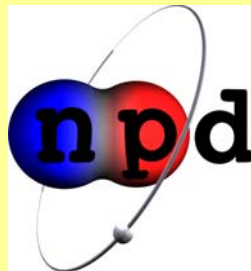


Badanie Gigantycznego Rezonansu Dipolowego wzbudzanego w zderzeniach ciężkich jonów.



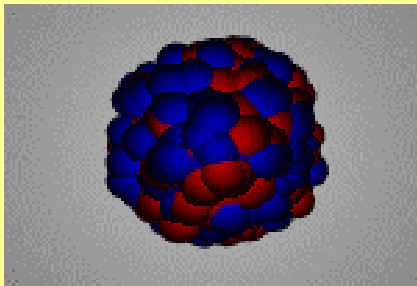
prof. dr hab. Marta Kicińska-Habior
Wydział Fizyki UW
Zakład Fizyki Jądra Atomowego
e-mail:
Marta.Kicinska-Habior@fuw.edu.pl
tel. 55 32 293

Gigantyczne Rezonanse

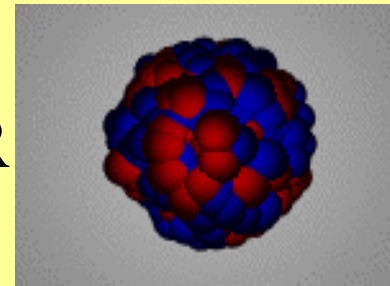
Jak wiadomo jądra atomowe są złożone z nukleonów. Nukleony te mogą podlegać wzbudzeniom. Wzbudzenia jednocząstkowe odpowiadają przeniesieniu jednego nukleonu na inny poziom energetyczny, a wzbudzenia kolektywne, jak oscylacje i rotacje, są związane ze skorelowanym ruchem grupy nukleonów. Specyficznym rodzajem wzbudzeń kolektywnych są tzw. **gigantyczne rezonanse** (GR). Odpowiadają one drganiom wszystkich nukleonów w jądrze, przy czym drgania te mają małą amplitudę, ale dużą częstość. Słowo “gigantyczne” związane jest z bardzo dużym przekrojem czynnym dla tych wzbudzeń, co znaczy, że wyjątkowo łatwo jest takie wzbudzenia wytworzyć.

Występują różne rodzaje rezonansów gigantycznych – klasyfikowane są one np. ze względu na charakter rozkładu materii jądrowej podczas drgań. Mamy więc **gigantyczny rezonans monopolowy (GMR)**, który odpowiada drganiom nukleonów imitującym “oddychanie” jądra. Kolejnym rezonansem jest **gigantyczny rezonans dipolowy (GDR)**. Odpowiada on drganiom nukleonów oscylujących od jednej do drugiej krawędzi jądra, względem środka masy jądra. Taki rodzaj drgań jest interesujący, gdy protony poruszają się w kierunku przeciwnym do neutronów. Istnieje jeszcze wiele innych rodzajów GR.

