

# **Jądra o wysokich energiach wzbudzenia**

## **1. Utworzenie i rozpad jądra złożonego**

**a) model statystyczny**

## **2. Gigantyczny rezonans dipolowy (GDR)**

**a) w jądrach w stanie podstawowym**

**b) w jądrach w stanie wzbudzonym**

## **3. Czego można się dowiedzieć o jądrach badając GDR**

## **4. Metodyka eksperymentów i wyniki**

# Utworzenie i rozpad jądra złożonego



1. Jeśli jądro  $C^*$  żyje dostatecznie długo - osiągnany jest stan równowagi termodynamicznej- jądro złożone

2. utworzenie i rozpad jądra złożonego są od siebie niezależne

$$\sigma[X(a,b)Y] = \sigma_C(a) P_C(b) - \text{hipoteza niezależności Bohra}$$

3. parametry charakteryzujące jądro złożone

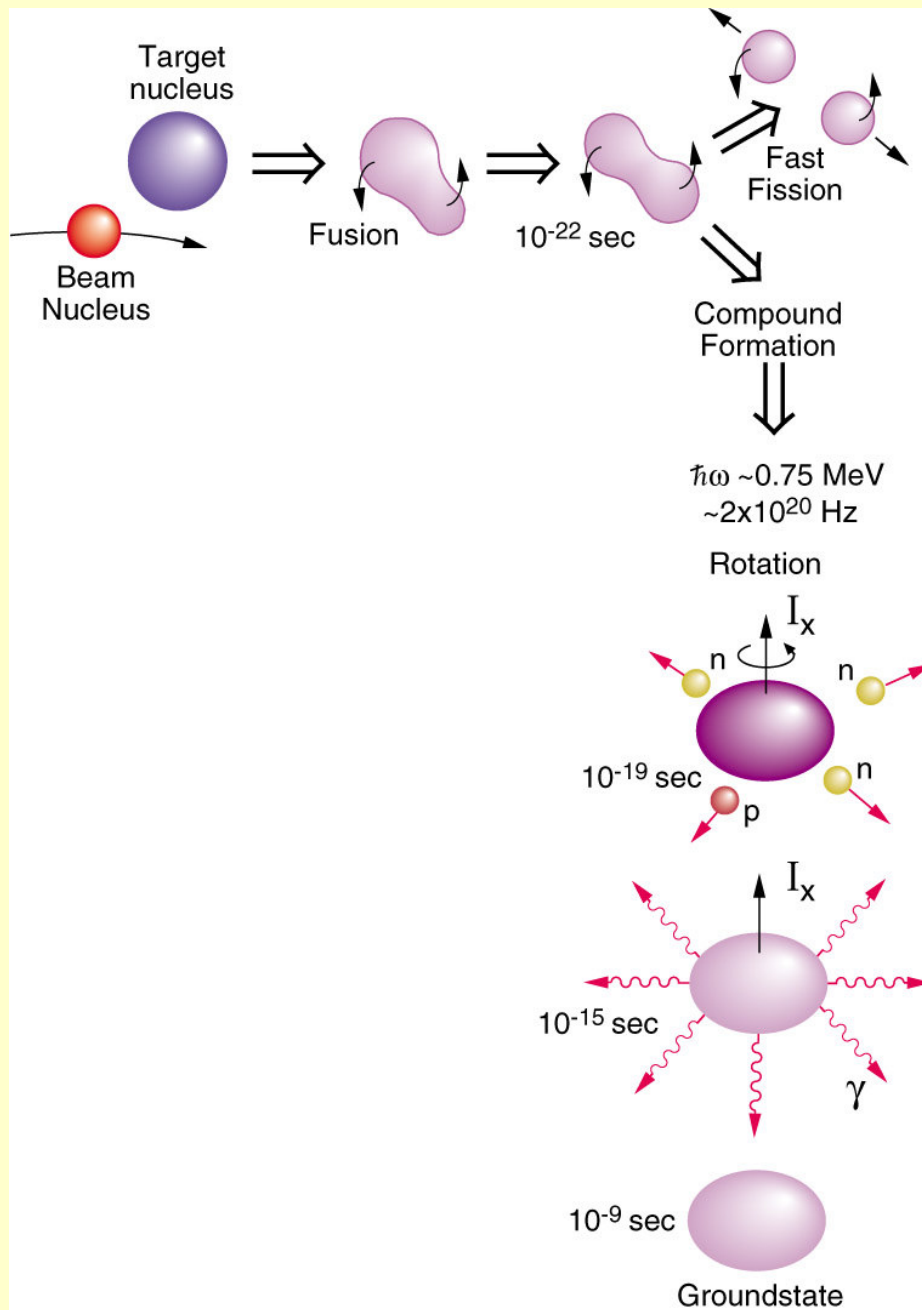
energia wzbudzenia  $E^* = E_{CM}^a + Q_{fus}$

$$E_{CM}^a = E_{Lab}^a M_X / (M_X + M_a)$$

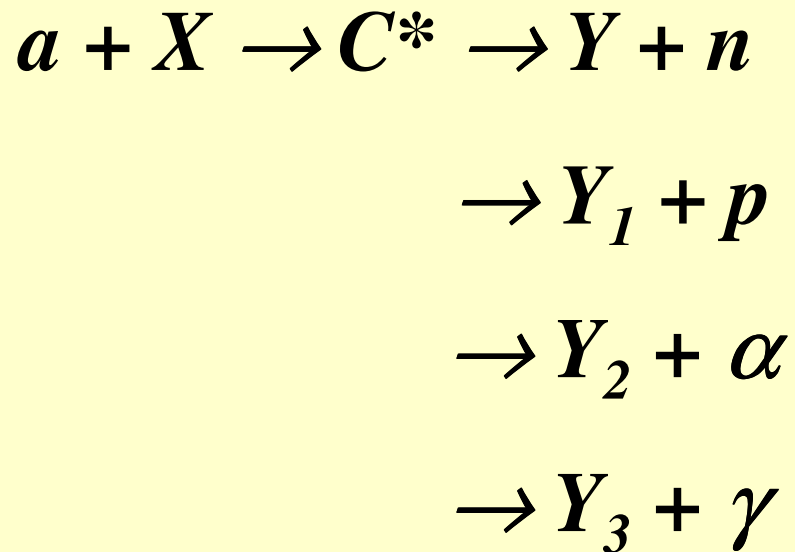
$$Q_{fus} = (M_X + M_a)c^2 - M_C c^2 = S_a(C)$$

moment pędu (spin)  $\bar{I} = \bar{I}_X + \bar{l}_a + \bar{S}_a$

# Utworzenie i rozpad jądra złożonego

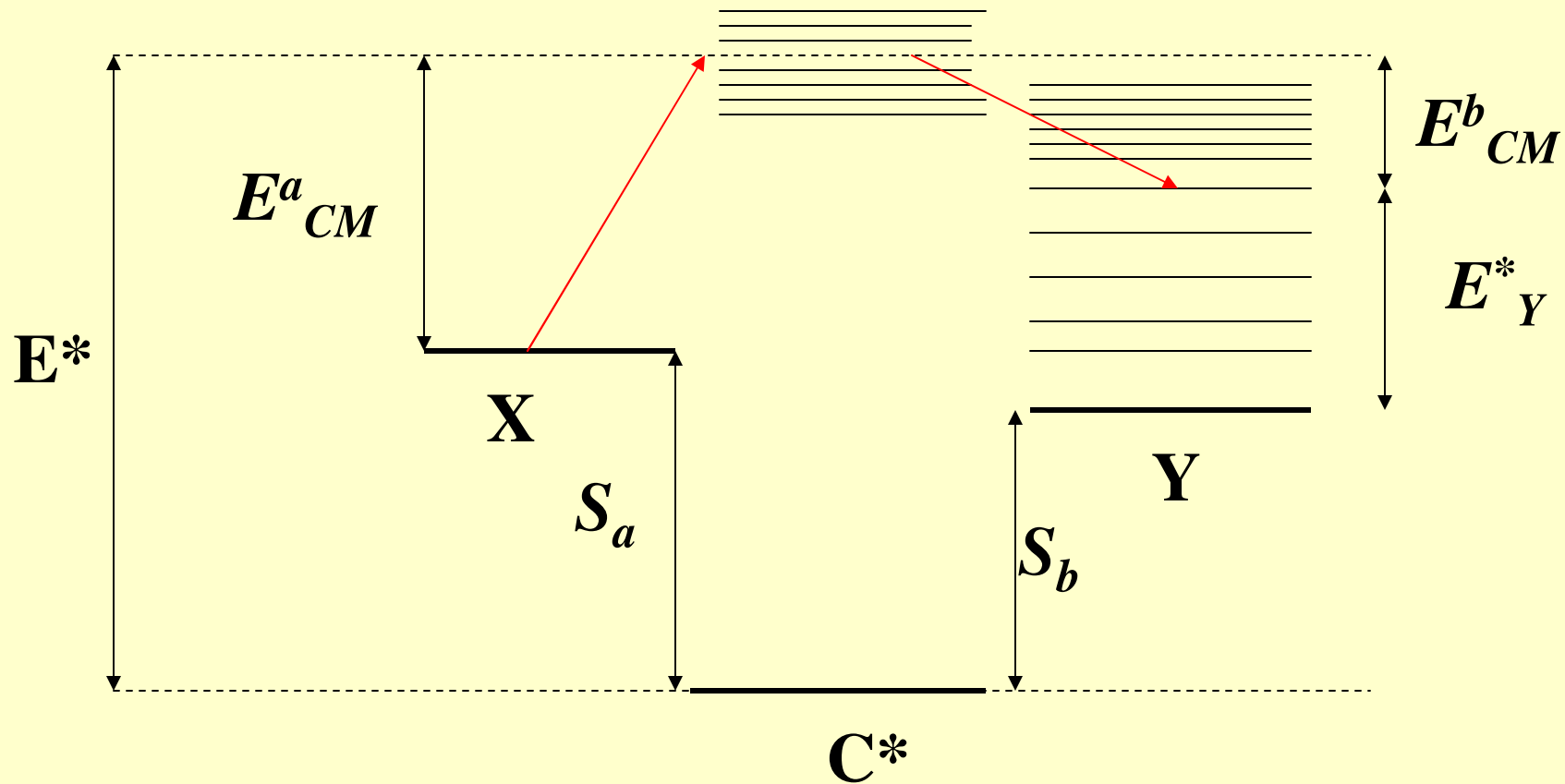


# Rozpad jądra złożonego



Czas trwania jądra złożonego ( $\sim 10^{-16}$  s) na tyle długi, że zapomina ono jak zostało utworzone i rozpada się zgodnie z dostępną energią i momentem pędu

**Rozpad z emisją kwantu  $\gamma$   
jest 1000 razy mniej prawdopodobny !**

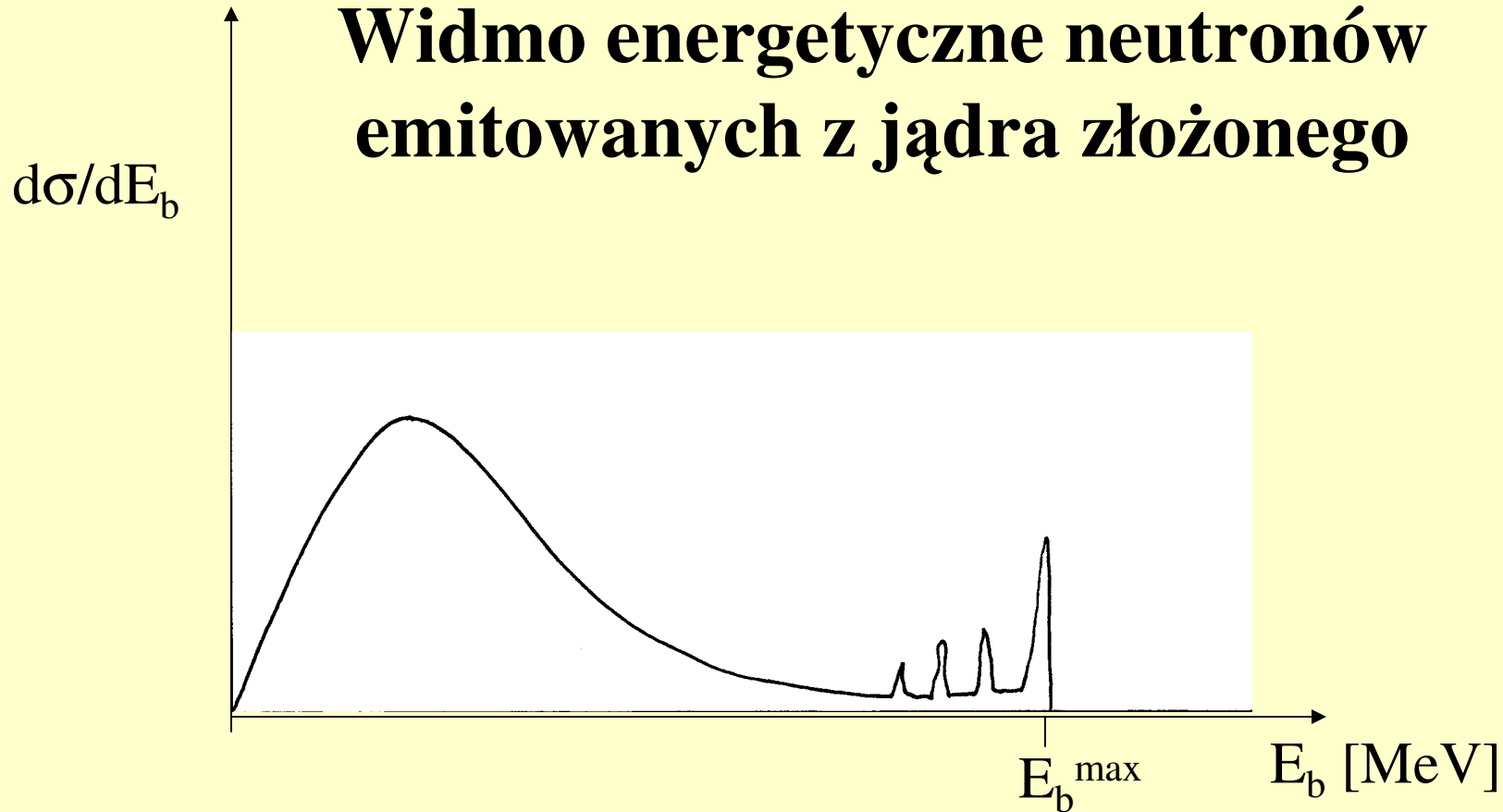


Maksymalna energia cząstki b:  $E^{b \max}_{CM} = E^a_{CM} + S_a(C) - S_b(C)$

Energia cząstki b:  $E^b_{CM} = E^{b \max}_{CM} - E^*_Y$

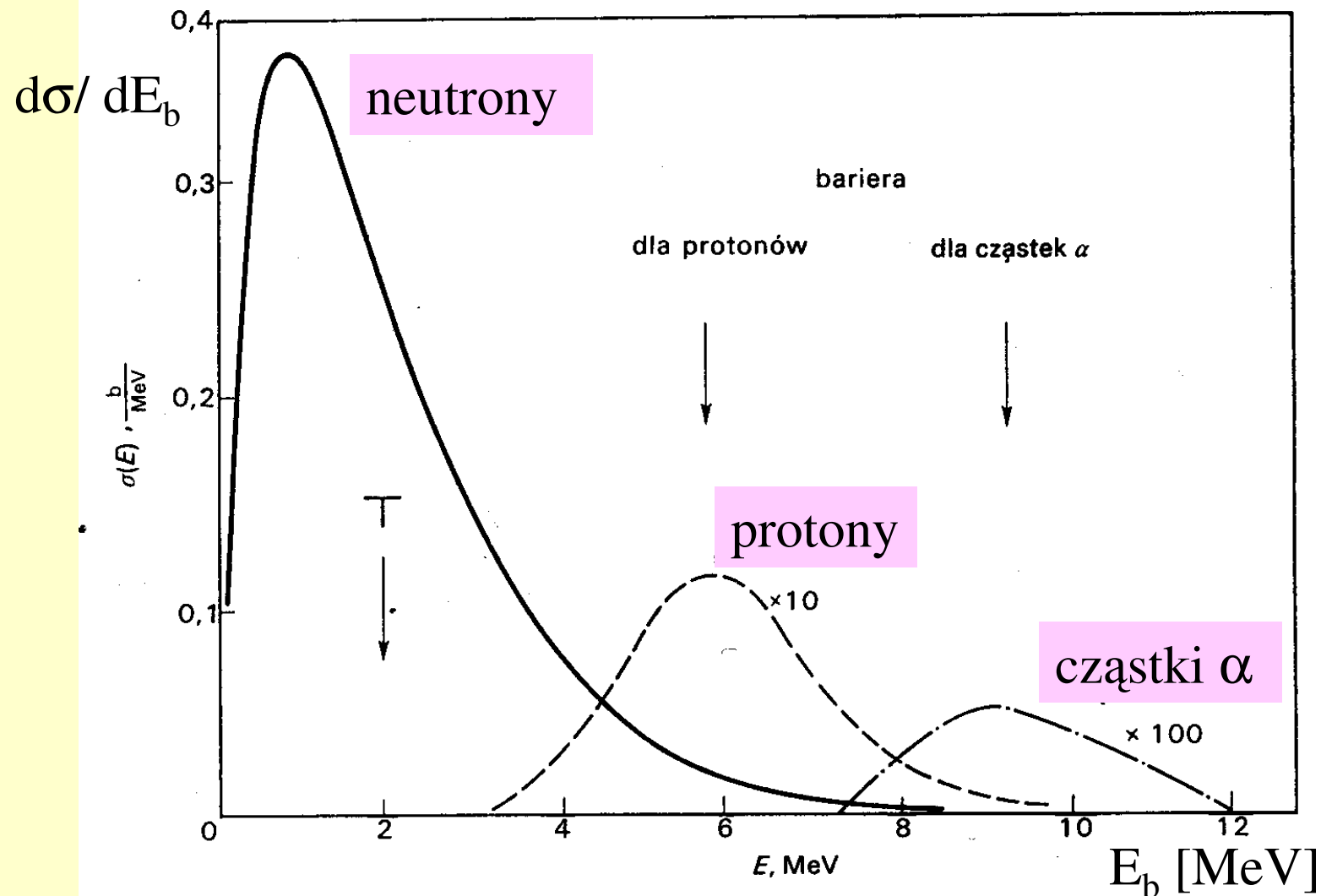
Ciepło reakcji  $X(a,b)Y$   $Q = S_a(C) - S_b(C)$

