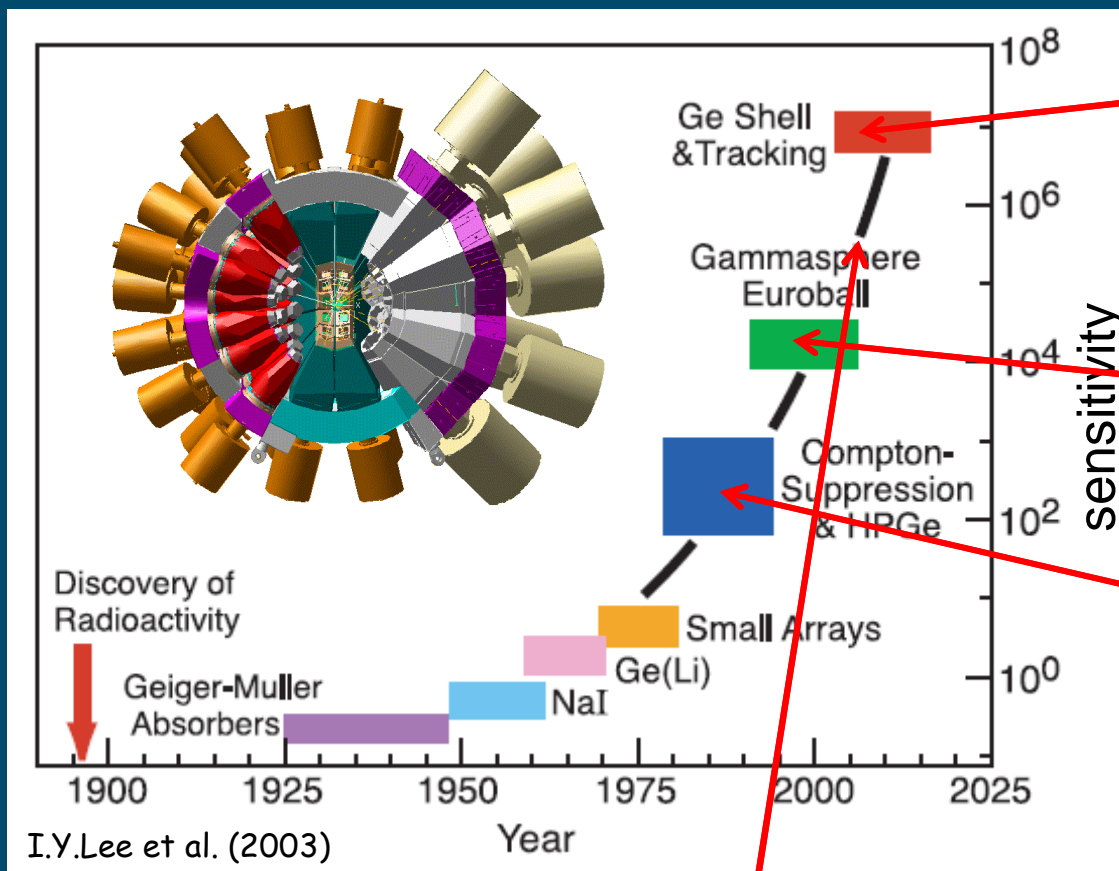
**Jądra powłoki pf**  
 -znane pasma SD  
 -maksymalny spin  $< 30\hbar$   
 -niestabilne kształty ( $\gamma$ -soft)  
 -w zasięgu *SM*

**Poszukiwanie uniwersalnej teorii jądra**  
 konsystentny opis **wszystkich** nuklidów

-Teoria Funkcjonału Jądrowego  
 - $H_{NUCL}(p(r), j(r), p'(r), j'(r), \dots)$   
 -Siła *Skyrme + Hertree-Fock*



# Złota dekada w spektroskopii $\gamma$ i optymistyczne prognozy...



Spektroskopia jądrow egzotycznych na wiązkach radioaktywnych

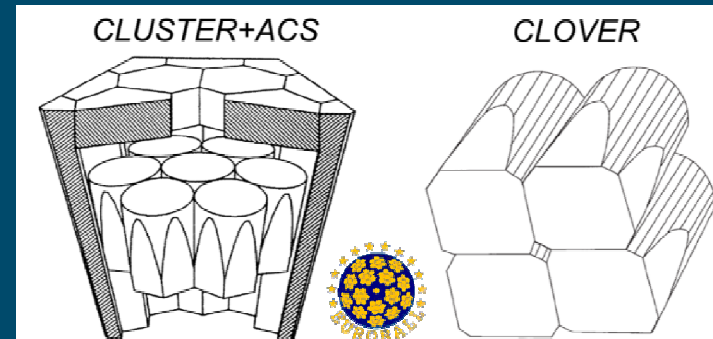
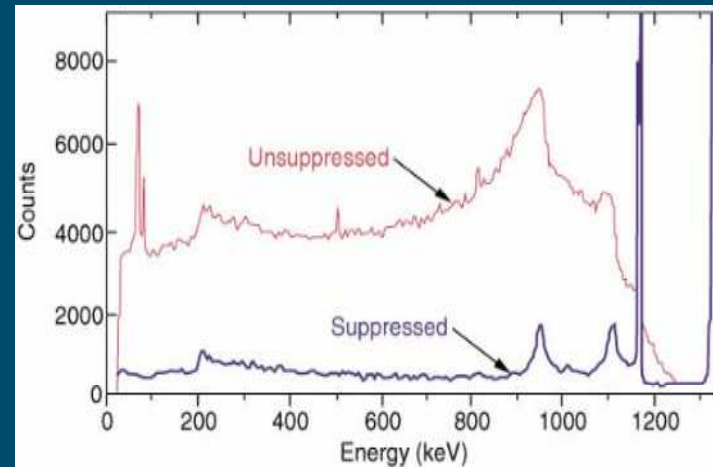
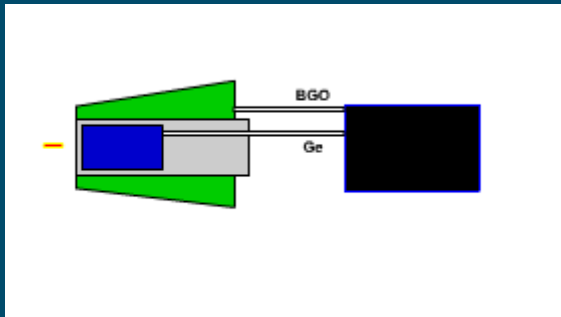
Egzotyczne mody kolektywne:  
-trójosiowość  
-rotacja magnetyczna  
-wysycanie pasm rotacyjnych  
-poszukiwanie HD

Odkrycie SD

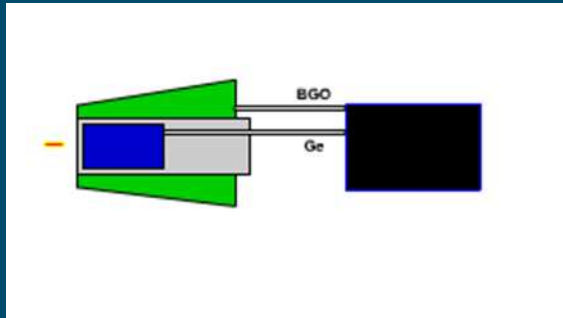
**...KONIECZNE DETEKTORY POMOCNICZE !**

# Revolucja w badaniach strukturalnych-wielodetektorowe spektrometry $\gamma$

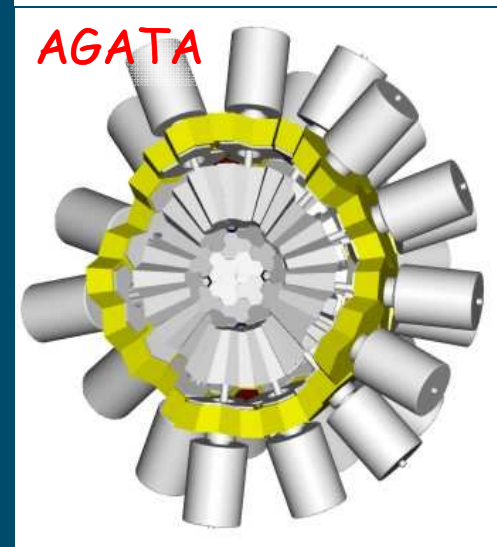
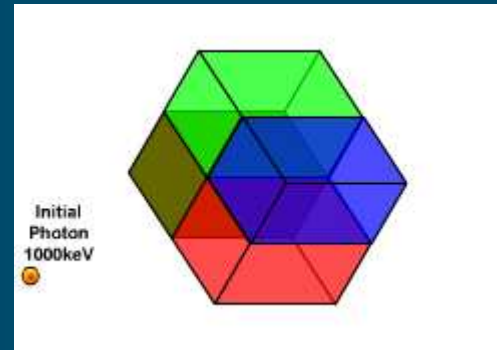
- Osłony ACS- redukcja tła komptonowskiego
- Detektory kompozytowe -duża granularność
- Czułość na promieniowanie o wysokiej krotności



