

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 - osiągnięty jest stan równowagi termodynamicznej- jądro złożone
2. utworzenie i rozpad jądra złożonego są od siebie niezależne

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

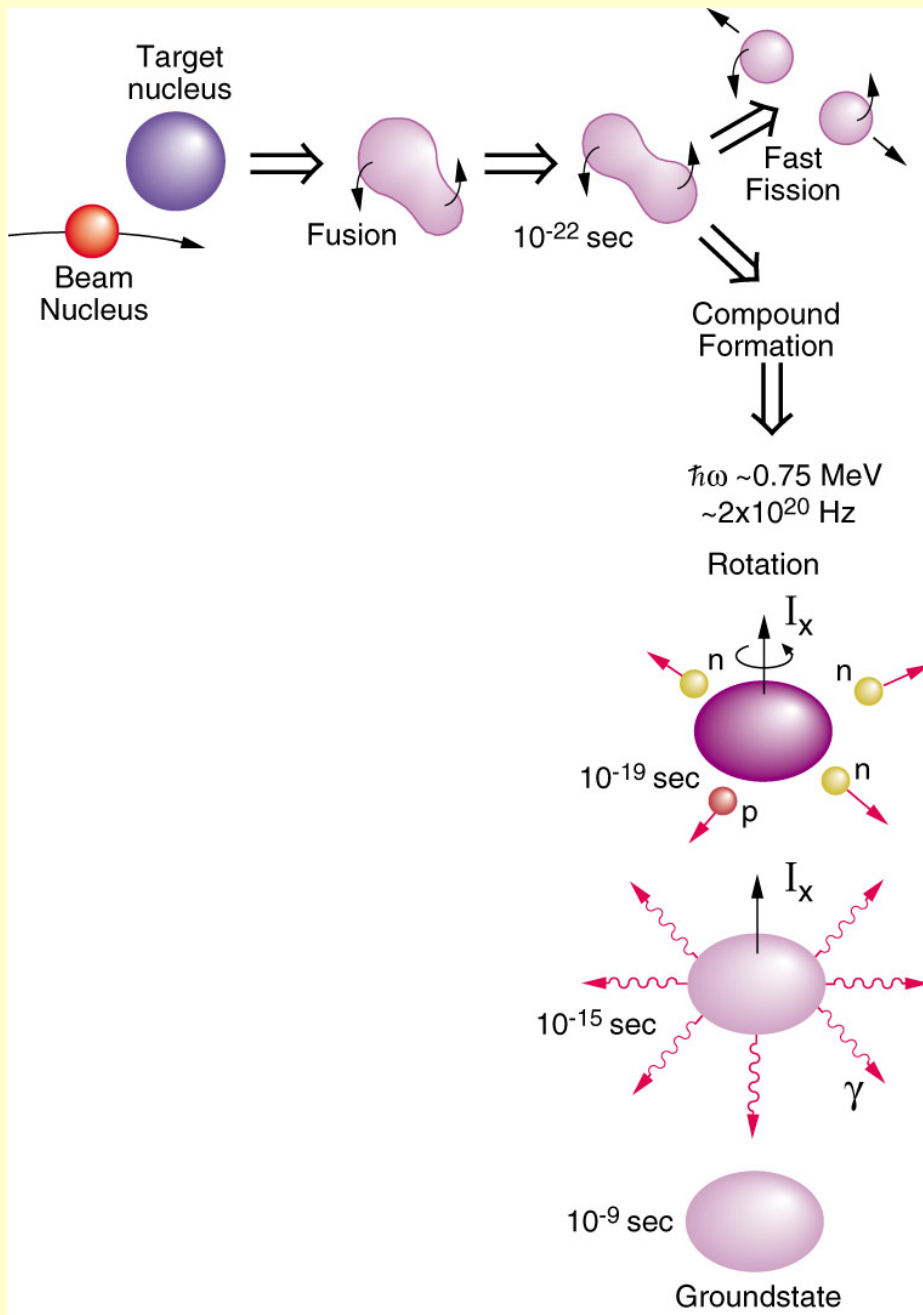
3. parametry charakteryzujące jądro złożone

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

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

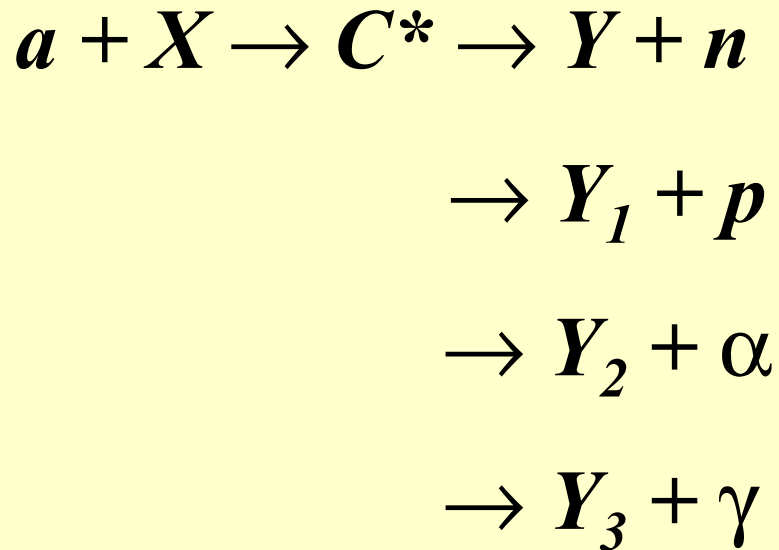
$$Q_{fus} = (M_X + M_a)c^2 - M_C c^2 = S_a(C)$$

