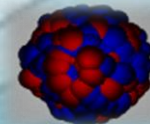
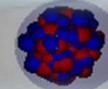
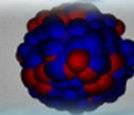
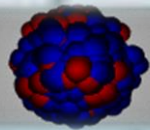
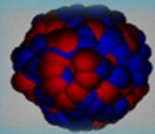
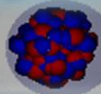




# Panorama egzotycznych wzbudzeń jąder atomowych



Maria Kmiecik

IFJ PAN Kraków



48 Zjazd Fizyków Polskich



# Plan

- Egzotyczne wzbudzenia jąder atomowych
- Pomiar wzbudzeń jąder w stanie podstawowym (zimnych)
- Badania wzbudzeń wywoływanych w jądrach o dużych energiach (gorących)

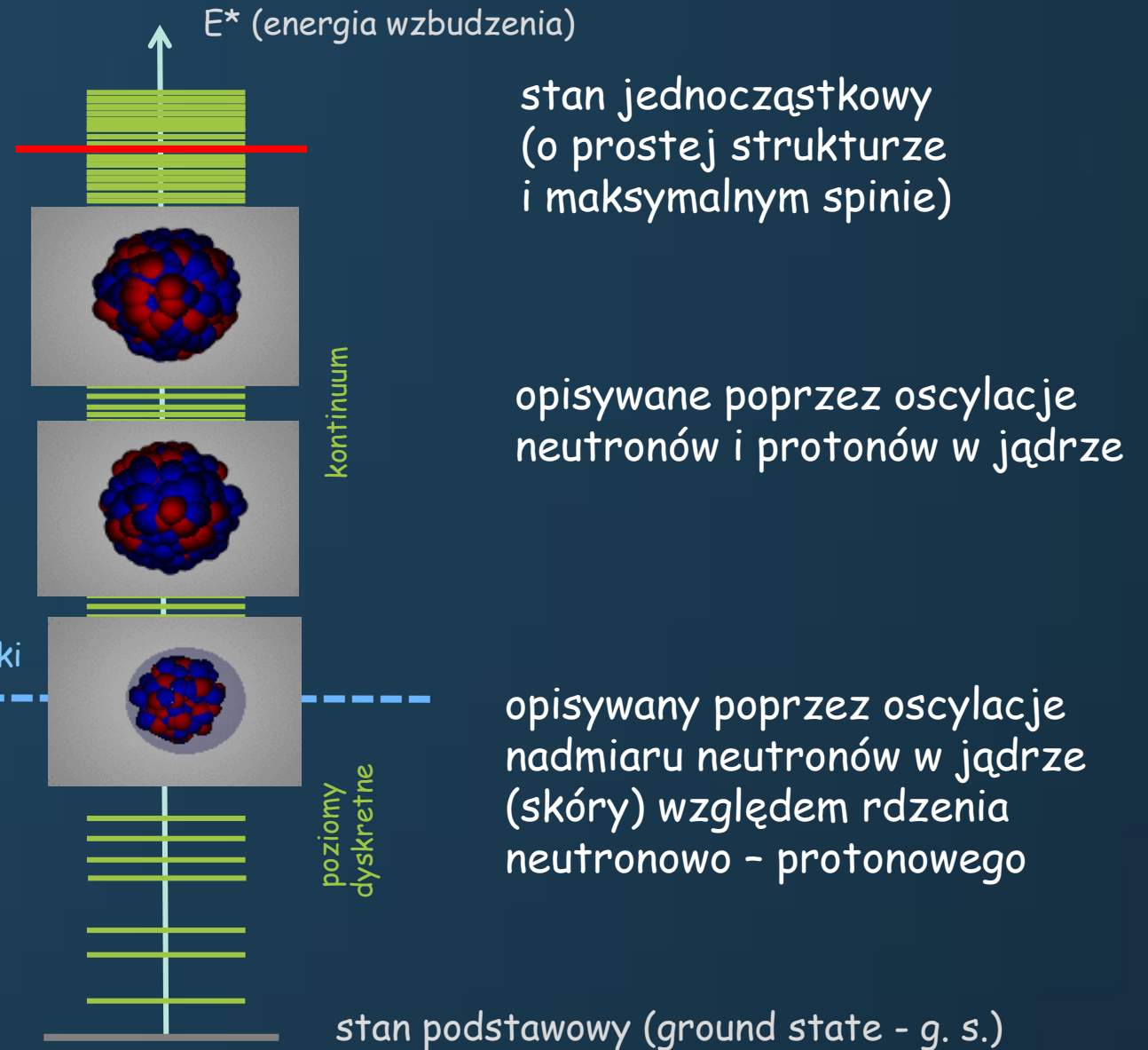
# Egzotyczne wzbudzenia

stan rezonansowy „rozciągnięty”  
**stretched**

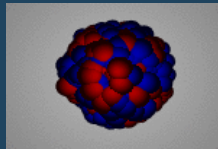
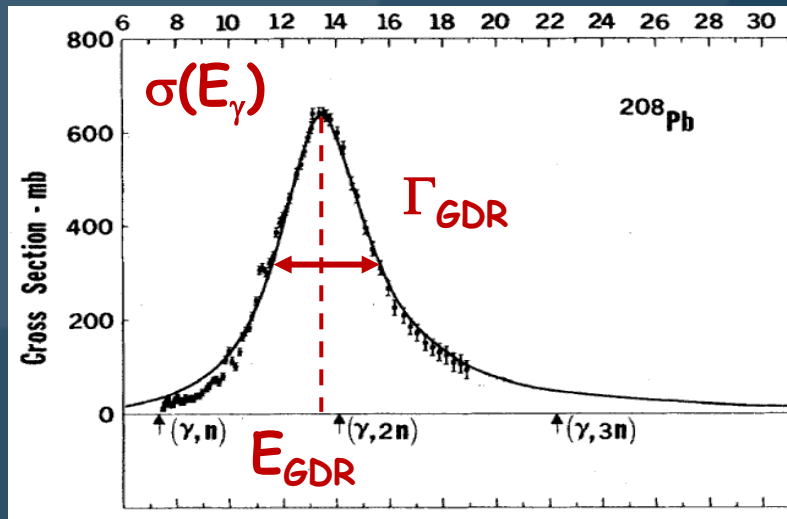
**GDR** (gigantyczny rezonans dipolowy  
- Giant Dipole Resonance)

**GQR** (gigantyczny rezonans kwadrupolowy  
- Giant Quadrupole Resonance)

**PDR** (pigmejski rezonans dipolowy)  
- Pygmy Dipole Resonance



# GDR

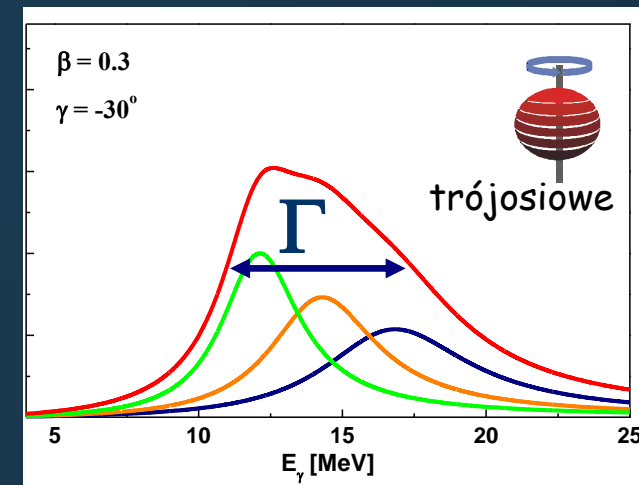
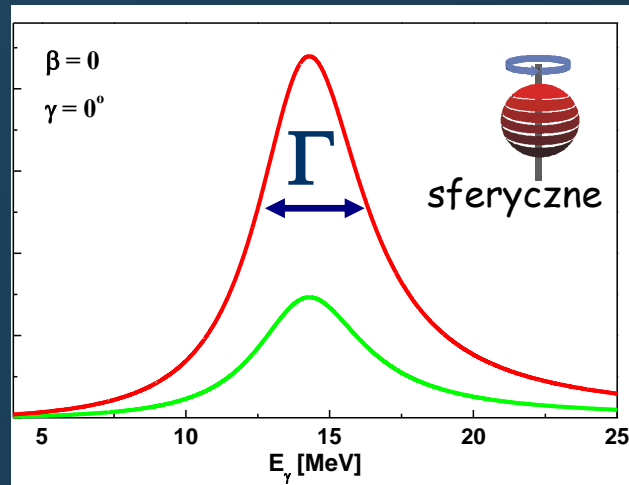
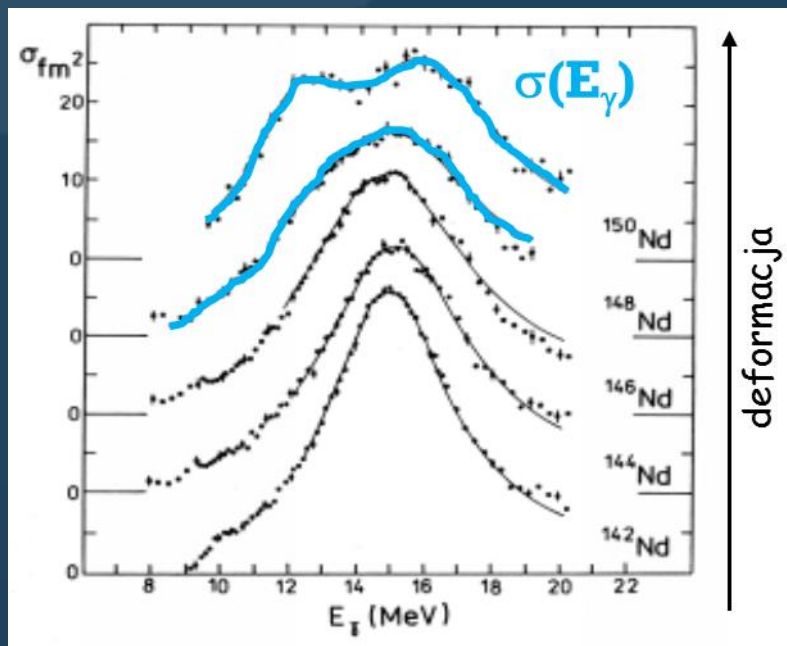


