

Obserwacja gigantycznych rezonansów dipolowych i rezonansów „pygmy” w ^{132}Sn i sąsiednich izotopach

Na podstawie rozprawy doktorskiej
Przemysława Adricha

(promotor: prof. W. Waluś)

Uniwersytet Jagielloński, 25 VIII 2005

Physical Review Letters **95**, 132501 (2005)

Tomasz Matulewicz
ZFJA
31 marca 2006

Observation of Pygmy and Giant Dipole Resonances in ^{132}Sn and neighboring mass isotopes

Plan prezentacji

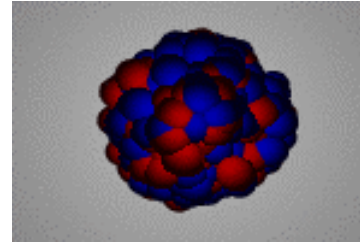
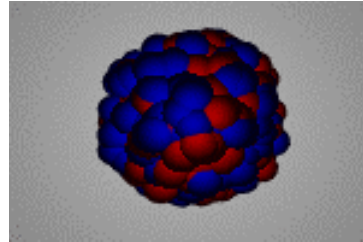
- Rezonanse gigantyczne – wprowadzenie
- Motywacja
- Eksperyment
- Wyniki
- Podsumowanie

Prosty model makroskopowy rezonansów gigantycznych

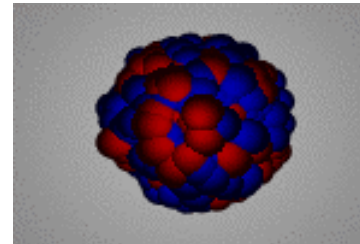
izoskalarny

izowektorowy

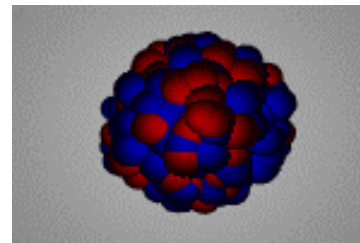
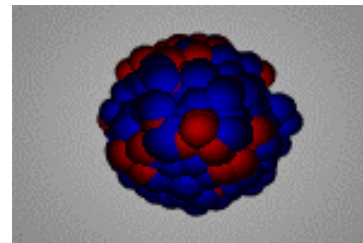
Monopolowy
(GMR)



Dipolowy
(GDR)

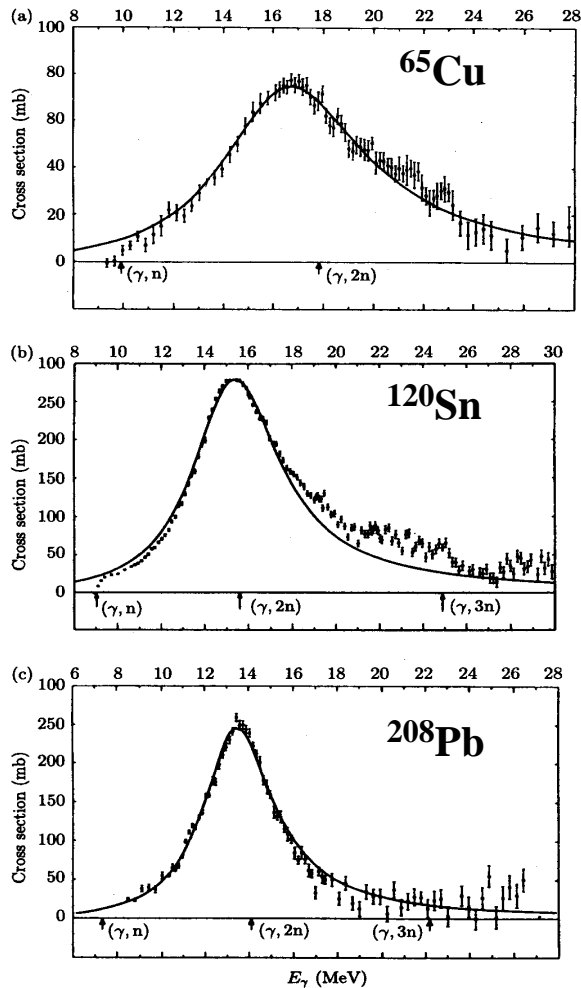


Kwadrupolowy
(GQR)



Gigantyczny rezonans dipolowy podstawowe własności

Berman and Fulz, Rev. Mod. Phys. 47 (1975) 47



➤ występuje powszechnie

$$\sigma_{\gamma}(E) = \frac{\sigma_{\max}}{1 + \frac{(E^2 - E_{\max}^2)^2}{E^2 \Gamma^2}}$$

σ_{\max} , E_{\max} , Γ – gładkie funkcje masy

$$E_{\text{GDR}}(A) = 31.2A^{-1/3} + 20.6A^{-1/6}$$

gęstość powierzchni

➤ energia powyżej progu na emisję nukleonu

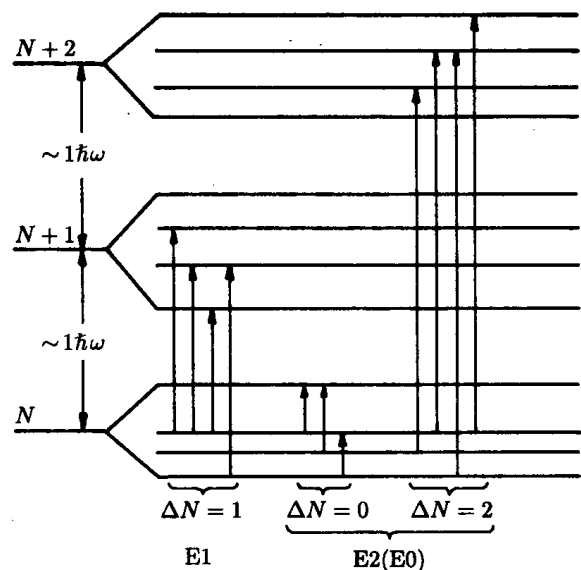
➤ nasilenie wysyca regułą sumacyjną TRK

Reguła sumacyjna TRK
(dla wzbudzeń dipolowych)

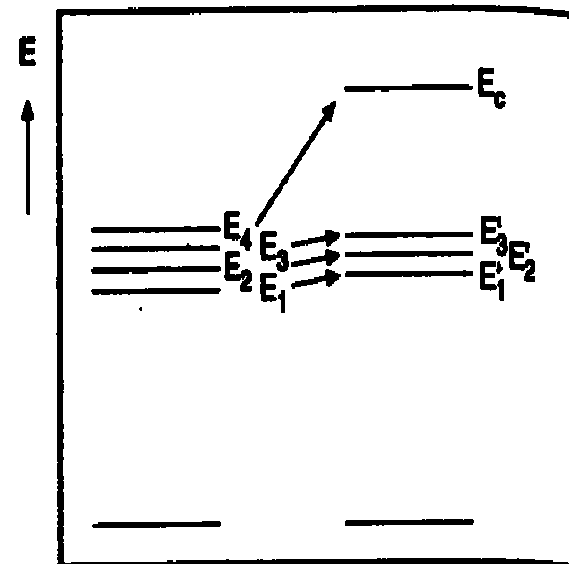
$$\int_0^{\infty} \sigma_{\gamma}(E) dE = \frac{2\pi^2 e^2 \hbar}{m_0 c} \frac{NZ}{A} = 60 \frac{NZ}{A} \text{ [mb} \cdot \text{MeV]}$$

Prosty model mikroskopowy rezonansów gigantycznych

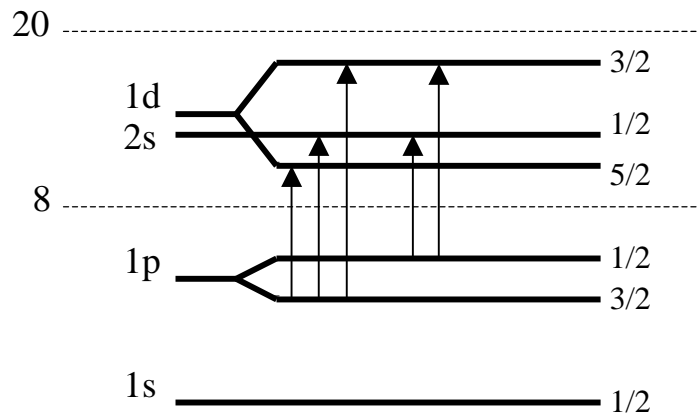
- Jak powiązać drgania kolektywne...
... z mikroskopową strukturą jądra atomowego ?



Koherentna superpozycja wielu wzbudzeń typu 1p-1h pomiędzy głównymi powłokami. Energia silnie przesunięta na skutek oddziaływań resztkowych.