GMR

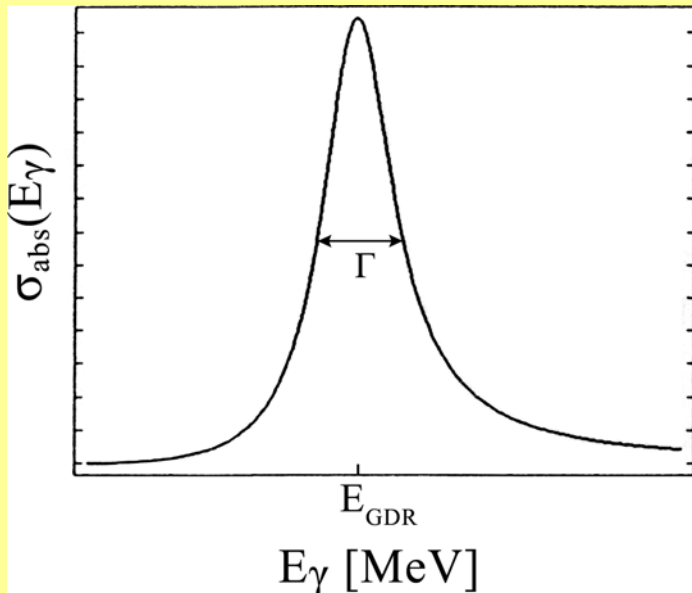


GDR



Gigantyczny Rezonans Dipolowy

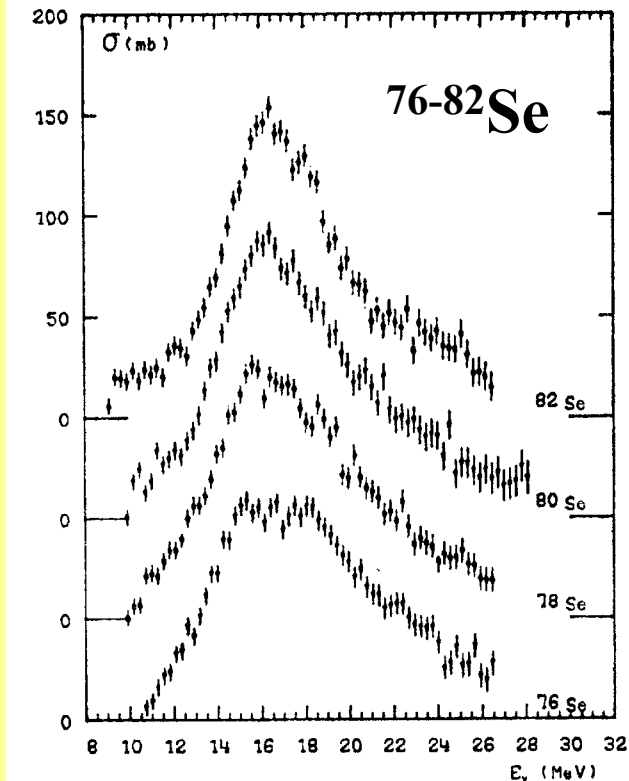
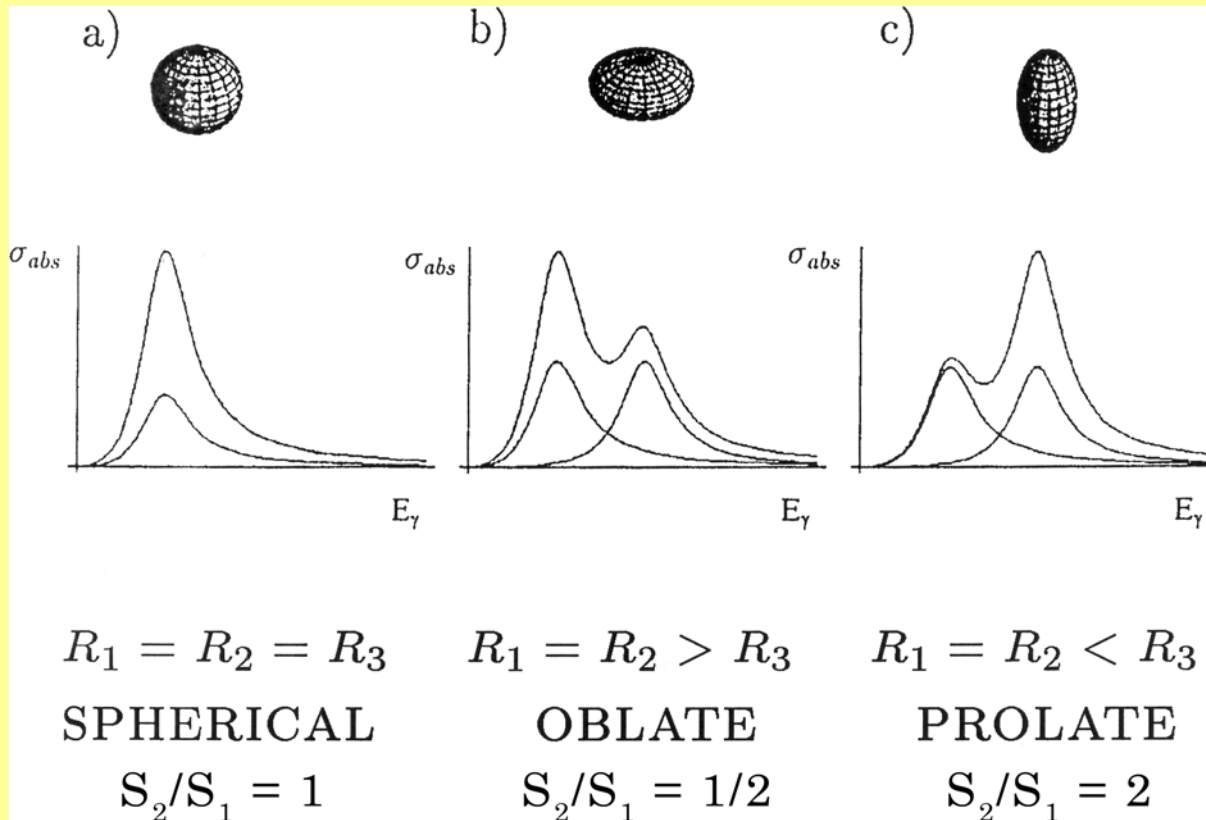
Gigantyczne rezonanse mogą zostać wzbudzone w zasadzie w każdym jądrze. Można je wzbudzić w jądrze w stanie podstawowym i w stanie wzbudzonym. **GDR w jądrze w stanie podstawowym wzbudza się np. poprzez bombardowanie jądra fotonami o odpowiednio wysokiej energii, zbliżonej do energii rezonansowej.** 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 .**



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

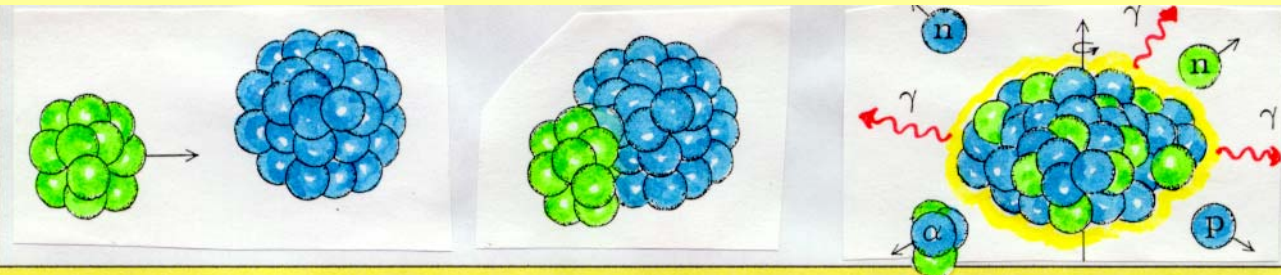
GDR a deformacja jądra w stanie podstawowym

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.



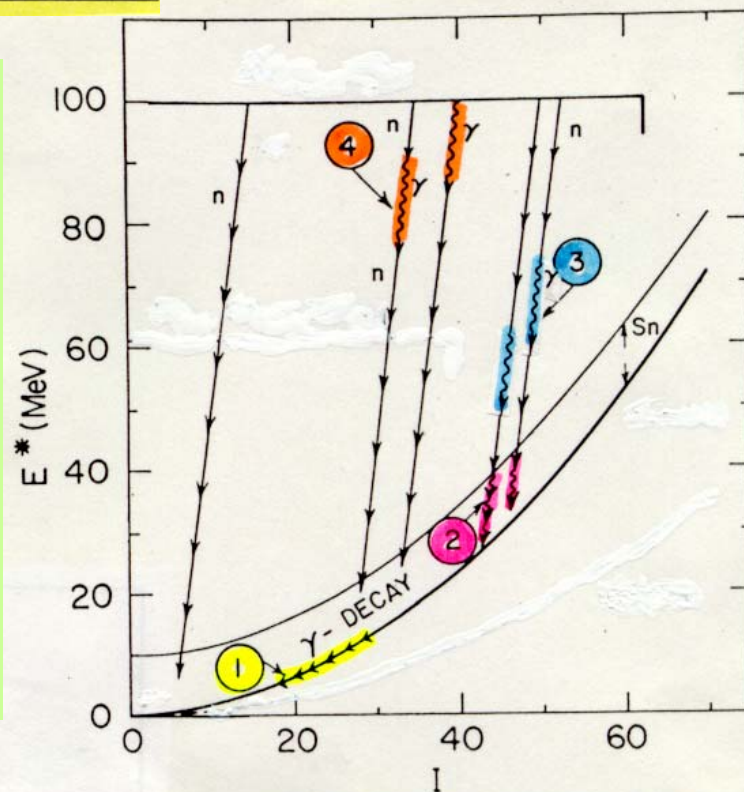
Gigantyczny Rezonans Dipolowy w jądrach gorących

Nasza grupa zajmuje się od kilkunastu lat badaniem GDR występujących w jądrach silnie wzbudzonych, o wysokiej temperaturze i szybko rotujących. **GDR zbudowany na stanach wzbudzonych jąder wzbudza się w zderzeniu ciężkich jonów.**



W tzw. reakcji fuzji ciężkich jonów powstaje jądro złożone, które przy osiąganych energiach wzbudzenia charakteryzuje się bardzo dużą gęstością poziomów jądrowych. Pośród wielu różnych poziomów wzbudzonych występujących przy danej energii wzbudzenia (10^{10} poziomów/MeV przy energii wzbudzenia 50-60 MeV) istnieją poziomy odpowiadające wzbudzeniu GDR. Jądro złożone jest nietrwałe.