# Nowa jakość: $\gamma$ -tracking

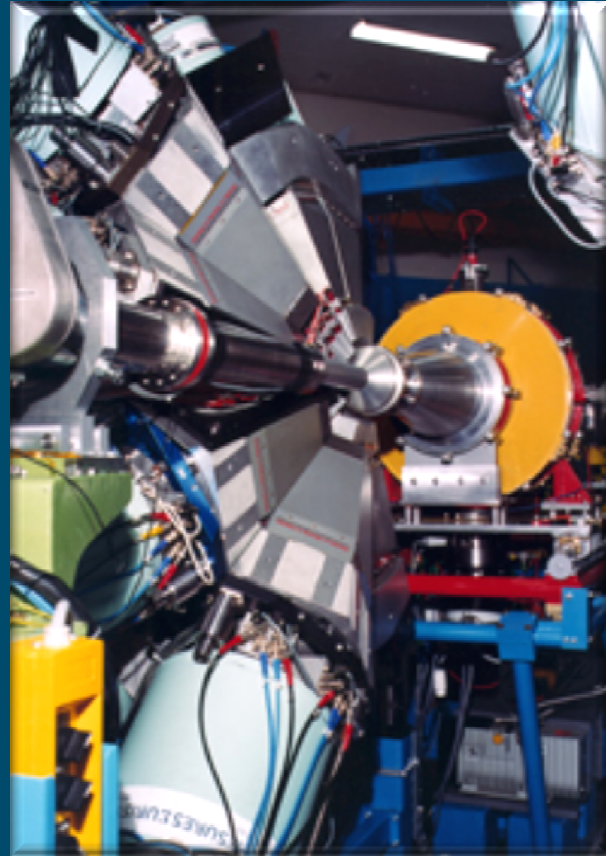


- $\Omega \sim 40\%$
- $\varepsilon \sim 10\%$
- $\theta \sim 8^\circ$



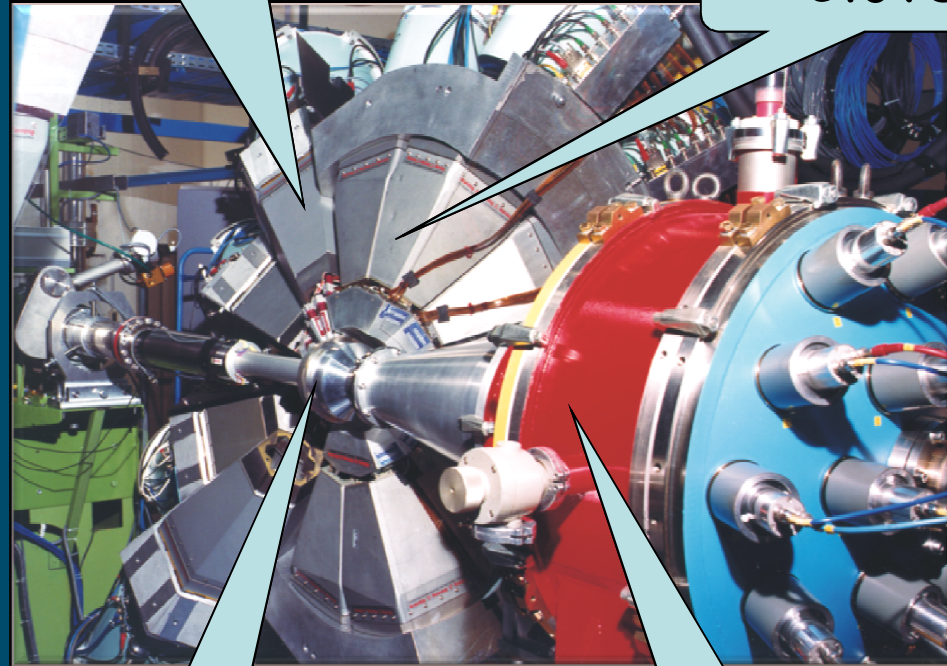
- $\Omega \sim 80\%$
- $\varepsilon \sim 50\%$
- $\theta \sim 1^\circ$

# Krakowski detektor jąder odrzutu- RFD



Cluster

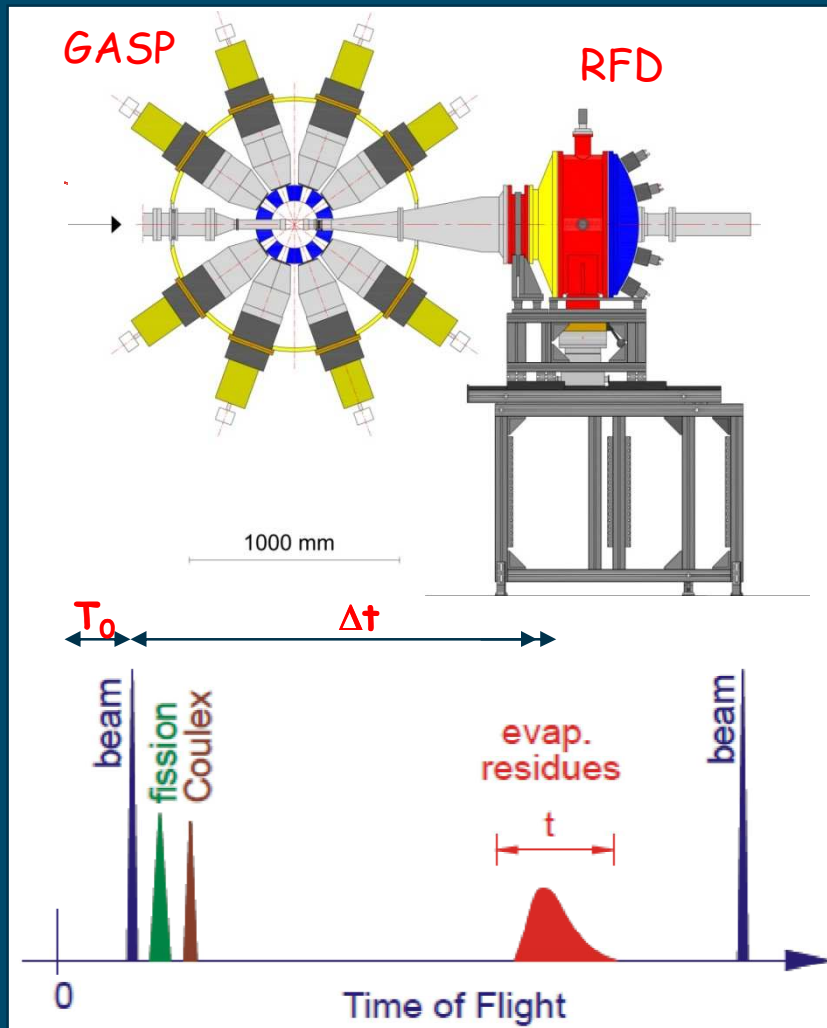
Clover



tarcza

RFD

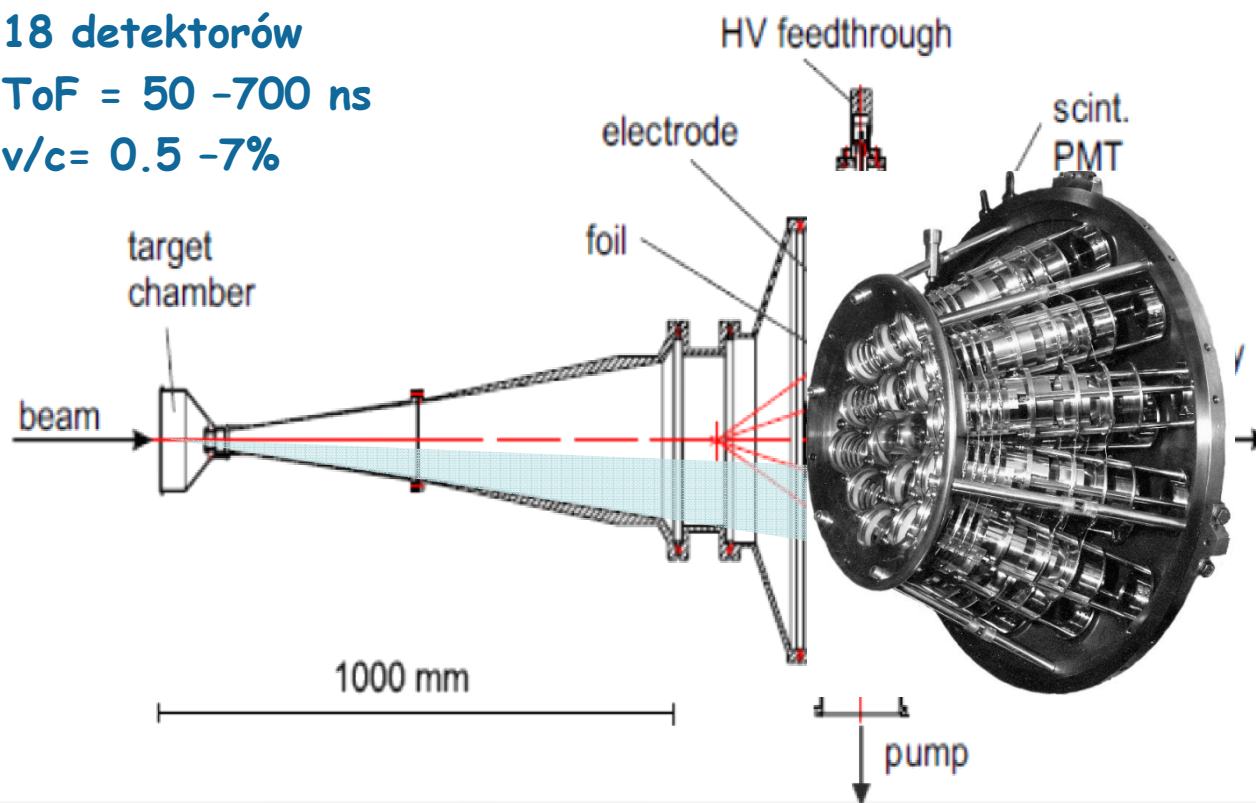
# Recoil Filter Detector - zasada działania