Przykład: GDR w ^{16}O



**Niezaburzone stany
cząstka-dziura $J^\pi = 1^-$**

$$|\psi_i\rangle = |\phi_{j_1}^{-1} \phi_{j_2}\rangle$$

$$|\phi_{1p_{3/2}}^{-1} \phi_{1d_{5/2}}\rangle, |\phi_{1p_{3/2}}^{-1} \phi_{1s_{1/2}}\rangle, |\phi_{1p_{3/2}}^{-1} \phi_{1d_{3/2}}\rangle,$$

**Ograniczone do
wzbudzeń powłok sd**

$$|\phi_{1p_{1/2}}^{-1} \phi_{1s_{1/2}}\rangle, |\phi_{1p_{1/2}}^{-1} \phi_{1d_{3/2}}\rangle$$

&

**Resztkowe oddziaływania
stanów cząstka-dziura:
(-> hamiltonian zaburzony)**

$$H = H_0 + V$$

$$H_0|\psi_i\rangle = E_i|\psi_i\rangle$$

**Stany i energie własne
zaburzonego
hamiltonianu H:**

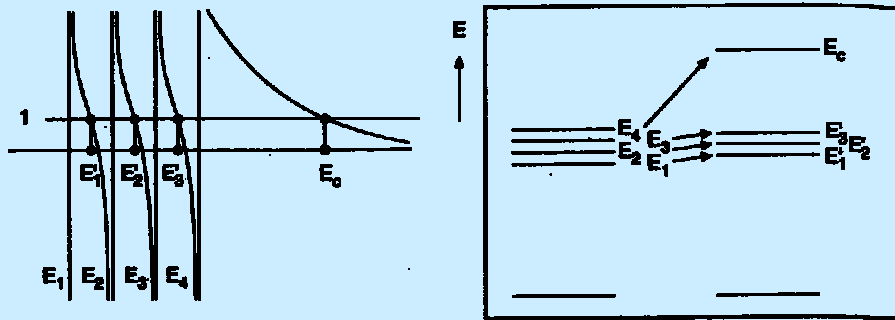
$$H|\psi\rangle = (H_0 + V)|\psi\rangle = E|\psi\rangle$$

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^N c_i |\psi_i\rangle$$

Schematyczny model mikroskopowy

$$\left. \begin{aligned} (H_0 + V) \sum_{i=1}^N c_i |\psi_i\rangle &= E \sum_{i=1}^N c_i |\psi_i\rangle \\ \sum_{i=1}^N \langle \psi_k | H_0 + V | \psi_i \rangle c_i &= E c_k \\ \sum_{i=1}^N (E_i \delta_{ik} + \langle \psi_k | V | \psi_i \rangle) c_i &= E c_k \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{bmatrix} E_1 + V_{11} & V_{12} & V_{13} & \cdots \\ V_{21} & E_2 + V_{22} & V_{23} & \cdots \\ V_{31} & V_{32} & E_3 + V_{33} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$V_0 > 0$ – oddziaływanie odpychające



„Particles and Nuclei”, R. Povh... Springer-Verlag

$$\langle \psi_k | V | \psi_i \rangle = V_{ki} = V_0$$

$$c_i = \frac{V_0}{E - E_i} \sum_{j=1}^N c_j \quad / \sum_{j=1}^N c_j = \text{Const} /$$

$$c_1 + c_2 + \dots = \left(\frac{V_0}{E - E_1} + \frac{V_0}{E - E_2} + \dots \right) \sum_{j=1}^N c_j$$

$$1 = \sum_{i=1}^N \frac{V_0}{E - E_i}$$

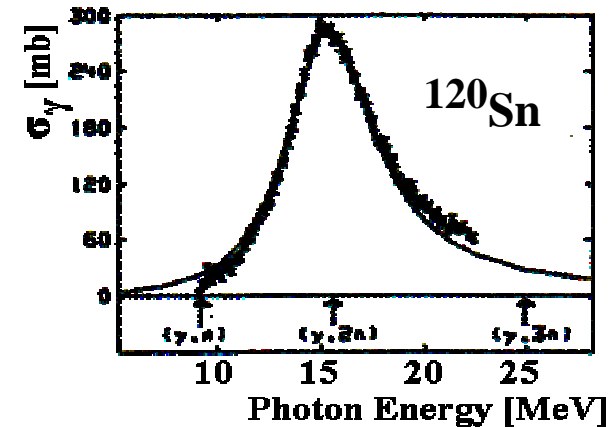
Motywacje – nasilenie dipolowe w jądrach bogatych w neutrony

W jądrach stabilnych:

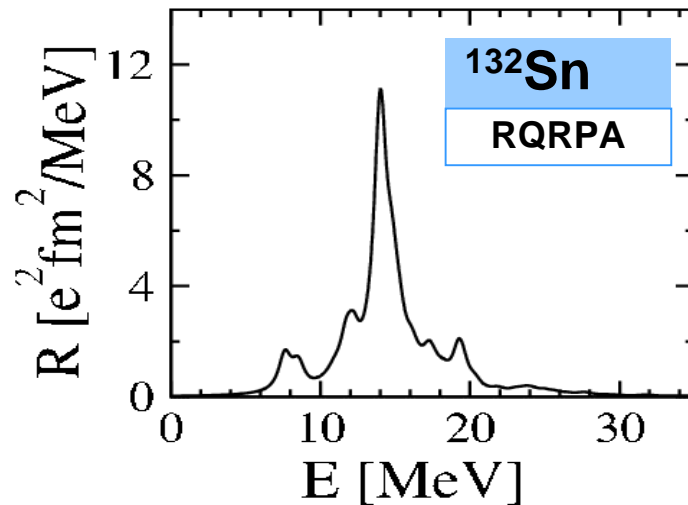
- nasilenie GDR wysyca ~100% reguły TRK

W jądrach bogatych w neutrony:

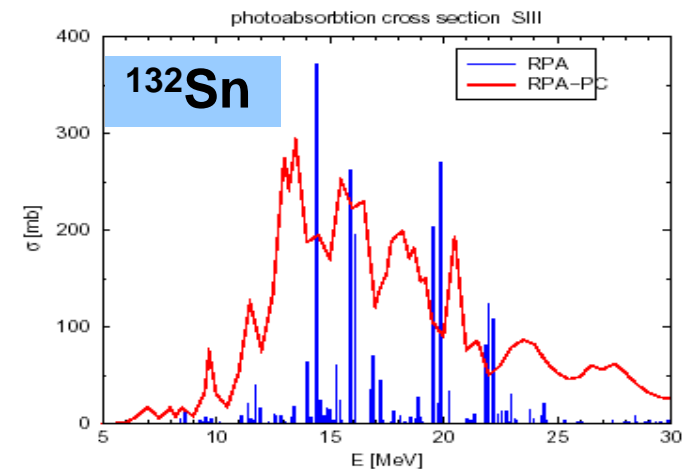
- fragmentacja funkcji nasilenia
- nasilenie poniżej energii GDR
- nowe wzbudzenie kolektywne?



Atomic and Nucl. Data Tables 1988



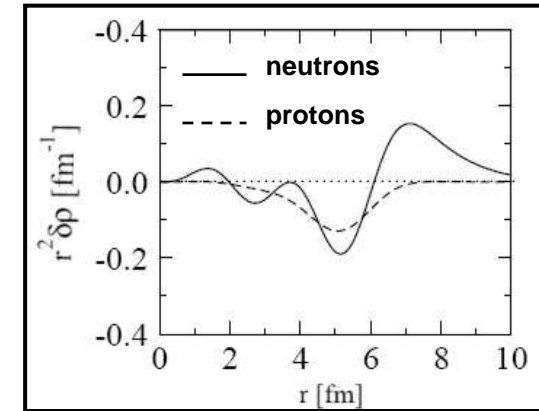
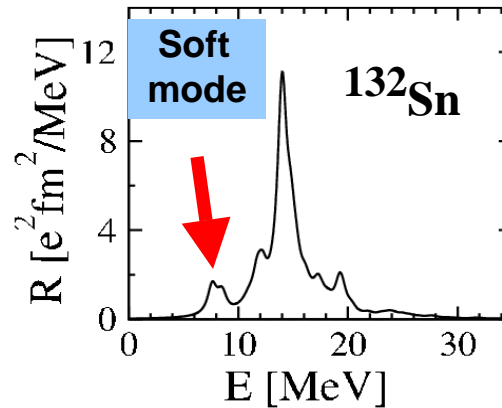
N.Paar et al, Phys.Rev. C67(2003)34312



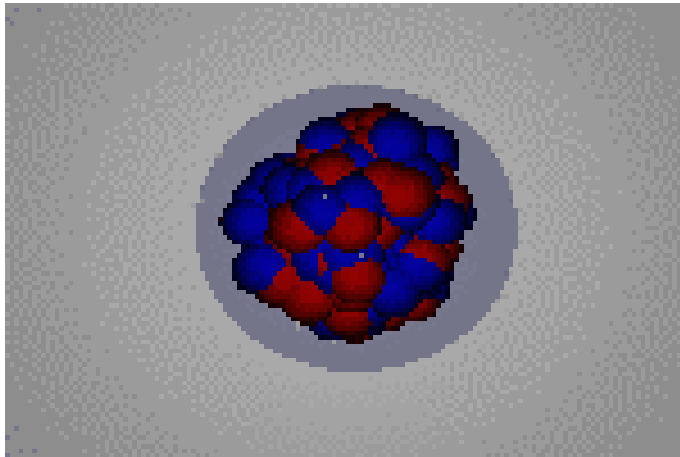
D.Sarchi, P.F.Bortignon, G.Colo,
Phys.Lett.B601(2004)27-33

Motywacje – poszukiwanie rezonansu typu „Pygmy” (PDR)

Stan kolektywny przy energii poniżej 10 MeV, opisany koherentną superpozycją wzbudzeń 1p-1h, o nasileniu wysycającym kilka % reguły TRK.