funkcja nasilenia GDR:

$$\sigma(E_\gamma) = \frac{\sigma_0 \Gamma_{GDR}^2 E_\gamma^2}{(E_\gamma^2 - E_{GDR}^2)^2 + \Gamma_{GDR}^2 E_\gamma^2}$$

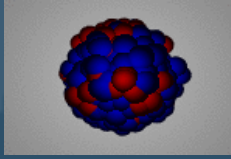
- energia wzbudzenia - **centroida** ( $E_{GDR}$ ), energia oscylacji  $\sim 1/R$
- **Szerokość** ( $\Gamma_{GDR}$ ),  $\Gamma_{GDR} \sim -1/t$

Kształt funkcji nasilenia GDR → deformacja jądra



Badany poprzez pomiar **rozpadu γ GDR** - informacja o właściwościach jądra (kształt, deformacja)

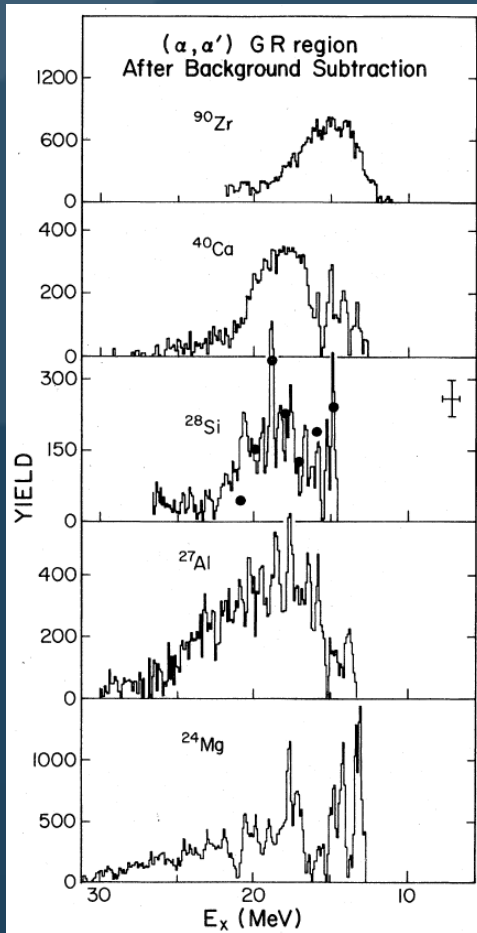
# GQR



Własności nie poznane dobrze,  
Mierzone przekroje czynne na wzbudzenie

D.H. Youngblood et al.,  
Phys. Rev. C15, 1644 (1977)