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



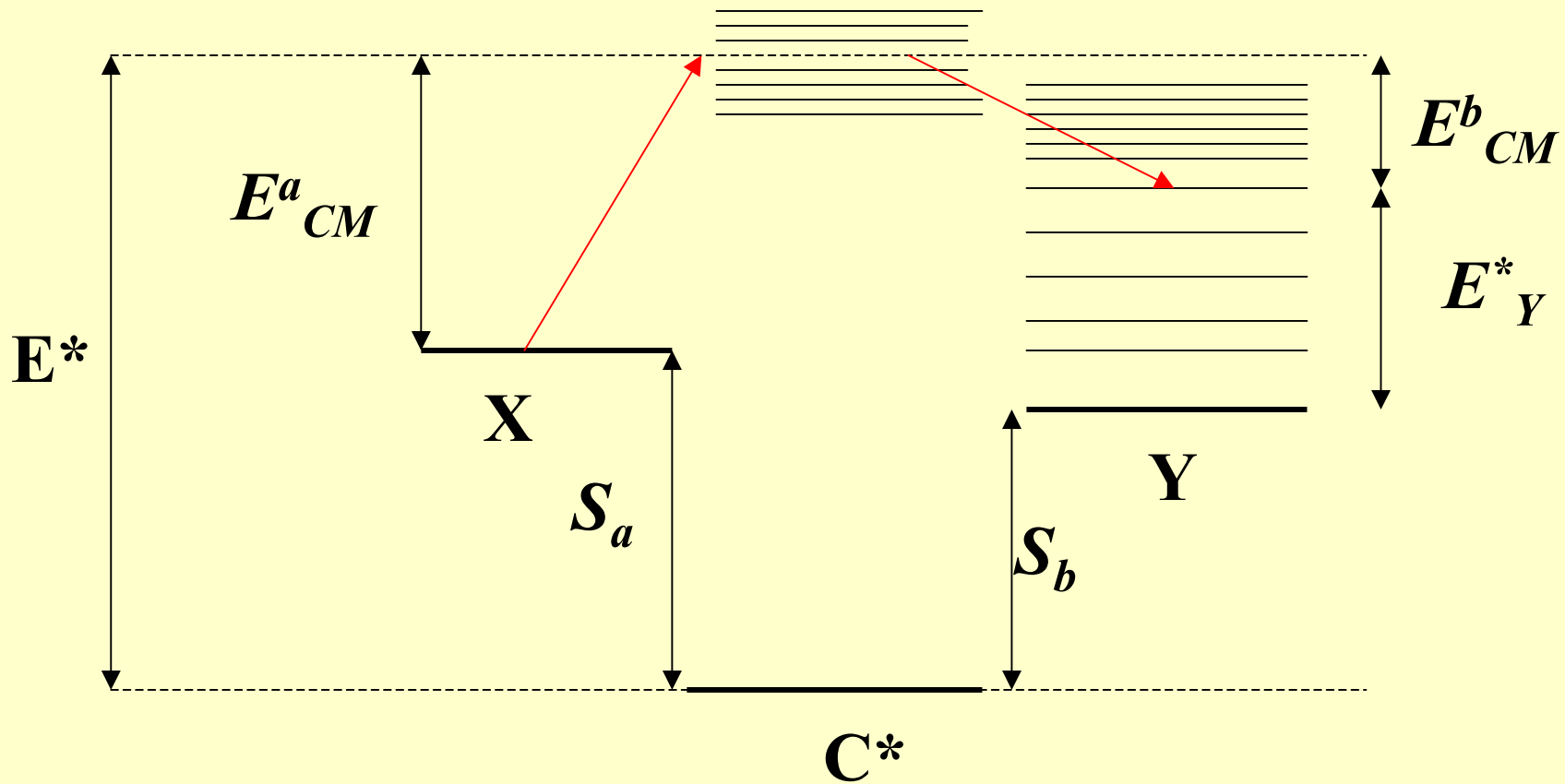
Utworzenie i rozpad jądra złożonego

Rozpad jądra złożonego



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

**Rozpad z emisją kwantu γ
jest 1000 razy mniej prawdopodobny !**

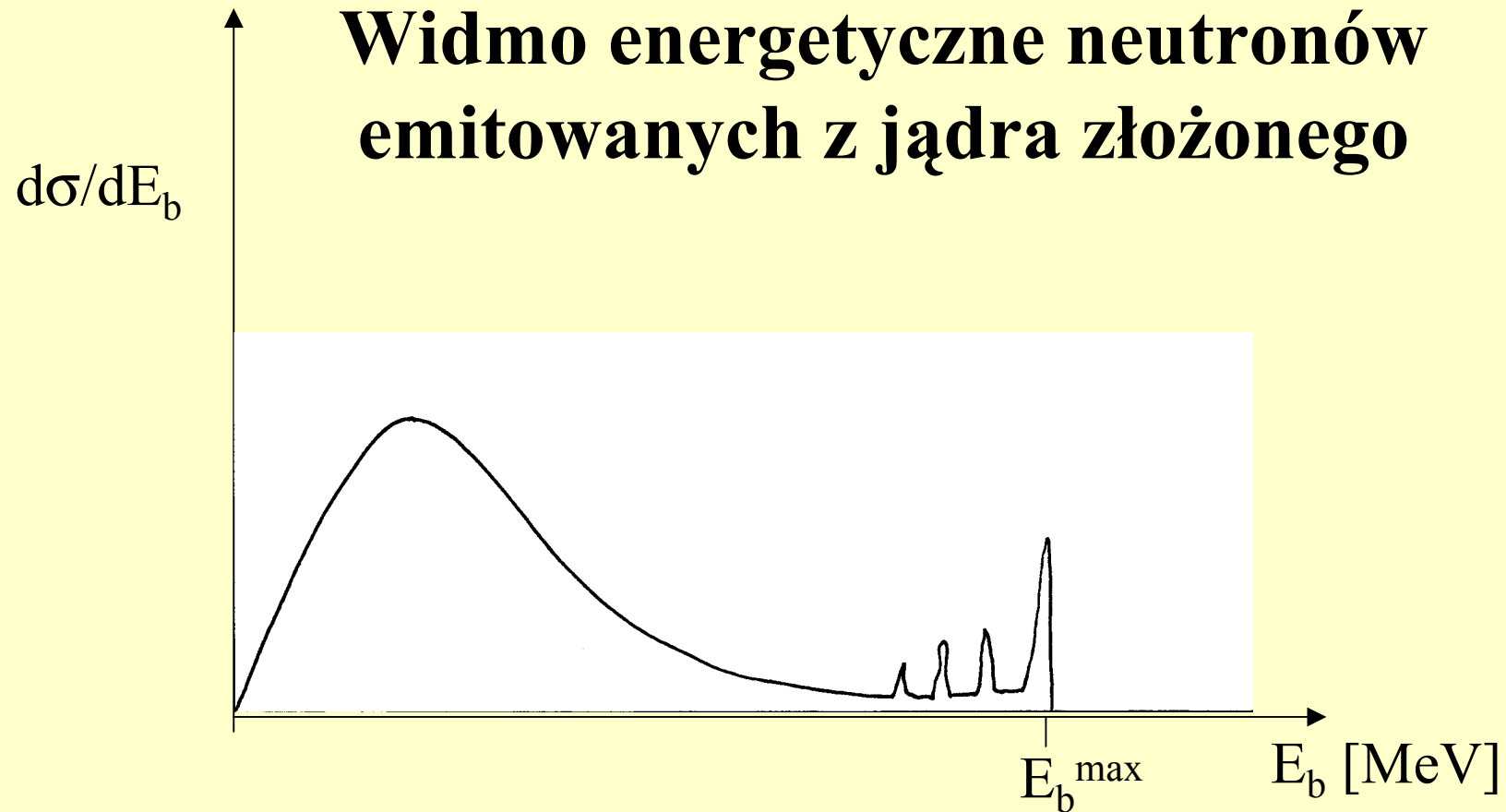


Maksymalna energia cząstki b: $E^{b \max}_{CM} = E^a_{CM} + S_a(C) - S_b(C)$

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

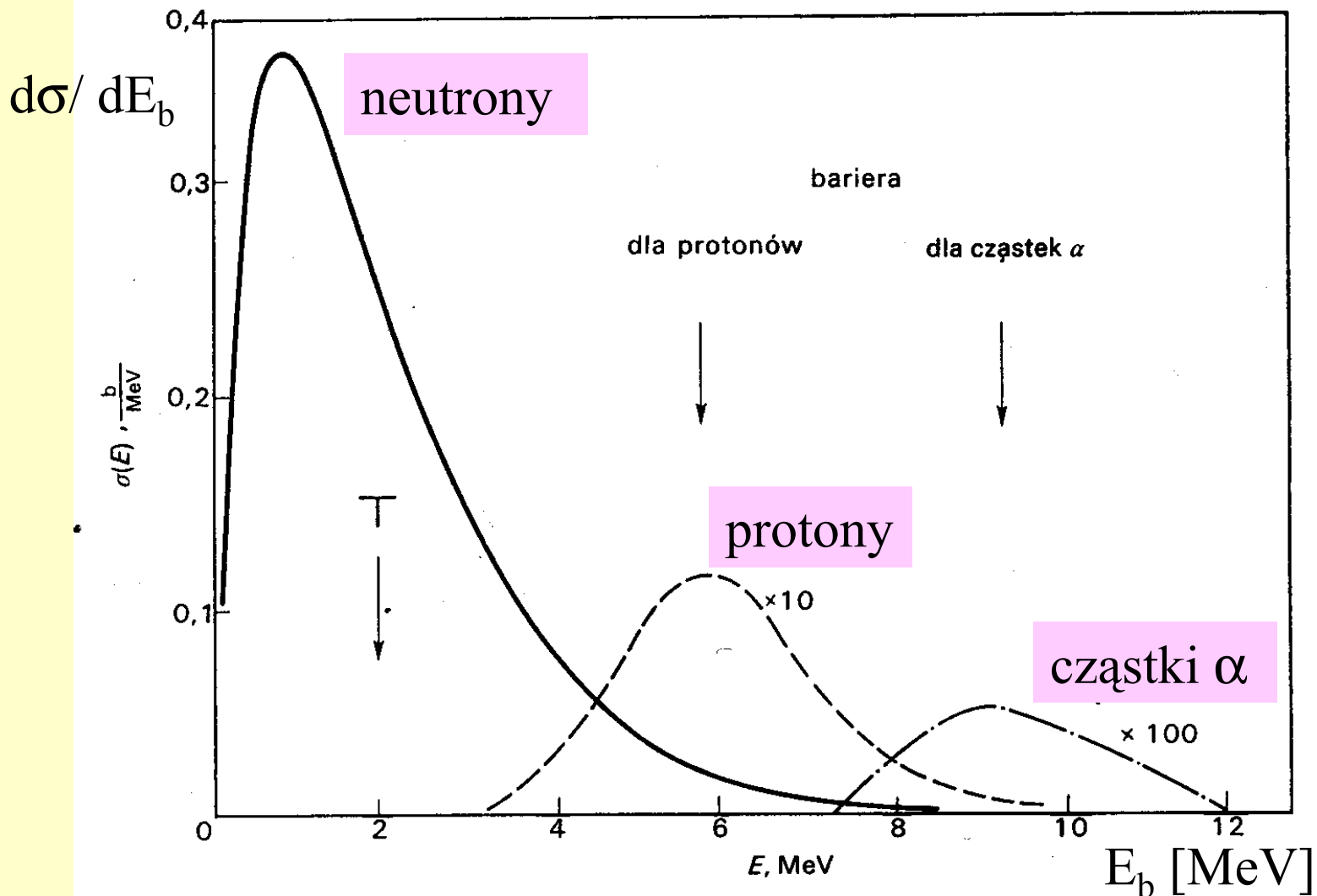
Ciepło reakcji $X(a,b)Y$ $Q = S_a(C) - S_b(C)$