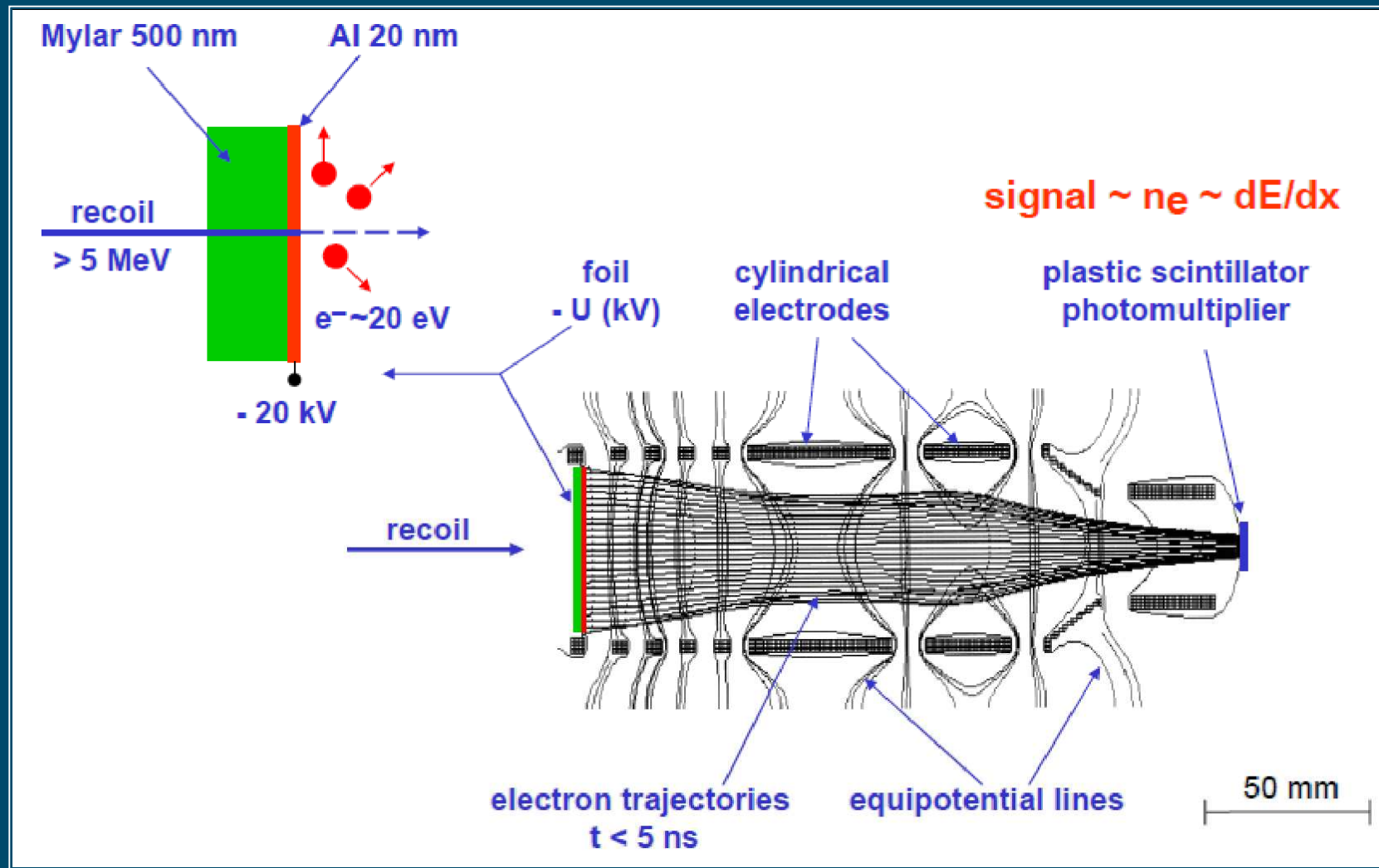
- **RFD** - detektor ciężkich jonów (rezyduów wyparowania) rejestrowanych w koincydencji z promieniowaniem  $\gamma$
- Pomiar czasu przelotu (**TOF**) umożliwia selekcję jąder odrzutu
- Wykorzystanie w systemach detekcyjnych:
  - OSIRIS 12HPGe , HMI Berlin
  - EUROBALL, IRES-IPHC, Strasbourg
  - GASP 40HPGe, LNL, Legnaro

# Technika detekcji jonów

- 18 detektorów
- ToF = 50 -700 ns
- $v/c = 0.5 -7\%$



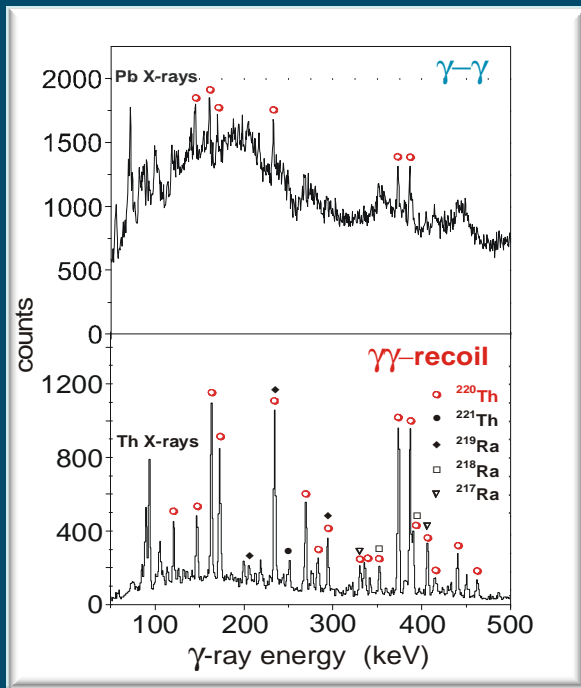
# Rejestracja wiązki wtórnych elektronów



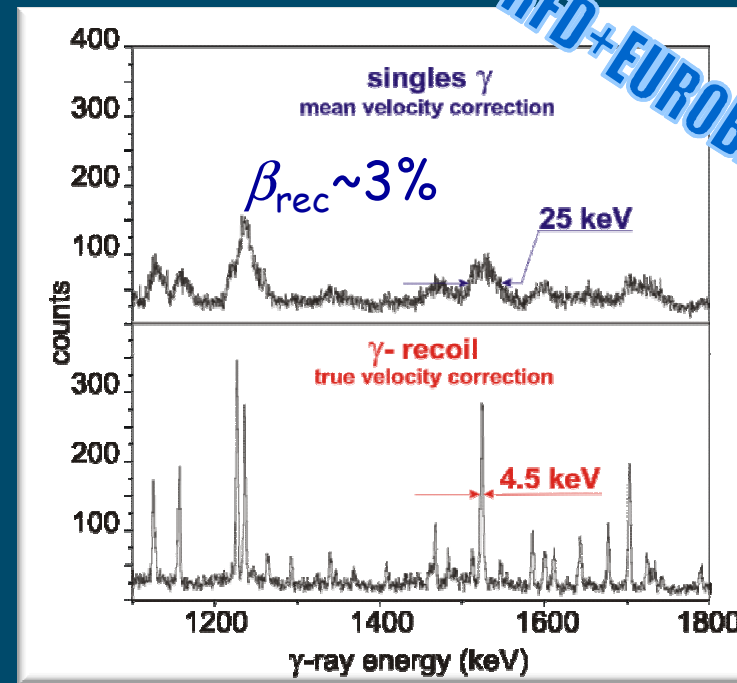


# Poprawa jakości mierzonych widm $\gamma$

92 MeV  $^{16}\text{O}$  + 0.4 mg/cm<sup>2</sup>  $^{208}\text{Pb}$



68 MeV  $^{18}\text{O}$  + 0.8 mg/cm<sup>2</sup>  $^{30}\text{Si}$

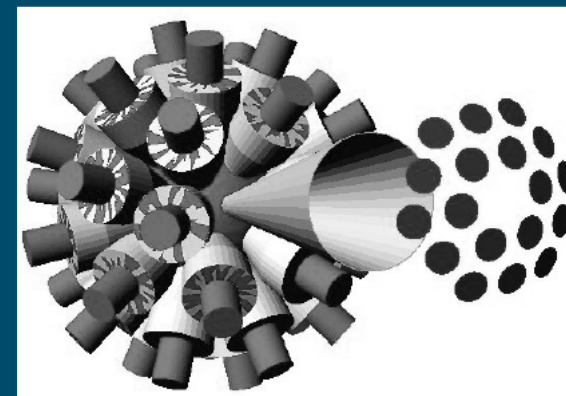
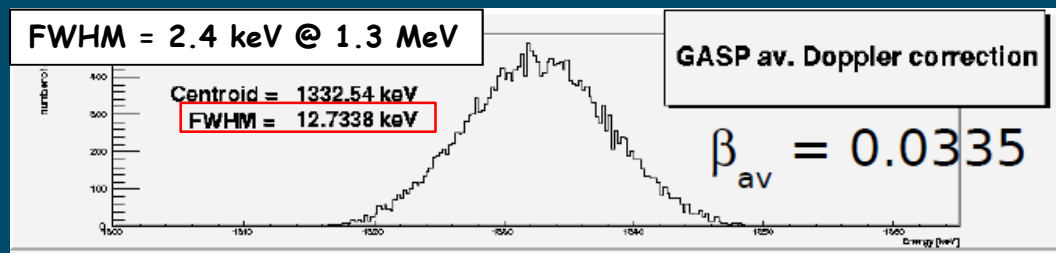


- Ciężkie jądra odrzutu
  - ✓ redukcja tła z rozszczepienia
  - ✓ reakcje z niskim przekrojem czynnym  $\sigma \sim 0.1$  mbarn