Podczas jego rozpadu emitowane są neutrony, protony, cząstki alfa oraz promieniowanie gamma o energii kilkunastu MeV.



Badanie kształtu jąder gorących

To 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).

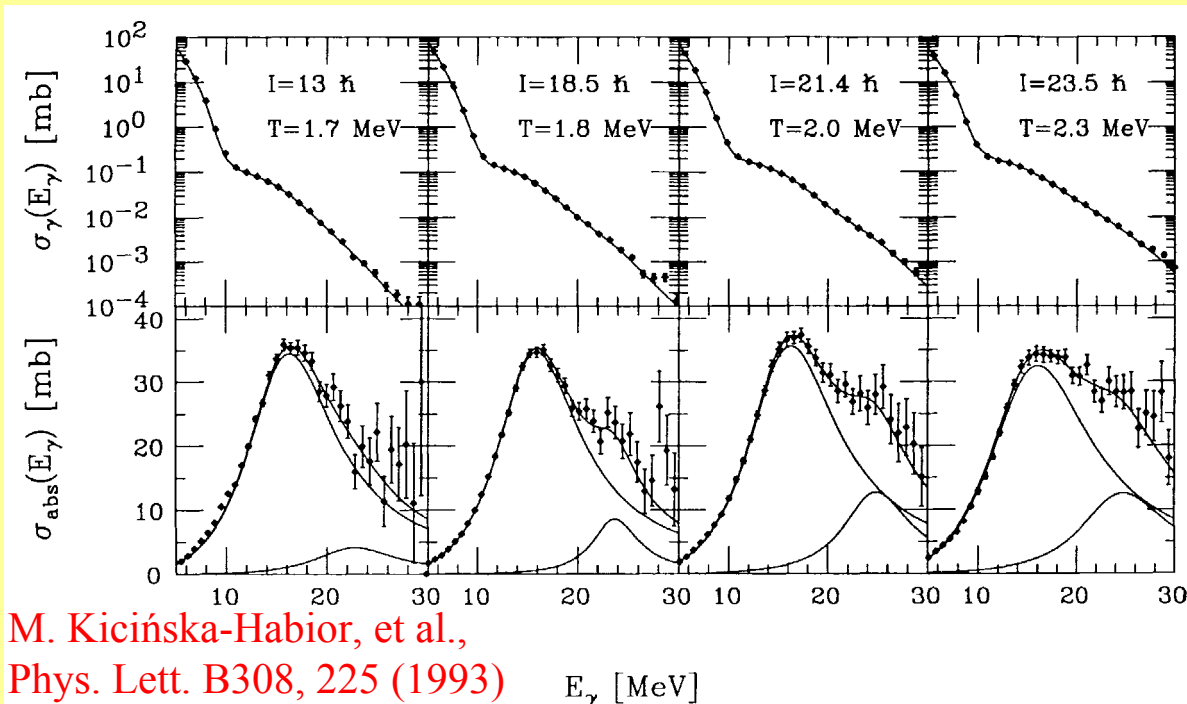
Wyniki otrzymane na wiązce w NPL w Seattle

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

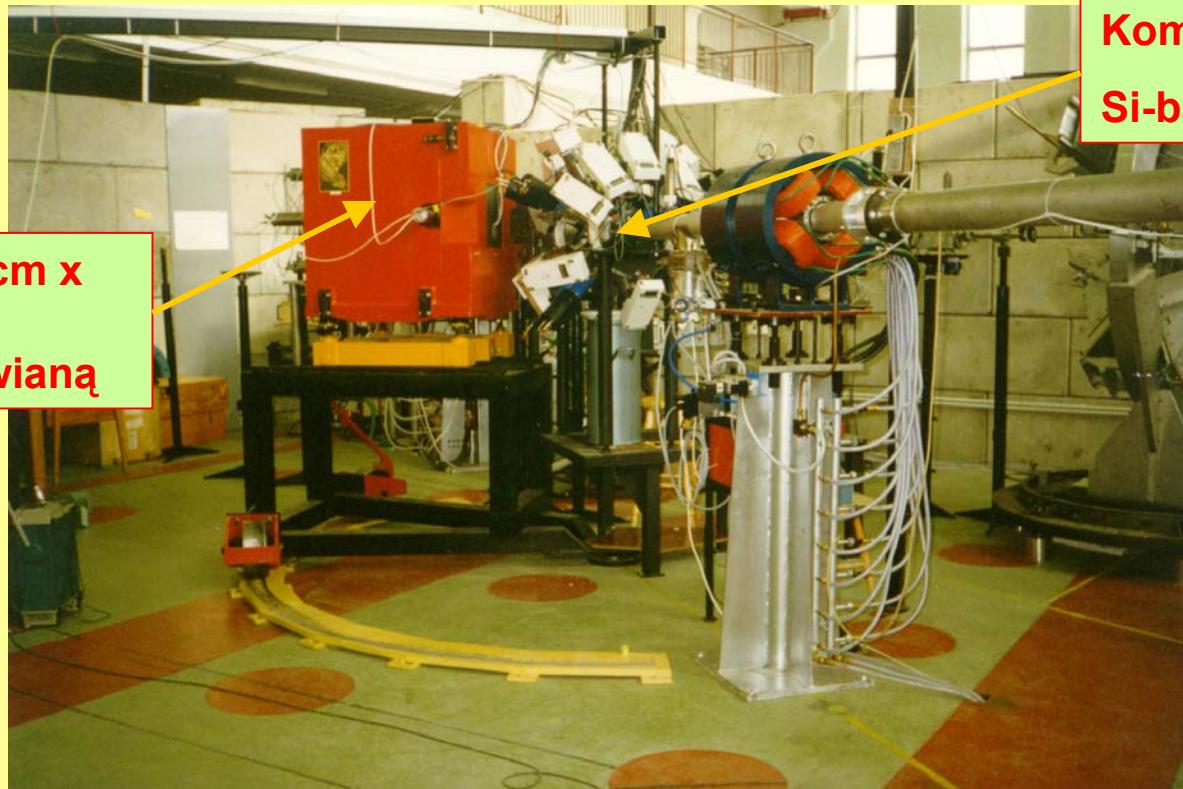


M. Kicińska-Habior, et al.,
Phys. Lett. B308, 225 (1993)

E_γ [MeV]

Układ eksperymentalny JANOSIK

W związku z tym postanowiliśmy mierzyć także w Warszawie promieniowanie gamma emitowane w zderzeniach ciężkich jonów. 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** w ramach jednego z projektów finansowanych przez KBN.