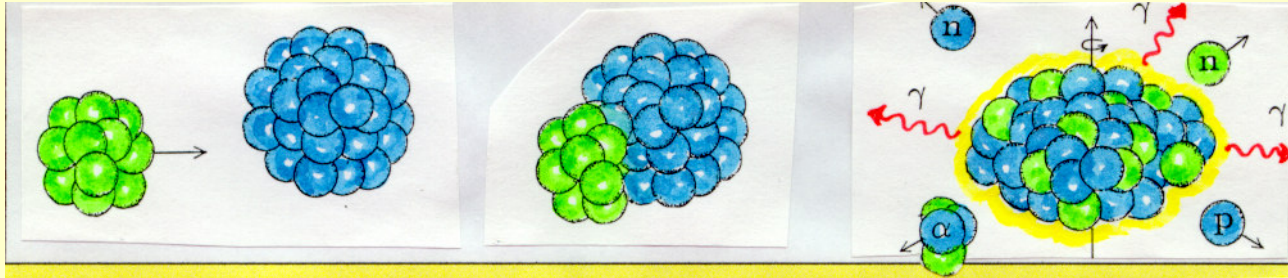
# Widmo energetyczne neutronów emitowanych z jądra złożonego



- a) przejście do stanu podstawowego Y
- b) przejście do dyskretnych stanów wzbudzonych
- c) przejście do stanów w obszarze zachodzących na siebie poziomów jądra Y

# Widmo energetyczne emitowanych cząstek



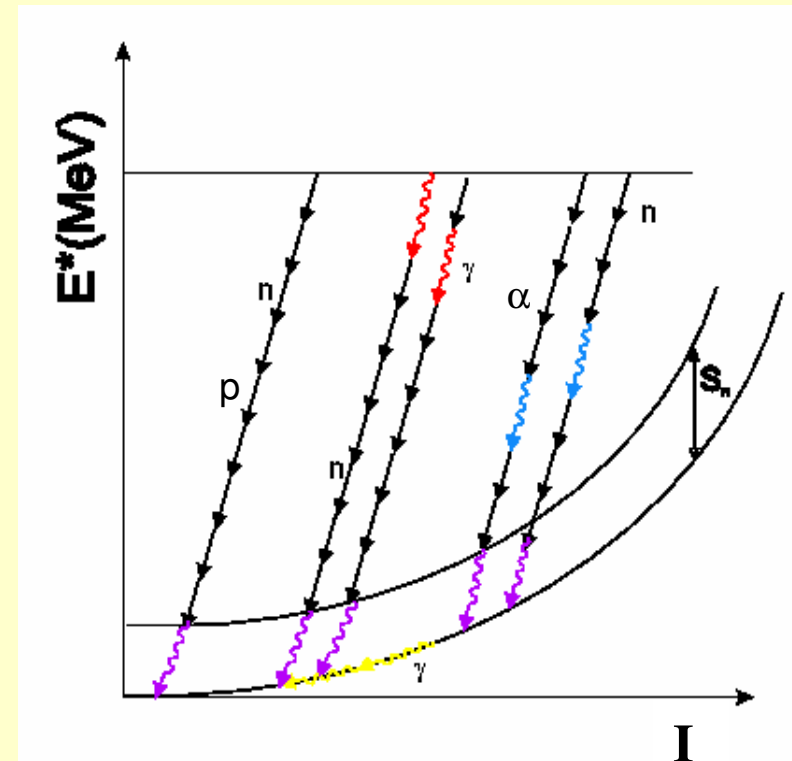


## Reakcja fuzji ciężkich jonów

Wytwarzanie jąder w stanach wzbudzonych o wysokiej energii wzbudzenia

$I$  - spin jądra  $C^*$

$J$  - moment bezwładności  $C^*$

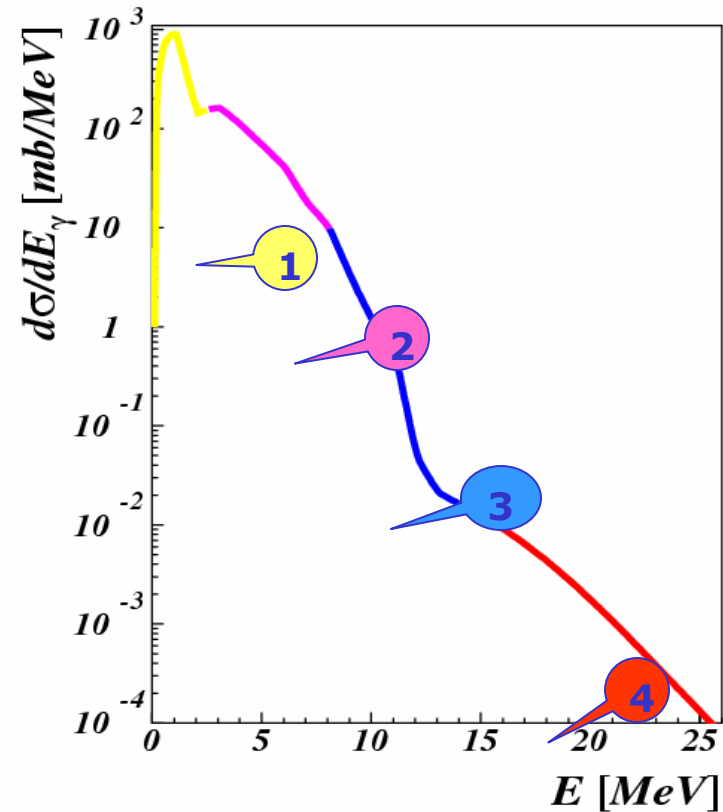
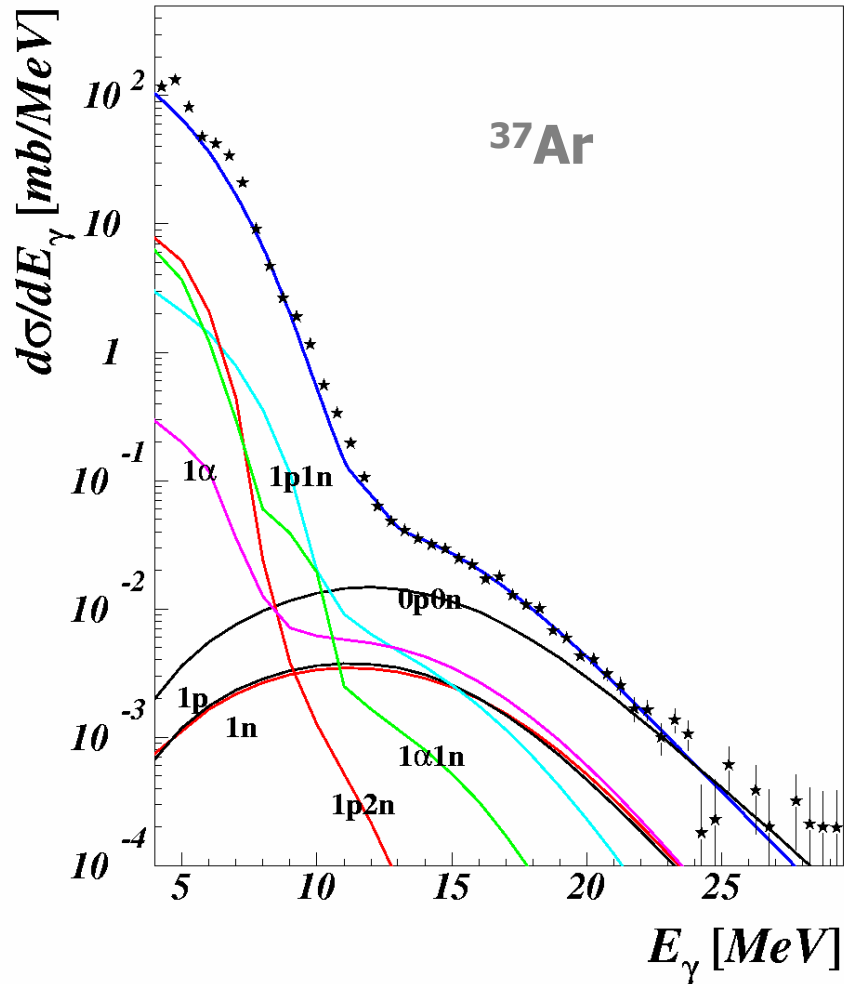


$$E_{rot} = I(I+1)\hbar^2/(2J)$$

Linia yrast



# Widmo energetyczne emitowanych kwantów $\gamma$



1. Widmo ciągłe - skala logarytmiczna
2. Brak izolowanych linii

# Model statystyczny jądra złożonego

## 1. Gęstość poziomów jądrowych

dla dużej  $E^*$  - duża liczba zachodzących na siebie poziomów

gęstość poziomów jądrowych  $\rho(E^*)$  - liczba stanów na jednostkę energii wzbudzenia  $E^*$

$$\rho(E^*) \approx \exp(\sqrt{a E^*})$$

2. Obliczenia przekroju czynnego na utworzenie i rozpad jądra złożonego – z uwzględnieniem wzbudzenia i rozpadu gigantycznych rezonansów

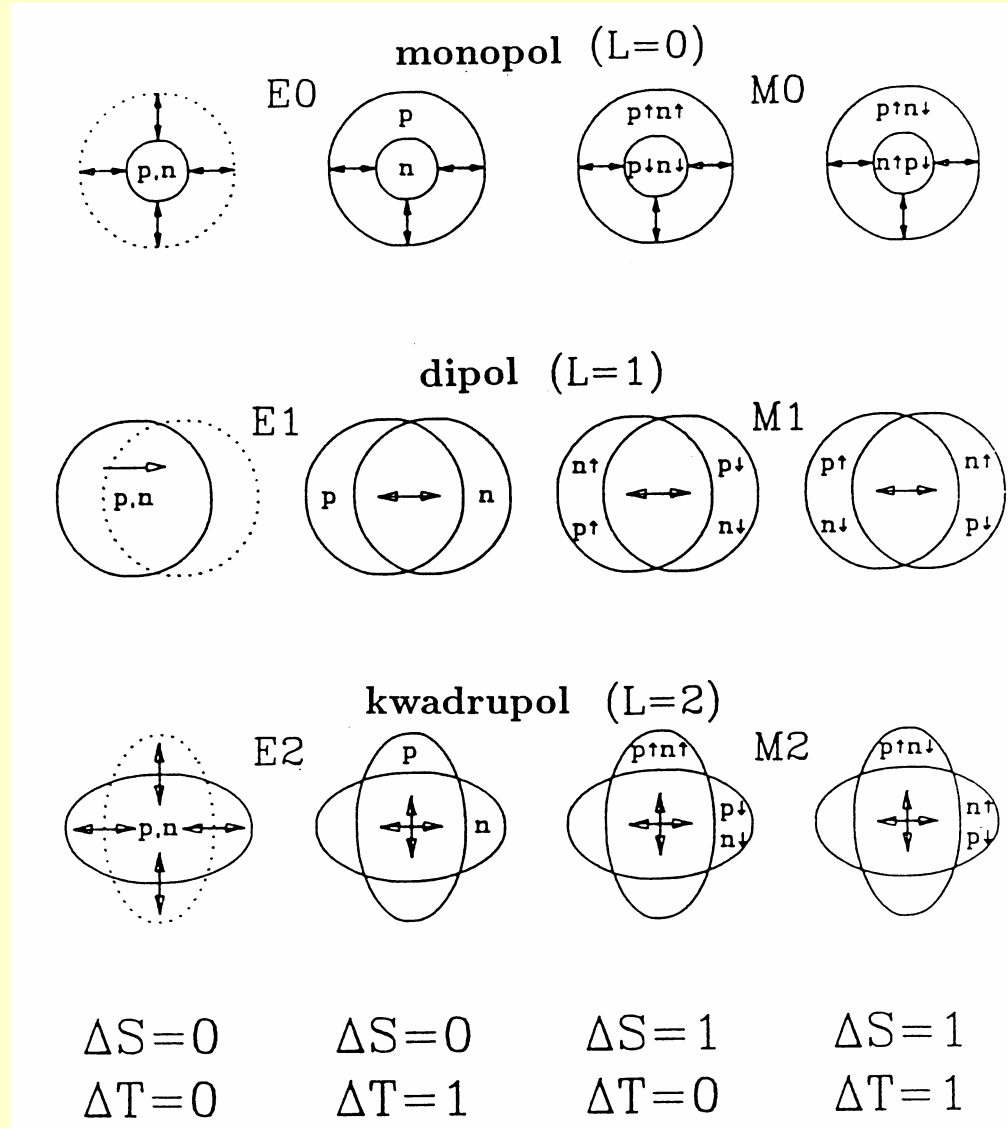
# Gigantyczne rezonanse (GR)

Wzbudzenia kolektywne jądra, charakteryzujące się małą amplitudą i dużą częstością drgań

## **Podział GR ze względu na:**

- a) rozkład materii jądrowej: GR monopolowy, dipolowy, kwadrupolowy, ..
- b) drgania nukleonów o przeciwnie skierowanych spinach: GR elektryczny i magnetyczny
- c) drgania neutronów względem protonów (nukleonów o przeciwnie skierowanym izospinie): GR izoskalarny i izowektorowy

# Gigantyczne rezonanse (GR)



# Elektryczne Rezonanse Gigantyczne

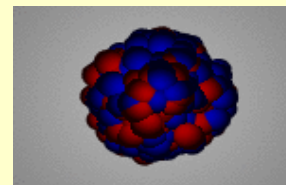
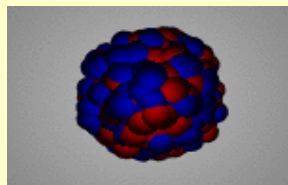
Izoskalarne

Izowektorowe

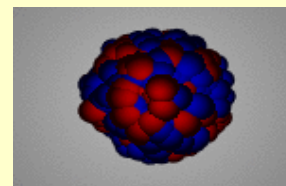
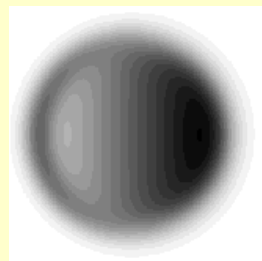
1977

1983

Monopol



Dipol

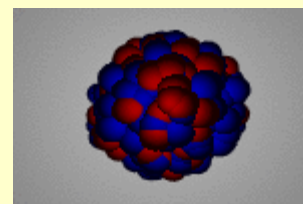
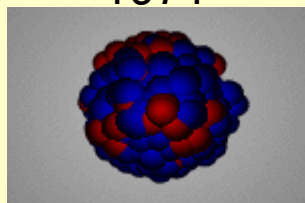