N.Paar et al, Phys.Rev. C67(2003)34312

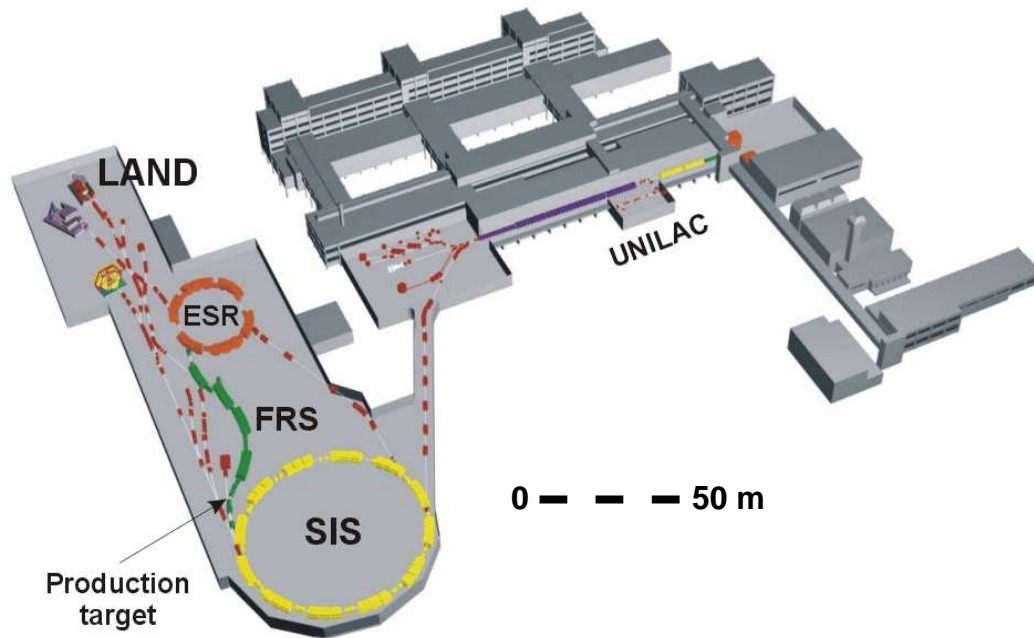


Przewidywana gęstość przejść (transition density):

- Wewnątrz jądra protony i neutrony drgają w fazie
- Przy powierzchni wkład tylko od neutronów

Interpretacja makroskopowa – drganie skórki neutronowej względem rdzenia jądra

Eksperyment



GSI = Gesellschaft für Schwerionenforschung
= Instytut Badania Ciężkich Jonów
Darmstadt, Niemcy

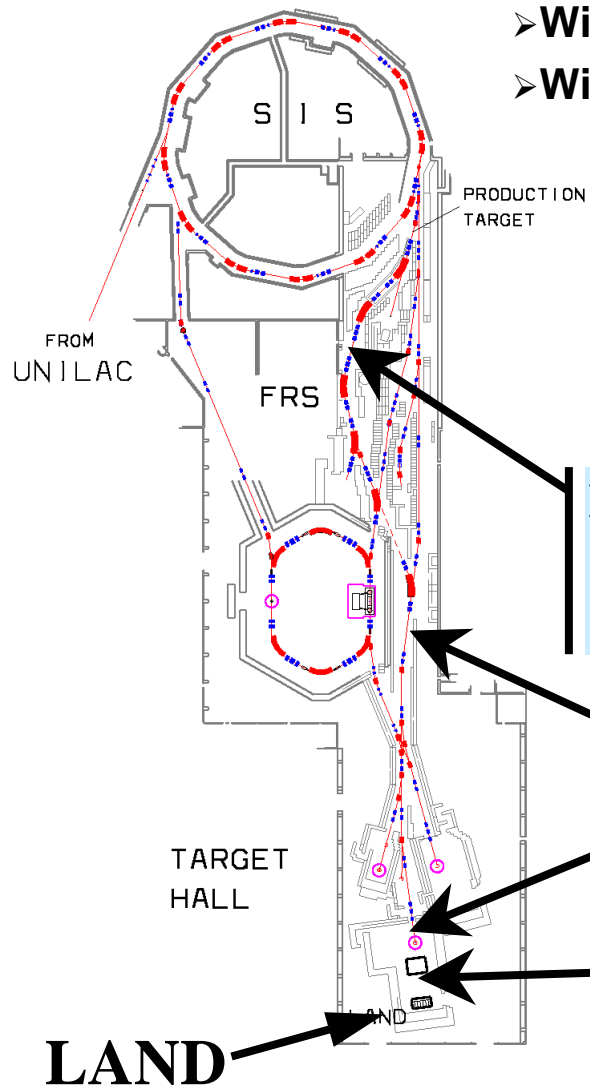
Podstawowe zagadnienia

- **Wytwarzanie wiązki**
(^{238}U : rozszczepienie w locie + separacja fragmentów)
- **Metoda wzbudzenia**
(reakcja wzbudzenia w peryferyjnym zderzeniu ciężkich jąder – wzbudzenie kulombowskie)
- **Metoda pomiaru funkcji nasilenia dipolowego**
(analiza masy niezmienniczej)

Układ i metoda pomiarowa

Wytwarzanie i identyfikacja wiązki

- Wiązka pierwotna: $3 \cdot 10^8$ $^{238}\text{U}/\text{s}$ @ 550 MeV/u
- Wiązka wtórna: 10 jonów $^{132}\text{Sn}/\text{s}$



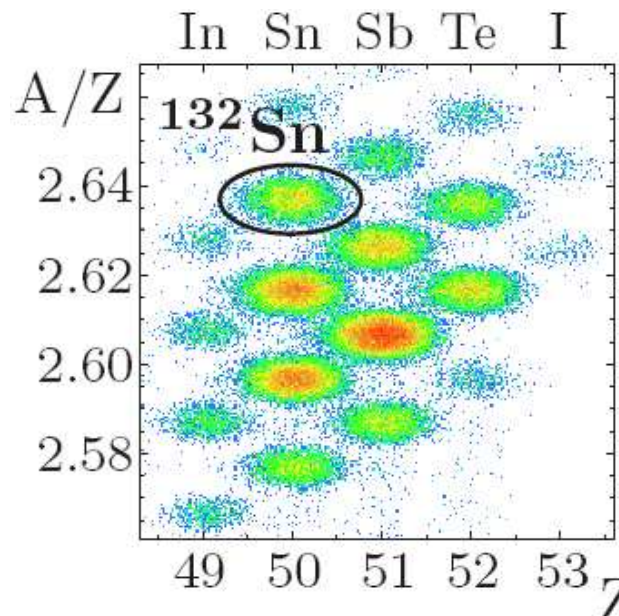
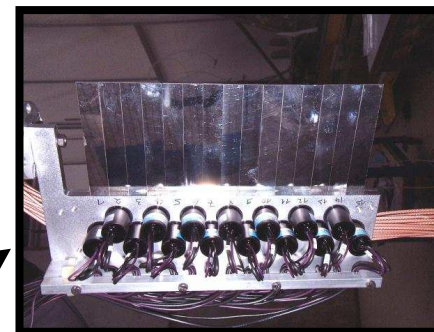
$$\frac{A}{Q} = \frac{e}{m_u c} \frac{B\rho}{\beta\gamma}$$