Widmo energetyczne neutronów emitowanych z jądra złożonego



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

Widmo energetyczne emitowanych cząstek



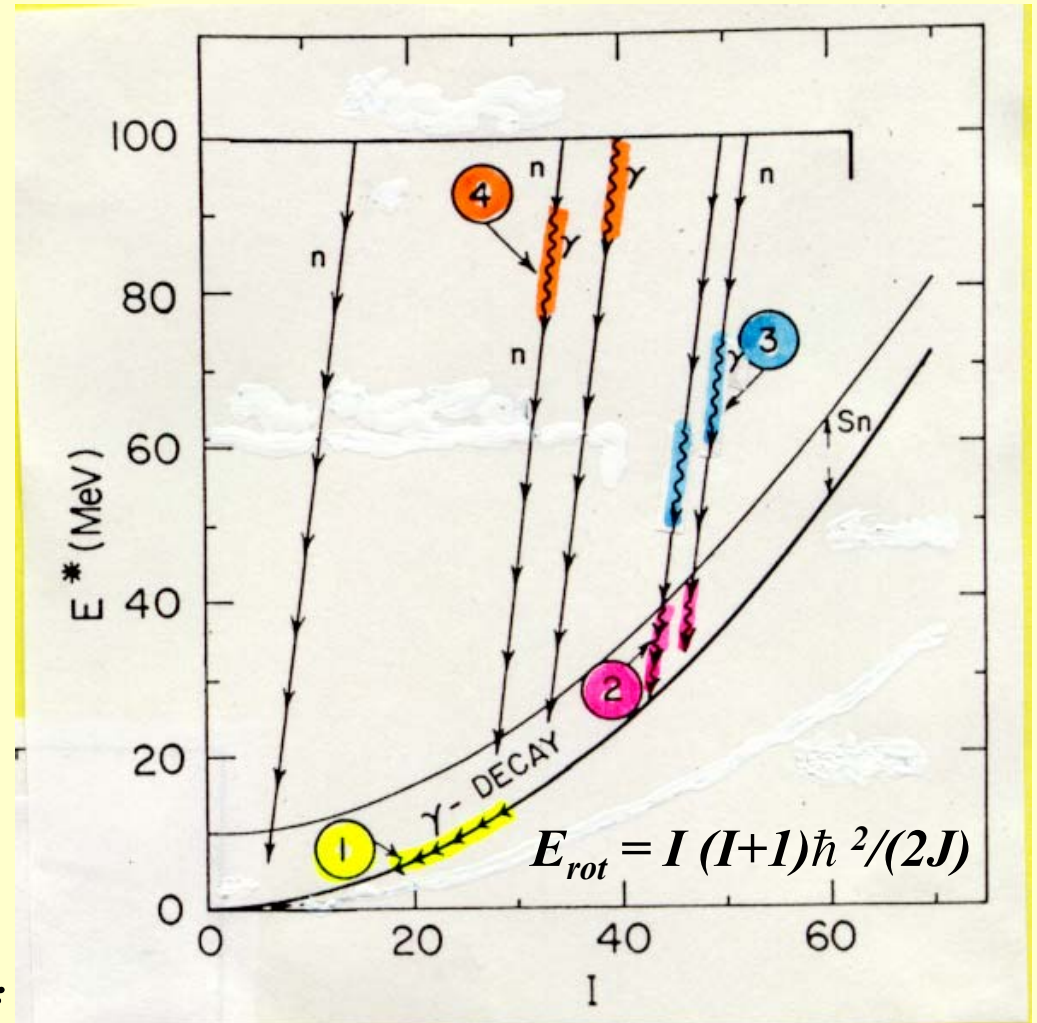


Reakcja fuzji ciężkich jonów

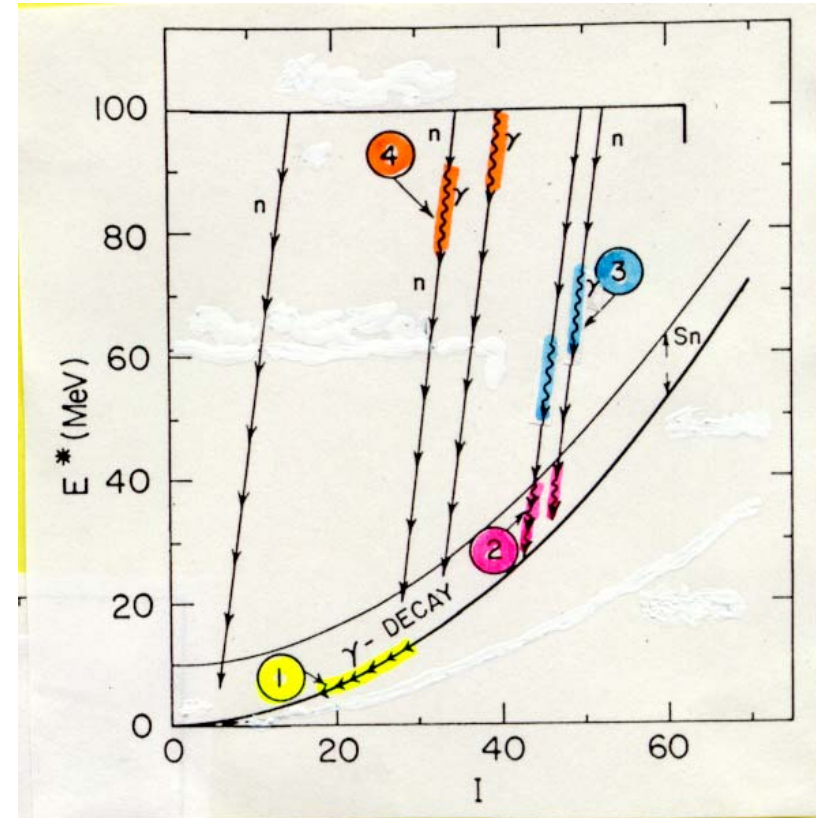
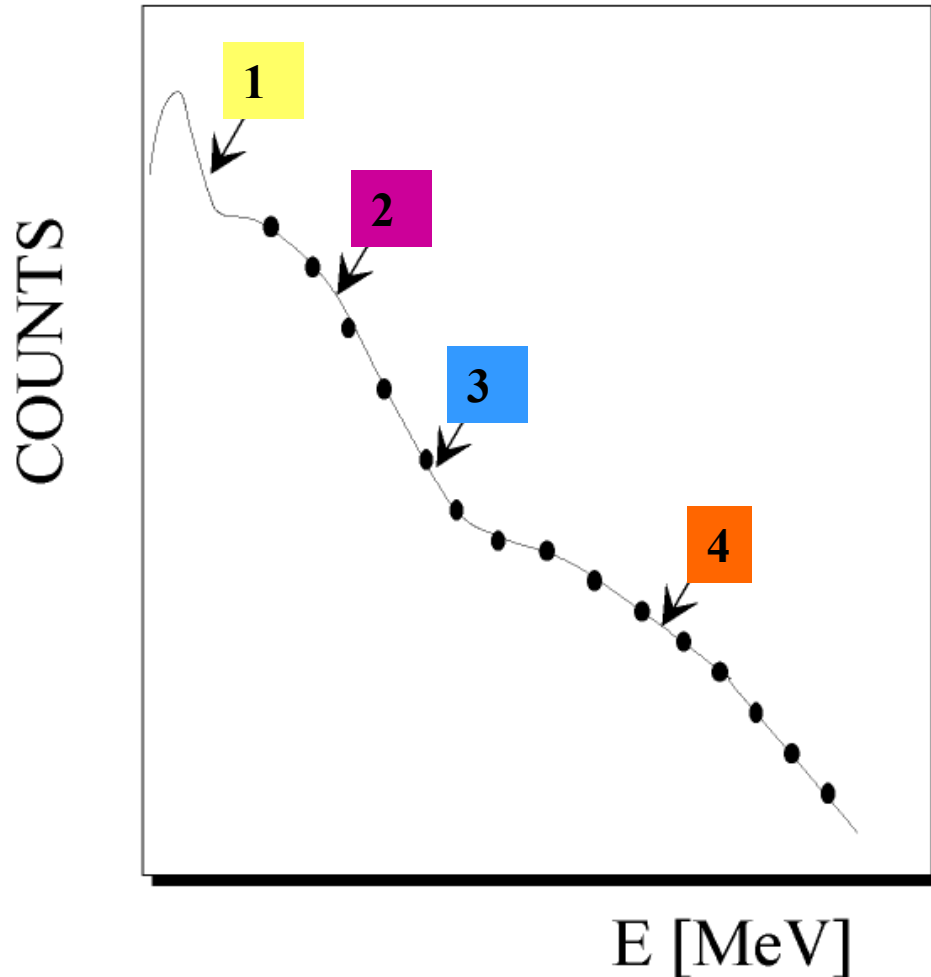
Wytwarzanie jąder w stanach wzbudzonych o wysokiej energii wzbudzenia