1948

1971

1980

Kwadrupol



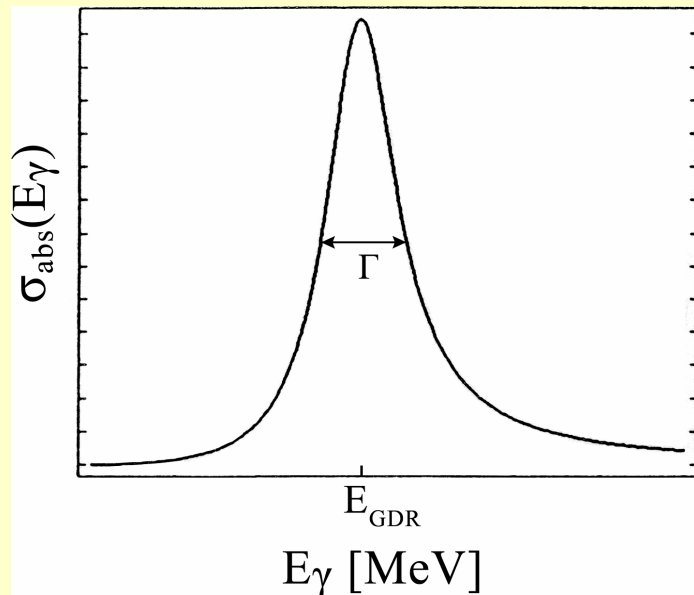
# **Gigantyczny rezonans dipolowy (GDR)**

dipolowy, elektryczny, izowektorowy

1. GDR w jądrach w stanie podstawowym
2. GDR w jądrach w stanie wzbudzonym

# Gigantyczny Rezonans Dipolowy

Gigantyczne rezonanse mogą zostać wzbudzone w zasadzie w każdym jądrze. Można je wzbudzić w jądrze w stanie podstawowym i w stanie wzbudzonym. **GDR w jądrze w stanie podstawowym wzbudza się np. poprzez bombardowanie jądra fotonami o odpowiednio wysokiej energii, zbliżonej do energii rezonansowej.** Kształt rezonansu, tzn. zależność przekroju czynnego na absorpcję fotonów  $\sigma_{abs}(E_\gamma)$  przez jądro opisuje się funkcją Lorentza z odpowiednimi **parametrami GDR: nasileniem  $S$ , energią rezonansu  $E_{GDR}$  i szerokością rezonansu  $\Gamma$ .**



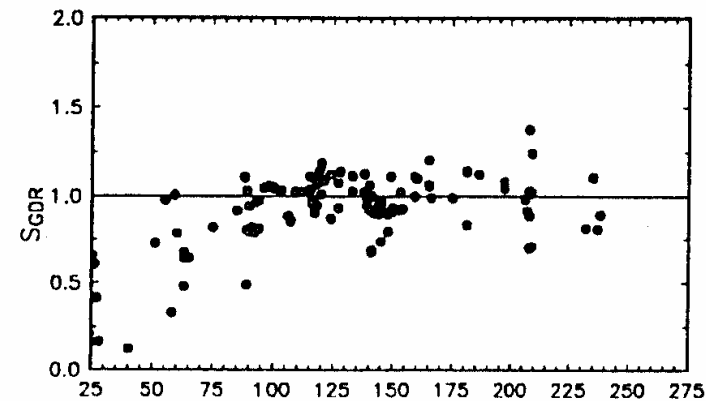
$$\sigma_{abs}(E_\gamma) = \frac{4\pi e^2 \hbar NZ}{mc A} \frac{SE_\gamma^2 \Gamma}{(E_{GDR}^2 - E_\gamma^2)^2 + E_\gamma^2 \Gamma^2}$$

# Gigantyczny Rezonans Dipolowy

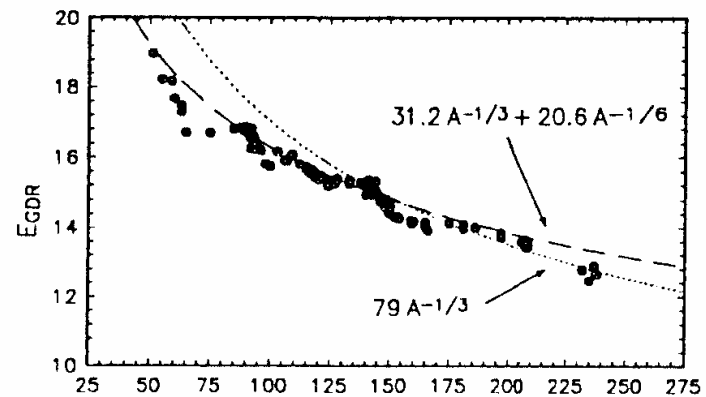
**Parametry GDR**  
dla różnych jąder  
w stanie  
podstawowym

Zaobserwowano, że  
energia  $E_{\text{GDR}} \sim A^{-1/3}$ ,  
szerokość  $\Gamma$  jest większa  
dla jąder zdeformowanych  
niż dla jąder sferycznych!

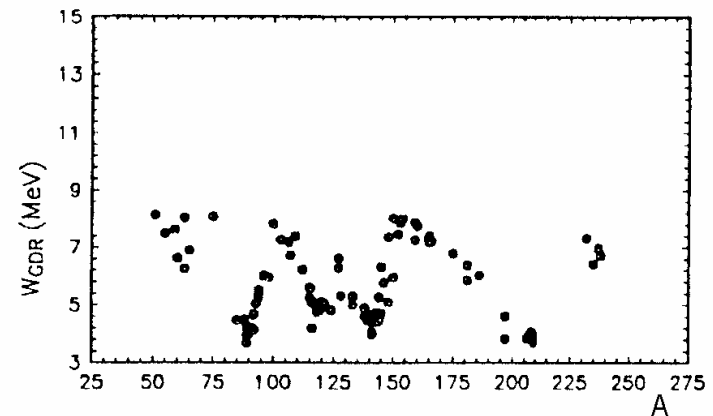
S



$E_{\text{GDR}}$



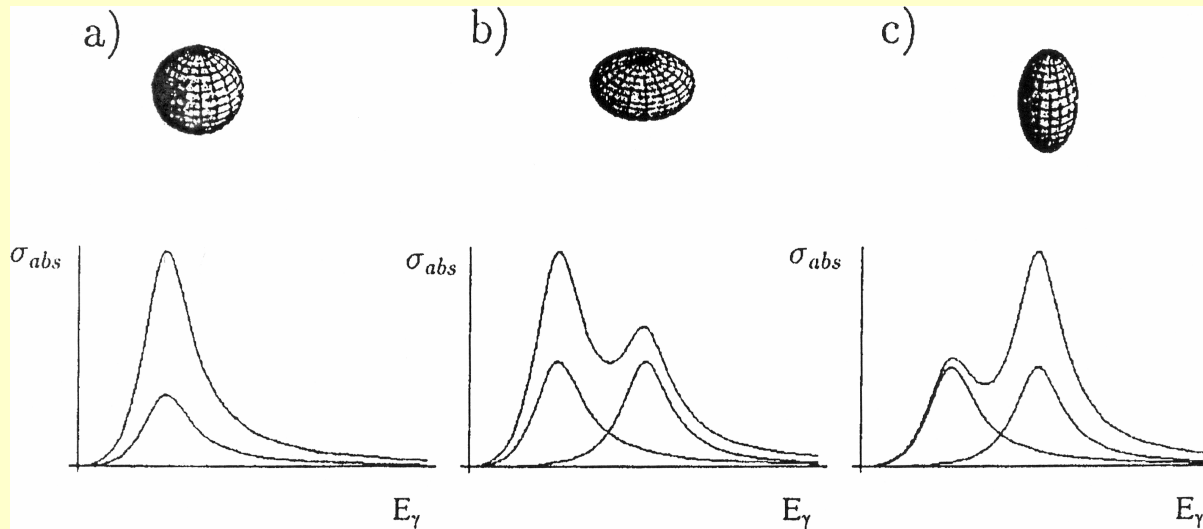
$\Gamma$





# GDR a deformacja jądra w stanie podstawowym

Wzbudzenie GDR w jądrze zdeformowanym można rozpatrywać jako złożenie drgań wzdłuż 3 głównych osi jądra, a kształt rezonansu GDR można przedstawić jako złożenie 3 funkcji Lorentza. Ze względu na proporcjonalność energii rezonansu  $E_{\text{GDR}}$  do odwrotności rozmiaru jądra  $1/R$  w kierunku zachodzenia drgań, kształt rezonansu GDR w jądrze zdeformowanym odzwierciedla kształt jądra.