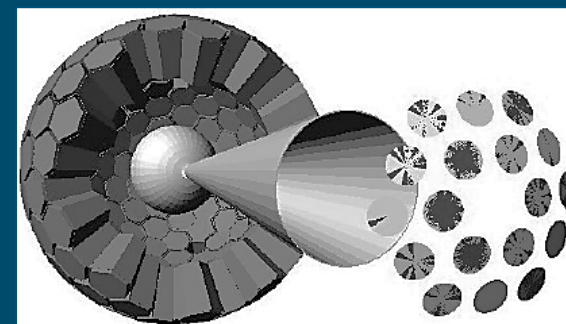
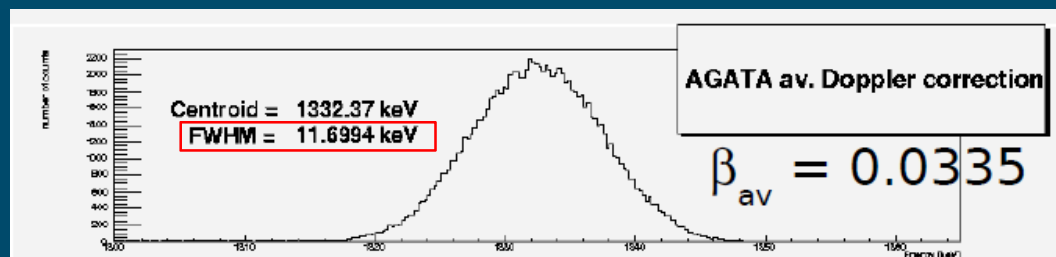
- Wysoka prędkość odrzutu:
  - ✓ redukcja poszerzenia dopplerowskiego

# Symulacja rozdzielczości energetycznej GASP vs AGATA

G. Jaworski



GASP:  $\epsilon = 5.0\%$   
 $\Delta\theta \sim 10^\circ$

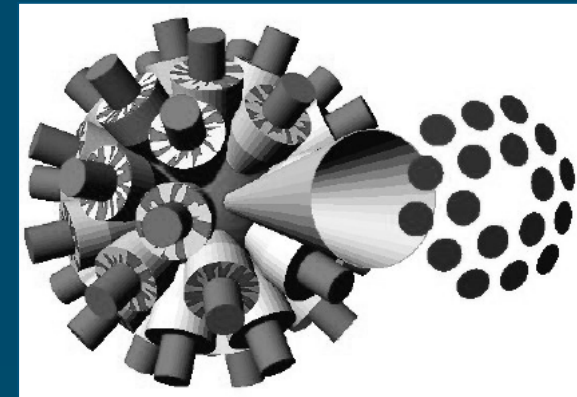
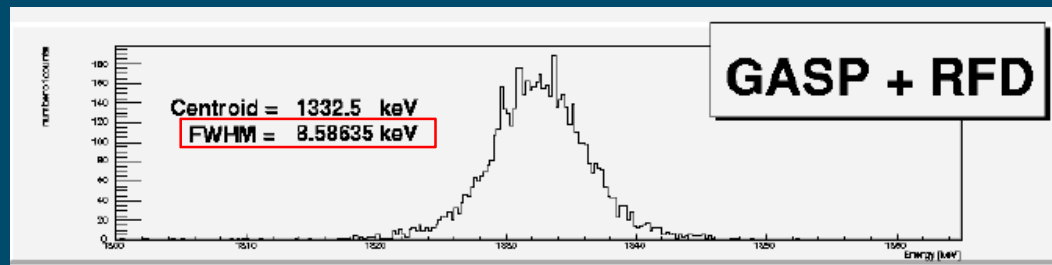


AGATA 3π:  $\epsilon = 22\%$   
 $\Delta\theta \sim 1^\circ$

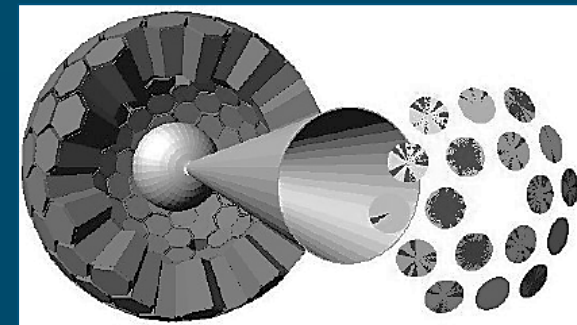
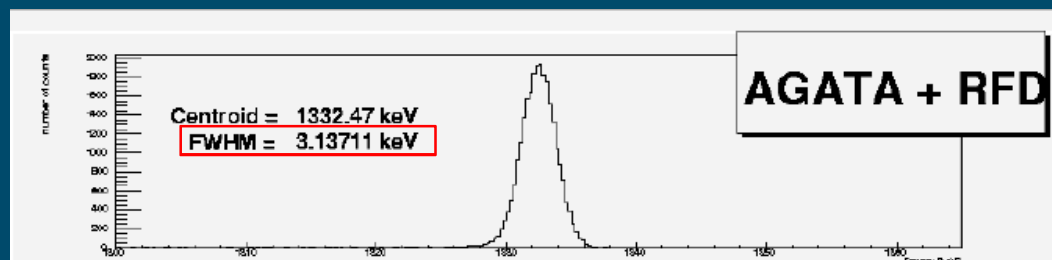
# Symulacja rozdzielczości energetycznej GASP vs AGATA

G. Jaworski

FWHM = 2.4 keV @ 1.3 MeV

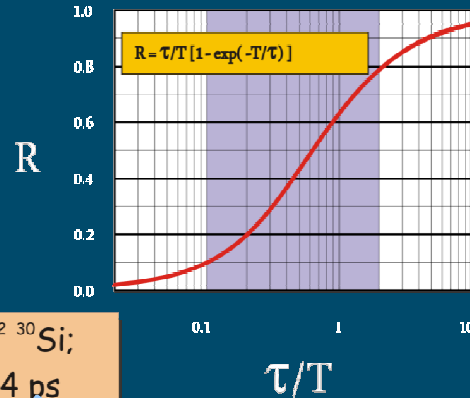


GASP:  $\epsilon = 5.0\%$   
 $\Delta\theta \sim 10^\circ$



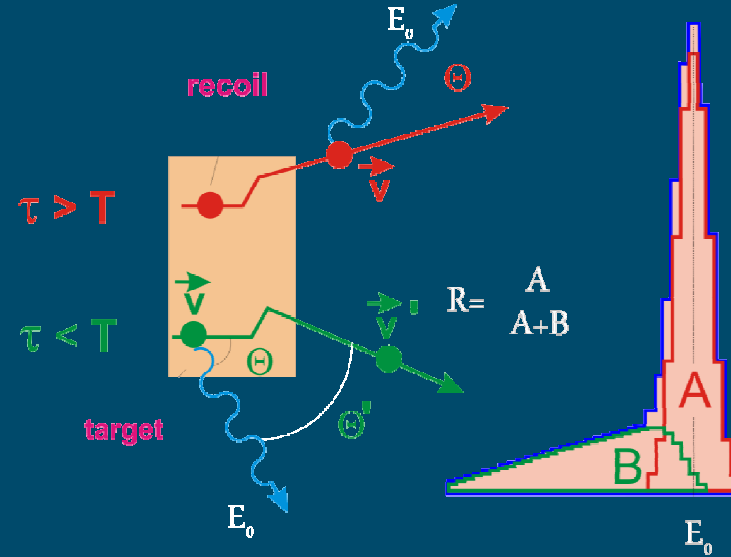
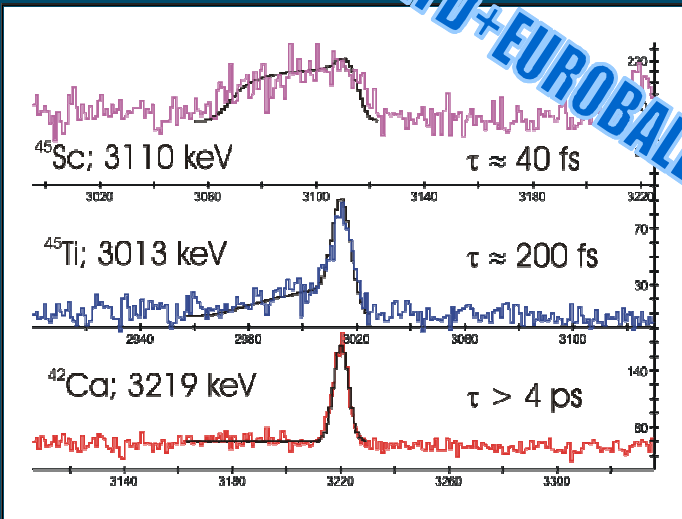
AGATA 3π:  $\epsilon = 22\%$   
 $\Delta\theta \sim 1^\circ$

# Pomiar krótkich czasów życia stanów jądrowych



68MeV  $^{18}\text{O}$  + 0.8mg/cm<sup>2</sup>  $^{30}\text{Si}$ ;  
Recoil transit time  $\approx 0.4$  ps

**RFD+EUROBALL**



- Emisja wewnątrz tarczy (B) zachodzi przy większej prędkości
- Liczba rozpadów za tarczą (A) w stosunku do pełnego natężenia linii (A+B) zależy od  $\tau$

# Efekty kolektywne w lekkich jądrach powłoki $f_{7/2}$

## Niskie spiny /~1980/:

- Stany połączone szybkimi przejściami E2 dobrze opisywane przez model powłokowy
- Niskoleżące pasma o wysokiej deformacji związane ze wzbudzeniem rdzenia  $^{40}\text{Ca}$

## Trudności eksperymentalne:

- Duże prędkości odrzutu
- Wysokie energie przejść
- Znaczne poszerzenie dopplerowskie

## Wysokie spiny /2000-/:

- Wielolicznikowe układy detektorów Ge
- Mikroskopowy opis rotacji w  $^{48}\text{Cr}$
- Superdeformacja w  $^{36,40}\text{Ar}$ ,  $^{40,42}\text{Ca}$ ,  $^{44}\text{Ti}$