Rozpad  $\gamma$  GQR obserwowany eksperymentalnie  
wcześniej tylko raz



W reakcji  
rozpraszania ciężkich jonów  
381 MeV  $^{17}\text{O}$  na  $^{208}\text{Pb}$

bardzo małe  
prawdopodobieństwo  $\sim 10^{-4}$

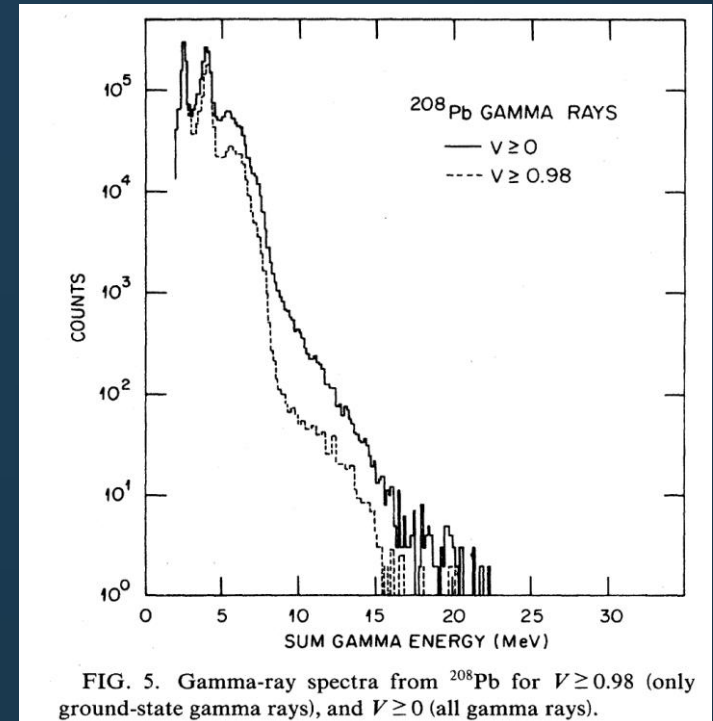
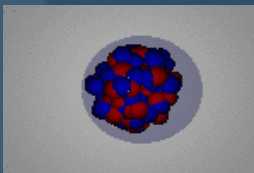


FIG. 5. Gamma-ray spectra from  $^{208}\text{Pb}$  for  $V \geq 0.98$  (only ground-state gamma rays), and  $V \geq 0$  (all gamma rays).

J.Beene et al., PRC39(1989)1307



# PDR

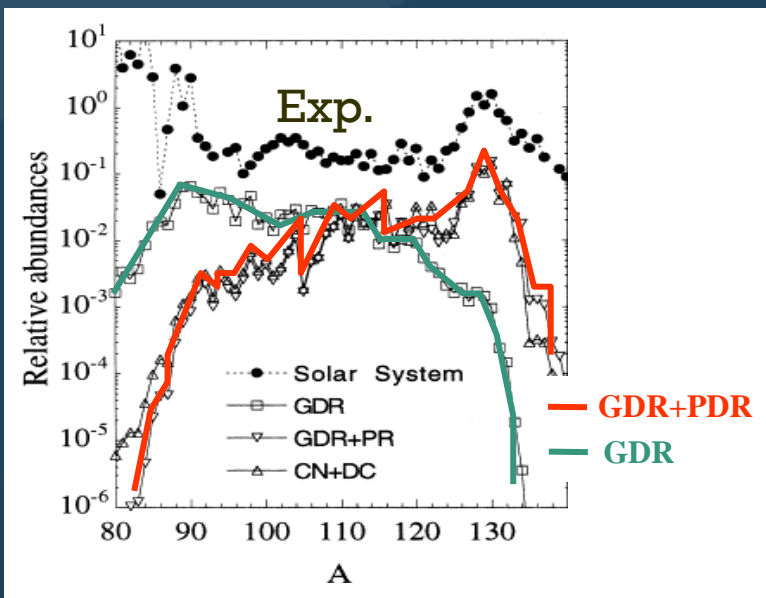


PDR istotne dla:

- procesu  $r$  (większy przekrój czynny na wychwytywanie neutronu)
- równania stanu materii jądrowej - grubość „skóry” neutronowej i energia symetrii

S.Goriely, Phys. Lett. B436 10 (1998)