I - spin jądra C^*

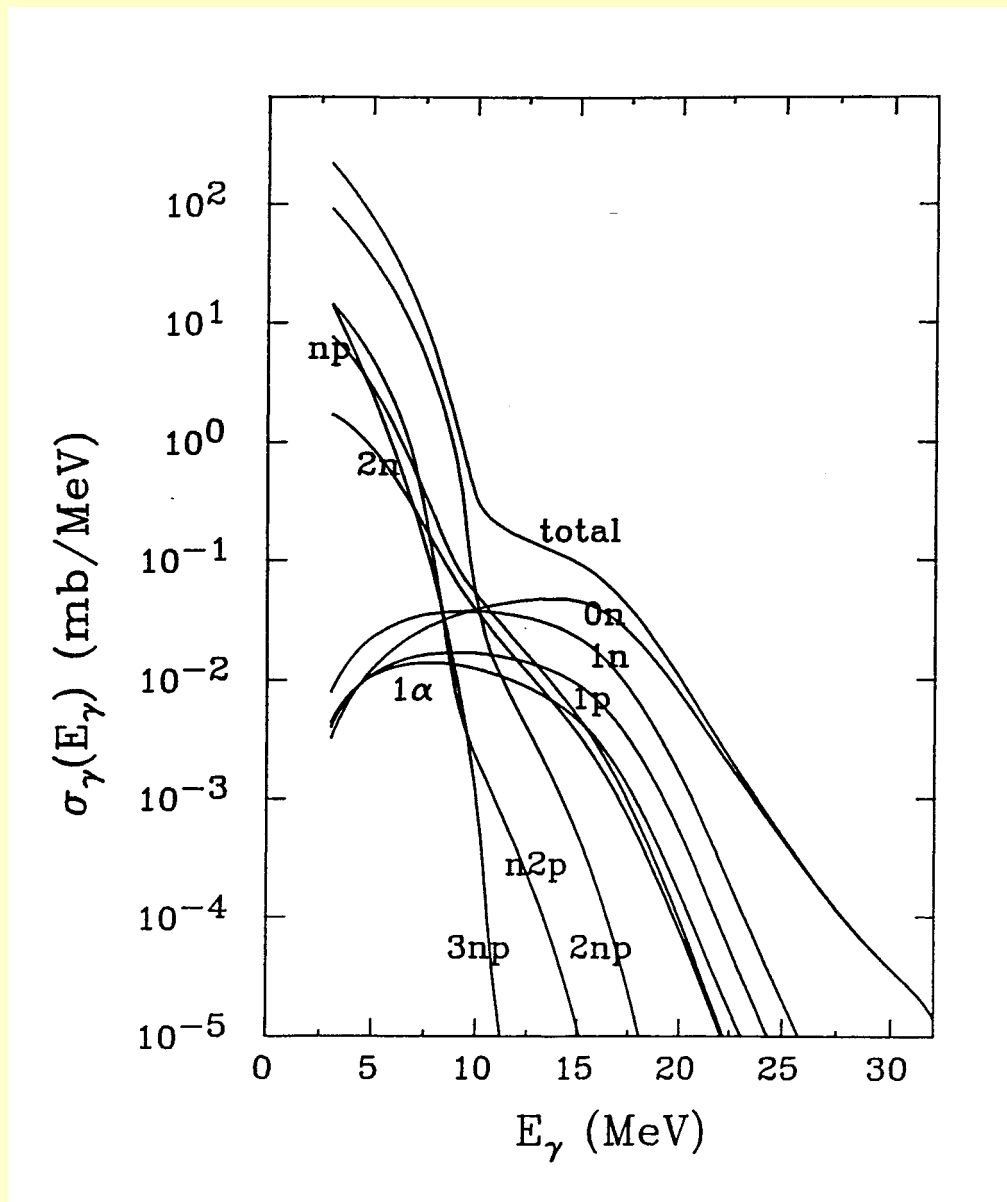
J - moment bezwładności C^*



Widmo energetyczne emitowanych kwantów γ



Widmo energetyczne emitowanych kwantów γ



$$E^* = 50 \text{ MeV}$$

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

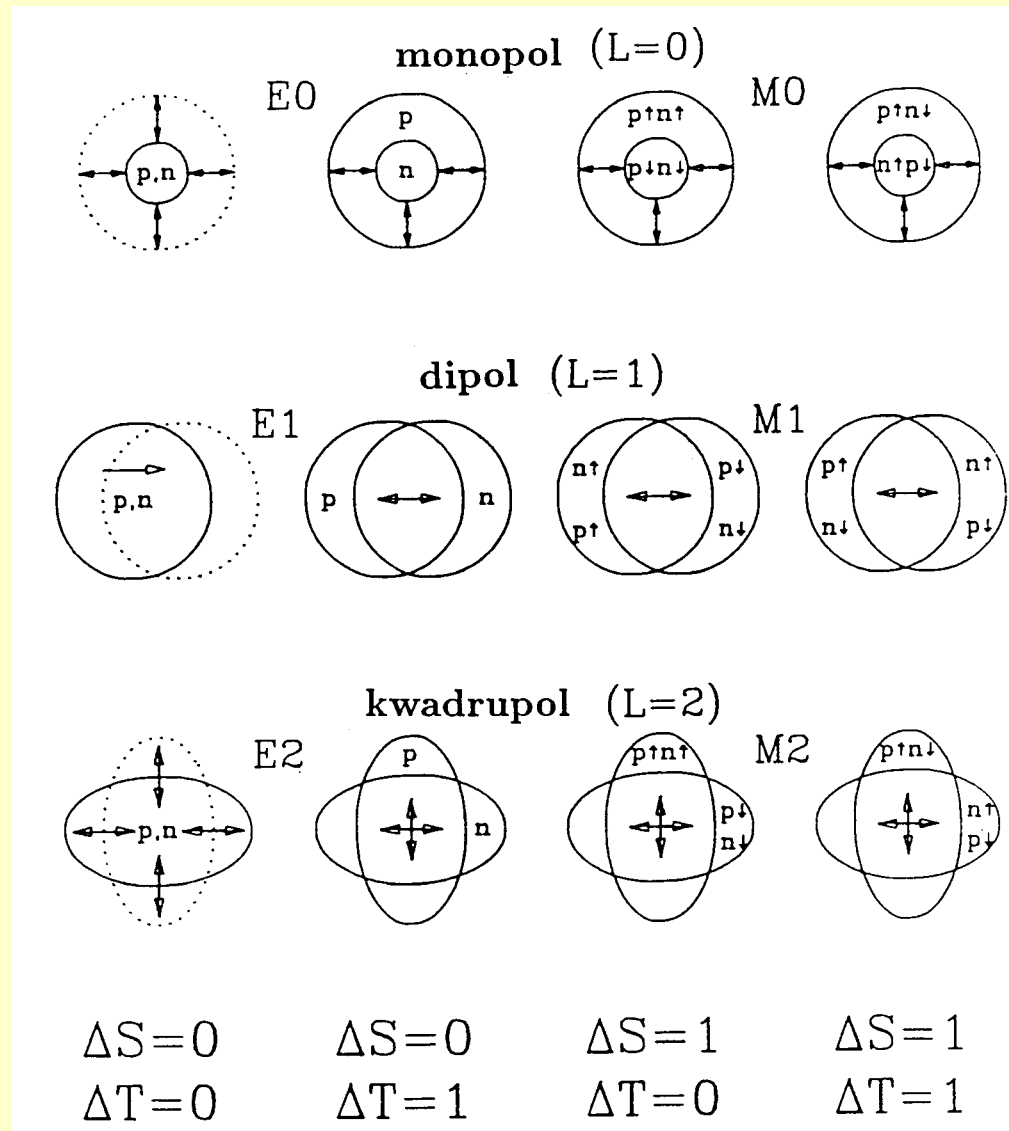
Gigantyczne rezonanse (GR)

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

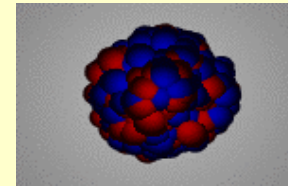
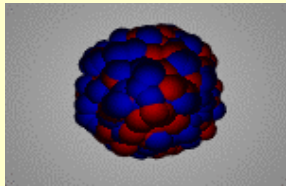
Izoskalarne

Izowektorowe

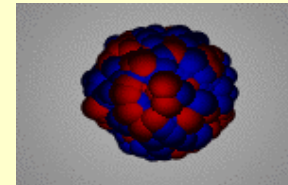
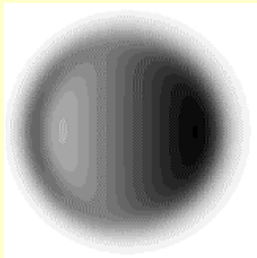
1977

1983

Monopol



Dipol

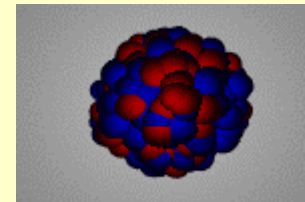
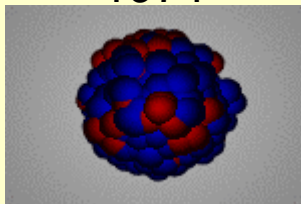


1948

1971

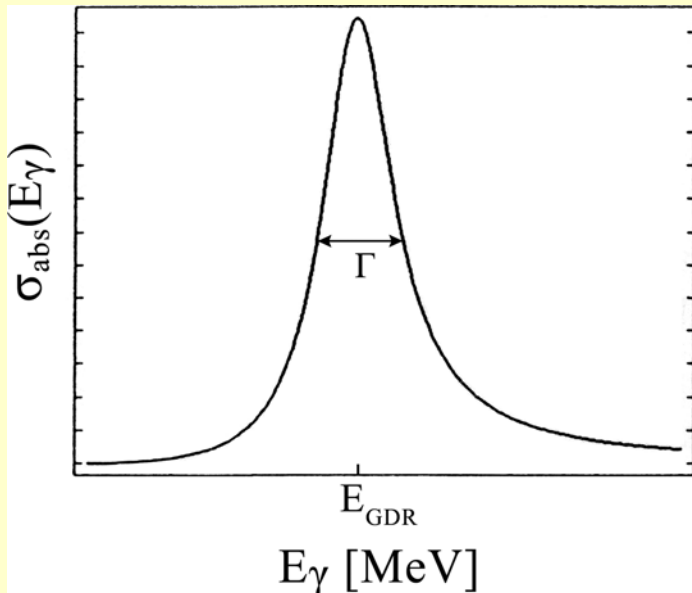
1980

Kwadrupol



Gigantyczny Rezonans Dipolowy

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 Γ .**

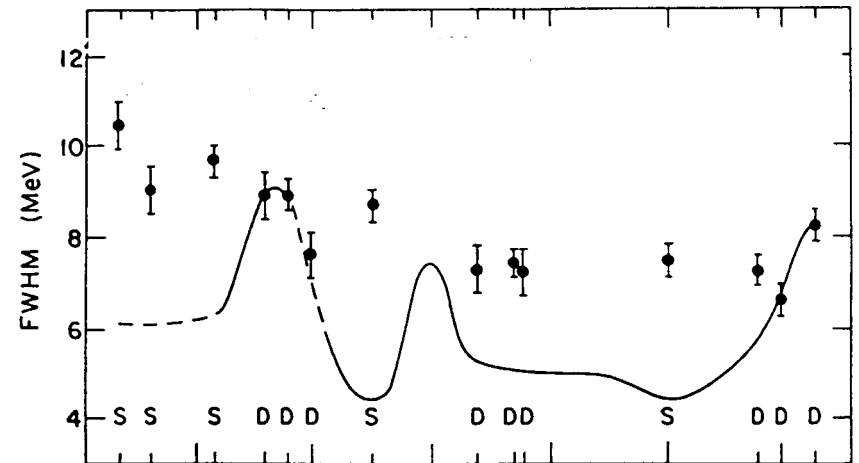


$$\sigma_{abs}(E_\gamma) = \frac{4\pi e^2 \hbar NZ}{mc A} \frac{SE_\gamma^2 \Gamma}{(E_{GDR}^2 - E_\gamma^2)^2 + E_\gamma^2 \Gamma^2}$$