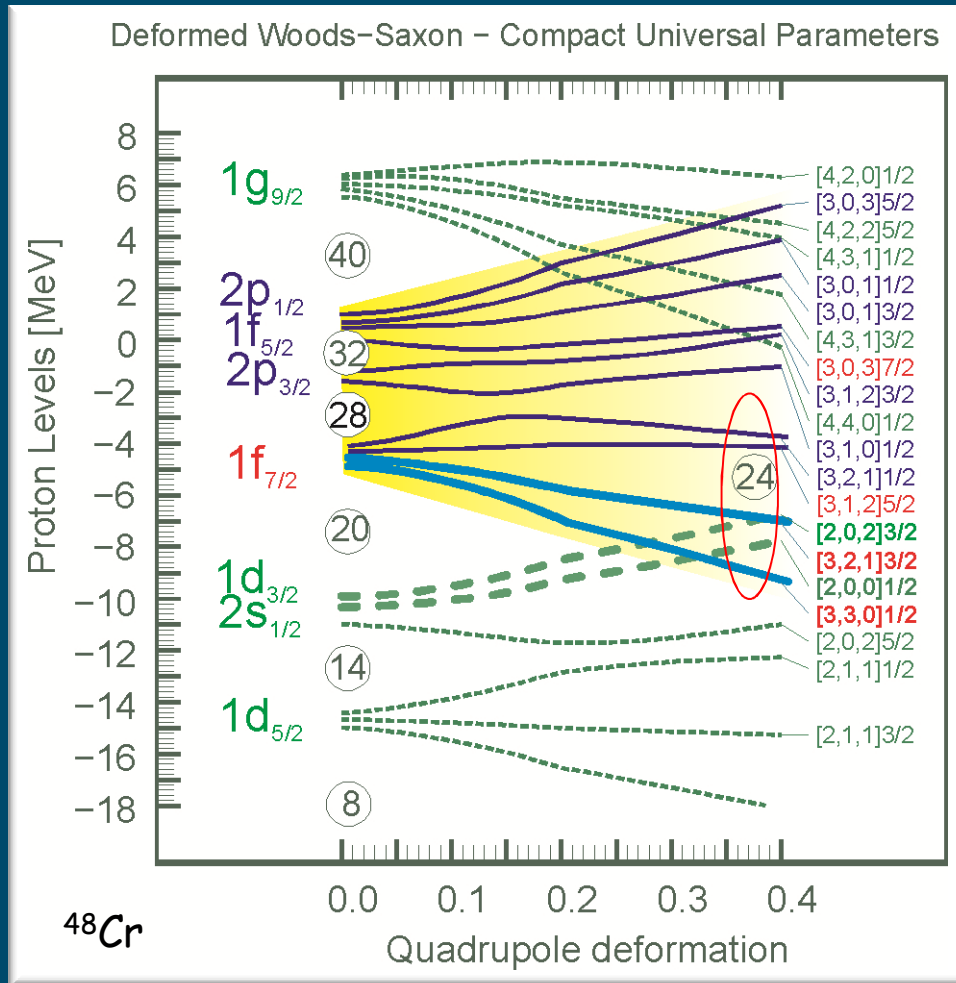
# Źródła deformacji w lekkich jądrach $f_{7/2}$

$^{100}\text{Sn}$

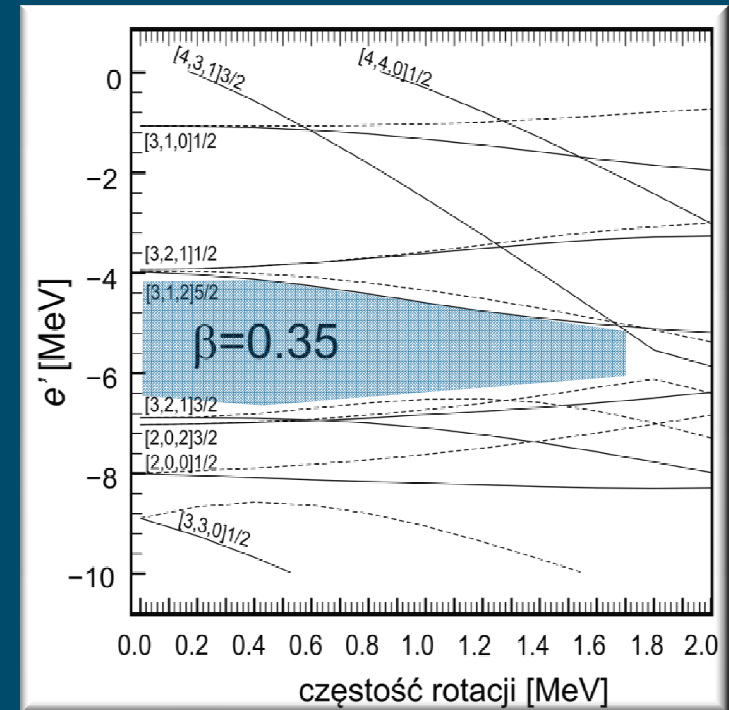
$^{80}\text{Zr}$

$^{58}\text{Ni}$

$^{40}\text{Ca}$



energie jednocząstkowe w rotującym układzie



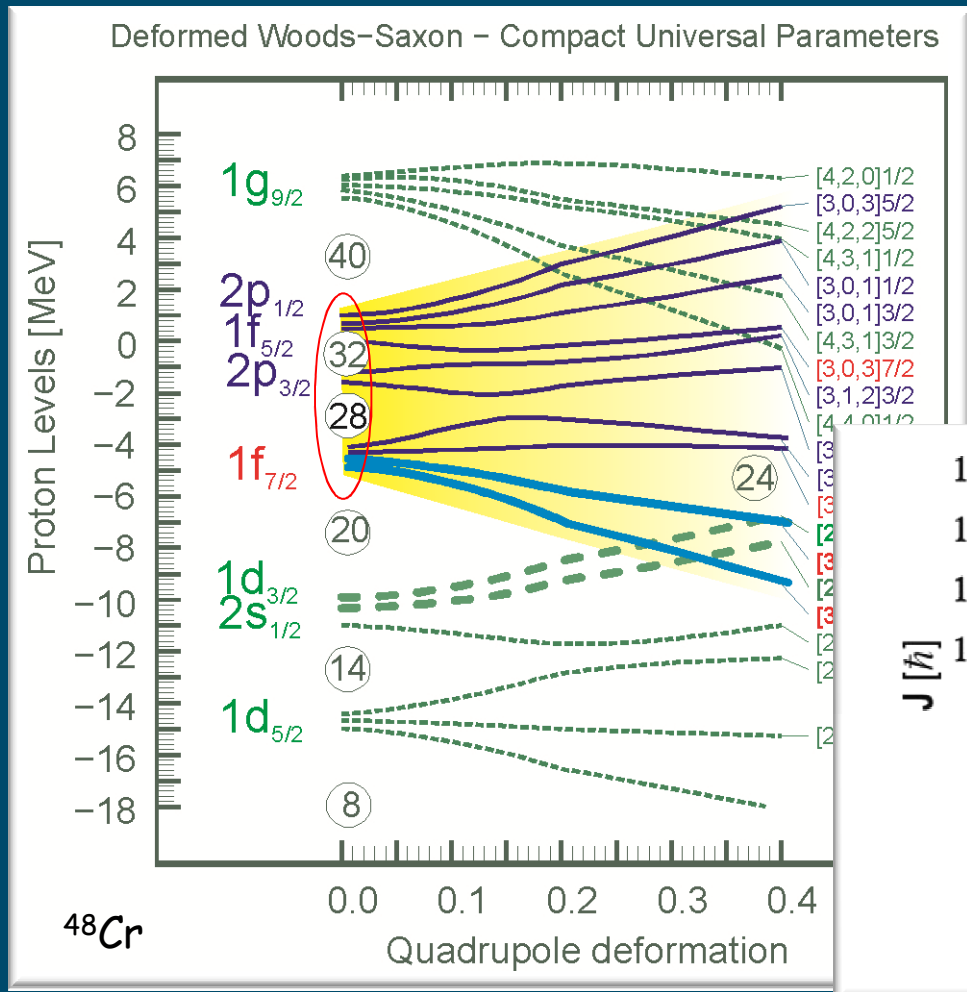
# Mikroskopowy opis rotacji w $^{48}\text{Cr}$