$$R_1 = R_2 = R_3$$

SPHERICAL

$$S_2/S_1 = 1$$

$$R_1 = R_2 > R_3$$

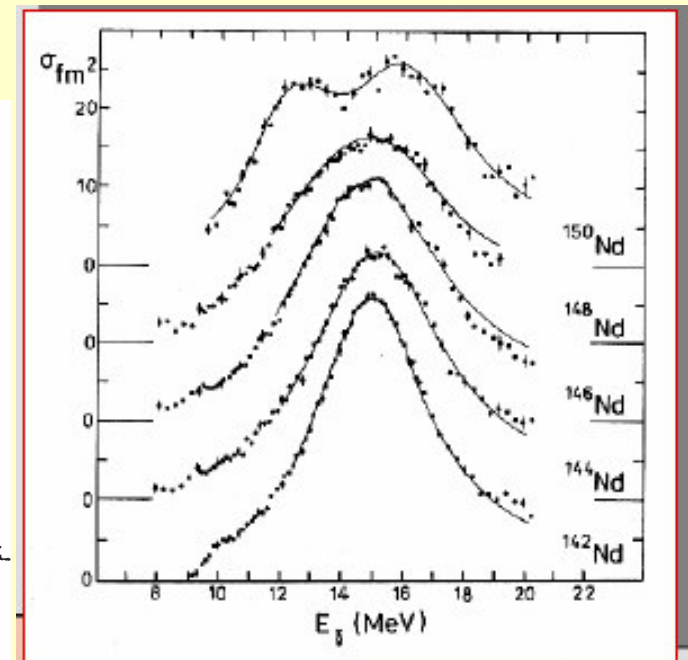
OBLATE

$$S_2/S_1 = 1/2$$

$$R_1 = R_2 < R_3$$

PROLATE

$$S_2/S_1 = 2$$



# Czego można się dowiedzieć o jądrach badając GDR

1. Badanie ewolucji kształtu jądra
2. Badanie zmieszania izospinowego poziomów jądrowych

# 1. Badanie ewolucji kształtu jądra

$\beta$  = parametr deformacji

$\beta=0$  dla sfery

$\beta=0.6$  dla a:b=2:1

$\beta=0.9$  dla a:b=3:1

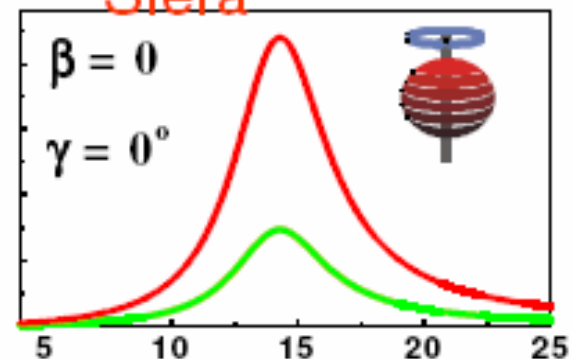
$\gamma$  – parametr nieosiowości

$\gamma=0^\circ$  dla cygara

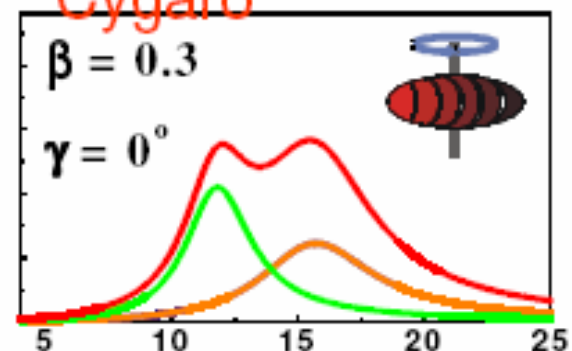
$\gamma=60^\circ$  dla dysku

$\gamma=30^\circ$  dla 3-osi

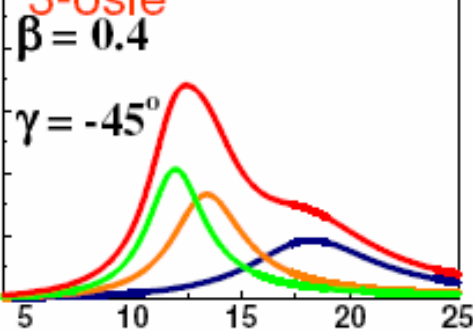
Sfera



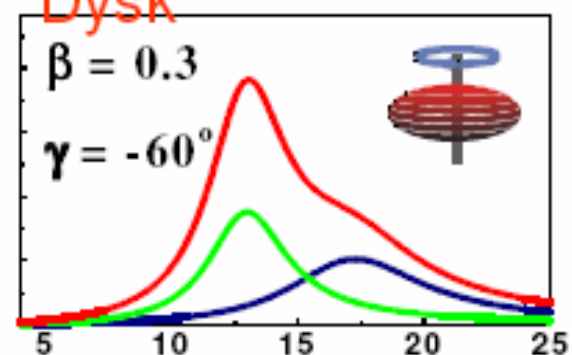
Cygaro



3-osie



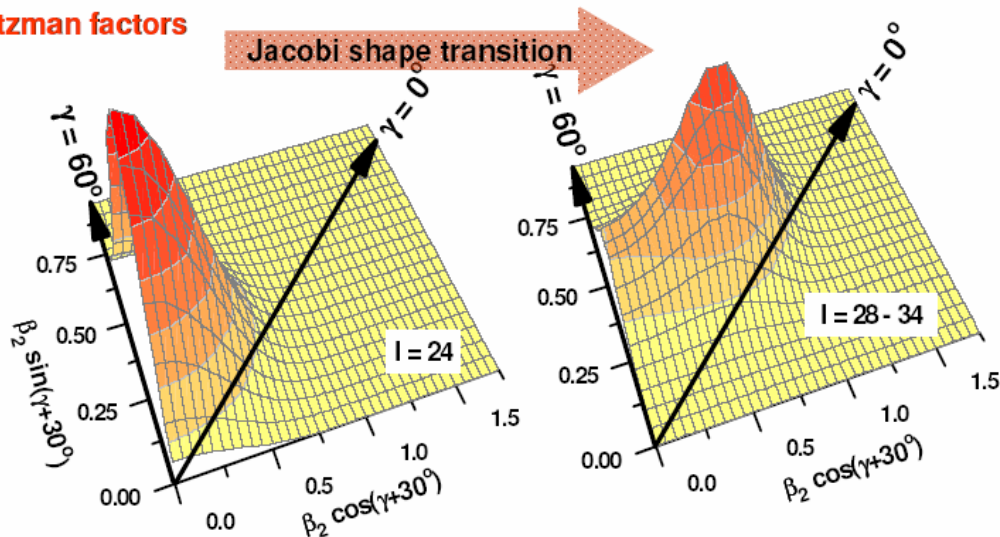
Dysk



# Termiczne fluktuacje kształtu jąder

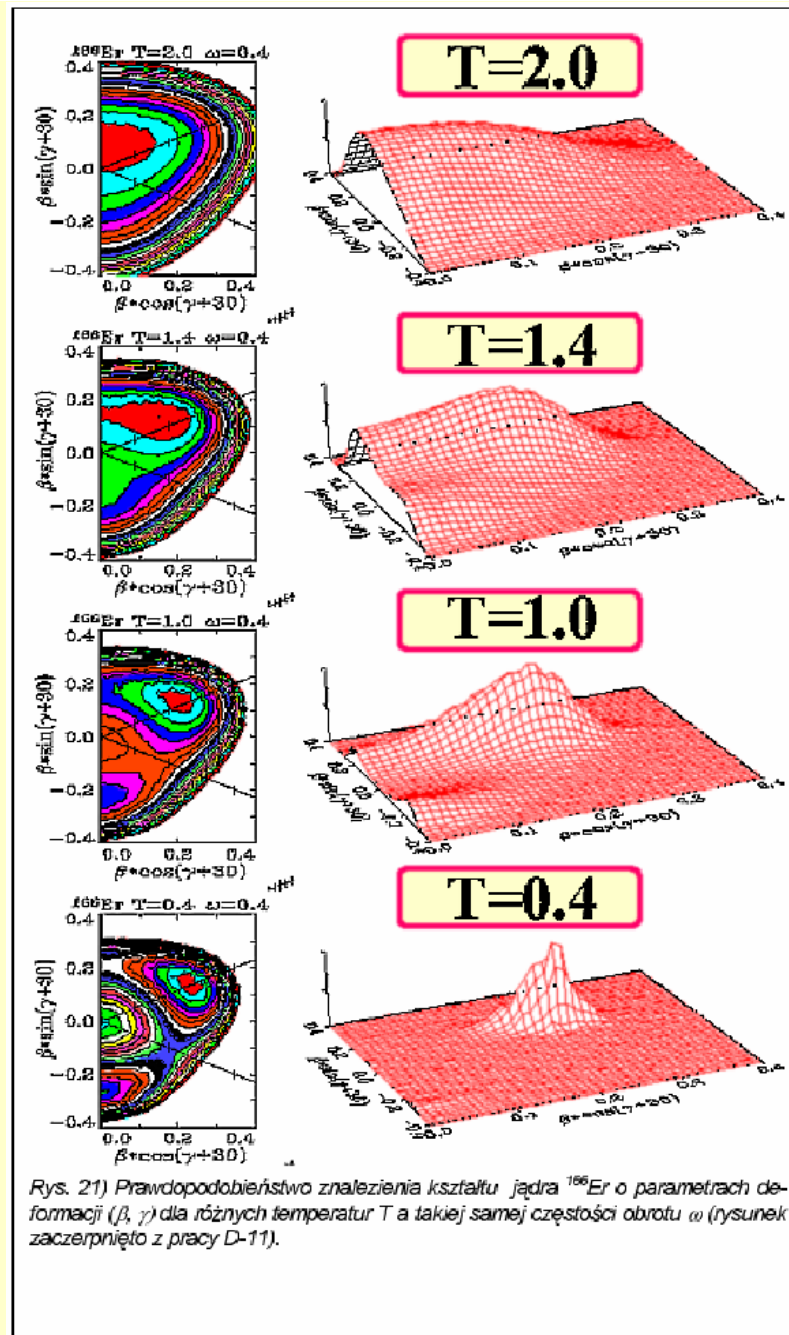
Boltzman factors

Jacobi shape transition



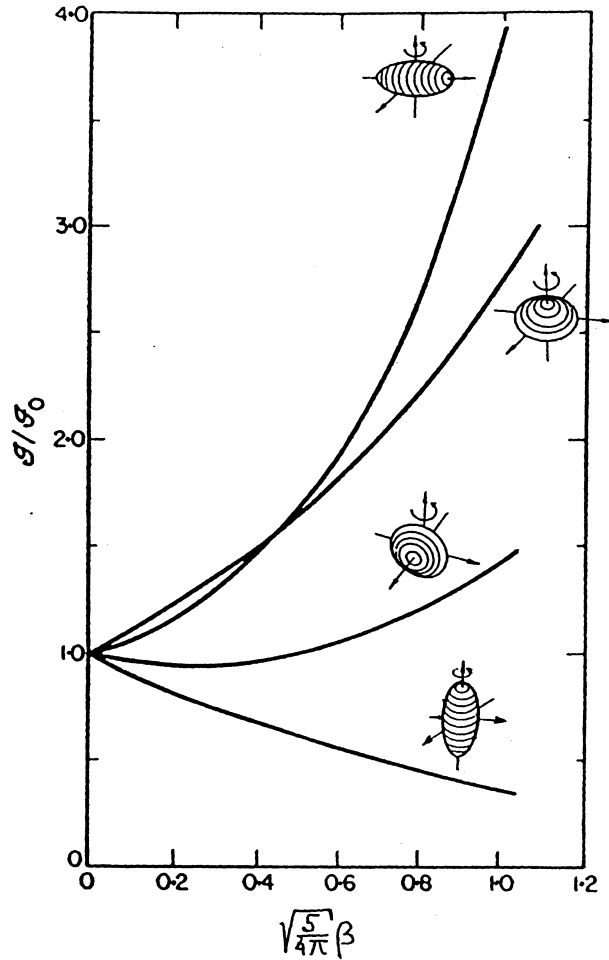
$\beta_2$  - opisuje wielkość odkształcenia,  
 $\gamma$  - opisuje formę odkształcenia

Dla  $\gamma = 0$   $R = R_0 [1 + \beta_2 Y_2^0(\vartheta, \varphi)]$



Rys. 21) Prawdopodobieństwo znalezienia kształtu jądra  $^{166}\text{Er}$  o parametrach deformacji  $(\beta, \gamma)$  dla różnych temperatur  $T$  a takiej samej częstości obrotu  $\omega$  (rysunek zaczerpnięty z pracy D-11).

# Badanie ewolucji kształtu wysoko wzbudzonych jąder $^{46}\text{Ti}$



$$E_{rot} = I(I+1)\hbar^2/(2J)$$

## Niestabilność Jacobiego

Obiekty astronomiczne (gwiazdy, planety)	Jądro atomowe
masa Słońca $\sim 1.99 \cdot 10^{30}$ kg	masa $\sim 1.67A \cdot 10^{-27}$ kg
promień Słońca (średni) $\sim 6.96 \cdot 10^8$ m	promień $R \sim 1.2A \cdot 10^{-15}$ m
długozasięgowe siły grawitacyjne	krótkozasięgowe siły jądrowe
Prawa mechaniki klasycznej	Prawa mechaniki kwantowej

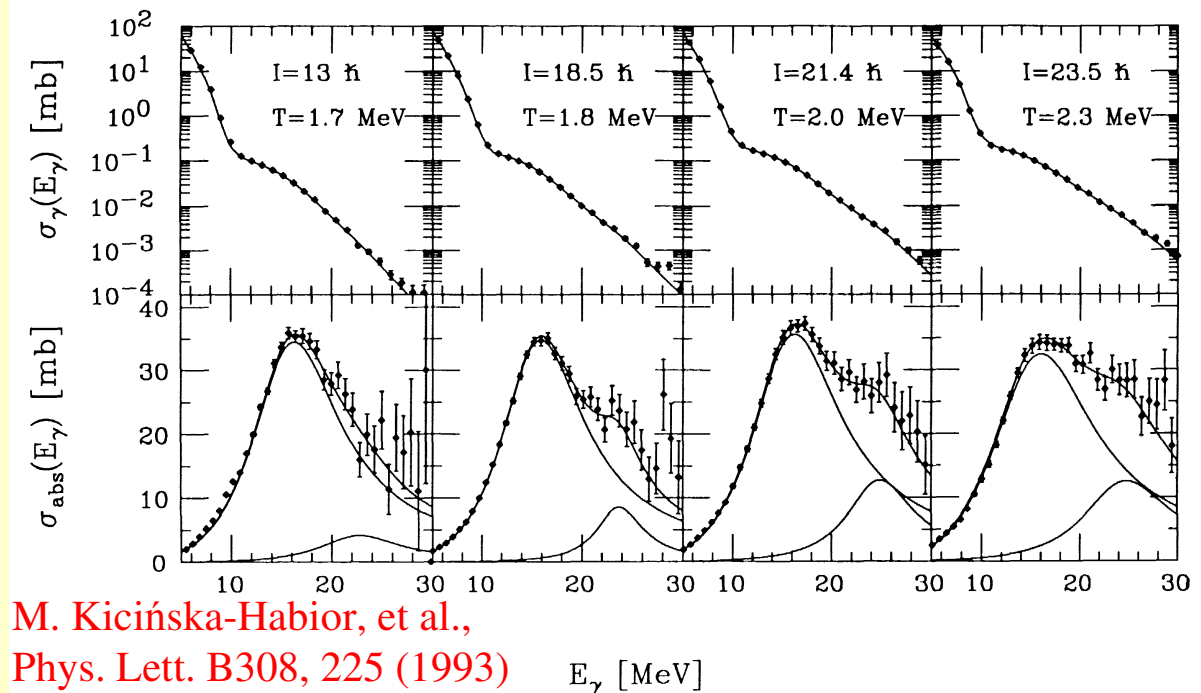
# Badanie kształtu jąder gorących

Wysokoenergetyczne promieniowanie gamma pochodzi z rozpadu GDR. Niesie więc informację o strukturze samego wzbudzenia gigantycznego rezonansu dipolowego, a także o silnie wzbudzonym i szybko obracającym się jądrze. Okazuje się, że z pomiarów tego promieniowania można uzyskać bardzo ciekawe informacje o własnościach jąder gorących np. o kształcie jądra i o jego zmianach przy zmianie temperatury (energii wzbudzenia) i szybkości obrotu (spinu).

Wyniki otrzymane na wiązce w NPL w Seattle (**eksperyment inkluzywny**)  
Widma energetyczne promieniowania  $\gamma$  i funkcje nasilenia GDR dla reakcji  
 $^{18}\text{O} + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^{45}\text{Sc}$  przy  $E_p/A = 2.5, 4, 5$  i  $6$  MeV/u

## Zaobserwowano:

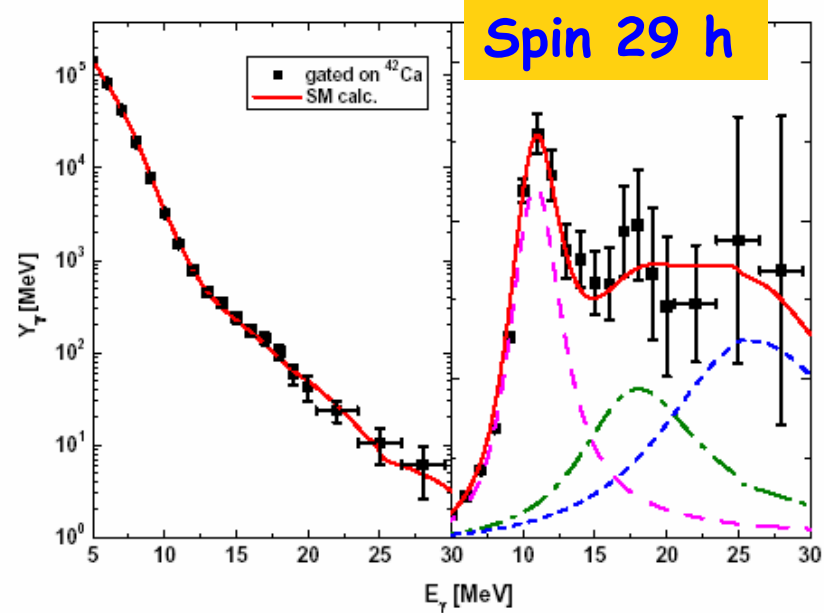
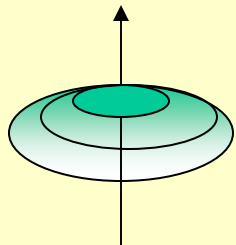
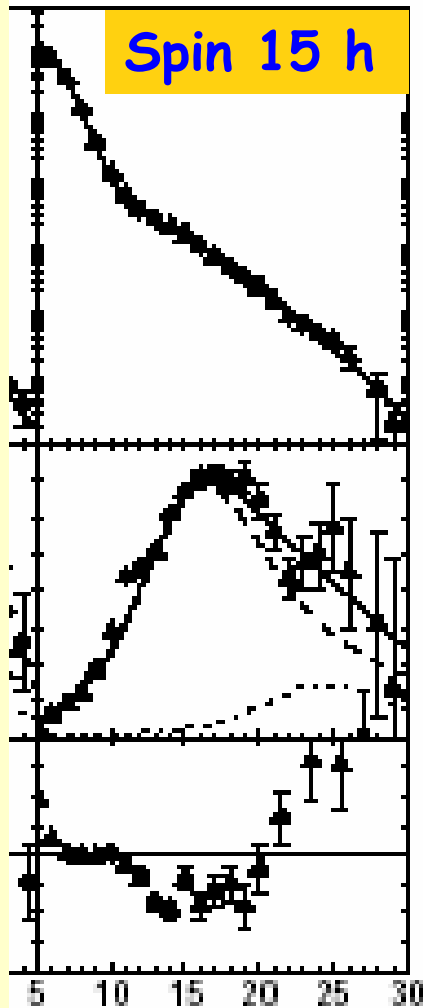
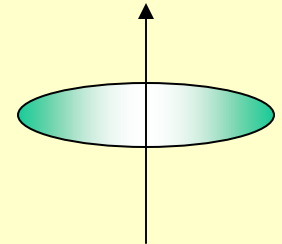
- silny wzrost deformacji jądra  $^{45}\text{Sc}$  ze wzrostem spinu,
- przewidywaną teoretycznie, lecz dotąd nie obserwowaną zmianę kształtu jądra ze spłaszczonego na wydłużony, tzw. przejście fazowe Jacobiego



M. Kicińska-Habior, et al.,  
Phys. Lett. B308, 225 (1993)

$E_\gamma$  [MeV]

# Badanie ewolucji kształtu wysoko wzbudzonych jąder $^{46}\text{Ti}$



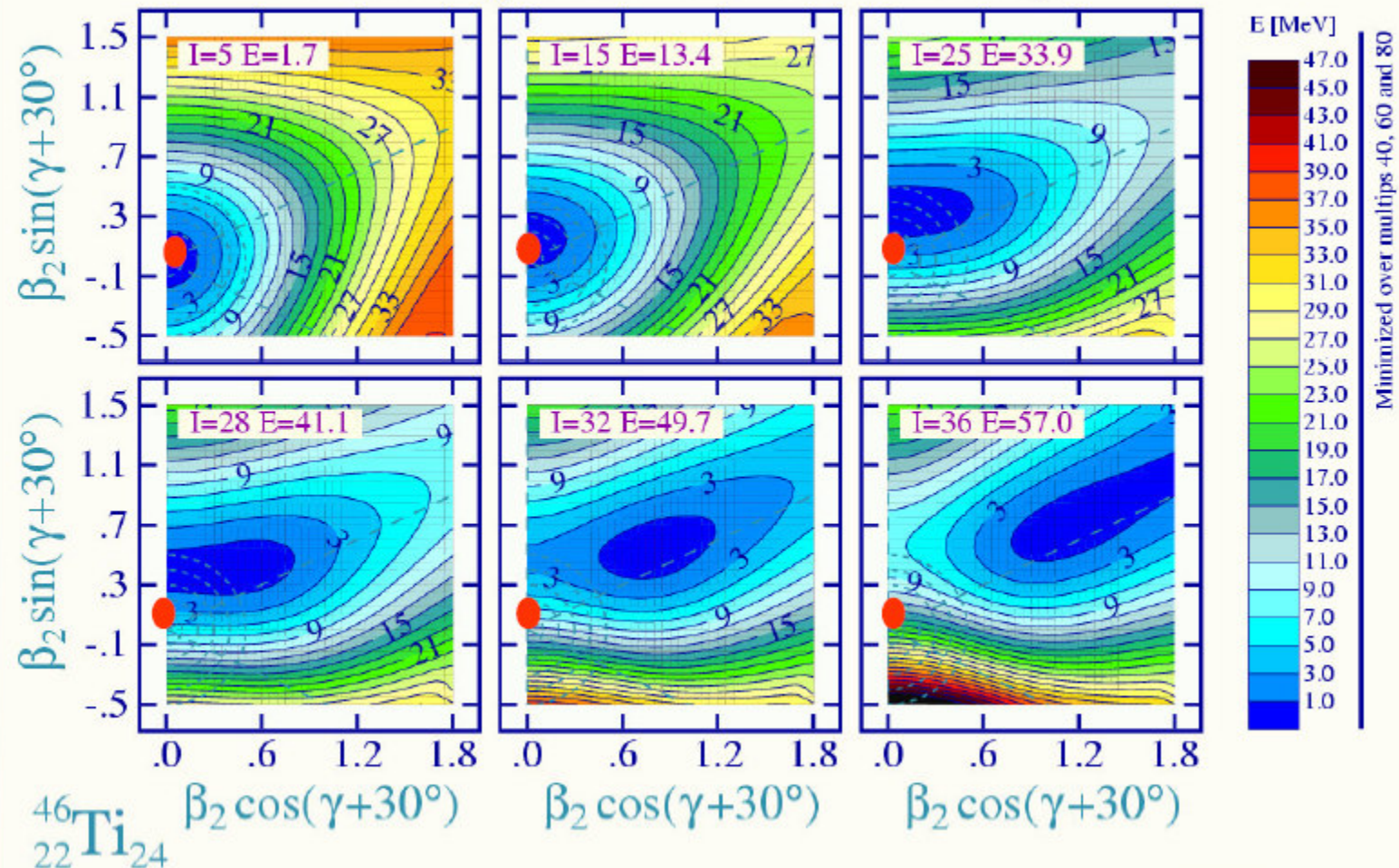
$105 \text{ MeV } ^{18}\text{O} + ^{28}\text{Si} \Rightarrow ^{46}\text{Ti}^*$   
 $I_{\text{max}} \approx 35 \hbar, E^* = 88 \text{ MeV}$

(Eksperyment ekskluzywny)