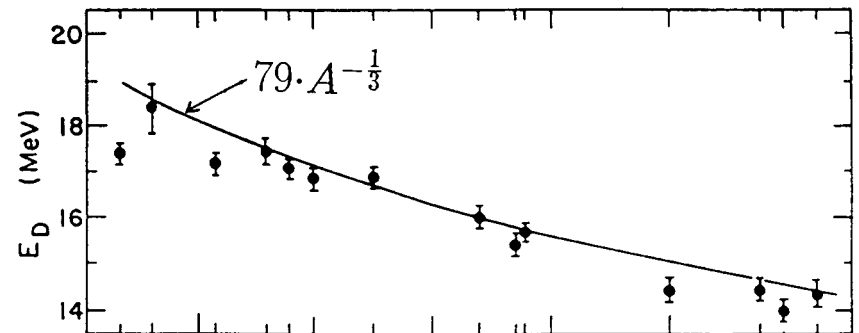
Gigantyczny Rezonans Dipolowy

Parametry GDR dla różnych jąder

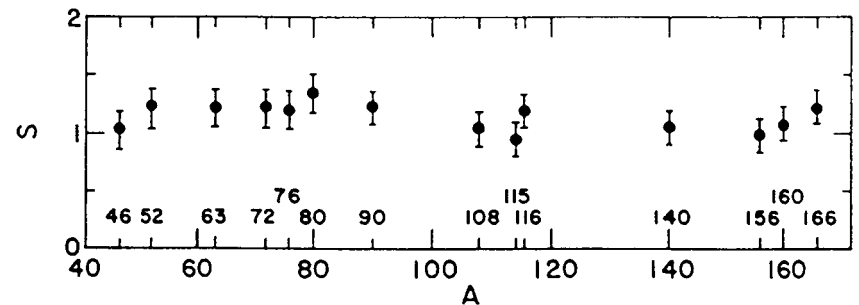
Γ



E_{GDR}

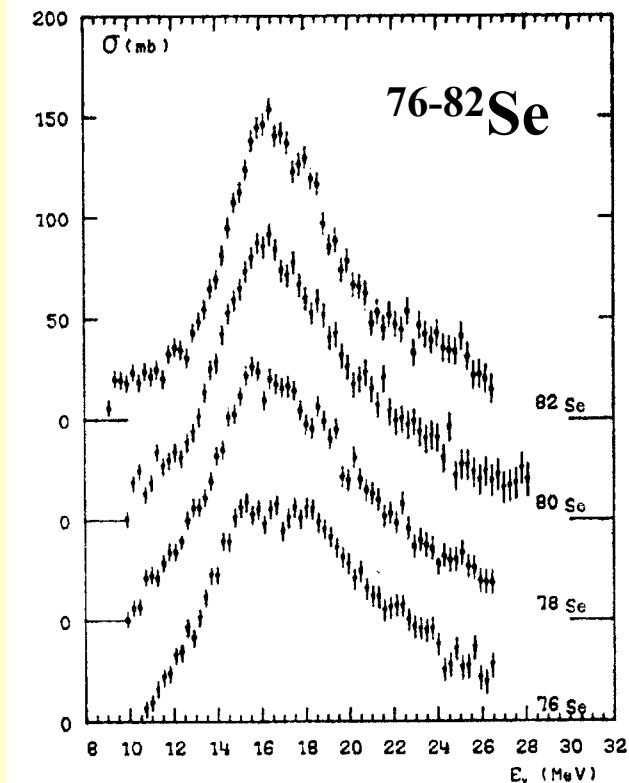
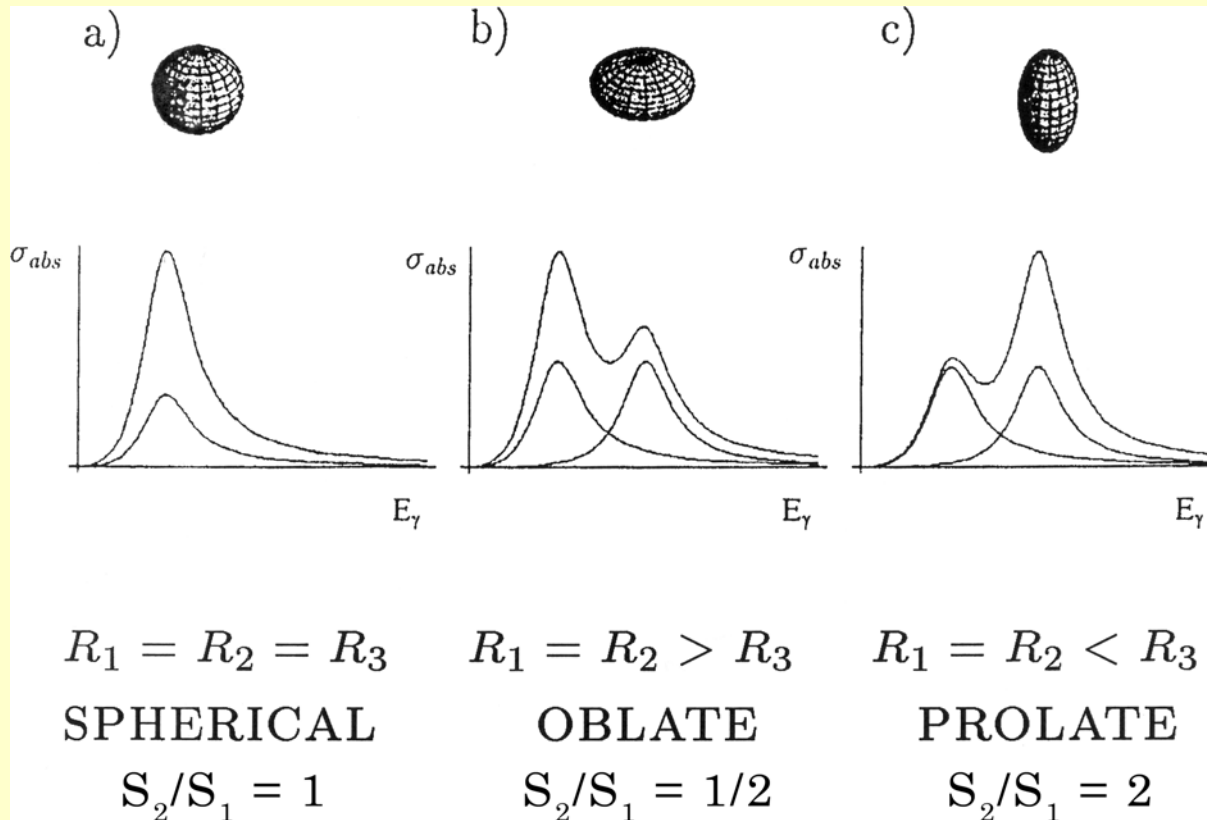


S



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_{GDR} do odwrotności rozmiaru jądra $1/R$ w kierunku zachodzenia drgań, kształt rezonansu GDR w jądrze zdeformowanym odzwierciedla kształt jądra.



Gigantyczny rezonans dipolowy (GDR)

dipolowy, elektryczny, izowektorowy

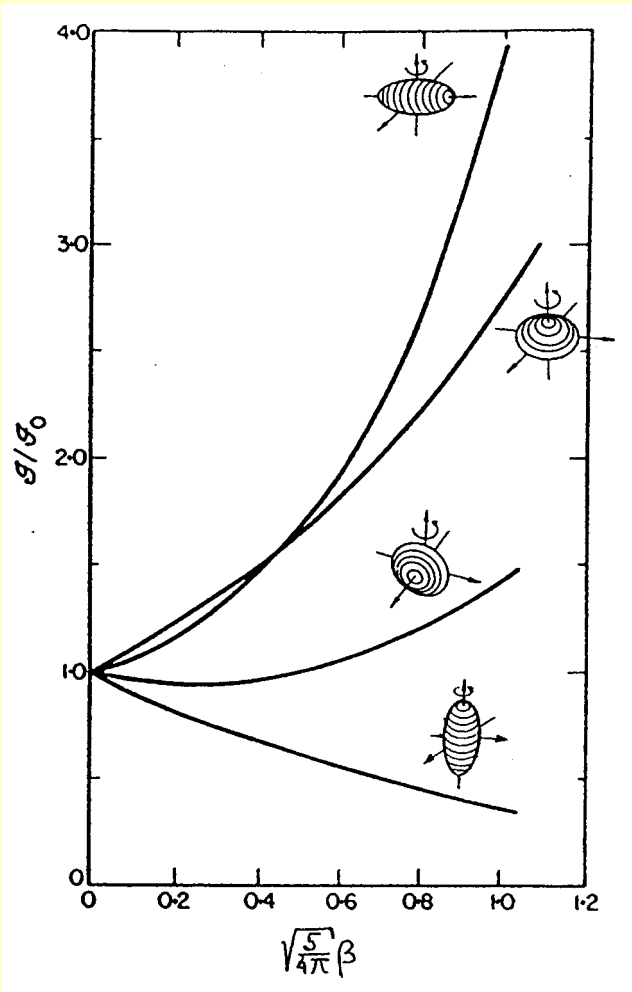
1. GDR w jądrach w stanie podstawowym
2. GDR w jądrach w stanie wzbudzonym

Czego można się dowiedzieć o jądrach badając GDR

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

Badanie ewolucji kształtu wysoko wzbudzonych jąder ^{46}Ti

Niestabilność Jacobiego



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

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

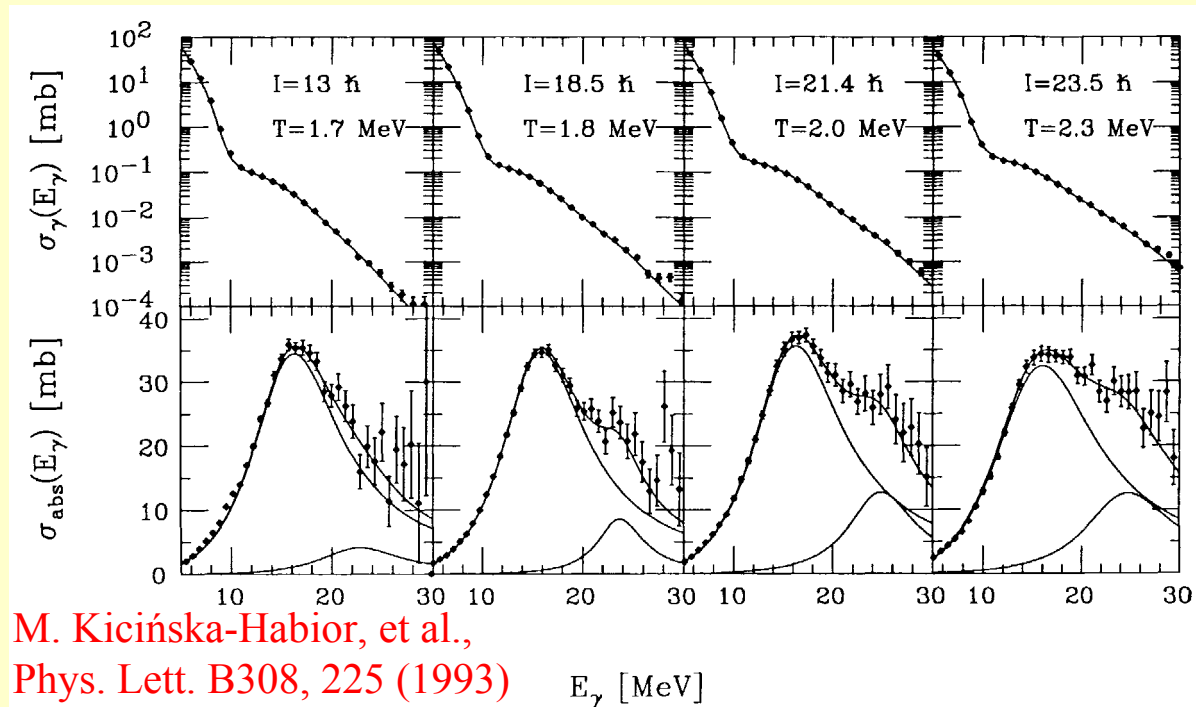
Wysokoenergetyczne promieniowanie gamma pochodzi z rozpadu GDR. Niesie więc informację o strukturze samego wzbudzenia gigantycznego rezonansu dipolowego, a także o silnie wzbudzonym i szybko obracającym się jądrze. Okazuje się, że z pomiarów tego promieniowania można uzyskać bardzo ciekawe informacje 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

Widma energetyczne promieniowania γ 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:

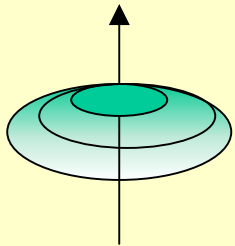
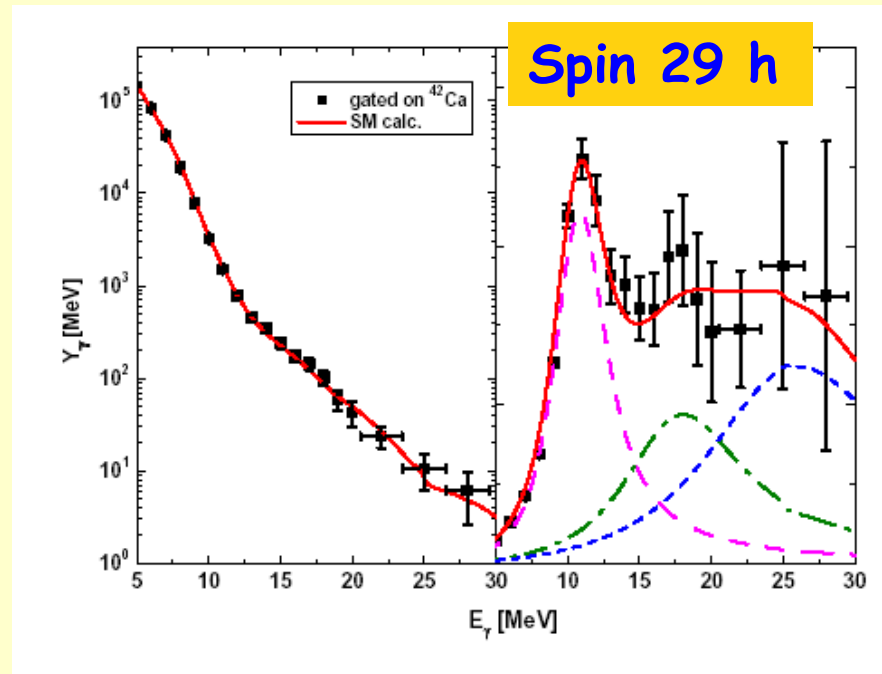
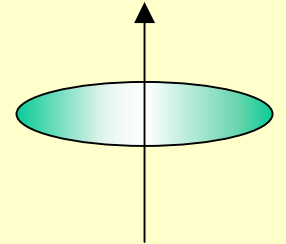
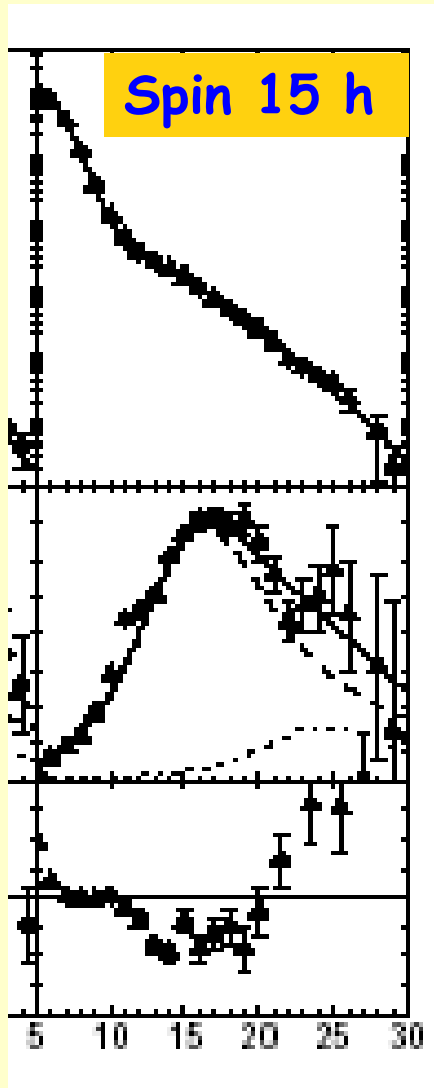
- silny wzrost deformacji jądra ^{45}Sc ze wzrostem spinu,
- przewidywaną teoretycznie, lecz dotąd nie obserwowaną zmianę kształtu jądra ze spłaszczonego na wydłużony, tzw. przejście fazowe Jacobiego



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

E_γ [MeV]

Badanie ewolucji kształtu wysoko wzbudzonych jąder ^{46}Ti

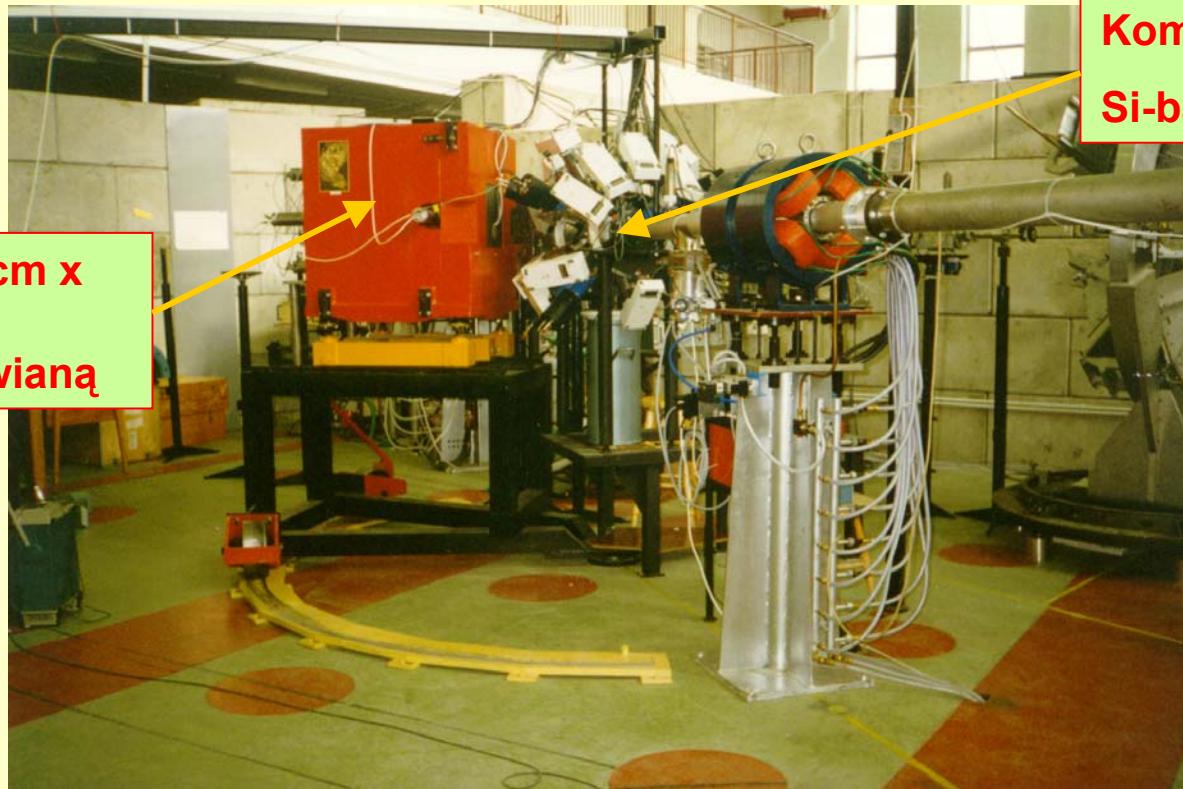


Metodyka eksperymentów

1. Zmniejszenie tła promieniowania kosmicznego - osłona antykomptonowska
2. Odróżnienie sygnałów od rejestracji neutronów i kwantów γ - metoda czasu przelotu
3. Wydzielenie zdarzeń odpowiadających rozpadowi jądra złożonego w danym przedziale spinów – filtr krotności

Układ eksperymentalny JANOSIK

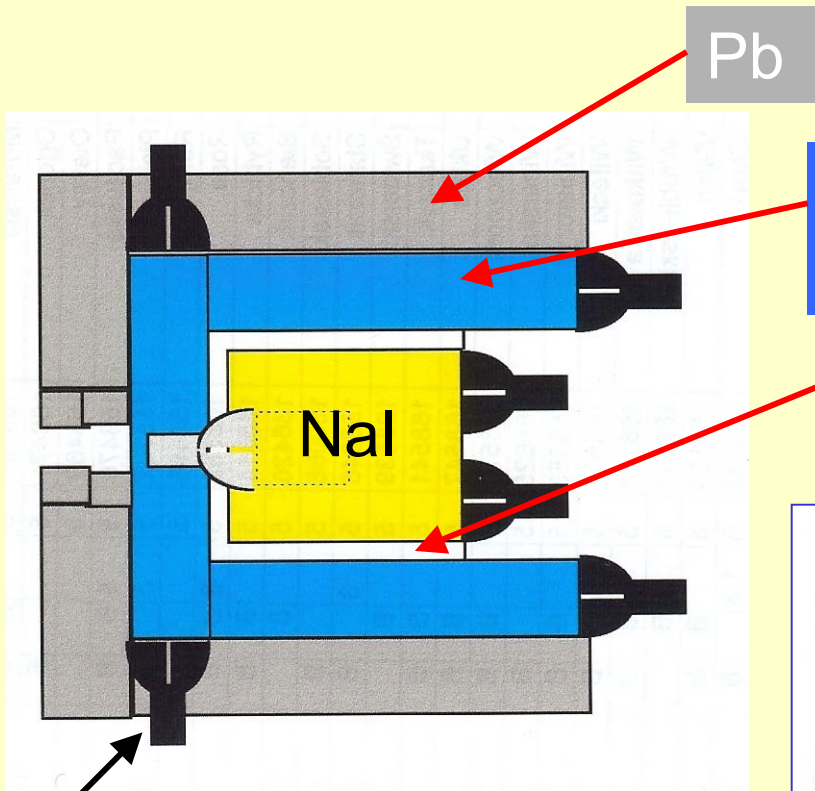
Do pomiaru wysokoenergetycznego ($E=5-50$ MeV) promieniowania gamma używa się układów spektrometrycznych umożliwiających oddzielenie zdarzeń wywołanych przez kwanty gamma pochodzące z reakcji od zdarzeń wywołanych przez inne promieniowanie: neutrony, promieniowanie kosmiczne itp. Takim układem jest **układ 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