$^{100}\text{Sn}$

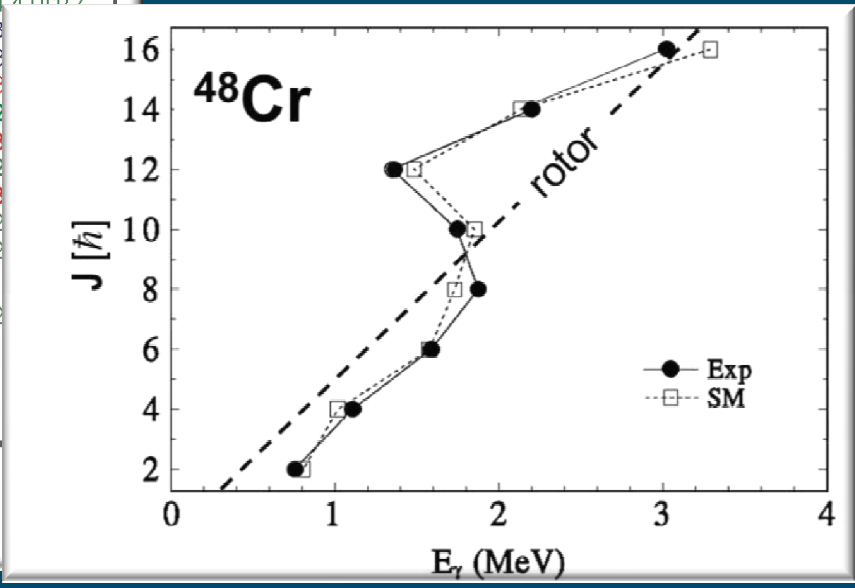
$^{80}\text{Zr}$

$^{58}\text{Ni}$

$^{40}\text{Ca}$



Model Powłokowy:  
rozszerzona powłoka *fp*



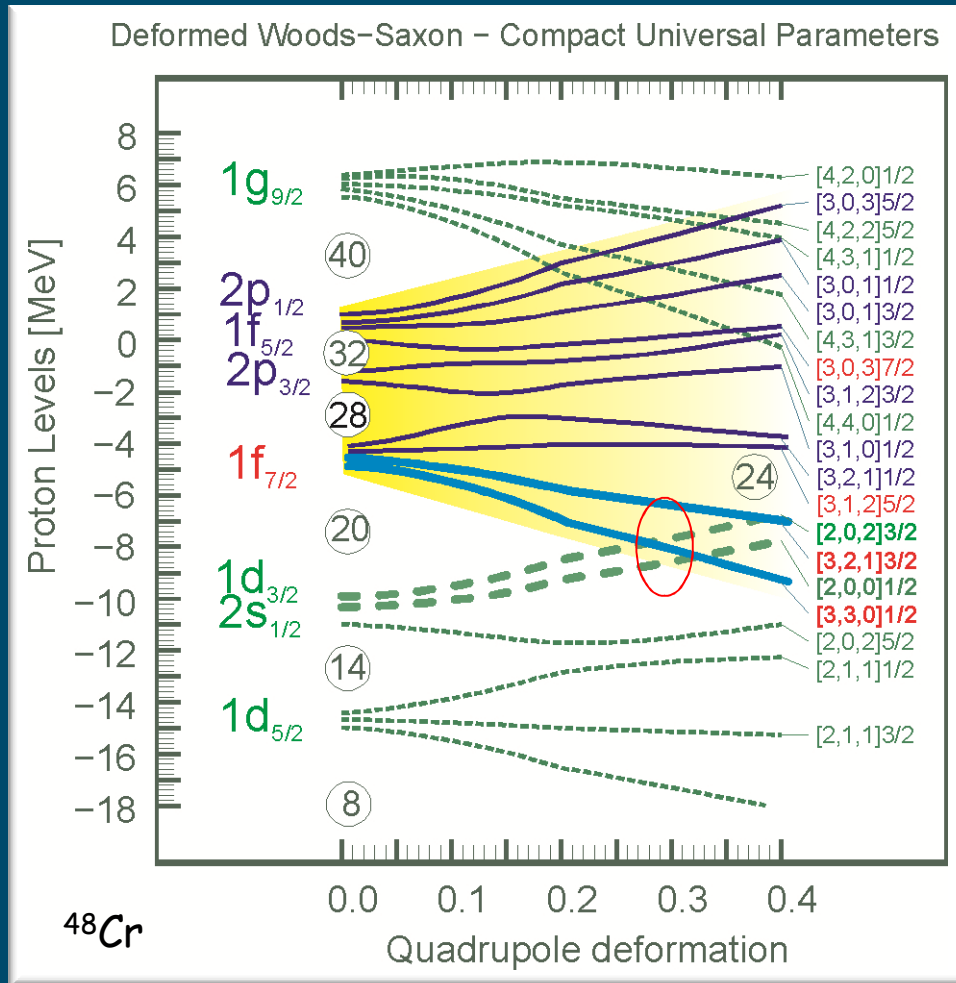
# Superdeformacja w jądrach $f_{7/2}$

$^{100}\text{Sn}$

$^{80}\text{Zr}$

$^{58}\text{Ni}$

$^{40}\text{Ca}$



$^{36}\text{Ar}$  - pasmo SD ( $\beta \sim 0.44$ )

C.E, Svensson et al. (2001)

- Opis SM w przestrzeni *sdfp*
- 4 cząstki na orbitalu  $1f_{7/2}$  ([300]1/2)
- 8 dziur w rdzeniu  $1d_{3/2}$



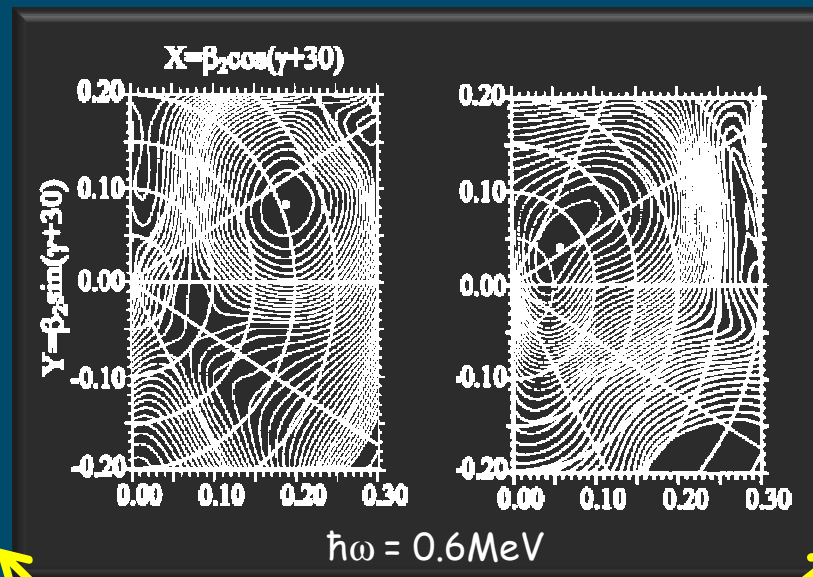
# Wysokospinowe rozwinięcie pasma typu cząstka-dziura w $^{45}\text{Sc}$

## GASP + Recoil Mass Spectrometer, LNL

P.Bednarczyk et al. (1997)

10044	14 <sup>+</sup>	11023	31/2 <sup>+</sup>
8219	12 <sup>+</sup>	8623	27/2 <sup>+</sup>
6242	10 <sup>+</sup>	6685	23/2 <sup>+</sup>
4897	8 <sup>+</sup>	4896	19/2 <sup>+</sup>
3299	6 <sup>+</sup>	3296	15/2 <sup>+</sup>
2010	4 <sup>+</sup>	2032	11/2 <sup>+</sup>
889	2 <sup>+</sup>	975	7/2 <sup>+</sup>
0	0 <sup>+</sup>	13	3/2 <sup>+</sup>

$T_{1/2} = 318 \text{ ms}$

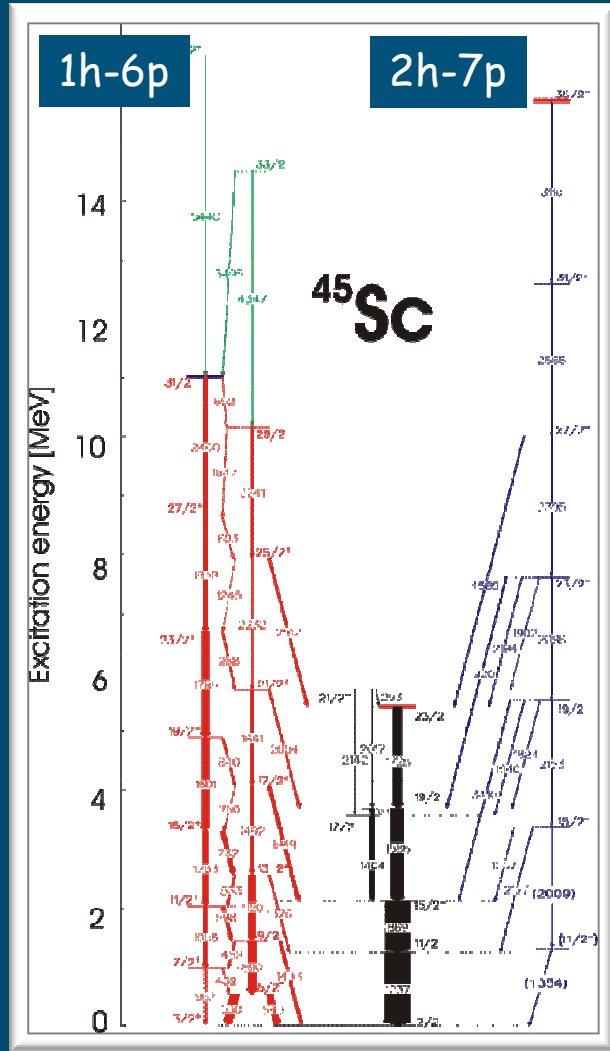


5418	23/2 <sup>-</sup>	5088	(8 <sup>-</sup> )
3693	19/2 <sup>-</sup>	3285	6 <sup>-</sup>
3570	17/2 <sup>-</sup>	2283	4 <sup>-</sup>
2107	15/2 <sup>-</sup>	1157	2 <sup>-</sup>
0	7/2 <sup>-</sup>	0	0 <sup>-</sup>



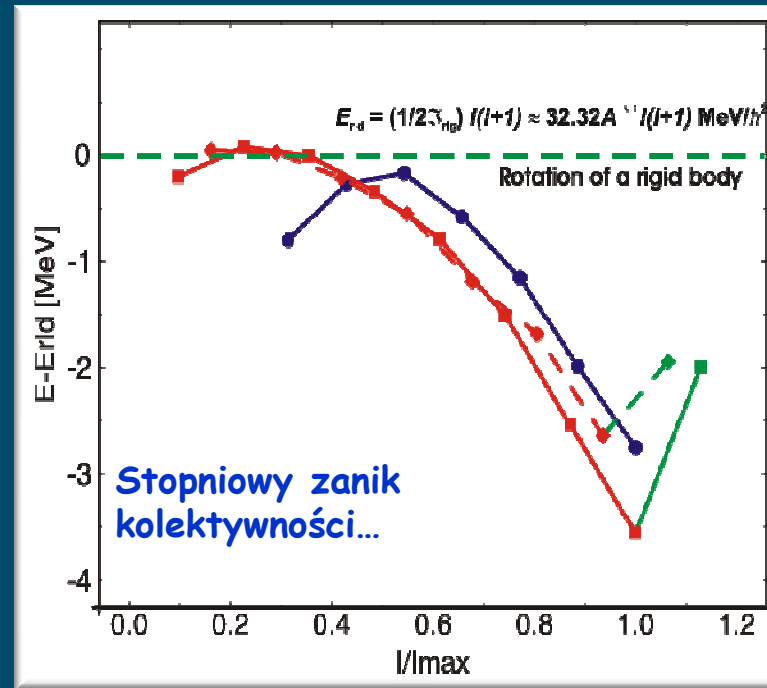
$\beta = +0.3$        $\beta \sim 0$   
 Bezpośredni pomiar momentu kwadrupolowego  
 (spektroskopia laserowa) M.Avgoulea et al. (2011)