S.Goriely and E. Khan, Nucl. Phys. A706 (2002) 217



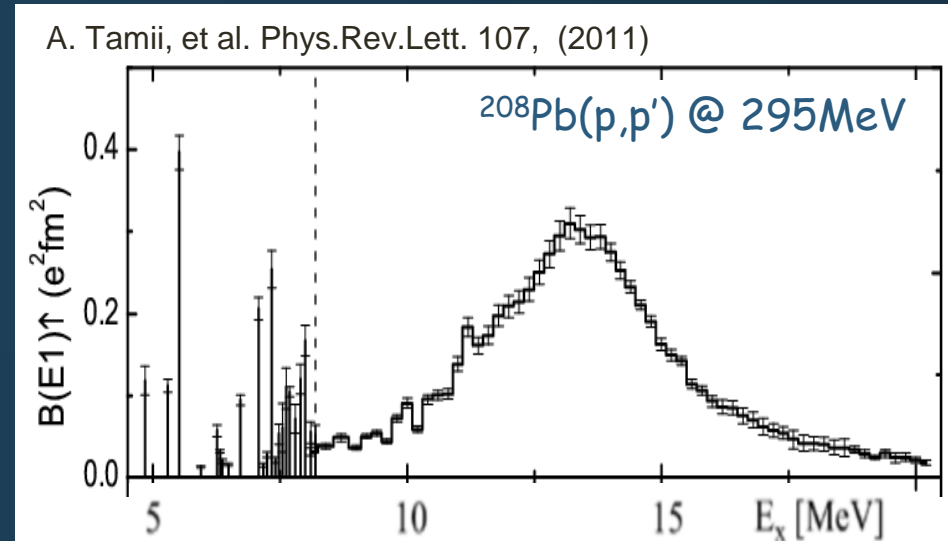
Badane z zastosowaniem reakcji np.:

- $(\alpha, \alpha'\gamma)$
- $(^{17}\text{O}, ^{17}\text{O}'\gamma)$
- $(p, p'\gamma)$
- $(p, p')$
- NRF (jądrowej fluorescencji rezonansowej)

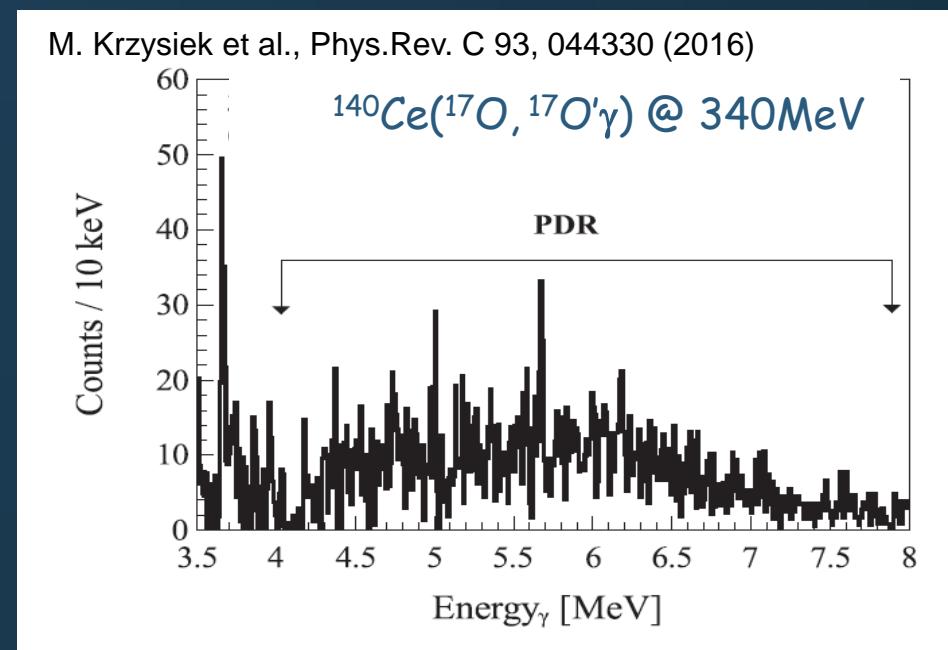
Nie wystarczająco dobrze poznane własności i mechanizm powstawania

Przykłady:

- nieelastyczne rozpraszanie protonów ( $p, p'$ )