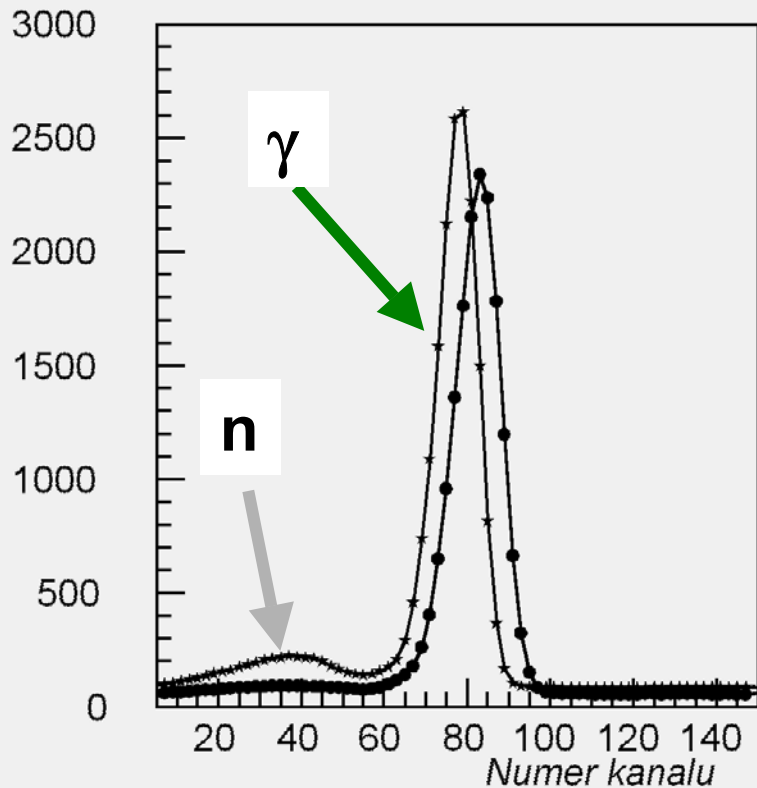
Detektor NaI (25cm x 29 cm) z osłoną plastikową i ołowianą

Komora tarczowa i Si-ball

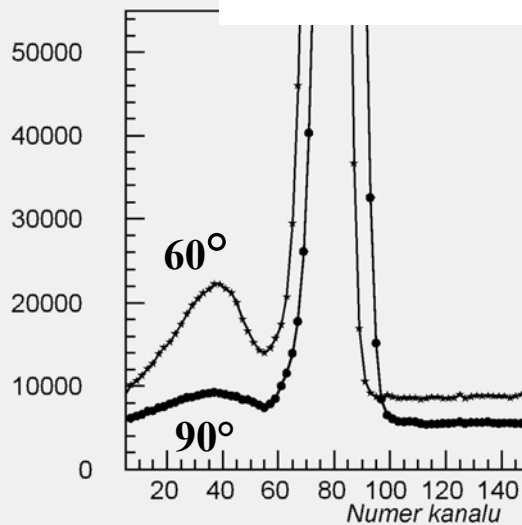
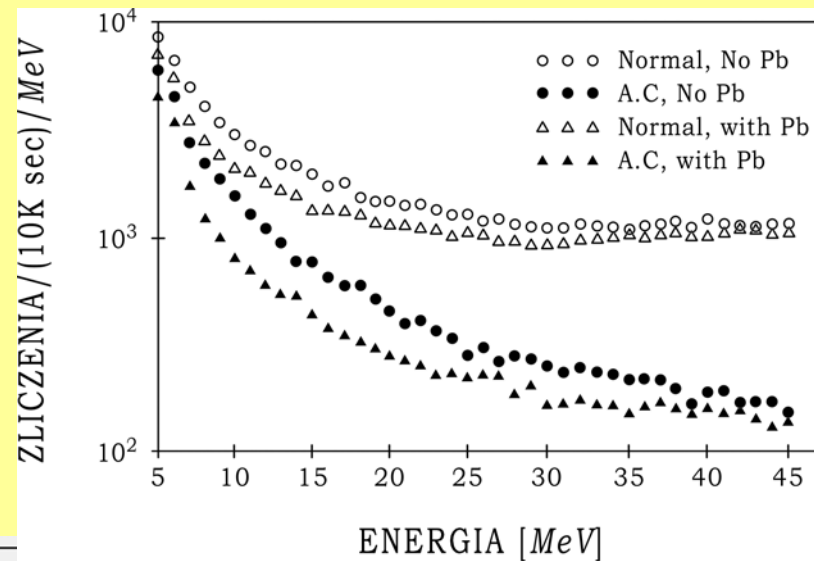
Charakterystyki układu JANOSIK

Widmo czasu przelotu

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



Skuteczność osłony ołowianej i plastikowej



Badania GDR na wiązce z Warszawskiego Cyklotronu

Wykorzystując ten układ i wiązkę jonów z Warszawskiego Cyklotronu można badać GDR w wytworzonym w reakcji jądrze złożonym.

W Warszawie zbadaliśmy w ten sposób jądra ^{70}Se i ^{76}Se o energii wzbudzenia ok. 40 MeV, utworzone w reakcjach $^{12}\text{C}+^{58,64}\text{Ni}$. Wyznaczyliśmy parametry GDR i stwierdziliśmy, że jądro ^{76}Se jest zdeformowane, przy czym jego kształt jest zbliżony do kształtu w stanie podstawowym.

Ostatnio zajmujemy się badaniem **symetrii izospinowej we wzbudzonych jądrach atomowych**. Izospin T jest dobrą liczbą kwantową w stanie podstawowym jądra. Natomiast przy energii wzbudzenia ok. 20 MeV stan o izospinie T może mieć z prawdopodobieństwem ok. 30 - 40% izospin T+1. Teoria przewiduje, że powyżej 20 MeV symetria izospinowa poprawia się i zmieszanie izospinowe maleje ze wzrostem energii wzbudzenia.