# Badanie ewolucji kształtu wysoko wzbudzonych jąder $^{46}\text{Ti}$

Total energy surfaces from LSD model for  $^{46}\text{Ti}$

Critical Spin and the Jacobi Instability





# Metodyka eksperymentów

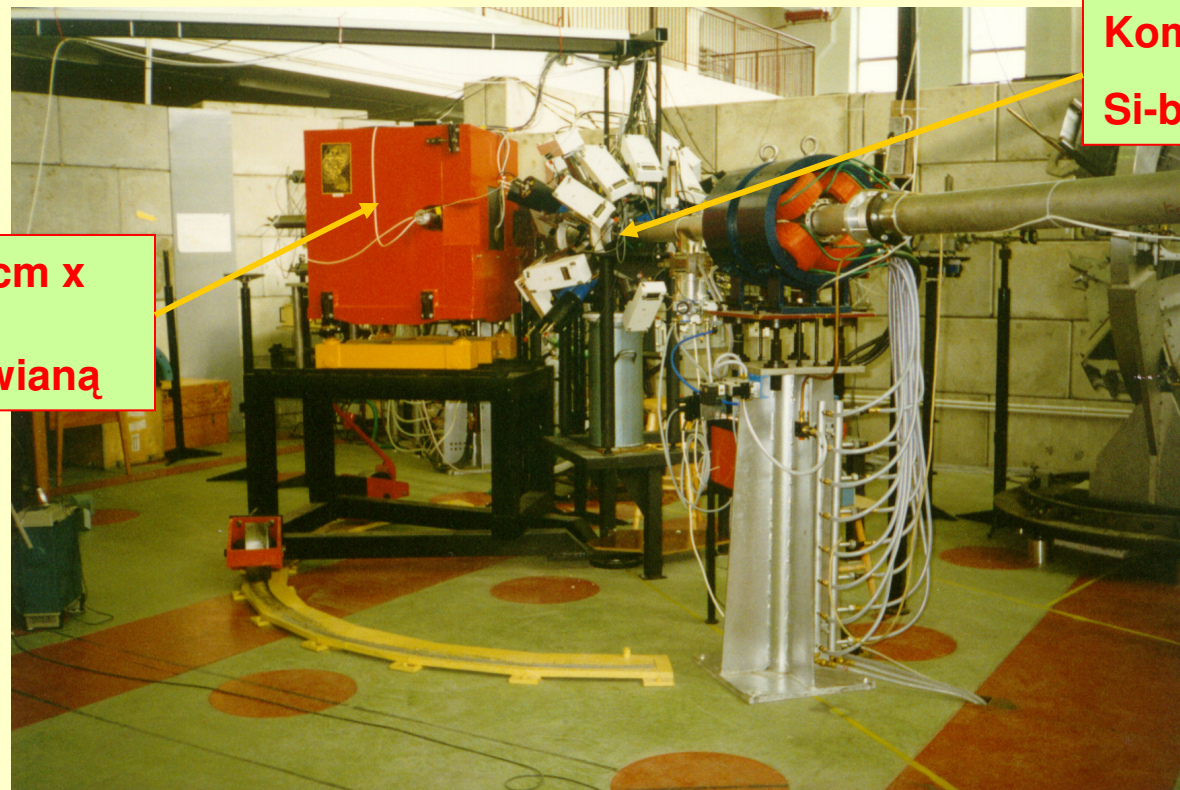
1. Zmniejszenie tła promieniowania kosmicznego - osłona antykomptonowska
2. Odróżnienie sygnałów od rejestracji neutronów i kwantów  $\gamma$  - metoda czasu przelotu
3. Wydzielenie zdarzeń odpowiadających rozpadowi jądra złożonego w danym przedziale spinów – filtr krotności
4. Wydzielenie kanału (grupy kanałów) reakcji – detekcja cząstek i/lub niskoenergetycznych kwantów  $\gamma$

Eksperyment inkluzywny (prosty)

Eksperyment ekskluzywny (koincydencyjny)

## Układ eksperymentalny JANOSIK

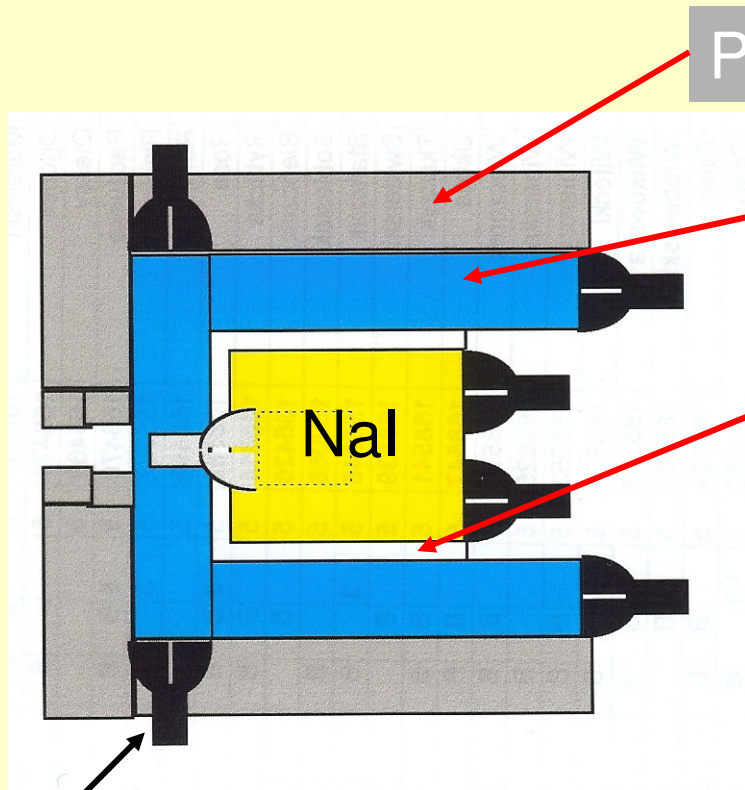
Do pomiaru wysokoenergetycznego ( $E=5-50$  MeV) promieniowania gamma używa się układów spektrometrycznych umożliwiających oddzielenie zdarzeń wywołanych przez kwanty gamma pochodzące z reakcji od zdarzeń wywołanych przez inne promieniowanie: neutrony, promieniowanie kosmiczne itp. Takim układem jest **układ JANOSIK zbudowany przez naszą grupę przy Warszawskim Cyklotronie w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego**



Detektor NaI (25cm x 29 cm) z osłoną plastikową i ołowianą

Komora tarczowa i Si-ball

# Detektor NaI z osłonami

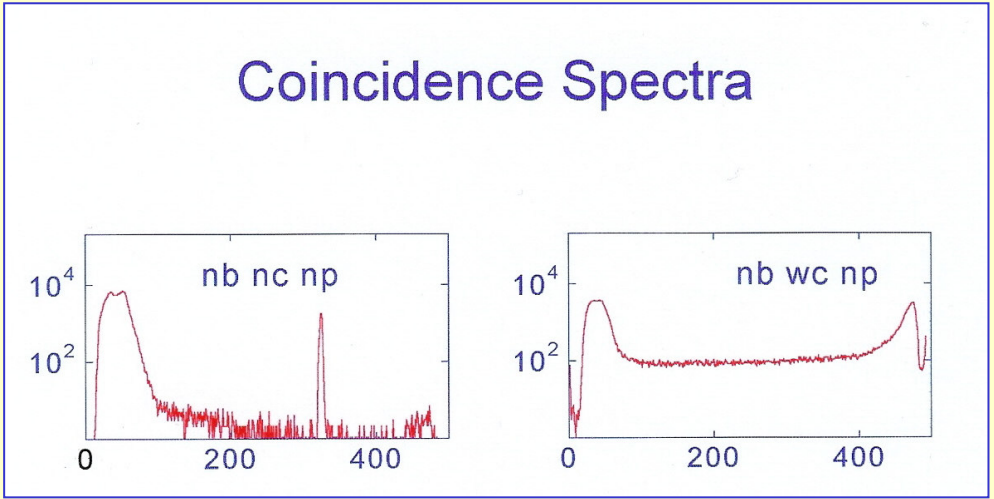


Pb

Scyntylator plastikowy

NaI

fotopowielacz



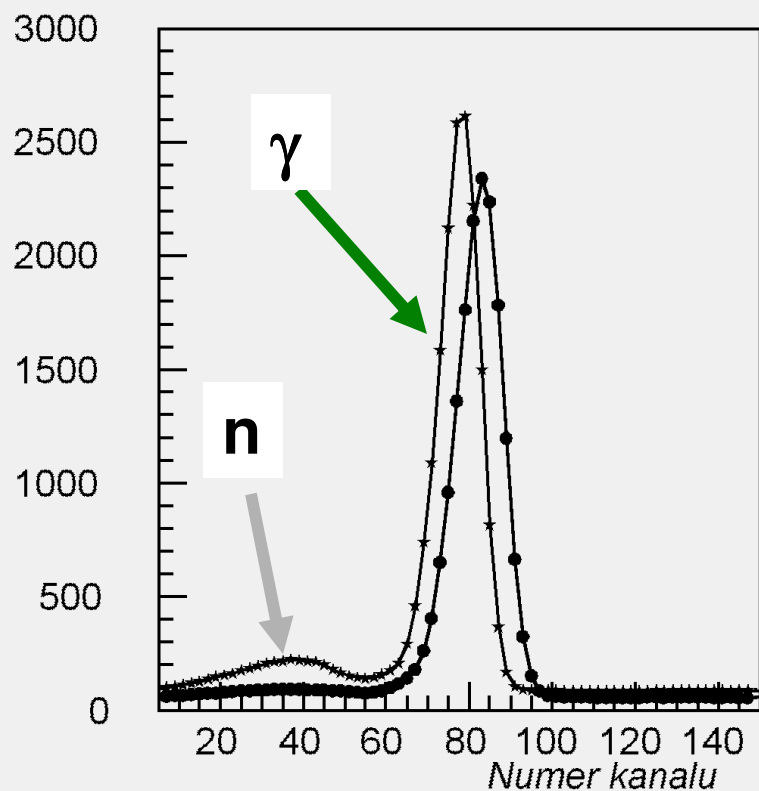
Bez promieniowania kosmicznego

Z promieniowaniem kosmicznym

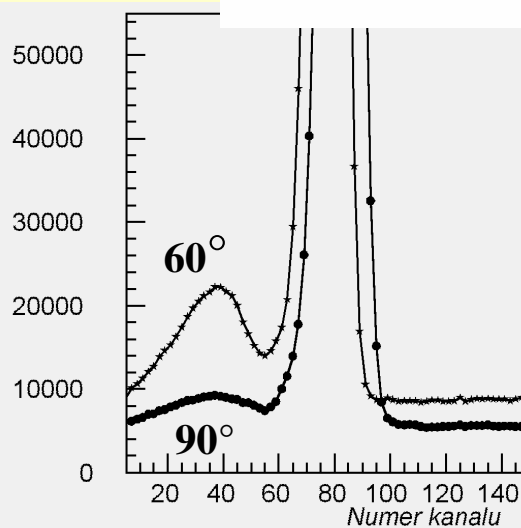
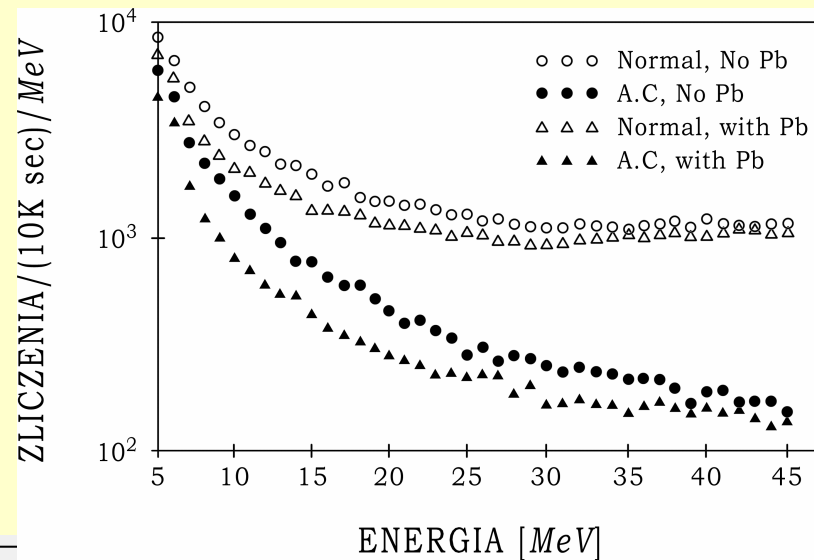
# Charakterystyki układu JANOSIK