$B\rho$ – z trajektorii w płaszczyźnie ogniskowej FRS

β – z TOF

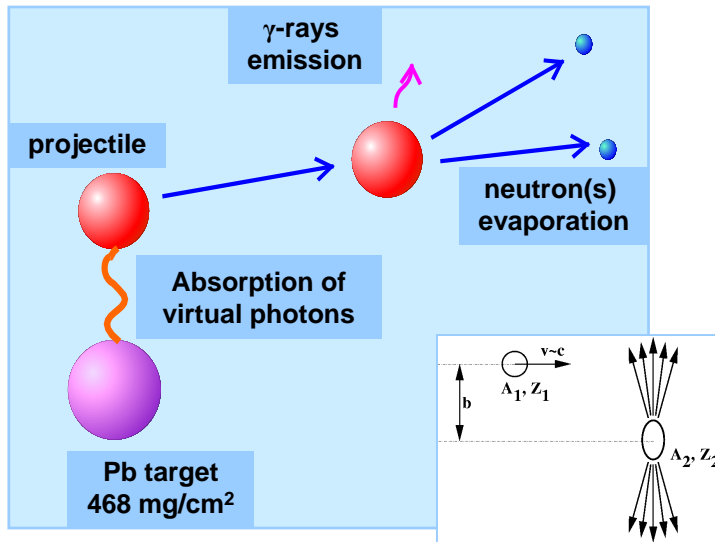
Z – z ΔE

LAND

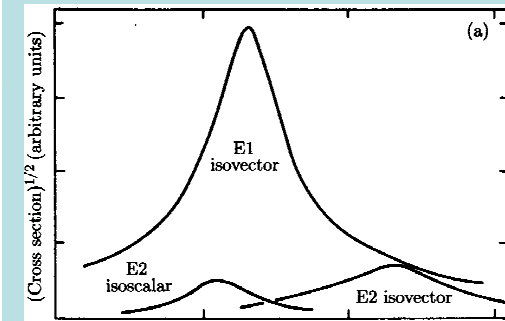
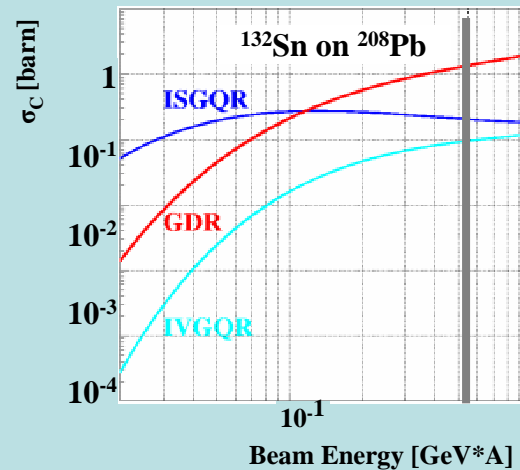


Układ i metoda pomiarowa

Wzbudzenie kulombowskie w zderzeniu peryferyjnym



- Duże przekroje czynne: $\sigma_c \sim Z^2$
- Duża selektywność na wzbudzenia typu E1



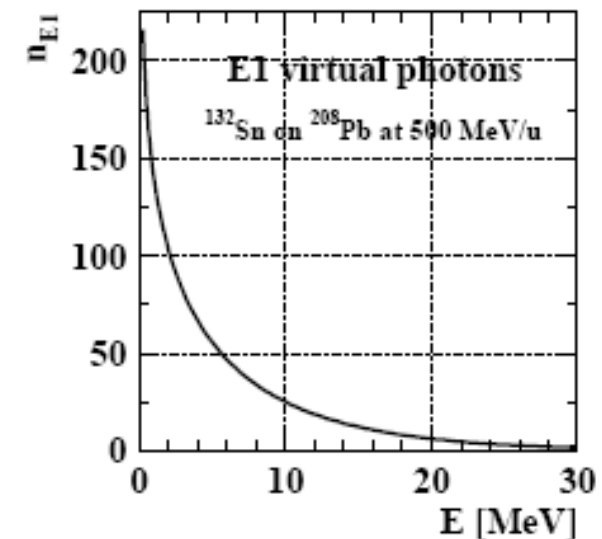
➤ Dobrze ugruntowana teoria

Interpretacja ilościowa w modelu absorpcji fotonów wirtualnych. Dla wzbudzeń czysto dipolowych zachodzi:

$$\frac{dB}{dE}(E1,0 \rightarrow E) \sim \frac{1}{n_{E1}(E)} \frac{d\sigma_{\text{Coulomb}}}{dE}(E)$$

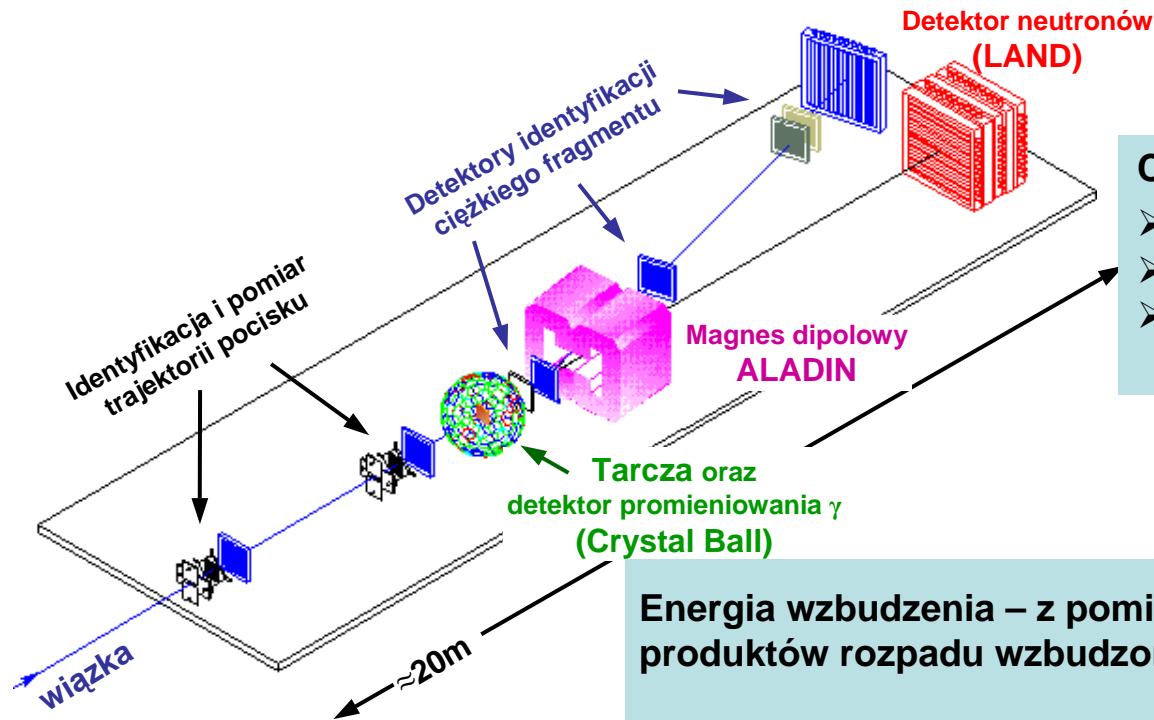
$$\sigma_V^{E1}(E) \sim E \frac{dB}{dE}(E1,0 \rightarrow E) \sim \frac{E}{n_{E1}(E)} \frac{d\sigma_{\text{Coulomb}}}{dE}(E)$$