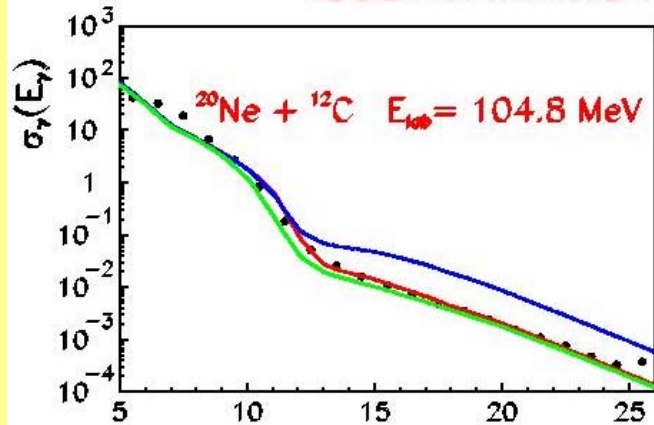
Badając wzbudzenie GDR i jego rozpad w jądrach o liczbie protonów równej liczbie neutronów można wyznaczyć prawdopodobieństwo wystąpienia zmieszania izospinu w tych jądrach.

W badaniach prowadzonych na wiązce jonów z Warszawskiego Cyklotronu, wykorzystując układ pomiarowy JANOSIK, wyznaczyliśmy prawdopodobieństwo zmieszania izospinowego $\alpha_{<}^2$ w jądrach ^{32}S i ^{36}Ar przy energii wzbudzenia ok. 50 MeV.

Badanie symetrii izospinowej w jądrach ^{32}S

Wyniki otrzymane na wiązce jonów z Warszawskiego Cyklotronu

ISOSPIN MIXING in ^{32}S at $E_x = 58.3$ MeV



GDR parameters

$$S_1 = 0.90$$

$$E_1 = 17.4 \text{ MeV}$$

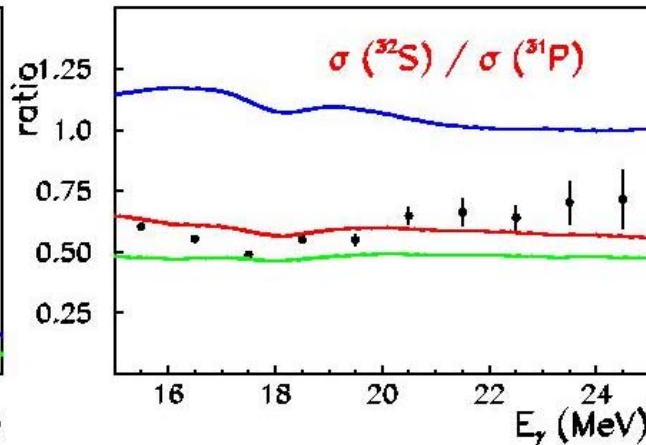
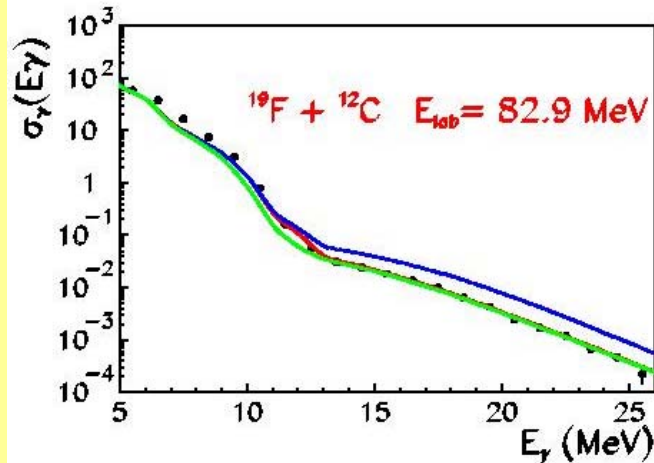
$$\Gamma_1 = 13.3 \text{ MeV}$$

Isospin mixing

$$\Gamma_s = 20 \text{ keV} \quad \alpha^2 = 0.013$$

$$\Gamma_s = 50 \text{ MeV} \quad \text{full mixing}$$

$$\Gamma_s = 0 \quad \text{no mixing}$$



$$\alpha^2_{<}(^{32}\text{S}^*)$$

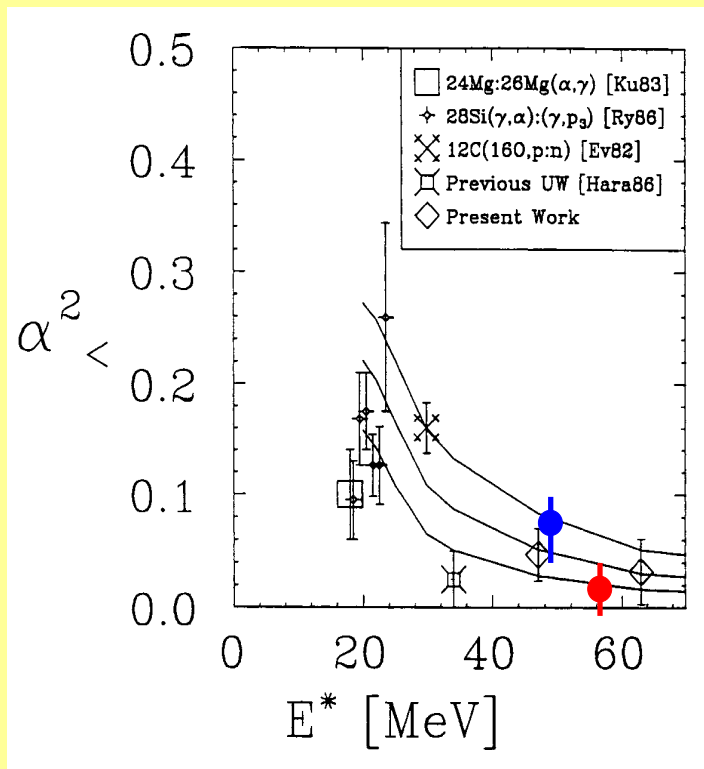


$$\Gamma_{>}^{\downarrow} = 20 \text{ keV}$$

Badanie symetrii izospinowej w jądrach lekkich

Wyznaczono:

prawdopodobieństwo zmieszania izospinowego $\alpha_{<}^2$ w jądrach ^{32}S i ^{36}Ar przy energii wzbudzenia ok. 50 MeV.