Widmo czasu przelotu

dla  $^{20}\text{Ne}+^{12}\text{C}$  5.2 MeV/u

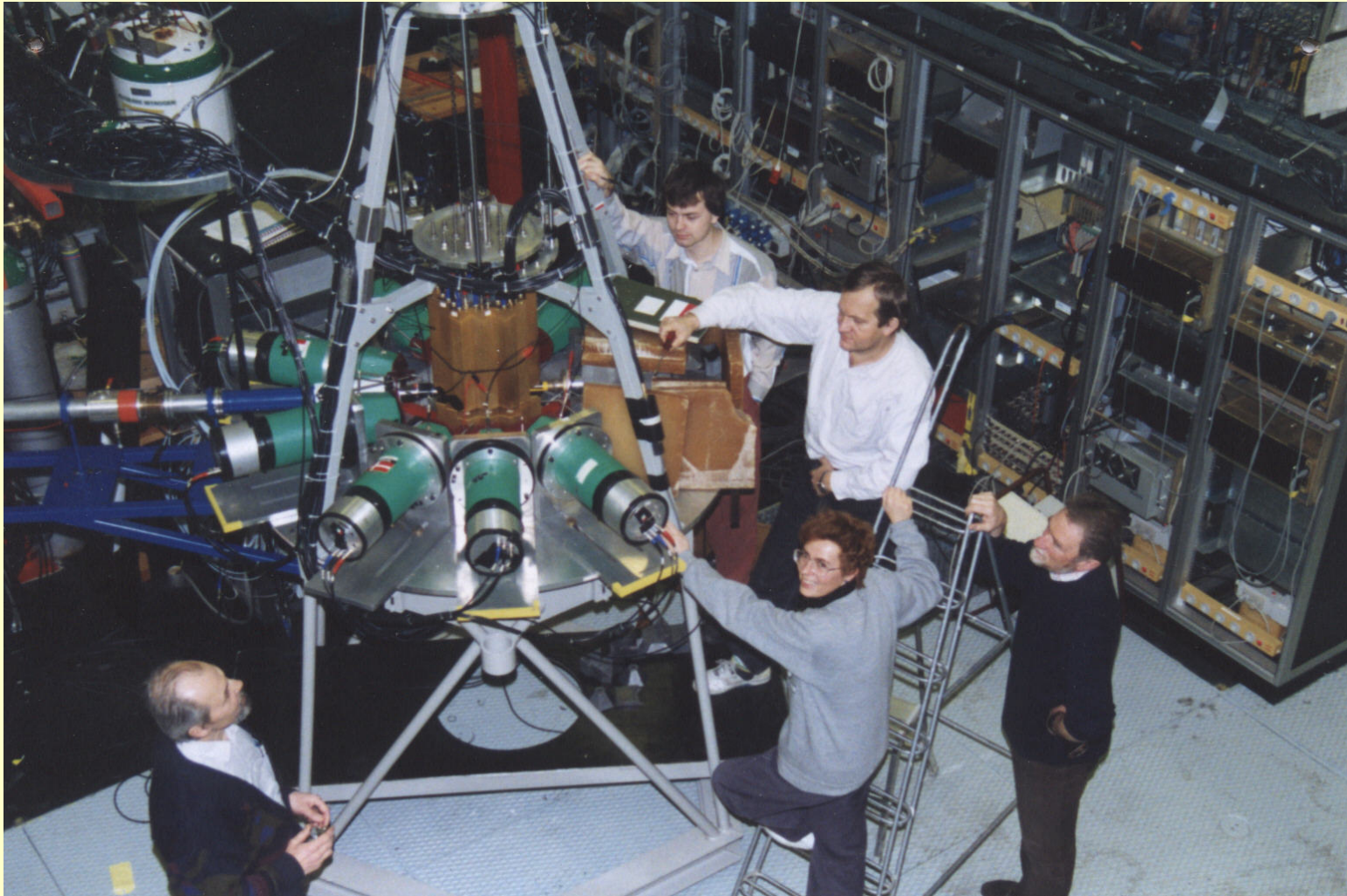


Skuteczność osłony ołowianej i plastikowej

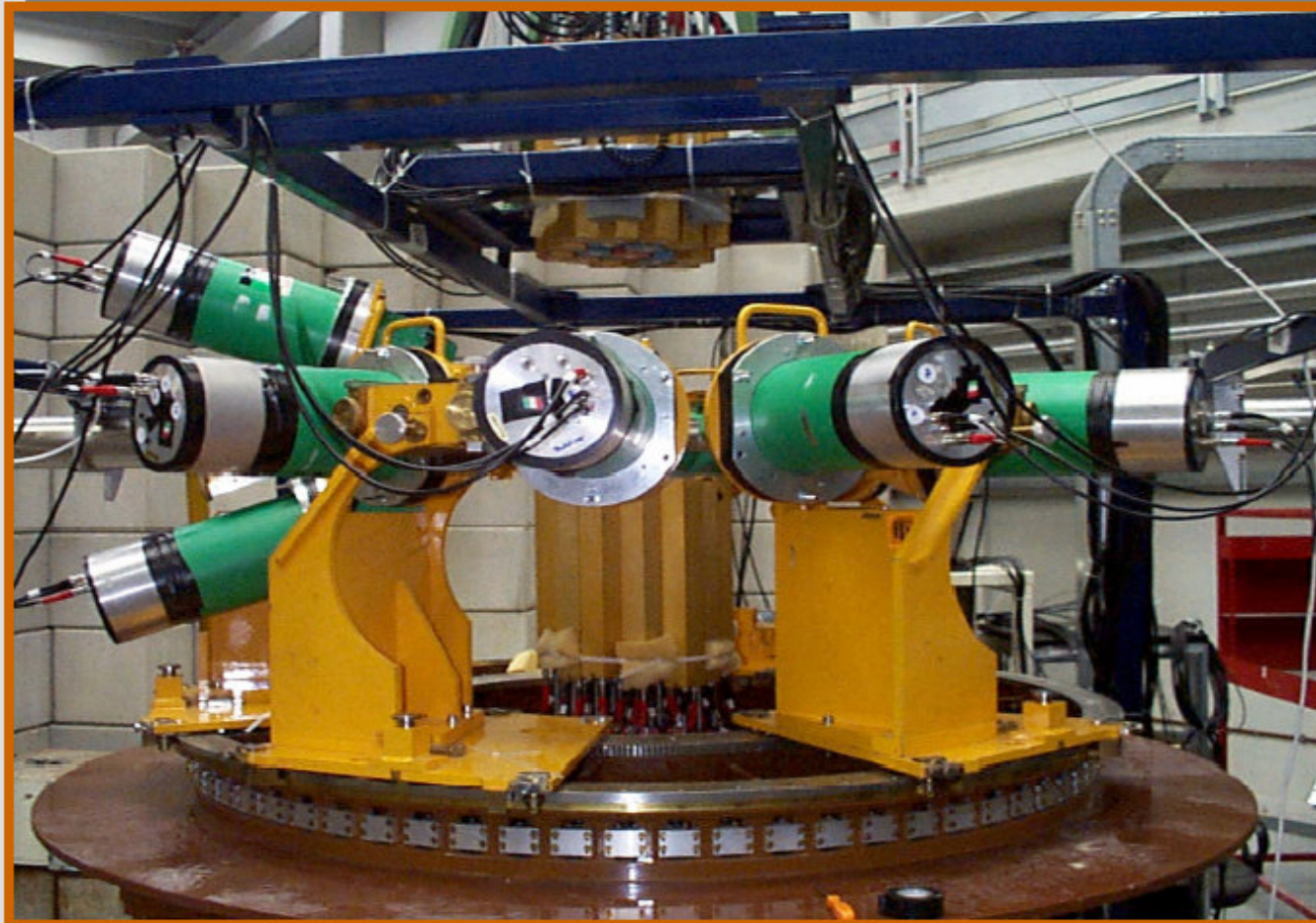


Wydzielenie zdarzeń odpowiadających rozpadowi jądra złożonego w danym przedziale spinów

## Układ HECTOR z filtrem krotności Helena

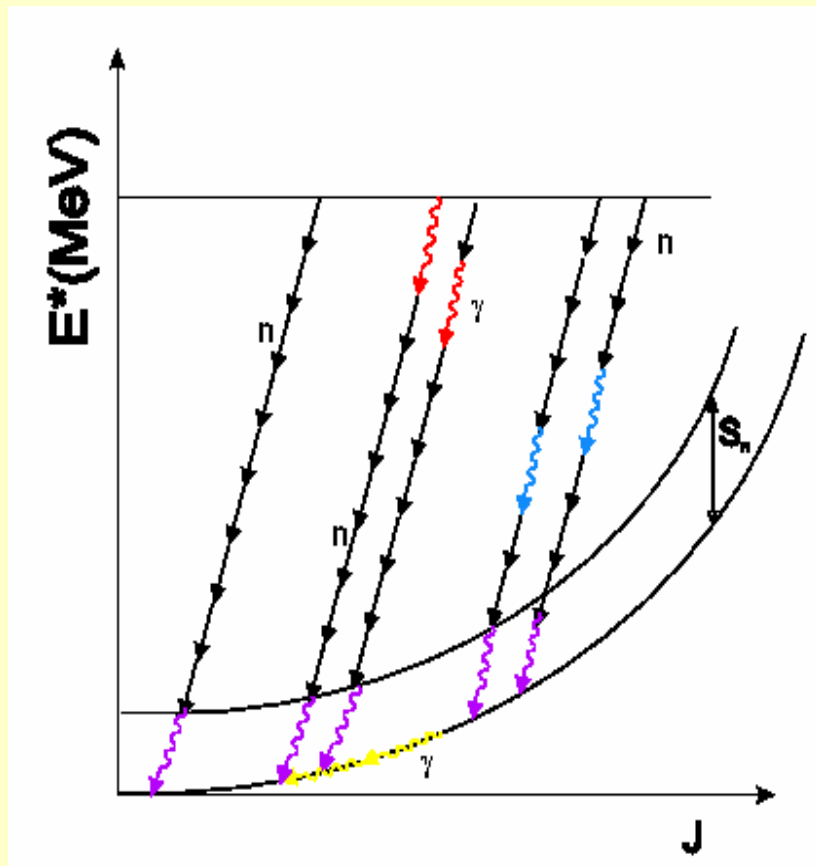


Wydzielenie zdarzeń odpowiadających rozpadowi jądra złożonego w danym przedziale spinów



**Układ HECTOR z filtrem krotności Helena**

Wydzielenie zdarzeń odpowiadających rozpadowi jądra złożonego w danym przedziale spinów

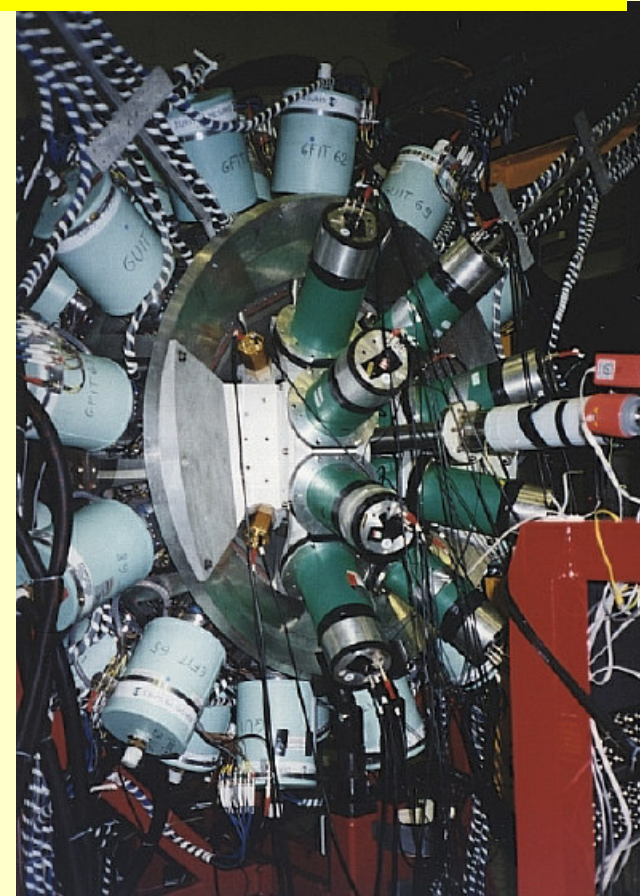
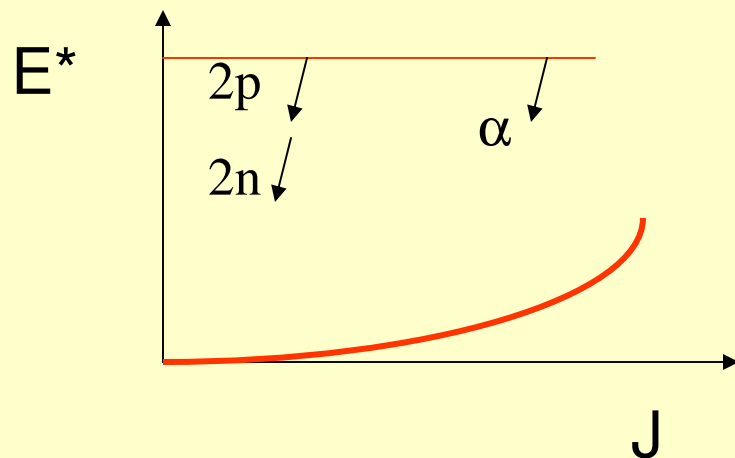
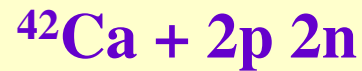


Mierzona krotność kwantów  $\gamma$

$$\langle k \rangle = k_{E1} + \frac{1}{2}(l_{CN} - k_{E1})$$

Wydzielenie kanału (grupy kanałów) reakcji – detekcja niskoenergetycznych kwantów  $\gamma$

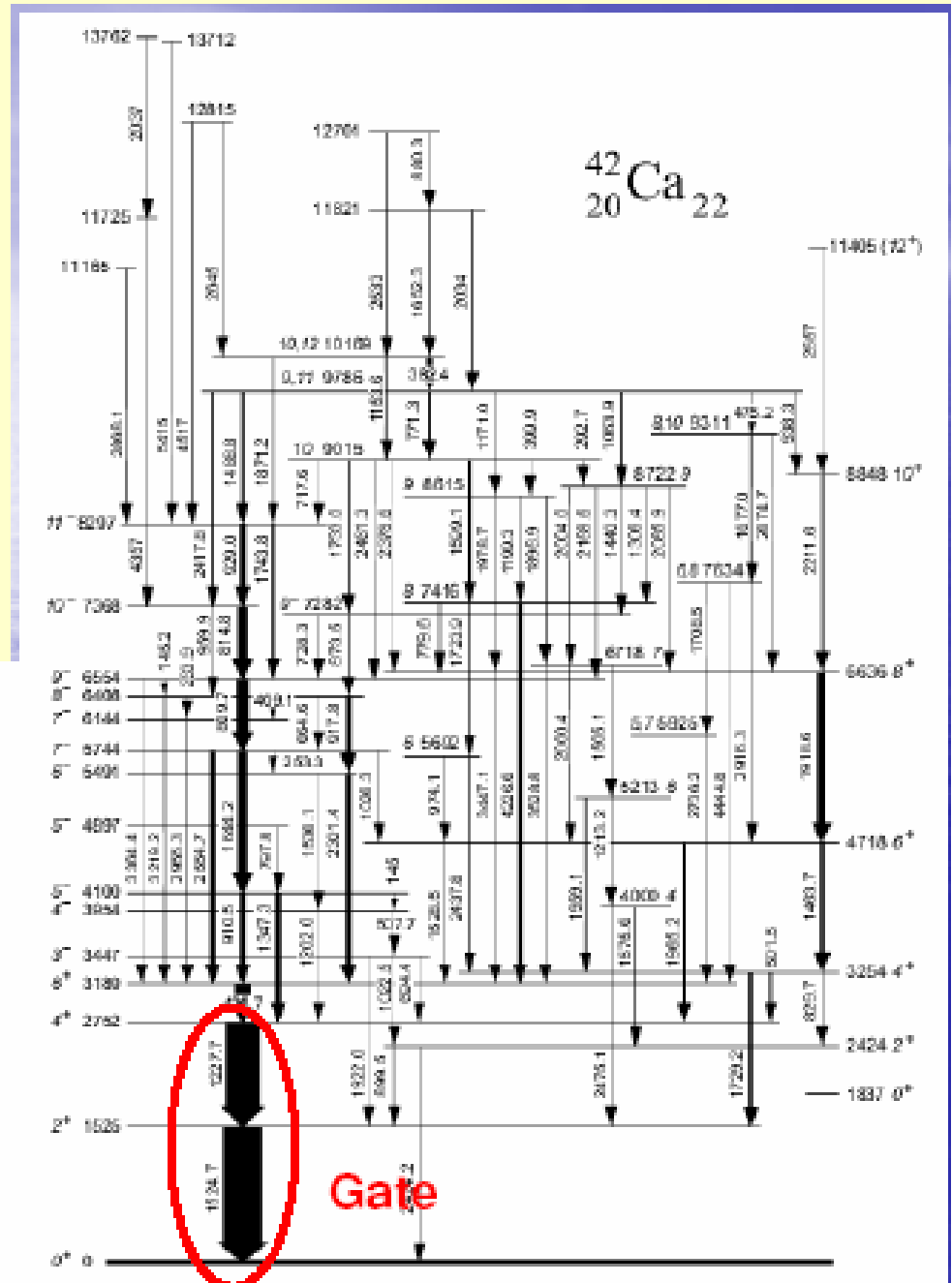
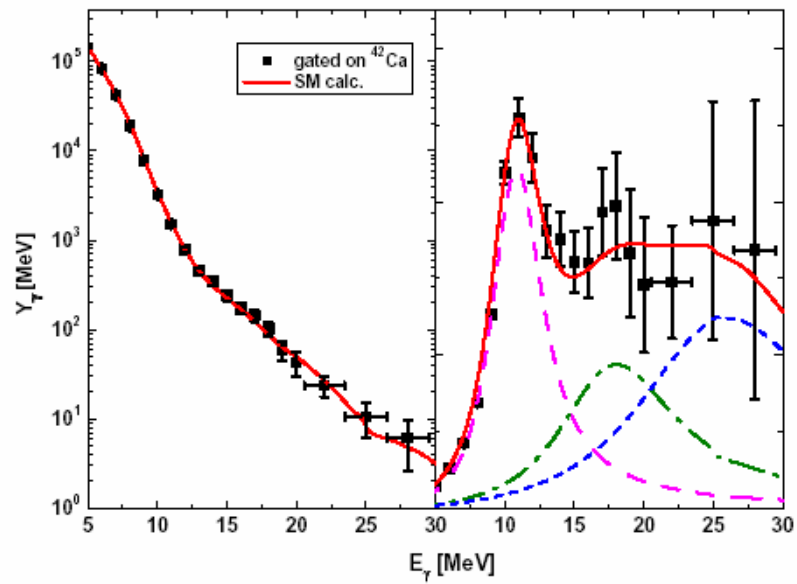
## Eksperyment w IReS Laboratory of Strasbourg