C.A.Bertulani and G.Baur, Phys. Rep. 163 (1988) 299-408



Układ i metoda pomiarowa

Pomiar masy niezmienniczej



Charakterystyka układu pomiarowego

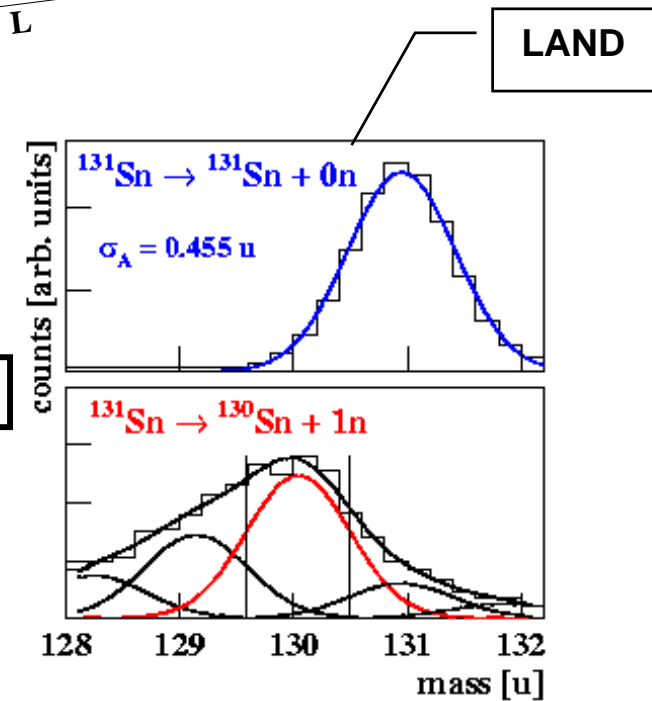
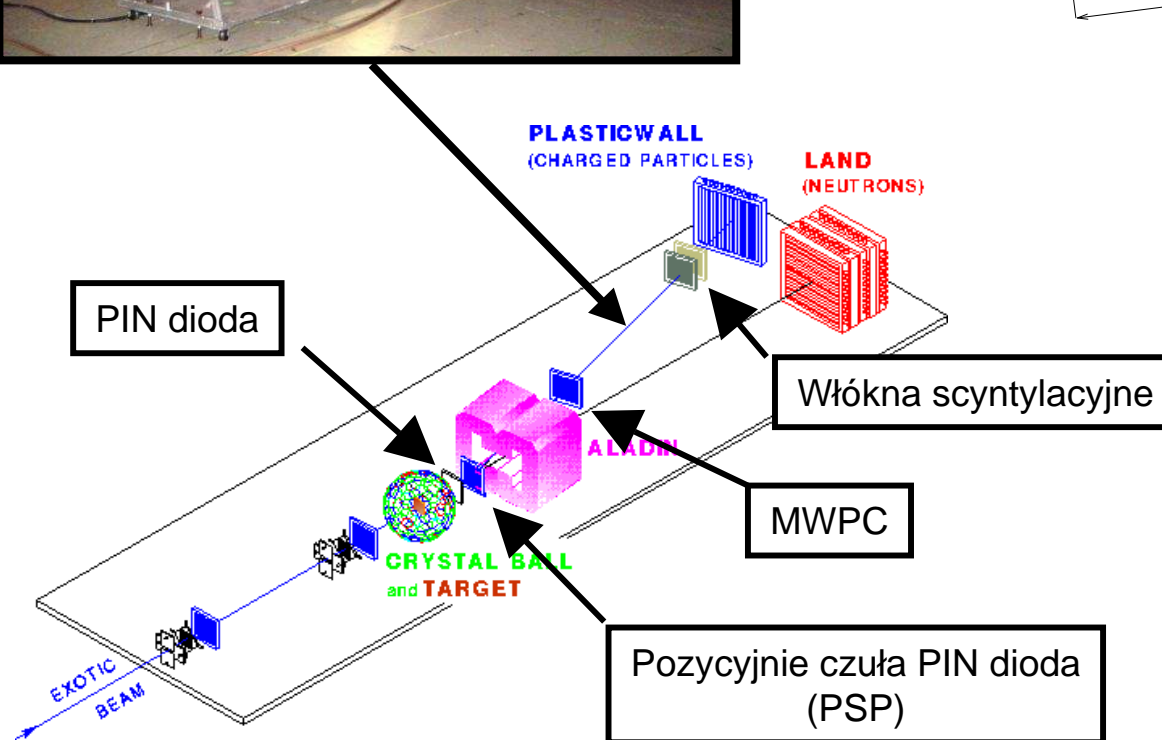
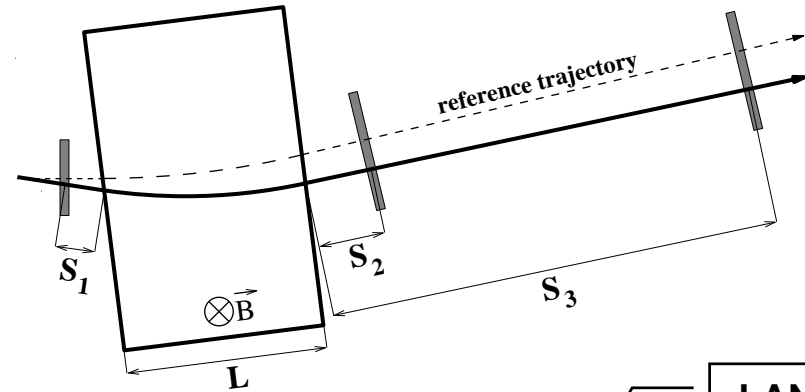
- Akceptancja 4π
- Wydajność detekcji $\sim 100\%$
- Możliwość pomiaru z grubymi tarczami ($0.5 \text{ g/cm}^2 \text{ Pb}$)

Energia wzbudzenia – z pomiaru czteropędów wszystkich produktów rozpadu wzbudzonego jądra pocisku:

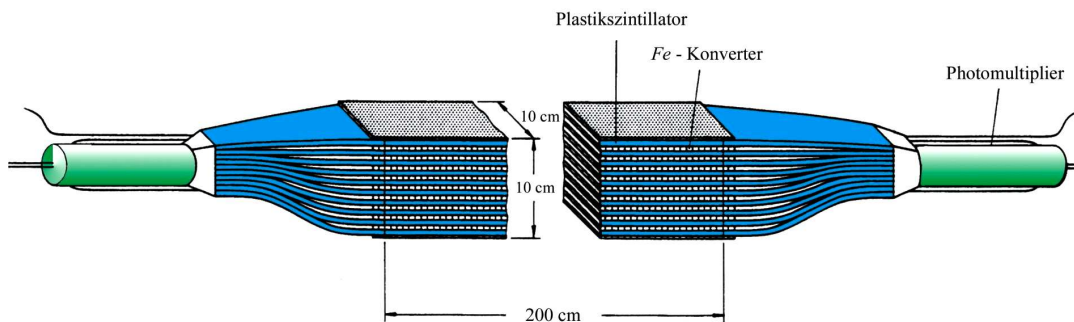
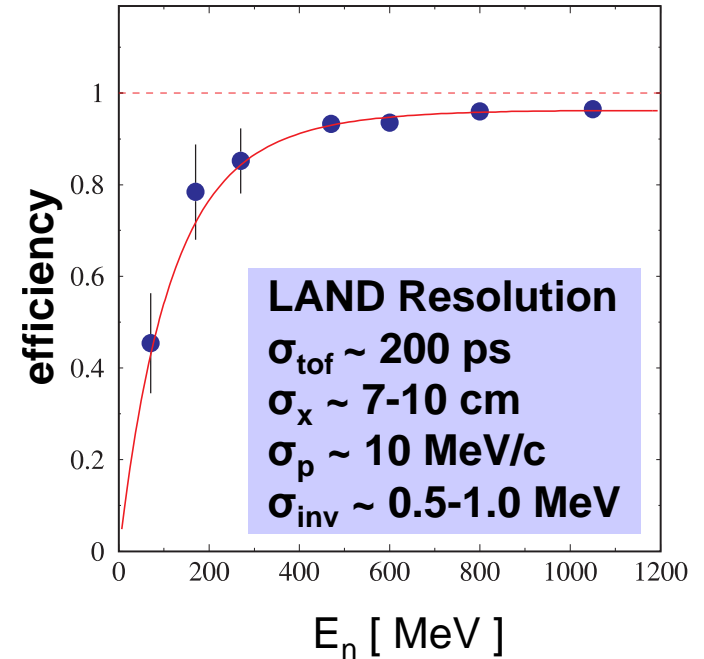
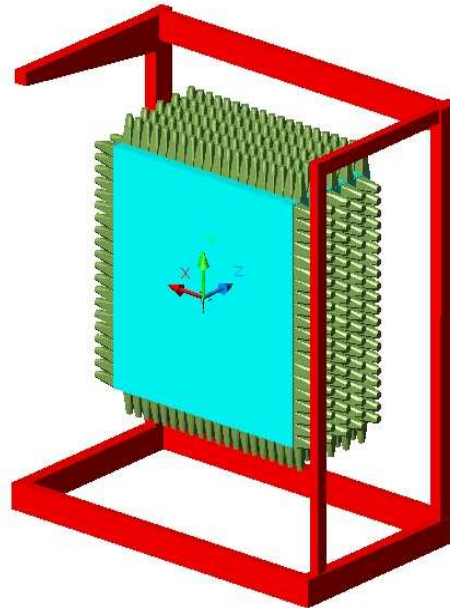
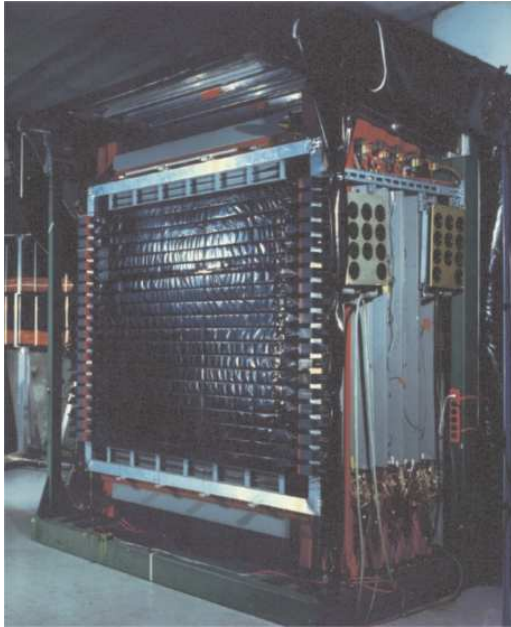
$$M_{inv}^2 = \left(m_{proj} + E^* \right)^2 = \left(\sum_j P_j \right)^2$$

$$E^* = \left(\sqrt{ \sum_i m_i^2 + \sum_{i \neq j} 2m_i m_j \gamma_i \gamma_j (1 - \beta_i \beta_j \cos \theta_{ij}) } - m_{proj} \right) c^2 + E_\gamma$$

Identyfikacja ciężkiego fragmentu



Detektor neutronów LAND (Large Area Neutron Detector)