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	0.013 ± 0.015
^{36}Ar	49	0.07 ± 0.03

M. Kicińska-Habior, E. Wójcik, O. Kijewska,
M. Kisieliński, M. Kowalczyk, J. Choiński,
Nucl. Phys. A 731c (2004) 138

- M.N. Harakeh et al., Phys. Lett. **176**, 297 (1986),
- J.A. Behr et al., Phys. Rev. Lett. **70**, 3201 (1993)

Mechanizm reakcji przy $E/A > 6 \text{ MeV/u}$

Aby zbadać zachowanie się parametrów GDR i kształtu jądra przy jeszcze wyższych energiach wzbudzenia i porównać je z przewidywaniami modeli teoretycznych należało przeprowadzić reakcje jądrowe dla wyższych energii pocisków. Początkowo **badania GDR przy wyższych energiach wzbudzenia jąder** prowadziliśmy w Laboratorium Fizyki Jądrowej Uniwersytetu Stanu Waszyngton w Seattle. Tam, przy wykorzystaniu podobnego układu spektrometrycznego zbadaliśmy promieniowanie gamma dla wielu reakcji, m.in. także dla reakcji $^{12}\text{C}+^{58,64}\text{Ni}$, ale przy energiach pocisków: 6, 8 i 11 MeV/nukleon. Stwierdziliśmy, że przy energiach pocisków powyżej 5 MeV/nukleon trzeba uwzględnić dodatkowe procesy, które występują w zderzeniu ciężkich jonów. Są to **promieniowanie hamowania** i **reakcja niepełnej fuzji**. W obu procesach emitowane jest wysokoenergetyczne promieniowanie gamma. W pierwszym emisja ma miejsce w zderzeniu pojedynczych nukleonów jądra pocisku i jądra tarczy. Przy czym rozkład kątowy tego promieniowania wyraźnie się różni od rozkładu promieniowania z rozpadu GDR.

Zaproponowaliśmy metodę rozseparowania promieniowania gamma z tych dwóch źródeł. Dzięki temu wyznaczyliśmy parametry opisujące promieniowanie hamowania dla kilku reakcji i kilku energii pocisków. Dobrze zgadzają się one z parametrami ekstrapolowanymi z obszaru wyższych energii pocisków, w których wpływ GDR jest zaniedbywalny, uzyskanymi przez innych autorów.

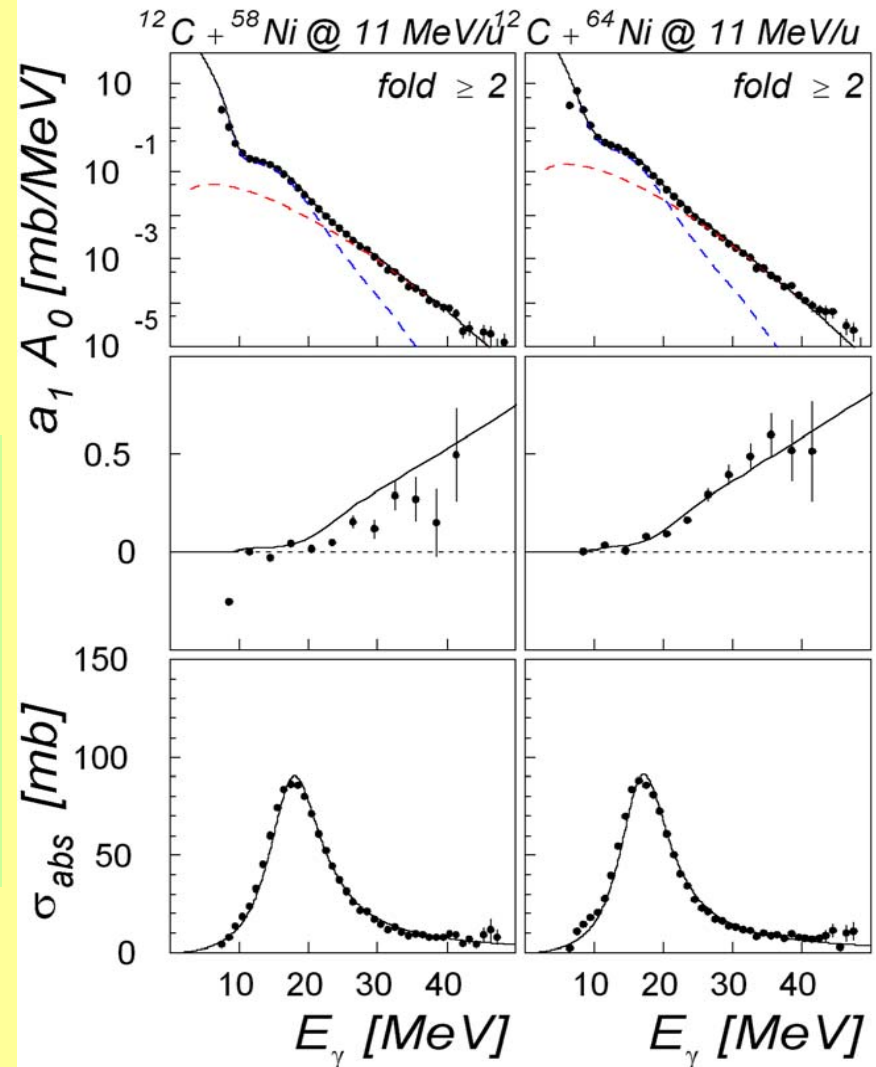
Metoda rozseparowania emisji promieniowania gamma z dwóch źródeł

Emisja statystyczna z jądra złożonego — — —

Emisja promieniowania hamowania - - -

Wyniki otrzymane na wiązce w NPL w Seattle

Widma energetyczne promieniowania γ i funkcje nasilenia GDR dla reakcji $^{12}\text{C} + ^{58,64}\text{Ni} \rightarrow ^{70,76}\text{Se}$ przy $E_p/A = 11 \text{ MeV/u}$