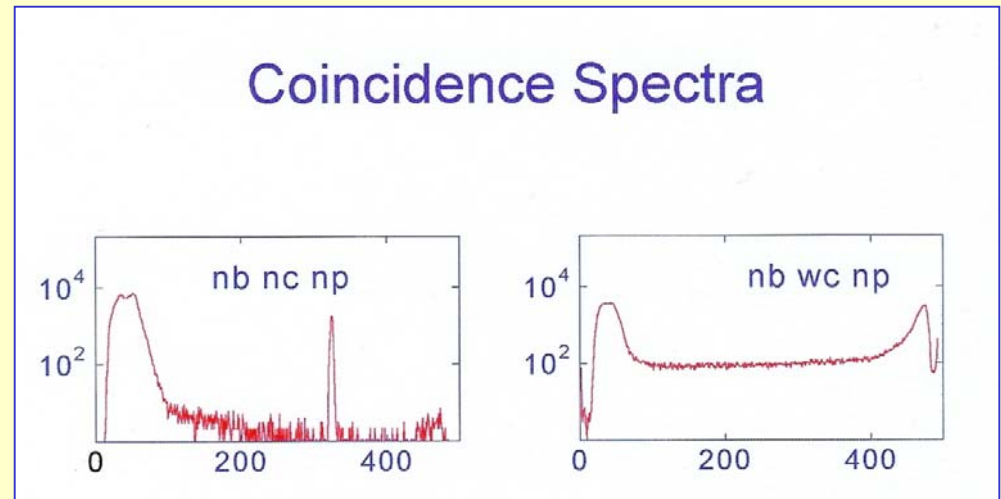
Detektor NaI z osłonami



fotopowielacz

Scyntylator plastikowy

LiH



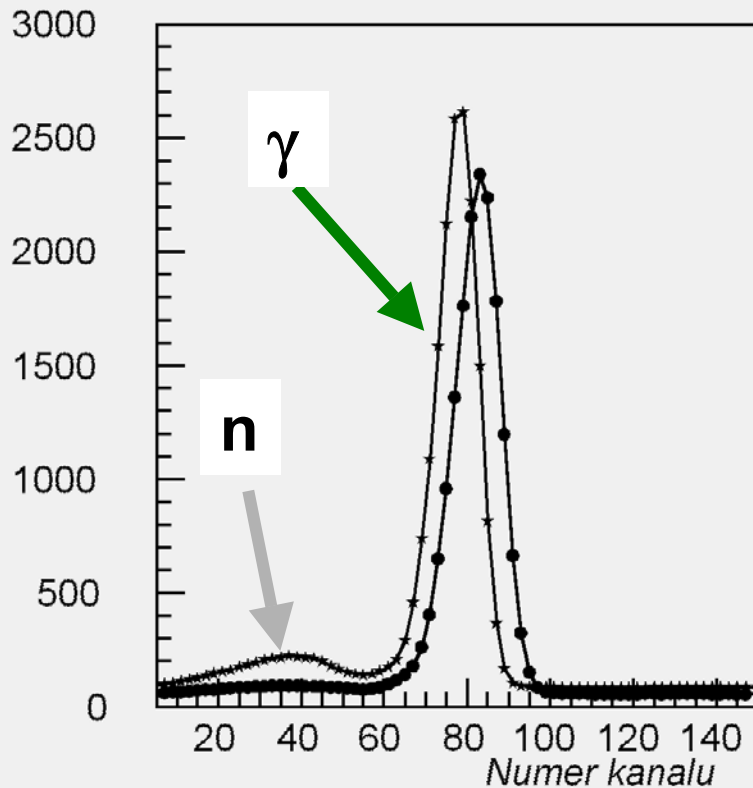
Bez promieniowania kosmicznego

Z promieniowaniem kosmicznym

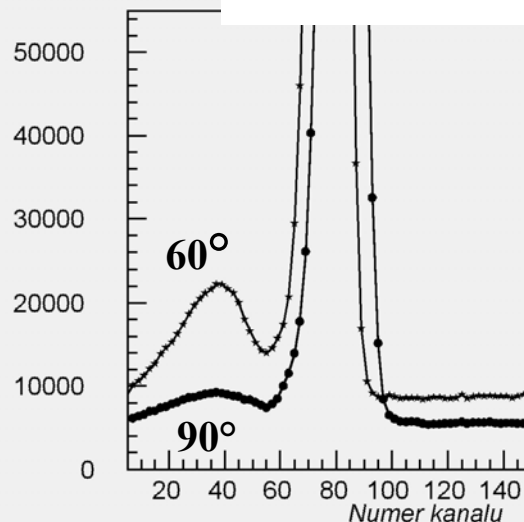
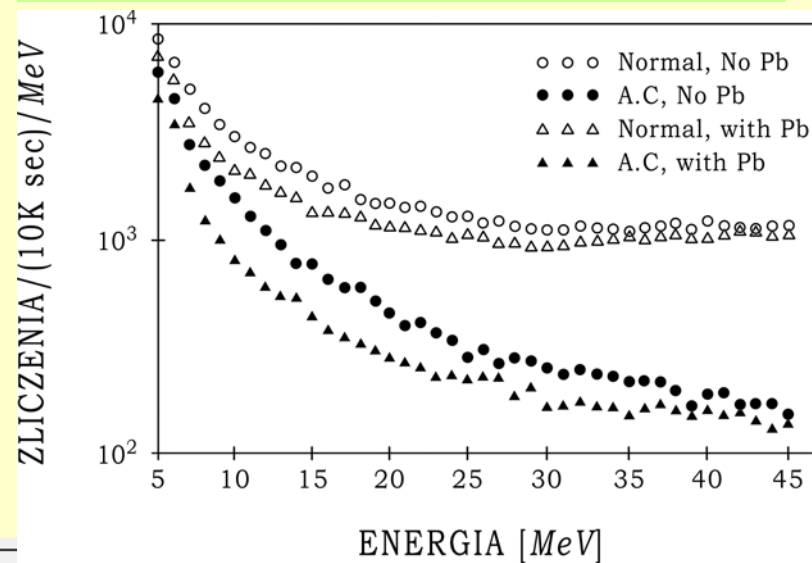
Charakterystyki układu JANOSIK

Widmo czasu przelotu

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

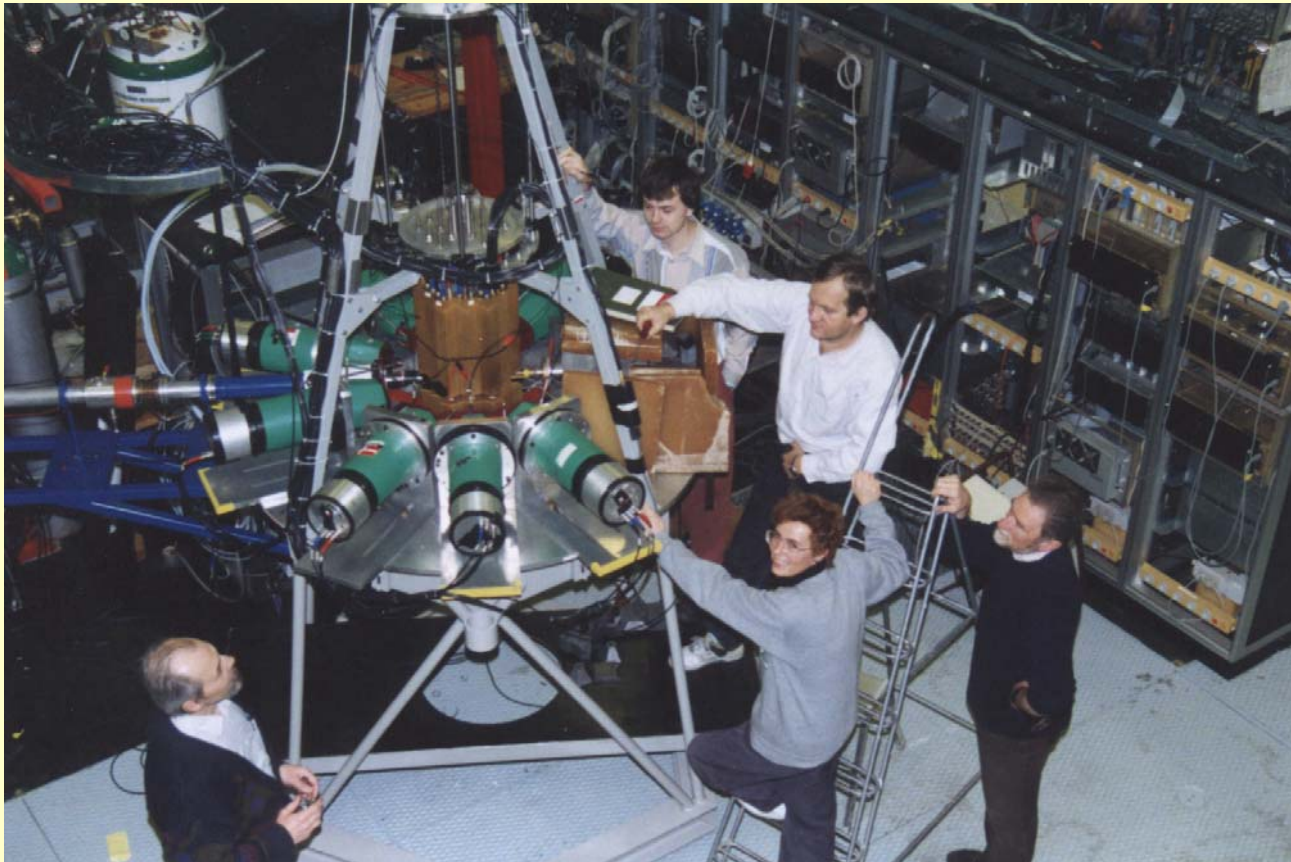


Skuteczność osłony ołowianej i plastikowej

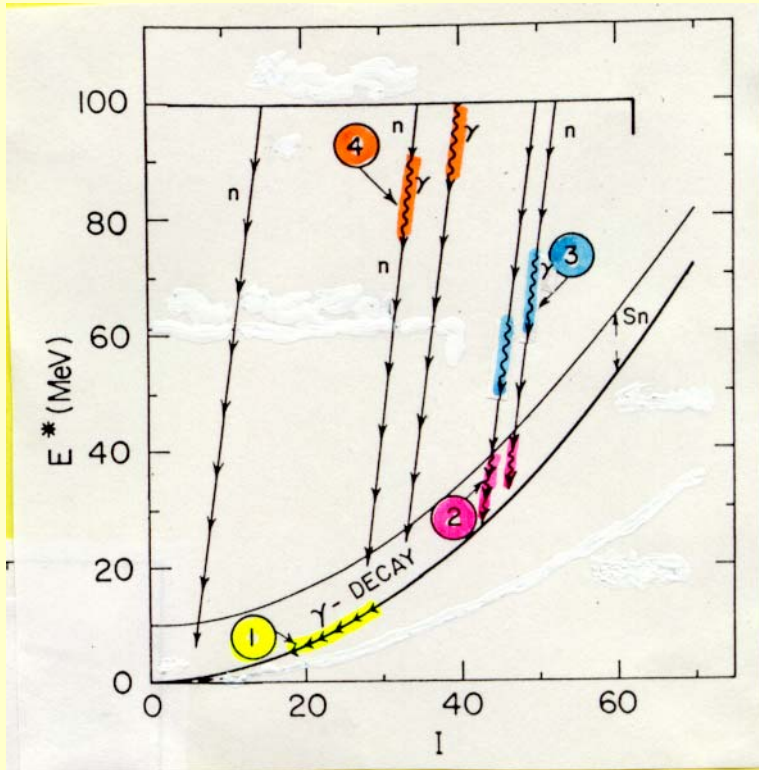


Wydzielenie zdarzeń odpowiadających rozpadowi jądra złożonego w danym przedziale spinów