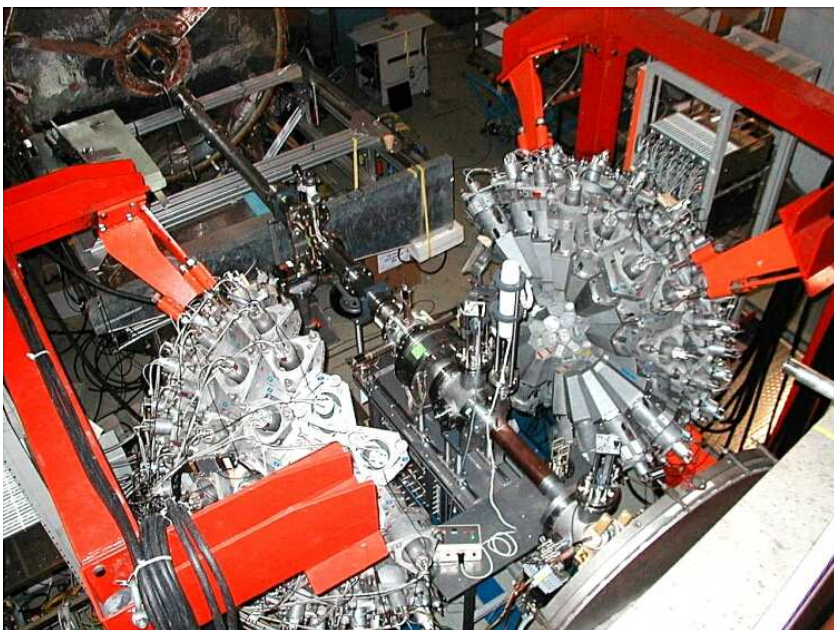
Nucl. Instr. Meth. A314 (1992) 136

Wydajność algorytmu
rekonstrukcji neutronów:

		Generated			
		%	1n	2n	3n
Detected	1n	83	40.6	20.6	
	2n	10.5	47.6	38.6	
	3n	0.5	10.3	28.8	

Pomiar energii promieniowania γ

Darmstadt-Heidelberg Crystal Ball

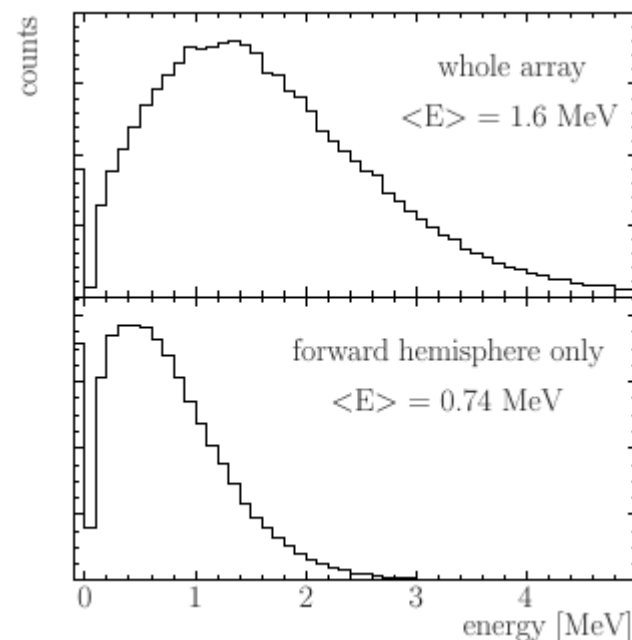


Detektor Crystal Ball
geometria 4π

160 kryształów NaI

- Wydajność kalorymetryczna ~ 0.7
- rozdzielczość energetyczna ~ 15 % (po korekcie dopplerowskiej)

Pomiar całkowitej energii promieniowania γ zaburzony znacznym promieniowaniem tła od procesów atomowych i wzbudzeń tarczy:

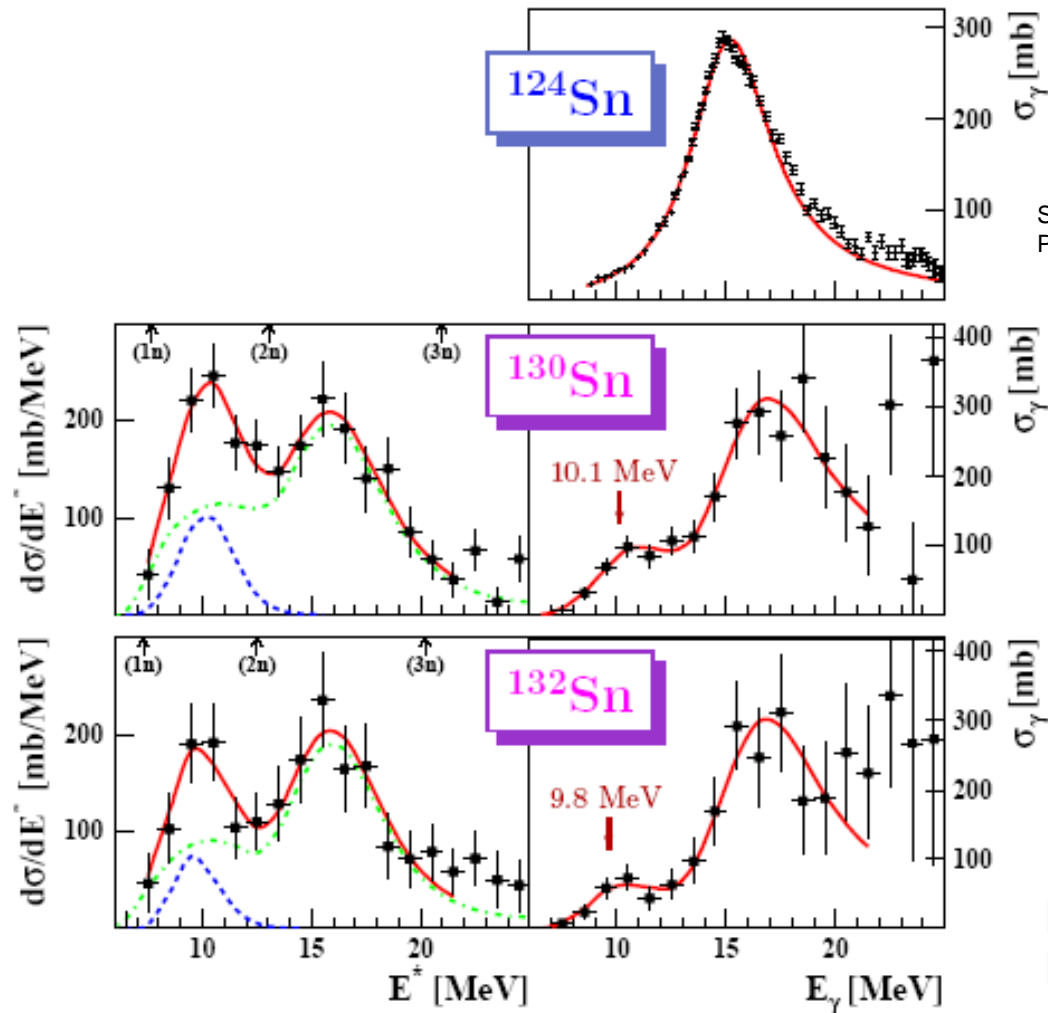


**W analizie „off line” tylko przednia półsfera detektora:
50% redukcji tła przy utracie
15% kwantów γ emitowanych z jądra pocisku.**

Wyniki dla $^{130,132}\text{Sn}$ przekroje czynne

mierzony kulombowski
przekrój czynny

wydedukowany przekrój
czynny na fotoabsorpcję



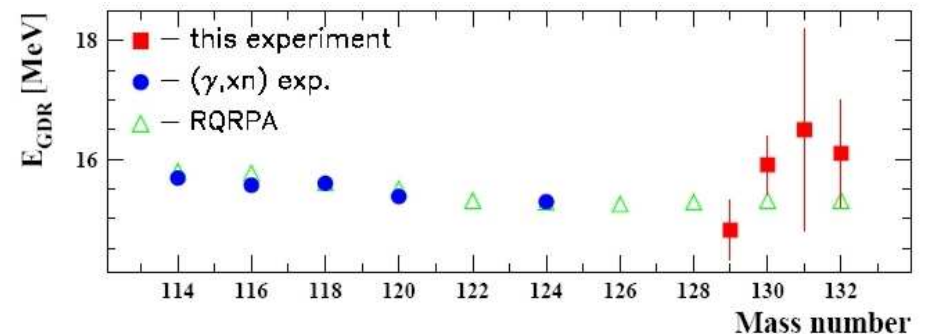
S.C. Fultz et al.,
Phys. Rev. 186 (1969) 1255

Physical Review
Letters 95,
132501 (2005)

Wyniki dla $^{130,132}\text{Sn}$ znalezione parametry PDR i GDR

	PDR			GDR		
	E_{centr} [MeV]	FWHM [MeV]	EWSR [% of TRK]	E_{centr} [MeV]	Γ [MeV]	EWSR [% of TRK]
^{124}Sn	-	-	-	15.3	4.8	116
^{130}Sn	10.1 (0.7)	< 3.4	7.0 (3.0)	15.9 (0.5)	4.8 (1.8)	145 (19)
^{132}Sn	9.8 (0.7)	< 2.5	4.0 (3.1)	16.1 (0.8)	4.7 (2.2)	125 (32)

- PDR o nasileniu odpowiadającym kilku % wartości reguły TRK
- PDR przy energii ~ 2 MeV powyżej energii wiązania neutronu
- Energetyczna zdolność rozdzielcza:
 $\sigma = 0.8 \text{ MeV}$ dla 9 MeV
 $\sigma \approx 2 \text{ MeV}$ dla 15 MeV