- nieelastyczne rozpraszanie jonów  $^{17}\text{O}$



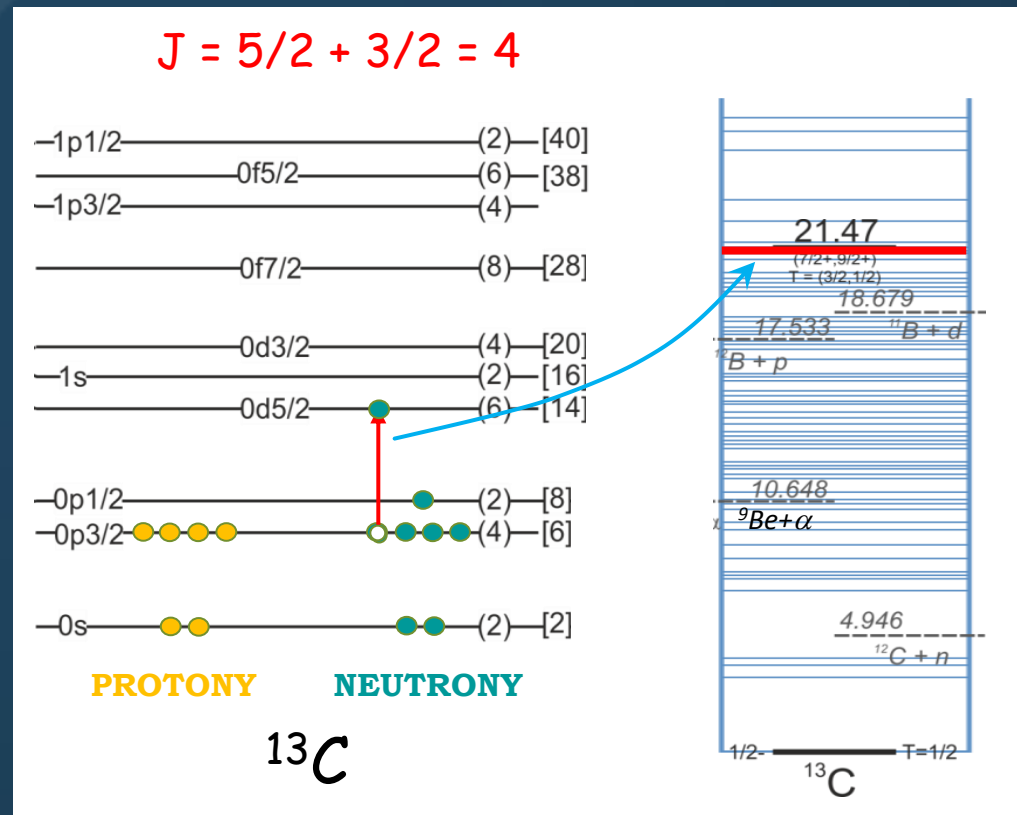
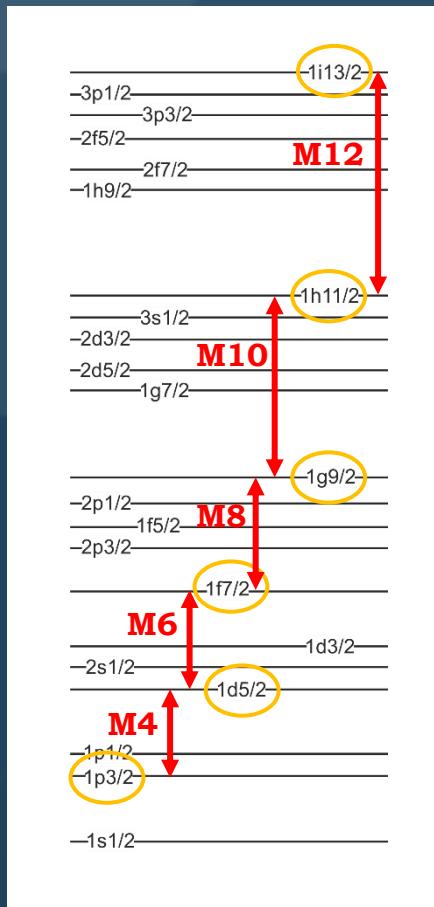
# Stany wzbudzone „rozciągnięte” (stretched)

wzbudzenia jednocząstkowe - typu 1 cząstka - 1 dziura,  
posiadające najwyższy możliwy spin wynikający z konfiguracji nukleonów na danej powłoce

$$J_{\max} = j_p (\max) + j_h (\max)$$

najprostsza struktura  
spośród innych stanów  
rezonansowych

→ doskonałe do testowania  
obliczeń teoretycznych



W lekkich jądrach stany „stretched”  
położone są  
powyżej energii separacji cząstek  
(region *continuum* energetycznego).