# Wysycenie pasm rotacyjnych w $^{45}\text{Sc}$

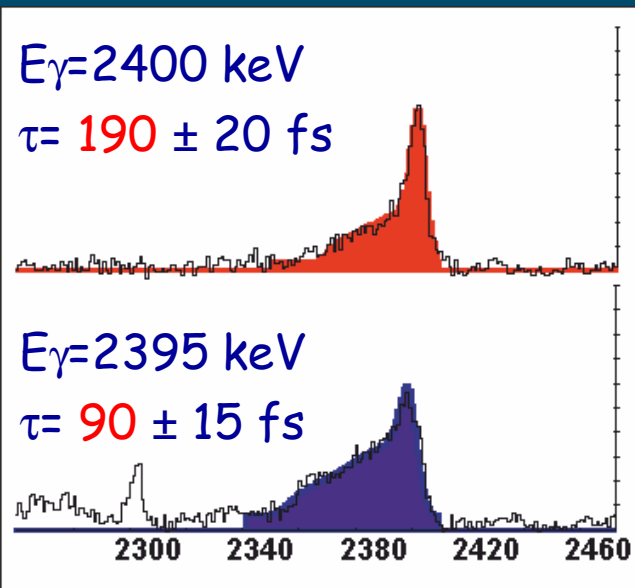
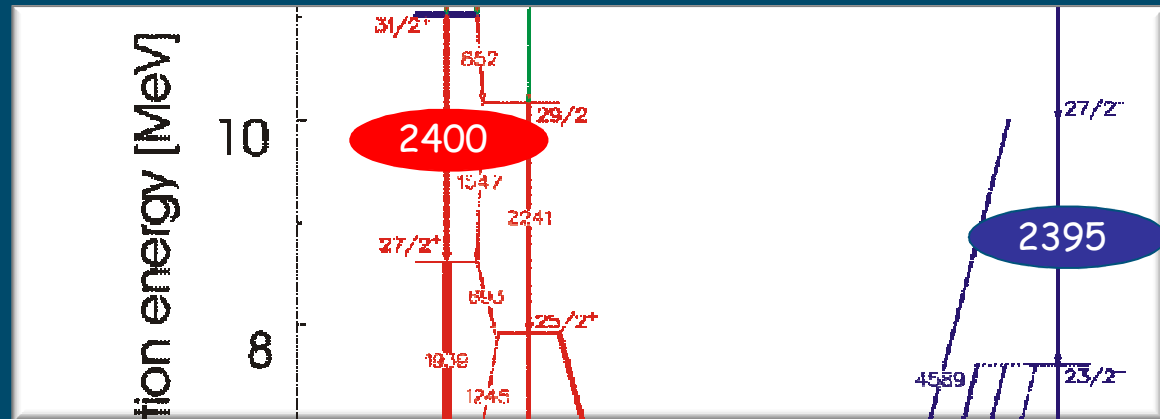
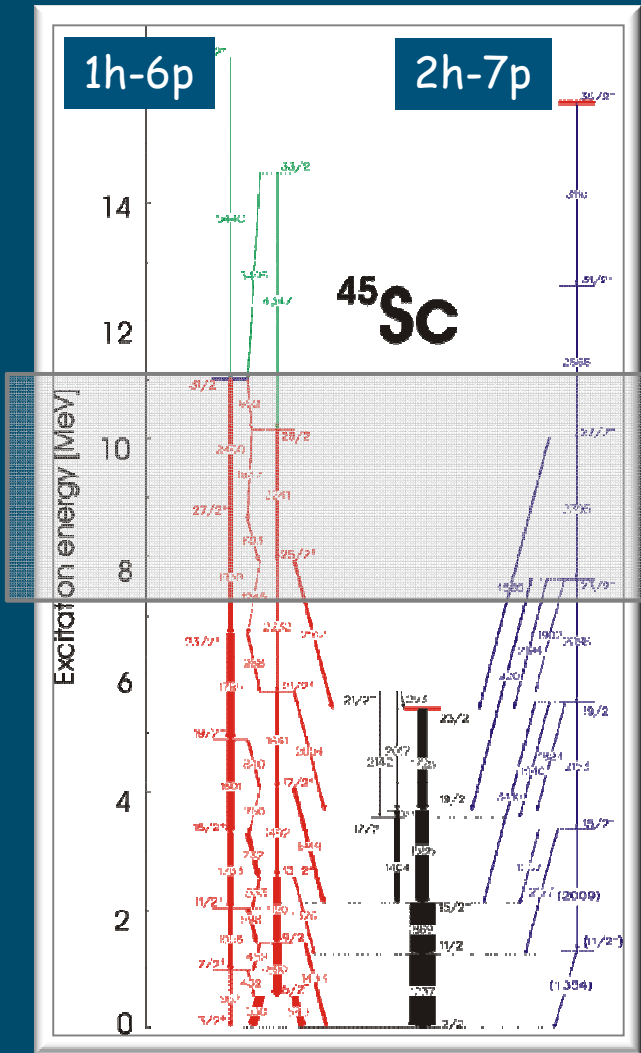


## EUROBALL + RFD

P. Bednarczyk et al. (2001)

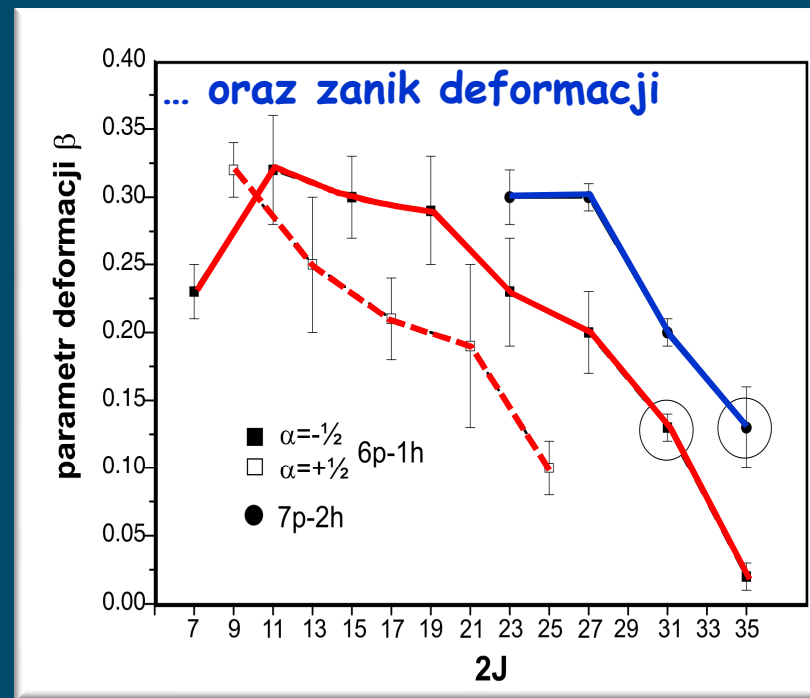
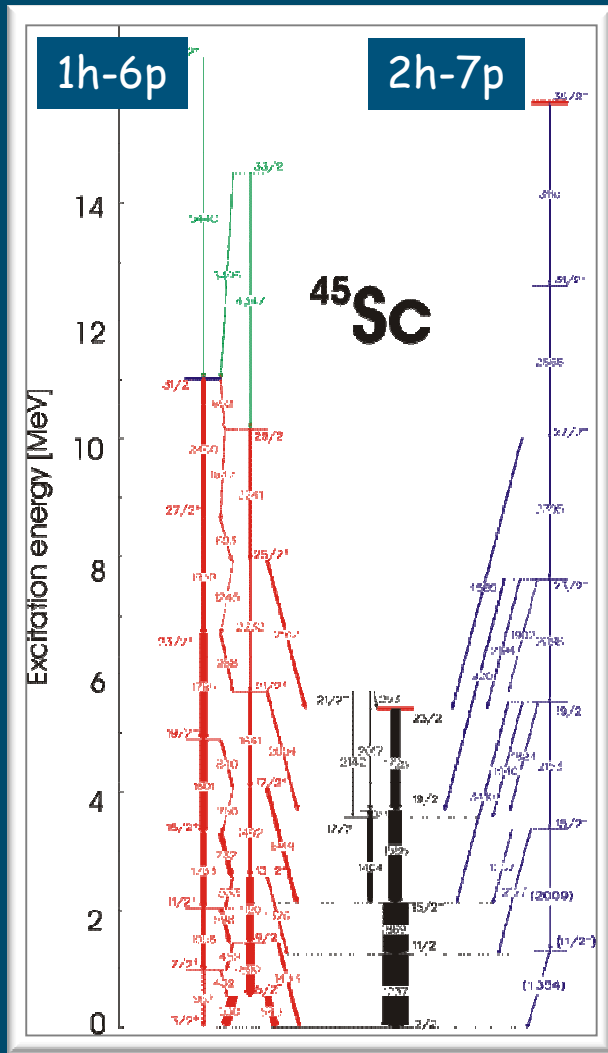