- GDR – zgodnie z systematyką

Wyniki dla $^{130,132}\text{Sn}$

porównanie z przewidywaniami teoretycznymi

$\frac{\text{EWSR(PDR)}}{\text{EWSR(GDR)}}$			
	Ten eksperyment	RQRPA N. Paar et al., Phys. Rev. C67(2003) 34312	RPA-PC D. Sarchi et al., Phys. Lett. B601 (2004) 27
^{130}Sn	0.05(2)	0.055	-
^{132}Sn	0.03(2)	0.05	0.04

Sprzeczne interpretacje natury teoretycznie znalezionej nasilenia przy niskich energiach:

- **RQRPA – koherentna superpozycja wielu konfiguracji 1p-1h. Drganie skórki neutronowej.**
- **RPA-PC – brak wzbudzeń kolektywnych przy energiach poniżej GDR.**

Wyniki dla $^{130,132}\text{Sn}$

PDR w kontekście „klastrowych” reguł sumacyjnych

➤ Reguły stosowalne tylko w przypadku słabo związanych nukleonów walencyjnych

Energy-weighted sum rule

$$S = \frac{3}{4\pi} \frac{N Z}{A A} \frac{e \hbar}{2m}$$



$$N \approx 10$$

N_v – ilość neutronów walencyjnych uczestniczących we wzbudzeniu



$$\sqrt{\langle R_v^2 \rangle} \approx 0.8 \text{ fm}$$

R_v – fluktuacja środka masy uczestniczących neutronów walencyjnych względem środka masy rdzenia

Wniosek:

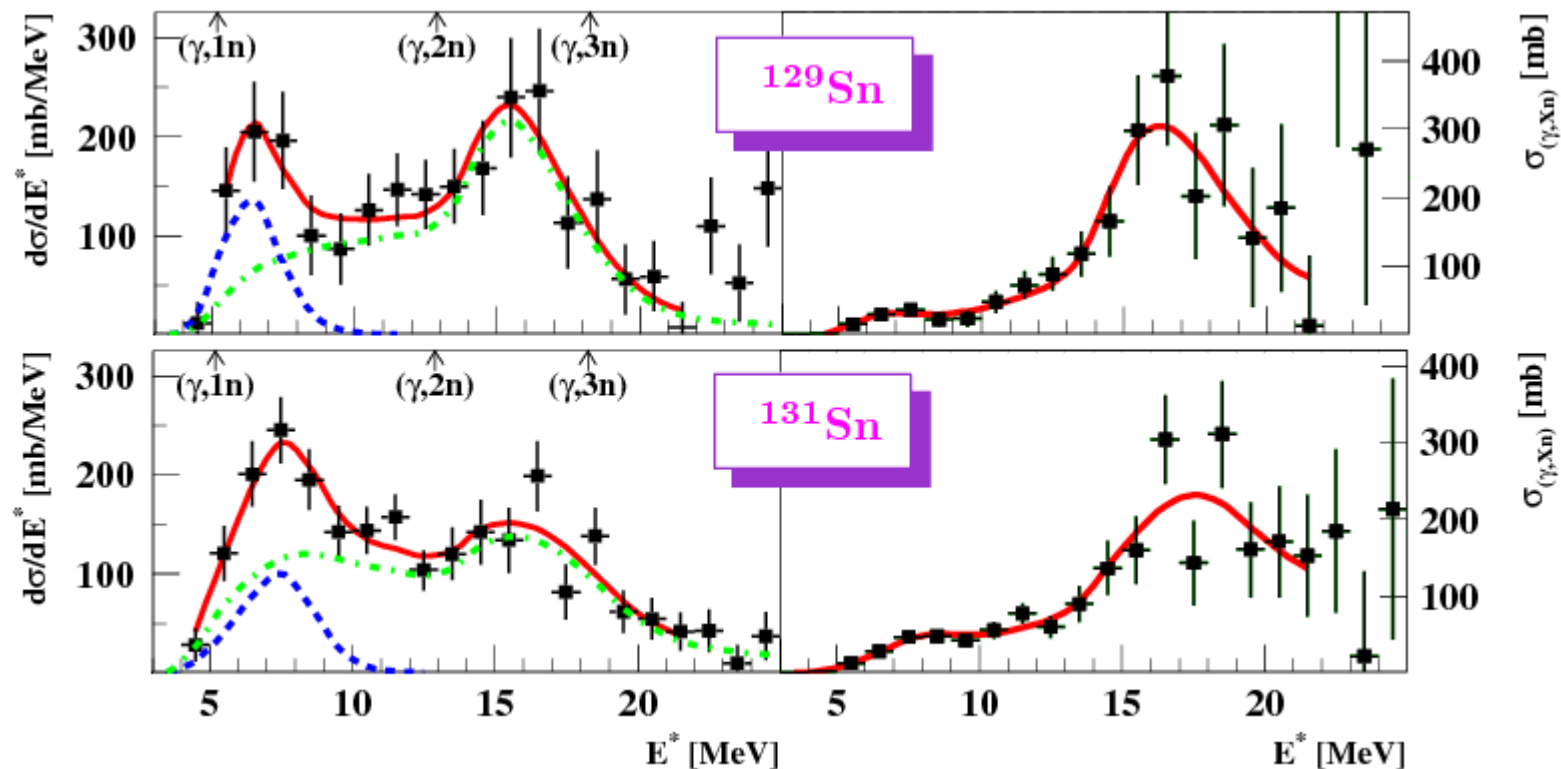
➤ Mała wartość R_v zgadza się z modelem drgającej skórki neutronowej uformowanej z neutronów walencyjnych równomiernie otaczających rdzeń jądra

Perspektywy

izotopy o masach nieparzystych $^{129,131}\text{Sn}$

mierzony kulombowski
przekrój czynny

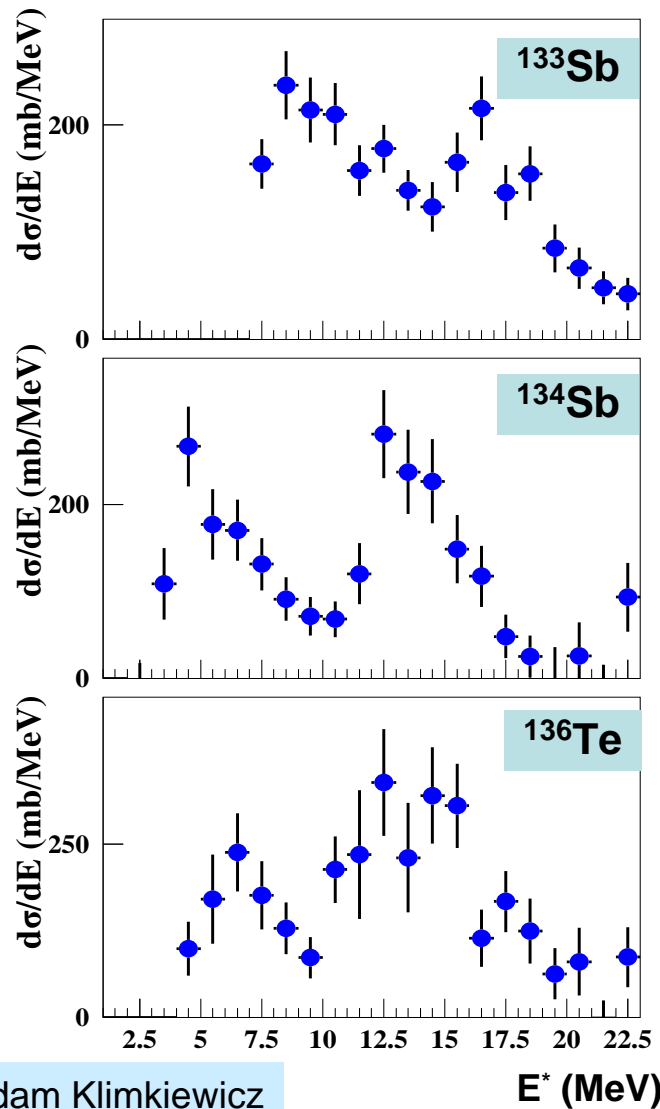
wydedukowany przekrój
czynny na fotoabsorpcję



- Przy niskich energiach widma bardziej złożone
- Nasilenie nierezonansowe?