EUROBALL + HECTOR

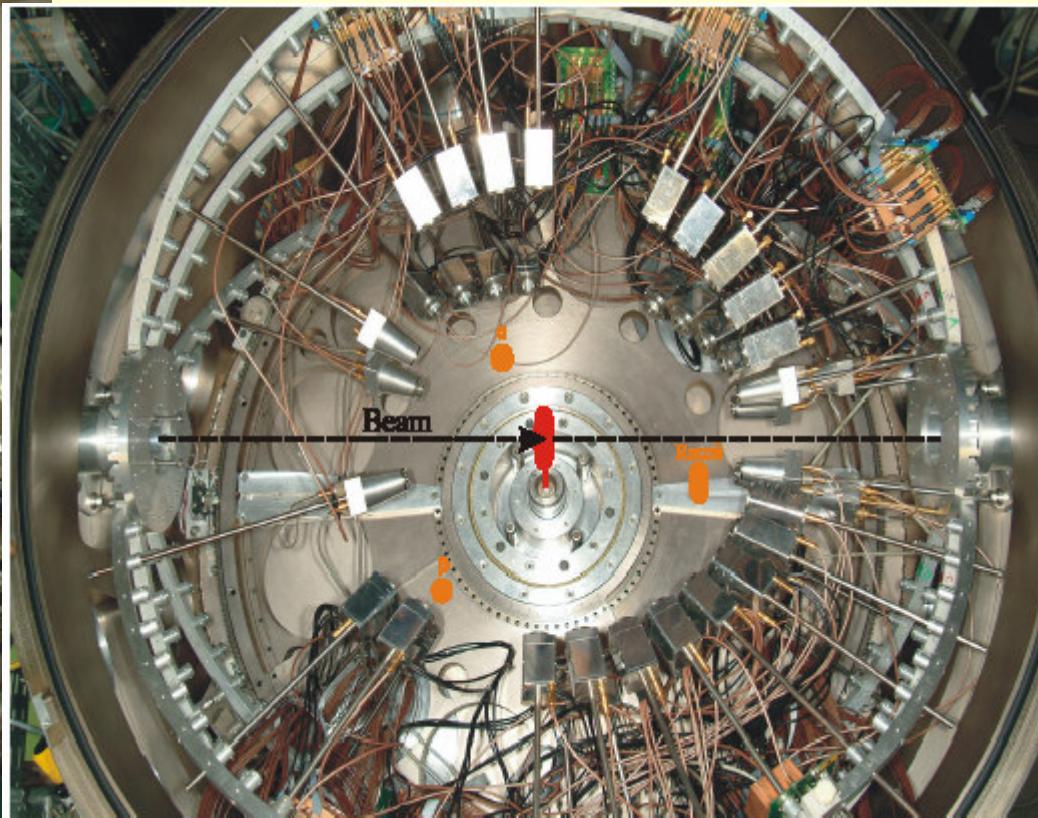
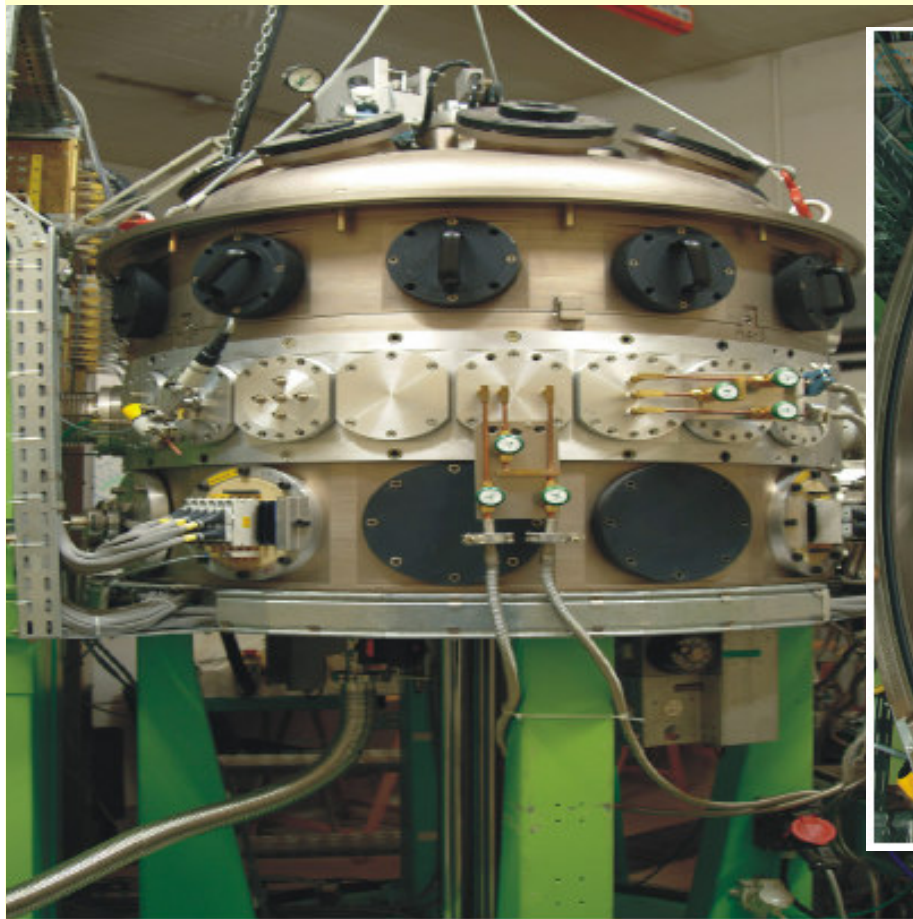


# Bramkowanie

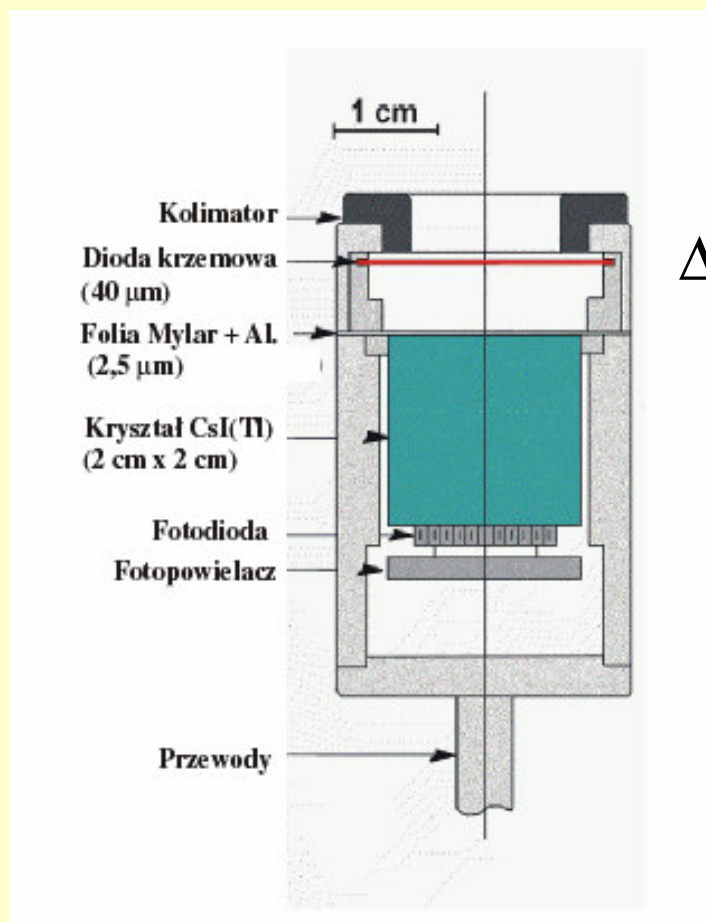


Wydzielenie kanału (grupy kanałów) reakcji – detekcja lekkich cząstek naładowanych: p i  $\alpha$

**Komora układu ICARE widok z boku i z góry**  
(od 2007 w Warszawskim Cyklotronie)



Wydzielenie kanału (grupy kanałów) reakcji – detekcja lekkich cząstek naładowanych: p i  $\alpha$



$\Delta E$

E

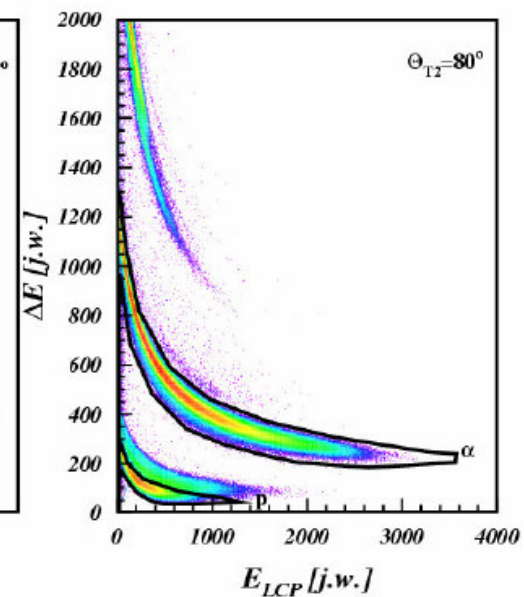
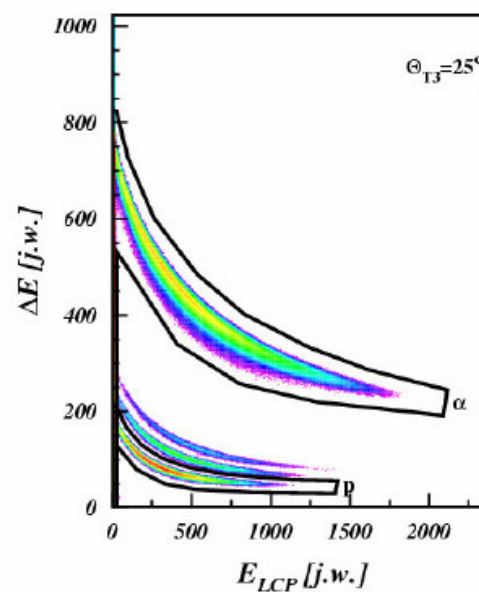
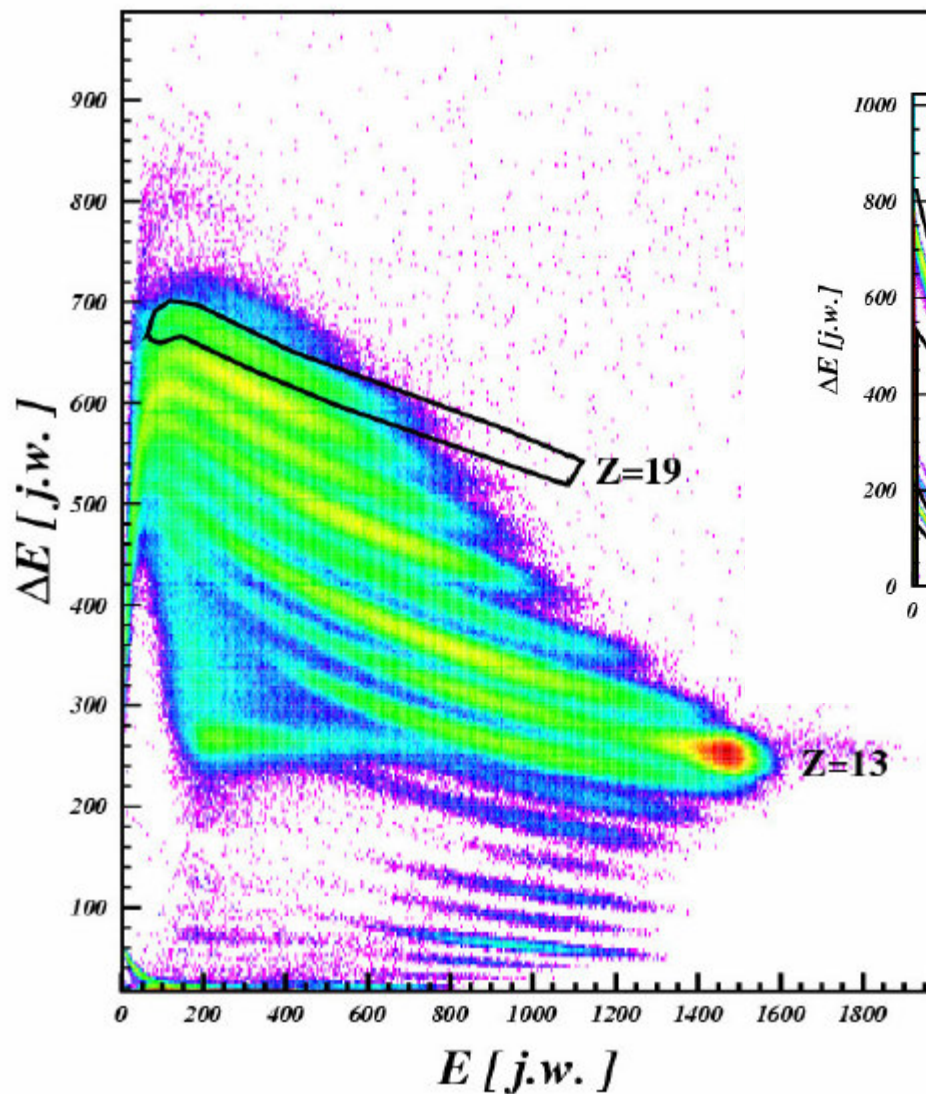
Detektory  
teleskopowe

$$E \Delta E \sim Z^2 M$$

$144 \text{ MeV } ^{27}\text{Al} + ^{19}\text{F} \Rightarrow ^{46}\text{Ti}^*$

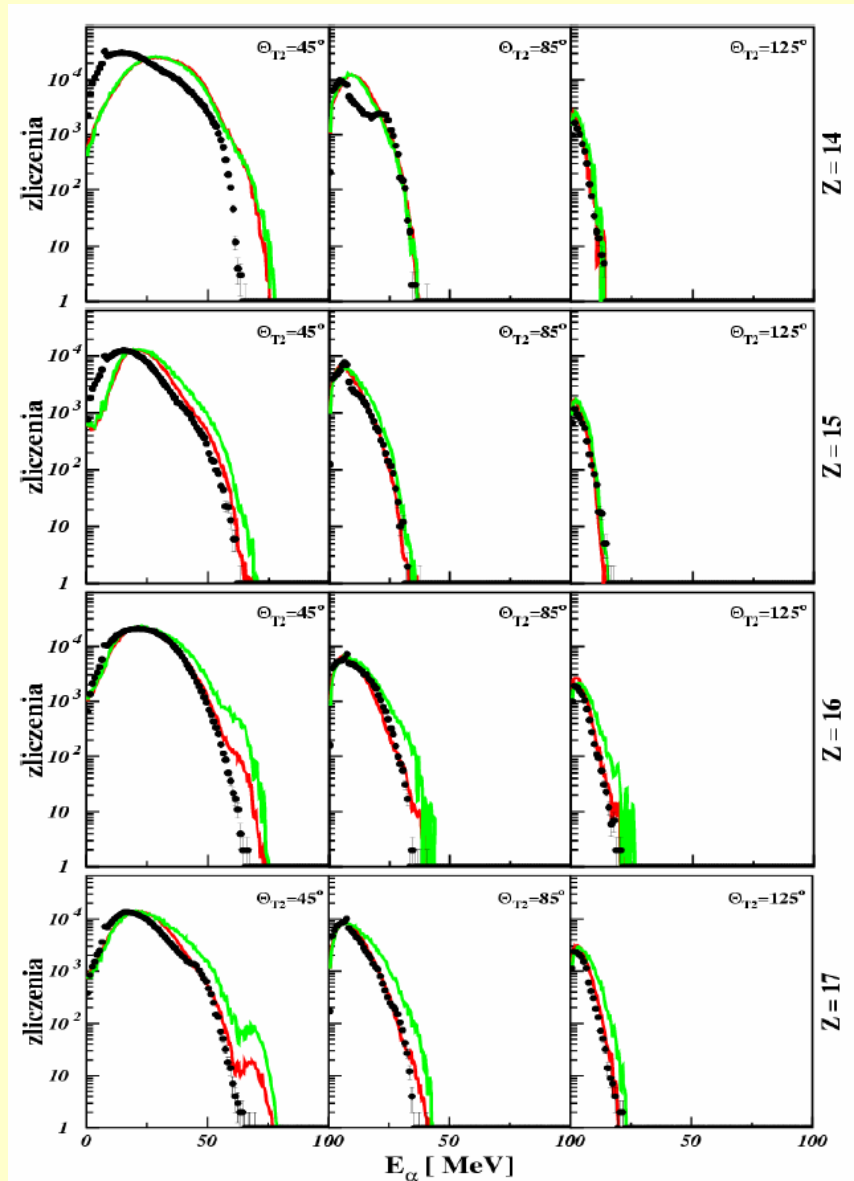
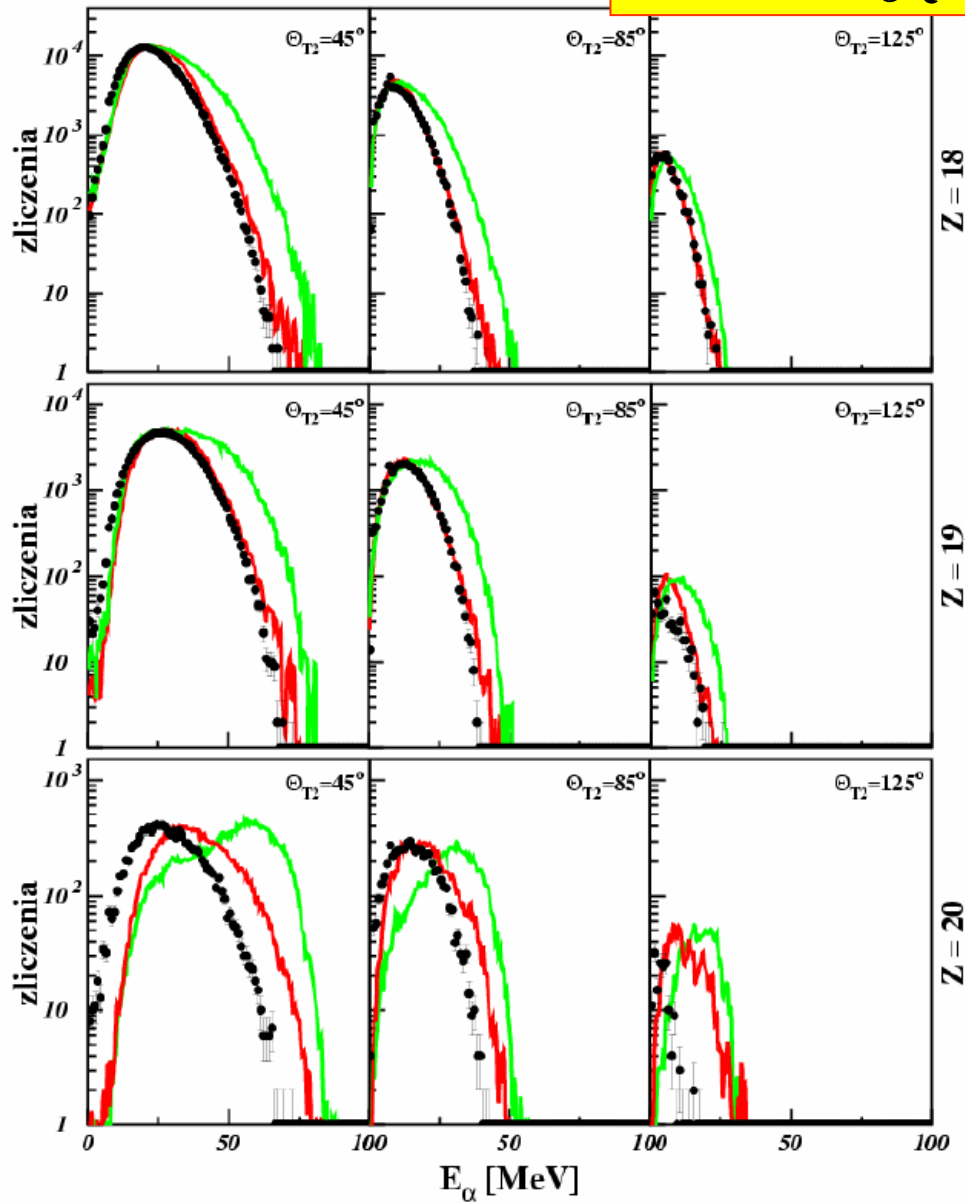
$I_{\text{max}} \approx 35 \hbar, E^* = 85 \text{ MeV}$