# Wysycenie pasm rotacyjnych w $^{45}\text{Sc}$

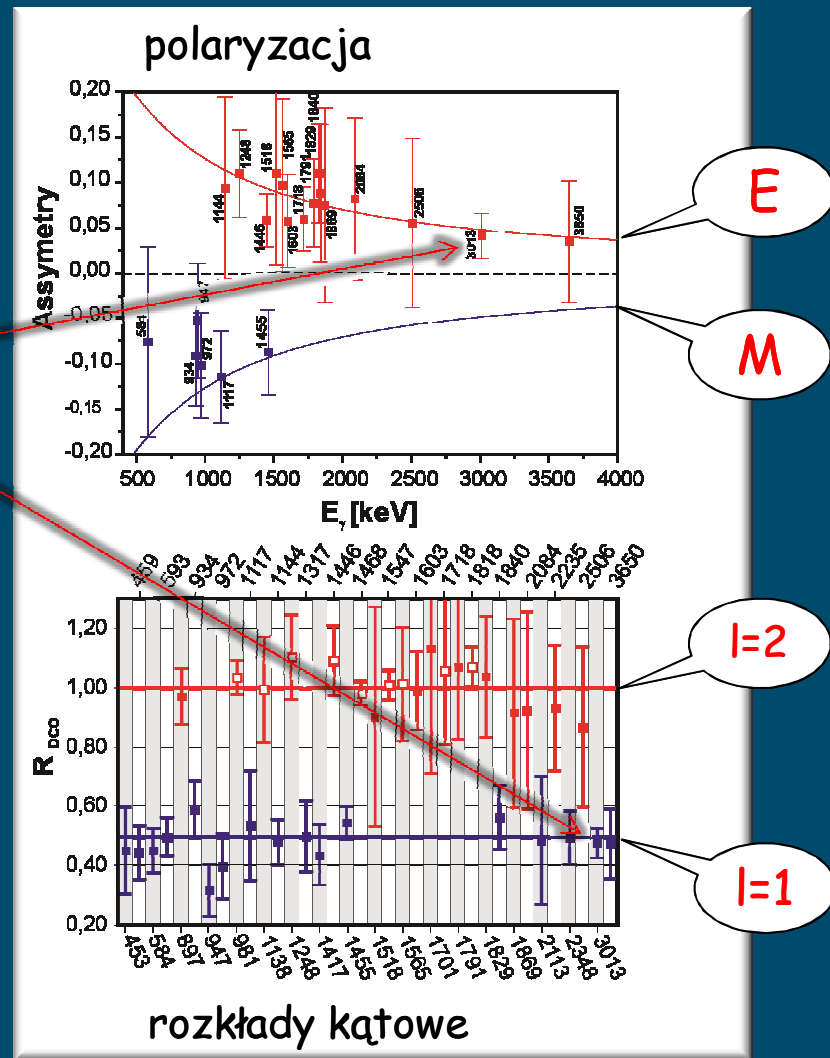
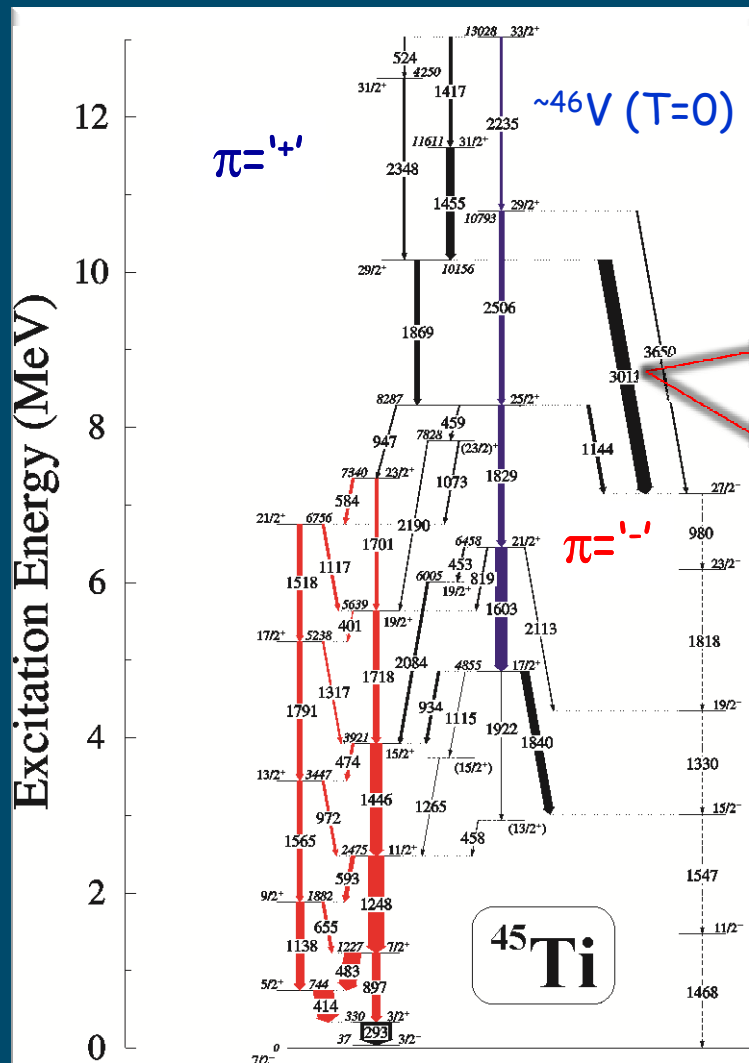


$\theta = 156^\circ$

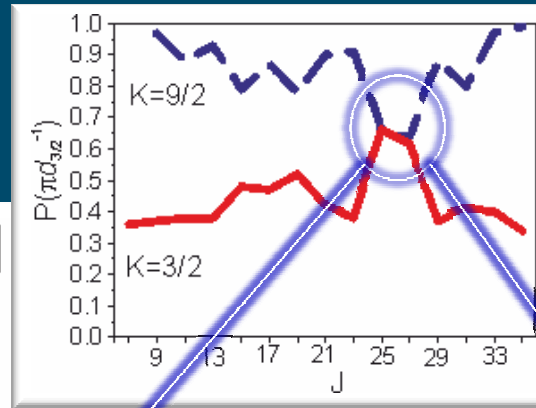
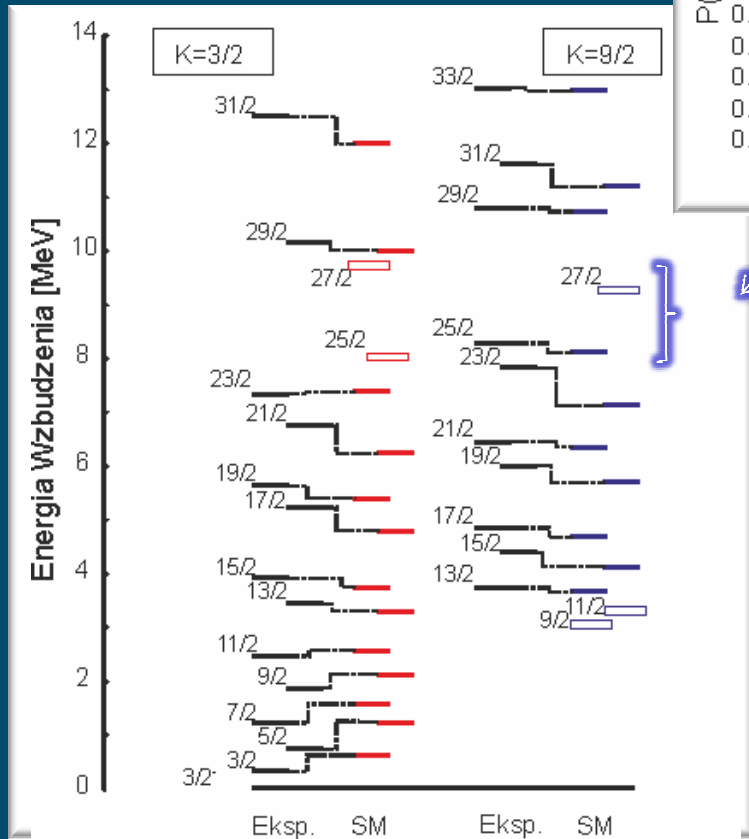
# Wysycenie pasm rotacyjnych w $^{45}\text{Sc}$



# Rozwikłanie schematu poziomów $\pi=+$ w $^{45}\text{Ti}$

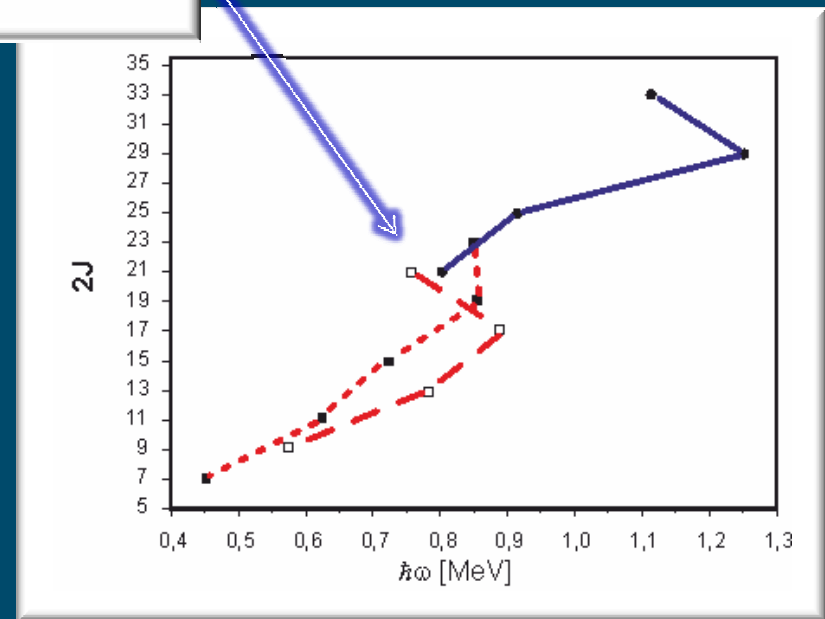


# $^{45}\text{Ti}$ - skrzyżowanie pasm w ujęciu SM



dziura  $\pi$

dziura  $\pi, \nu$



# Przetrawanie wysokiej deformacji w paśmie $T=0$ w $^{45}\text{Ti}$