Perspektywy: inne izotopy (Wyniki wstępne)

mierzony kulombowski przekrój czynny

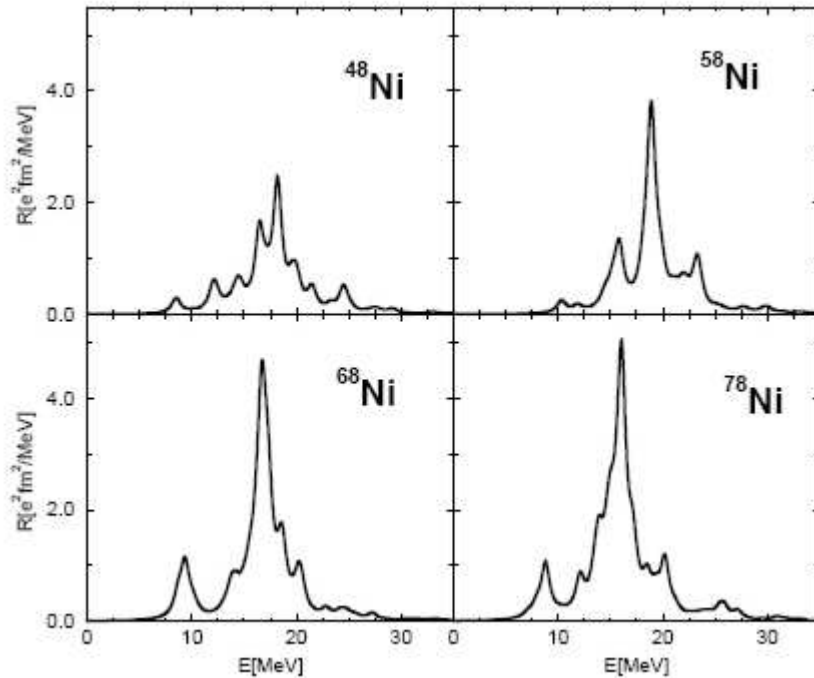


➤ Nasilenie poniżej GDR także obserwowane

by Adam Klimkiewicz

E^* (MeV)

Perspektywy: nasilenie dipolowe w jądrach Ni



N. Paar et al., Phys. Rev. C67(2003) 34312

- Eksperyment przeprowadzony na przełomie maja i kwietnia 2005, z użyciem tej samej aparatury i metody
- badano nasilenie dipolowe w izotopach ^{58}Ni , $^{68-72}\text{Ni}$
- Pomiar w ^{68}Ni wykonany również przez kolaborację Rising w kwietniu 2005

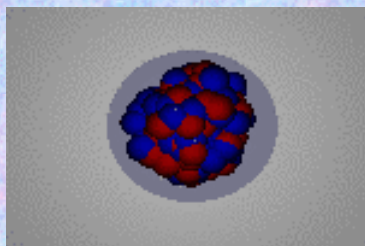
Podsumowanie

- Zmierzono nasilenie dipolowe poniżej energii GDR w jądrach $^{129-132}\text{Sn}$ wysycające kilka % wartości reguły sumacyjnej TRK – zgodnie z przewidywaniami obliczeń teoretycznych
- Natura tych niskoleżących wzbudzeń jest nieustalona (sprzeczne interpretacje obliczeń teoretycznych)
- Wyniki otrzymane dla GDR w jądrach $^{129-132}\text{Sn}$ pozostają w zgodzie ze znanymi systematykami
- Pomiary nasilenia dipolowego są kontynuowane (niedawne eksperymenty z izotopami niklu) i planuje się dalsze eksperymenty po rozbudowie układu pomiarowego (projekt R3B) i akceleratorowego (projekt FAIR)

Przedstawione wyniki otrzymana

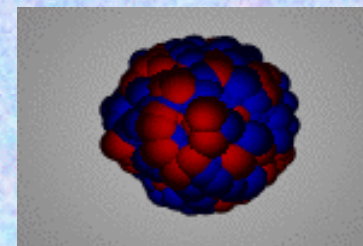
Kolaboracja LAND-FRS (S221)

**T. Aumann, K. Boretzky, H. Emling, M. Fallot, H. Geissel, M. Hellström,
K. L. Jones, Y. Leifels, U. Datta Pramanik, K. Sümmerer
GSI Darmstadt**



**H. Simon
Technical University Darmstadt**

**Th. W. Elze, R. Palit
University Frankfurt/M**

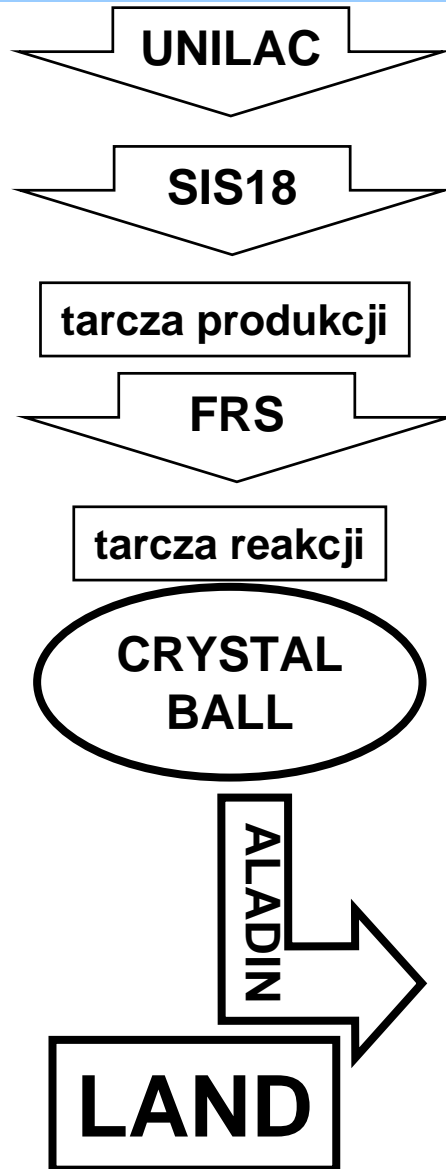


**P. Adrich, A. Klimkiewicz, R. Kulesa, G. Surówka, W. Waluś
Jagiellonian University, Kraków, Poland**

**J.V. Kratz, C. Nociforo
University Mainz**

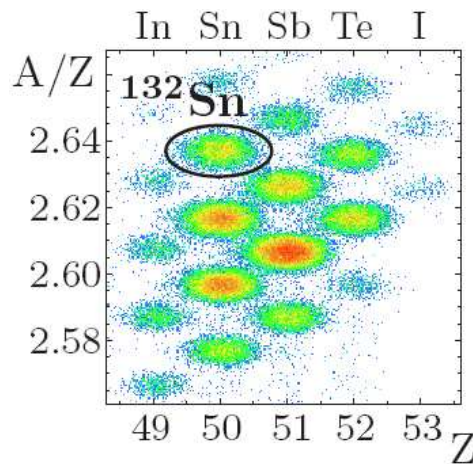
**D. Cortina-Gil
University Santiago de Compostela, Spain**

Moje wrażenia...



➤ Wiązka pierwotna:
 $3 \cdot 10^8$ $^{238}\text{U/s}$ @ 550 MeV/u

➤ Wiązka wtórna:
 10 jonów $^{132}\text{Sn/s}$

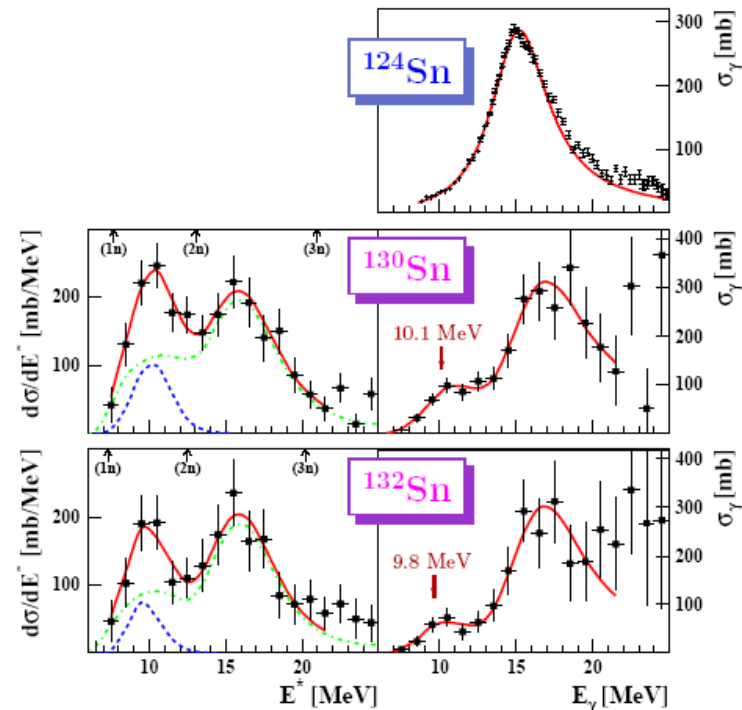


•Złożoność eksperymentu

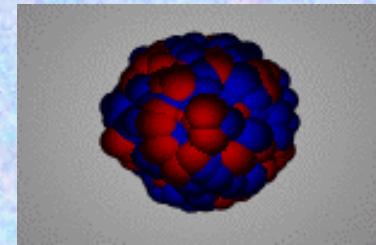
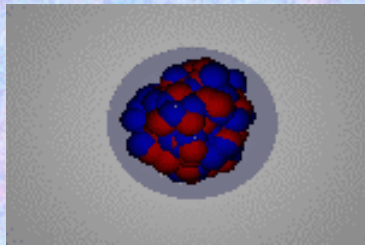
•Precyzja pomiarów:

$E_{\text{kin}} \approx 73,000$ MeV

$\sigma_{E^*} \approx 1$ MeV



*Zapraszamy na kawę i herbatę
na korytarz ZFJA*



*Poza ciastkami, dyskusja na temat
perspektyw zakładu ...*