## Bramkowanie



# Widma cząstek alfa

– wskazują na dużą deformację jądra



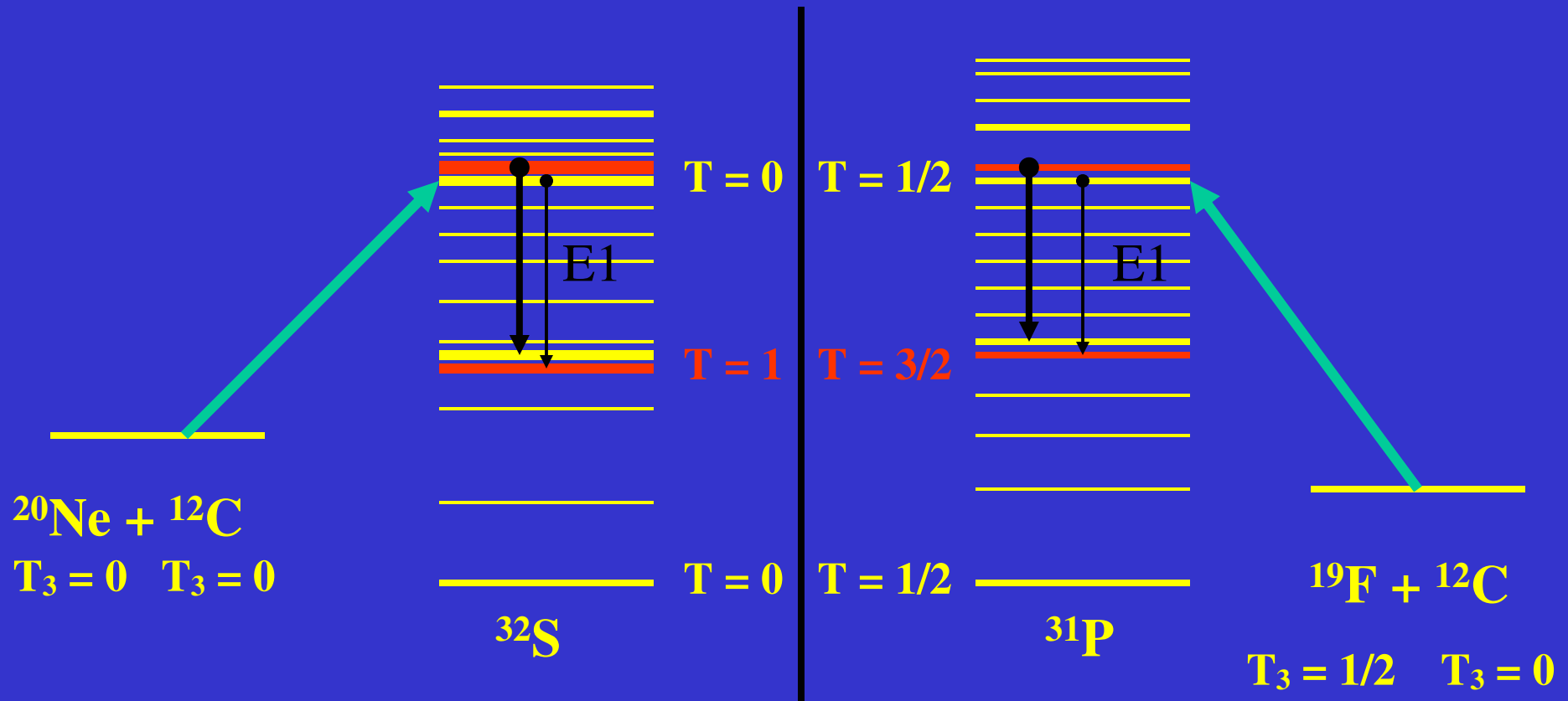
## Zmieszanie izospinowe poziomów jądrowych

Występowanie zmieszania izospinowego poziomów jądrowych świadczy o łamaniu symetrii izospinu

**izospin  $T$ ,  $T_3$**

**dla jąder  $T_3 = (N-Z)/2$**

# Zmieszanie izospinowe poziomów jądrowych i jego wpływ na GDR



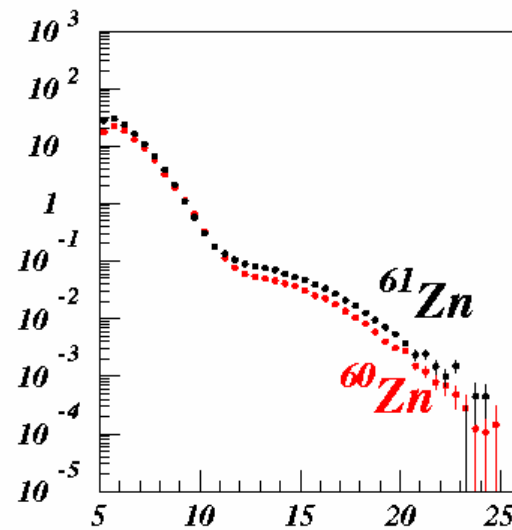
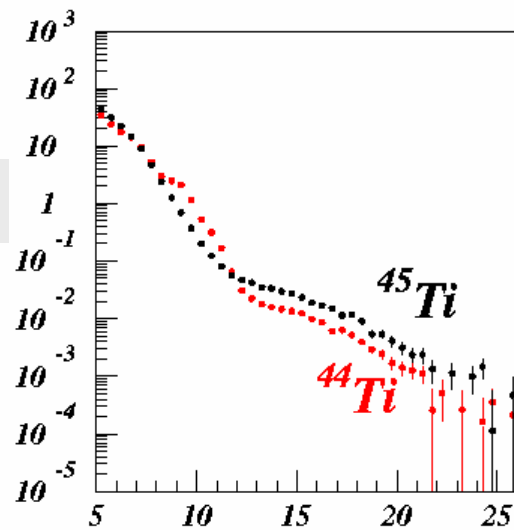
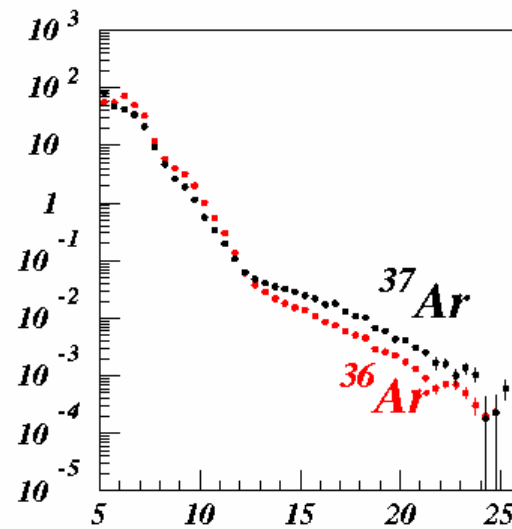
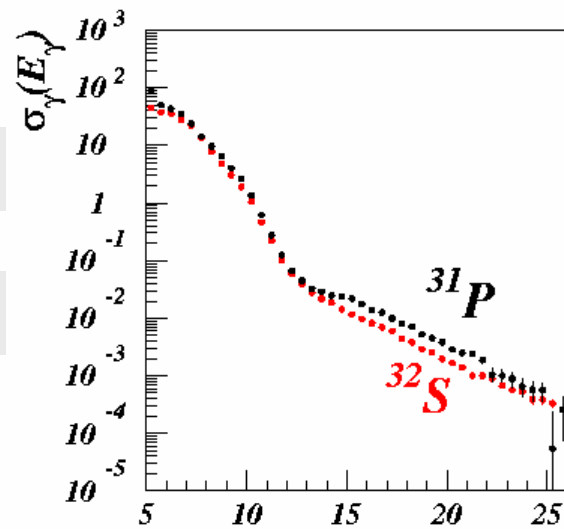
$$\langle T_i T_{3i} = 0 | E1 | T_f T_{3f} = 0 \rangle = \langle T_i 0 1 0 | T_f 0 \rangle \langle T_i || E1 || T_f \rangle$$

$^{19}\text{F} + ^{12}\text{C}$

$^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$

$^{20}\text{Ne} + ^{25}\text{Mg}$

$^{20}\text{Ne} + ^{24}\text{Mg}$



$^{12}\text{C} + ^{25}\text{Mg}$

$^{12}\text{C} + ^{24}\text{Mg}$

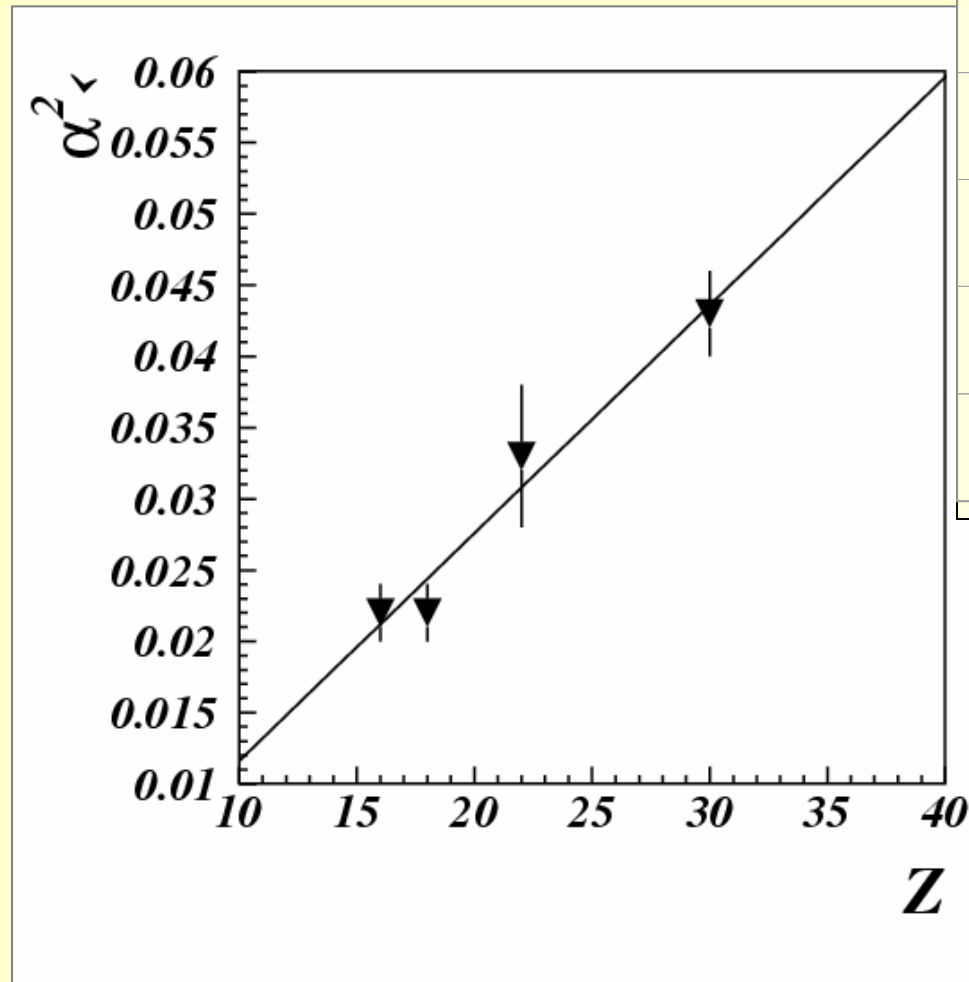
$^{36}\text{Ar} + ^{25}\text{Mg}$

$^{36}\text{Ar} + ^{24}\text{Mg}$

$E_\gamma$  (MeV)



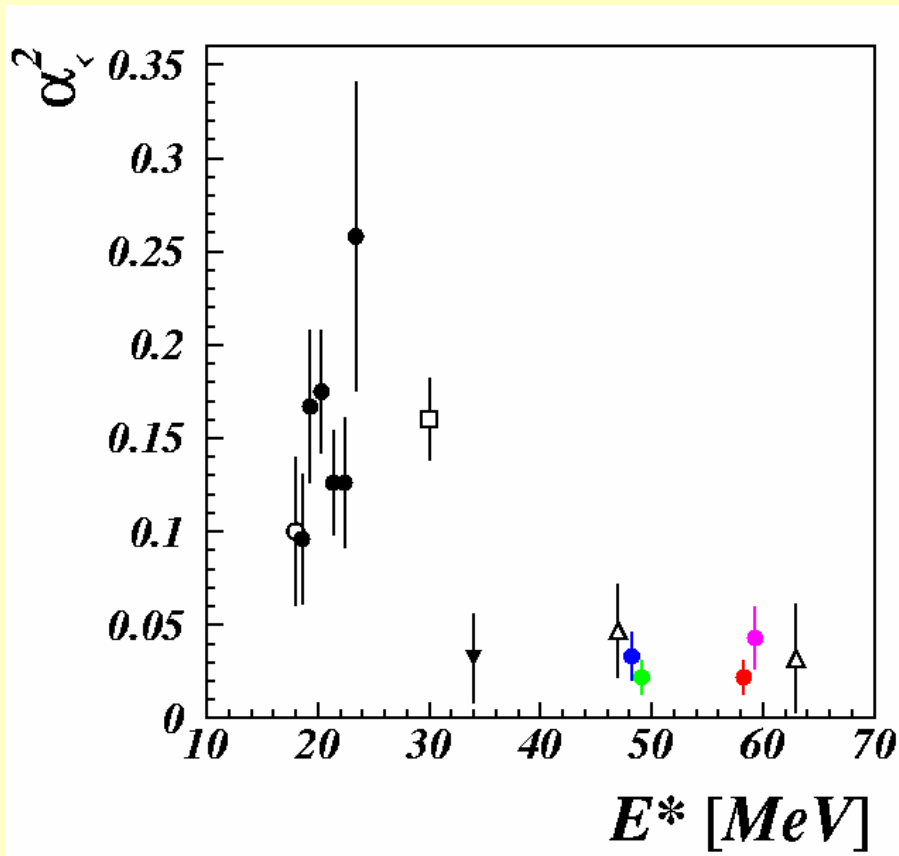
# Zależność zmieszania izospinowego poziomów jądrowych od liczby atomowej $Z$ jądra



JĄDRO	$\alpha^2_{<}$
$^{32}\text{S}$	$0.022 \pm 0.002$
$^{36}\text{Ar}$	$0.022 \pm 0.002$
$^{44}\text{Ti}$	$0.033 \pm 0.005$
$^{60}\text{Zn}$	$0.043 \pm 0.003$

# Badanie symetrii izospinowej w jądrach lekkich

Zależność zmieszania izospinowego poziomów jądrowych od energii wzbudzenia jądra



Zmieszanie izospinowe maleje ze wzrostem  $E^*$

M.N. Harakeh et al., Phys. Lett. **176**, 297 (1986)

J.A. Behr et al., Phys. Rev. Lett. **70**, 3201 (1993)