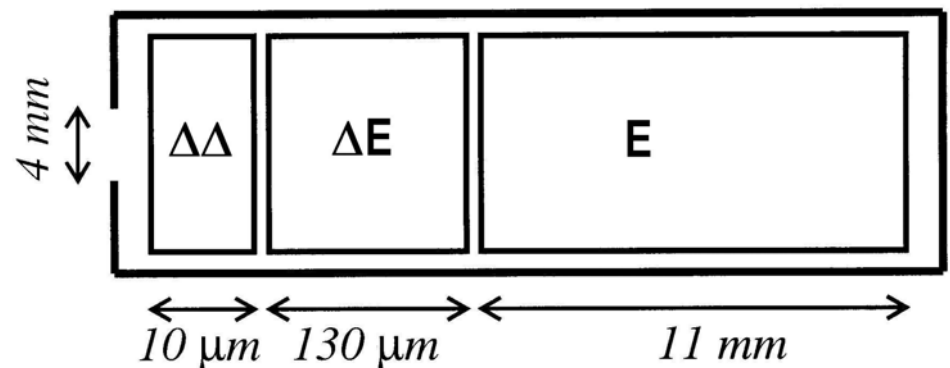
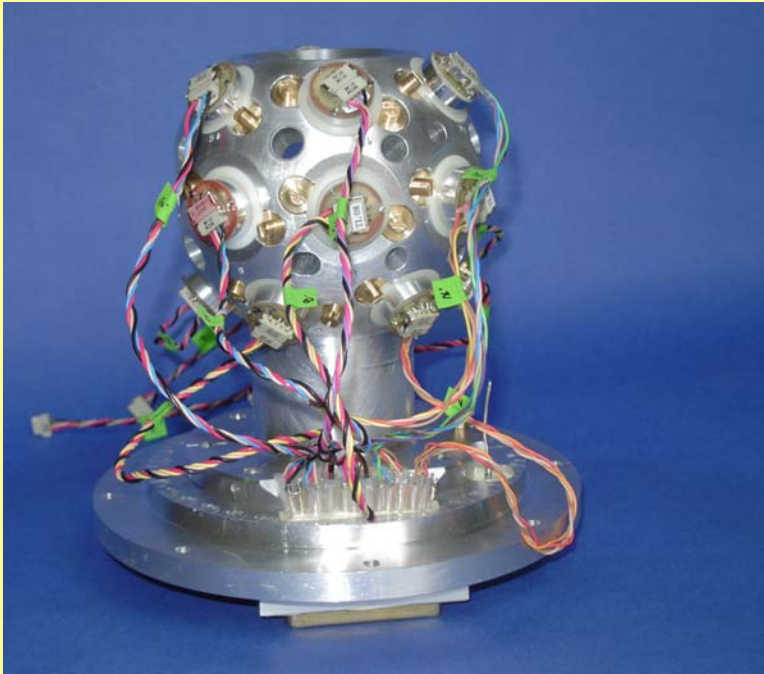


Niepełna fuzja

Drugim procesem, który wymaga uwzględnienia jest **niepełna fuzja**, w której tylko część pocisku łączy się z jądrem tarczy w jądro złożone. Określenie strat masy, ładunku i energii wzbudzenia tworzonych jądra, w którym wzbudzony jest GDR w porównaniu do jądra tworzonych w reakcji pełnej fuzji ma ogromne znaczenie dla prawidłowego określenia zależności parametrów GDR od temperatury jądra. Ta zależność ma natomiast podstawowe znaczenie dla opisu zachowania się nukleonów w jądrach przy najwyższych możliwych temperaturach, przewidywanego w różny sposób przez różne modele teoretyczne. Wyznaczenie strat masy, ładunku i energii wzbudzenia jest możliwe albo w oparciu o obliczenia teoretyczne albo przez pomiar odpowiednich wielkości. Ta druga metoda jest oczywiście lepsza i właśnie rozpoczęliśmy badania na wiązce z Warszawskiego Cyklotronu, w których oprócz promieniowania gamma **mierzymy także protony, deuterony i cząstki alfa emitowane podczas reakcji.**