Układ HECTOR z filtrem krotności Helena



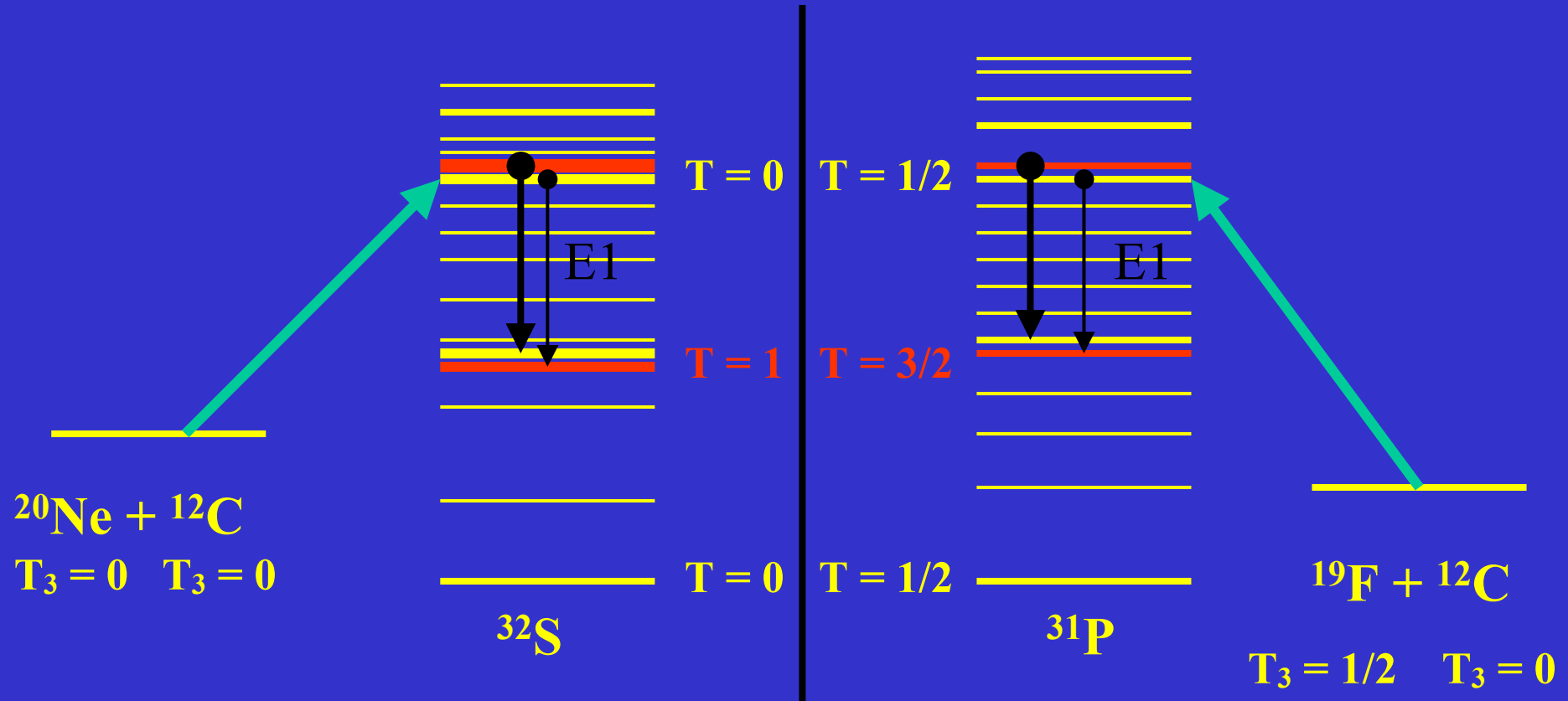
Wydzielenie zdarzeń odpowiadających rozpadowi jądra złożonego w danym przedziale spinów



Mierzona krotność kwantów γ

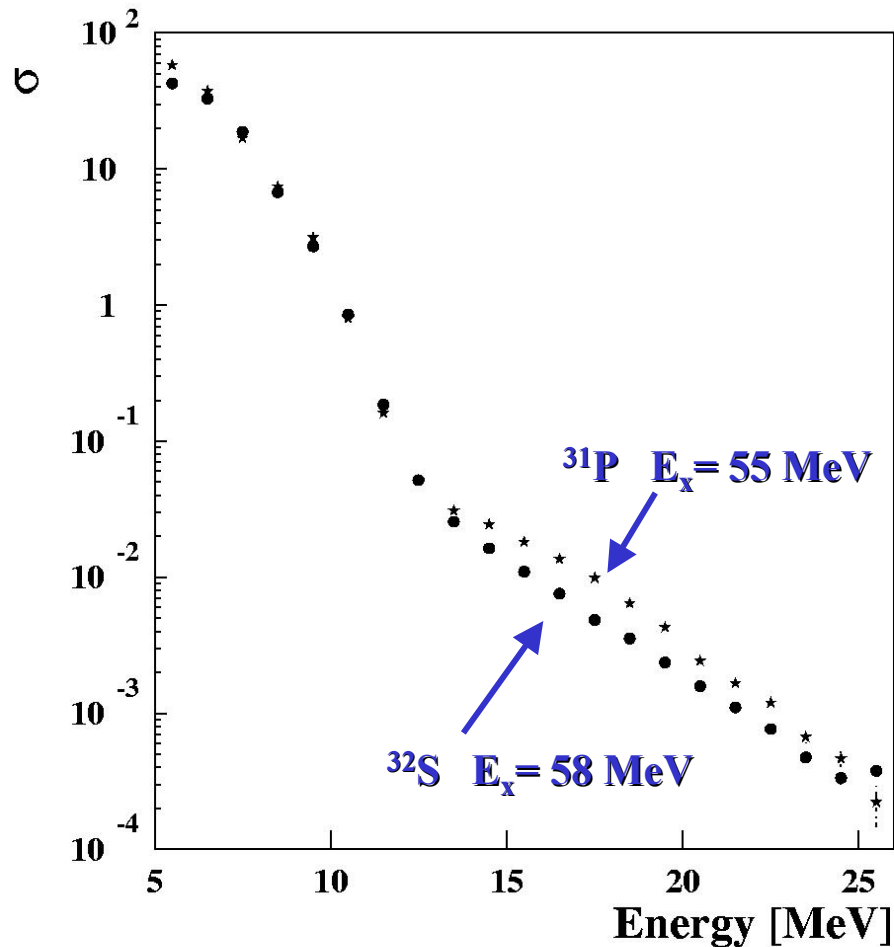
$$\langle k \rangle = k_{E1} + \frac{1}{2}(l_{CN} - k_{E1})$$

Zmieszanie izospinowe poziomów jądrowych i jego wpływ na GDR



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

Zmieszanie izospinowe i Gigantyczny Rezonans Dipolowy (dane eksperymentalne)



$$T_3 = 1/2 \quad T_3 = 0$$

$$E_{\text{lab}}/A = 4.4 \text{ MeV/u}$$



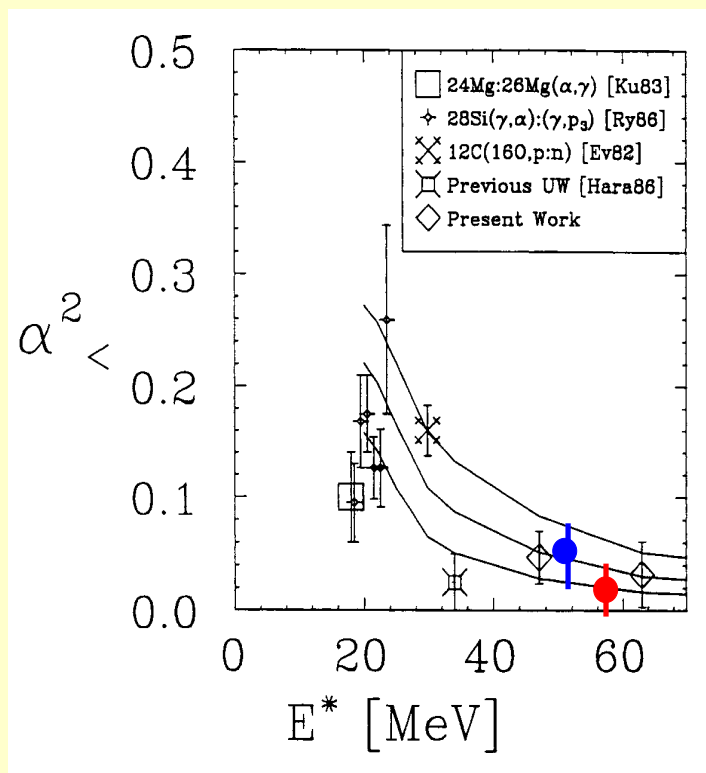
$$T_3 = 0 \quad T_3 = 0$$

$$E_{\text{lab}}/A = 5.2 \text{ MeV/u}$$

Badanie symetrii izospinowej w jądrach lekkich

Zależność zmieszania izospinowego poziomów jądrowych od energii wzbudzenia jądra

izospin T , T_3 dla jąder $T_3 = (N-Z)/2$



CN	E_{in}^x [MeV]	$\alpha_{<}^2$
^{28}Si	*34	0.032 ± 0.032
	47	0.047 ± 0.023
	63	0.032 ± 0.029
^{26}Al	33	0.017 ± 0.032
	42	0.032 ± 0.029
	65	0.061 ± 0.044
^{32}S	58	0.017 ± 0.007
^{36}Ar	49	0.034 ± 0.007

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

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

Zależność zmieszania izospinowego poziomów jądrowych od masy jądra

Jądra zbadane na wiązce z
Warszawskiego Cyklotronu:

^{32}S , ^{36}Ar , ^{44}Ti , ^{60}Zn