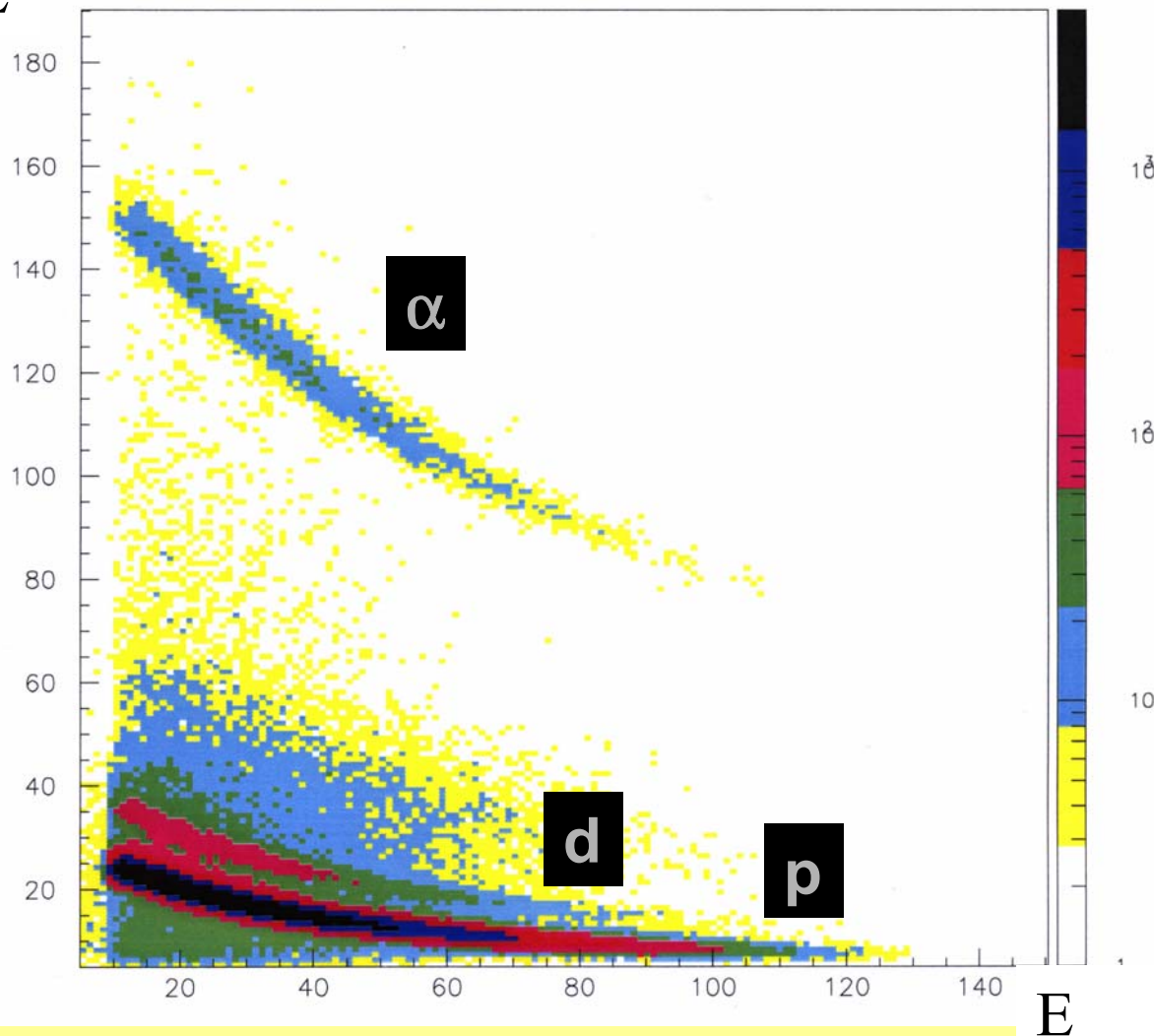
Układ Si-ball

W tym celu zbudowaliśmy **układ Si-ball** złożony z 16 potrójnych teleskopów krzemowych umieszczonych promieniście względem tarczy w próżniowej komorze tarczowej. Badamy teraz GDR wzbudzany w reakcji $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$.



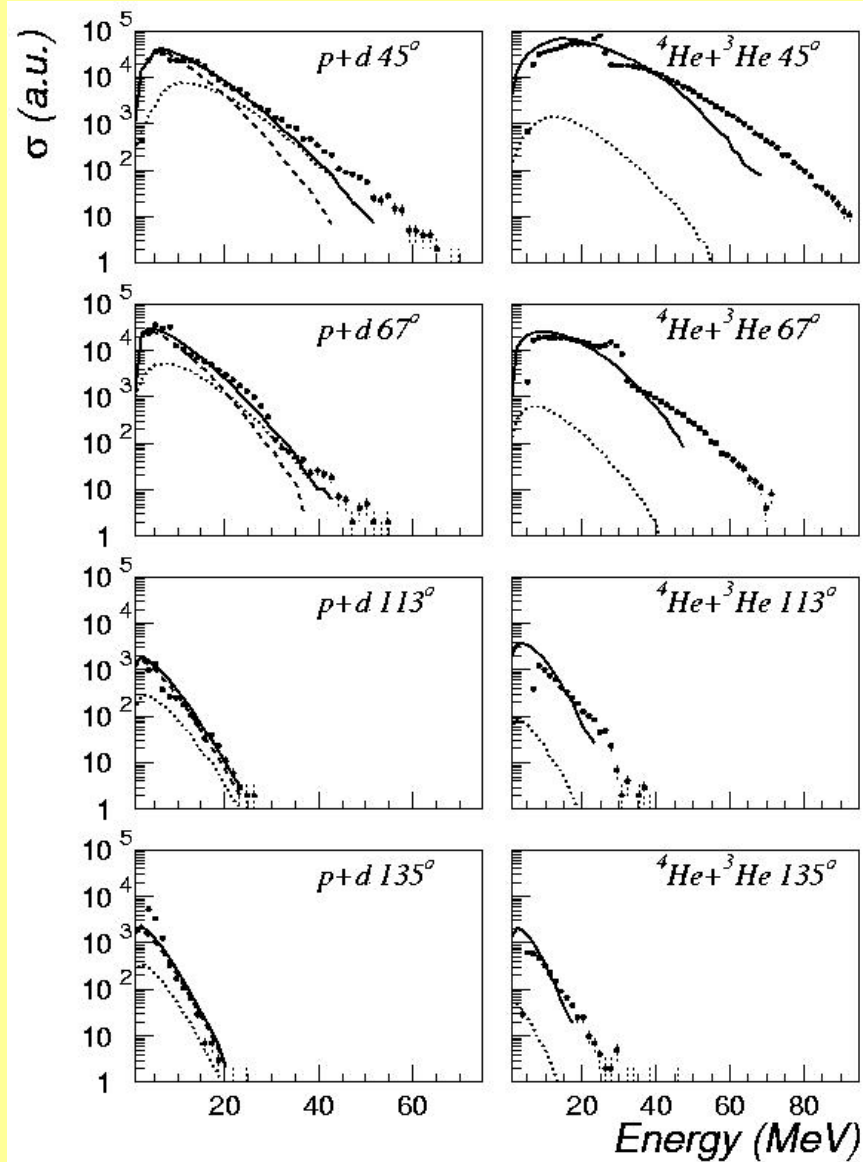
2-wymiarowe widmo cząstek naładowanych z reakcji $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$

ΔE



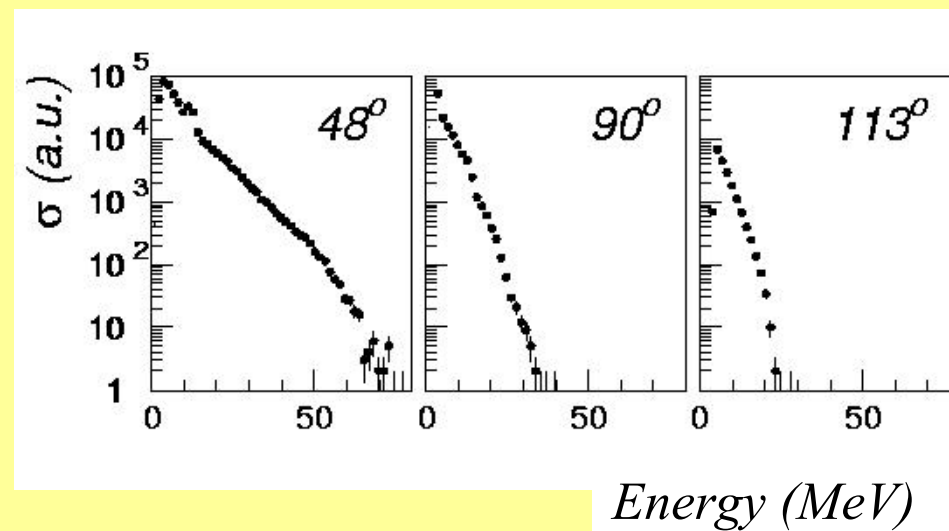
Widma energetyczne protonów i cząstek α z reakcji $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$

Wyniki otrzymane na wiązce jonów z Warszawskiego Cyklotronu



Widma dla energii pocisków 5 MeV/u

Widma zmierzone przy energii pocisków 9 MeV/u są w trakcie analizy.



Grupa GDR:

M. Kicińska-Habior,

O. Kijewska,

E. Wójcik,

M. Kisieliński,

M. Kowalczyk,



Zapraszamy do współpracy !