Nieznany rozpad  
w lekkich jądrach

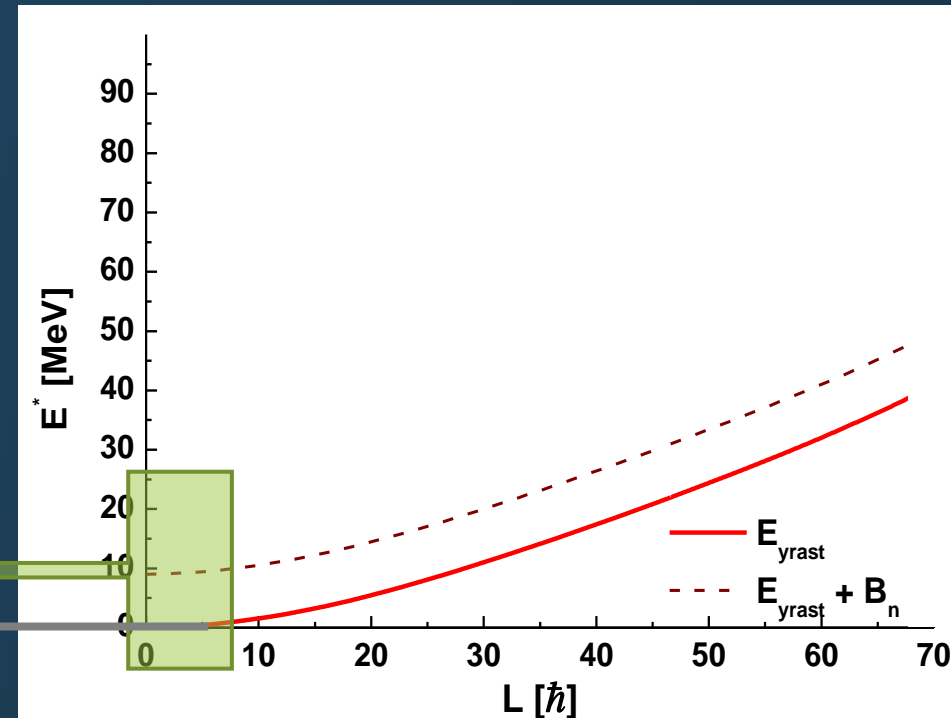
# Pomiary wzbudzeń jąder w stanie podstawowym

Eksperymenty w IFJ PAN  
Z zastosowaniem reakcji (p,p'γ)

- niewielka energia wzbudzenia (temperatura) - jądra zimne,
- niski spin całkowity (kręt),

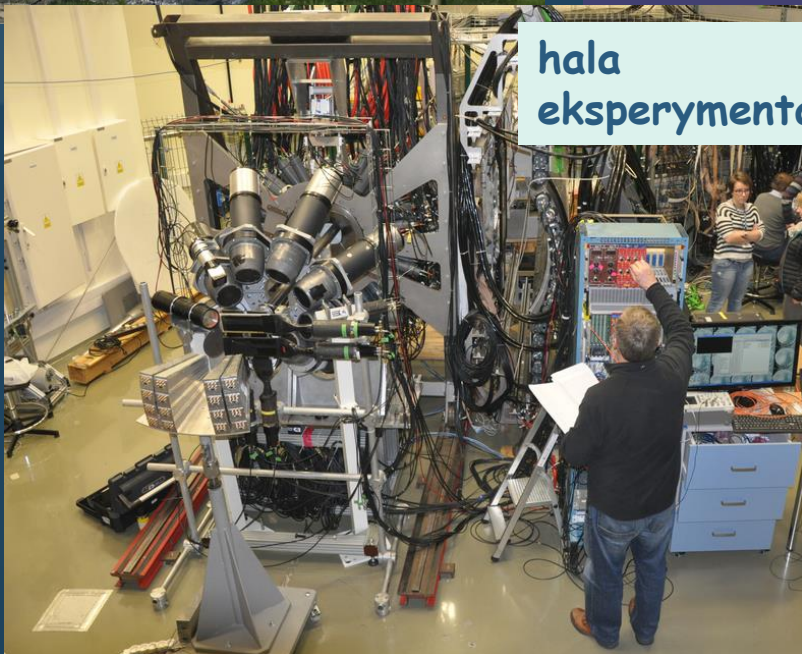
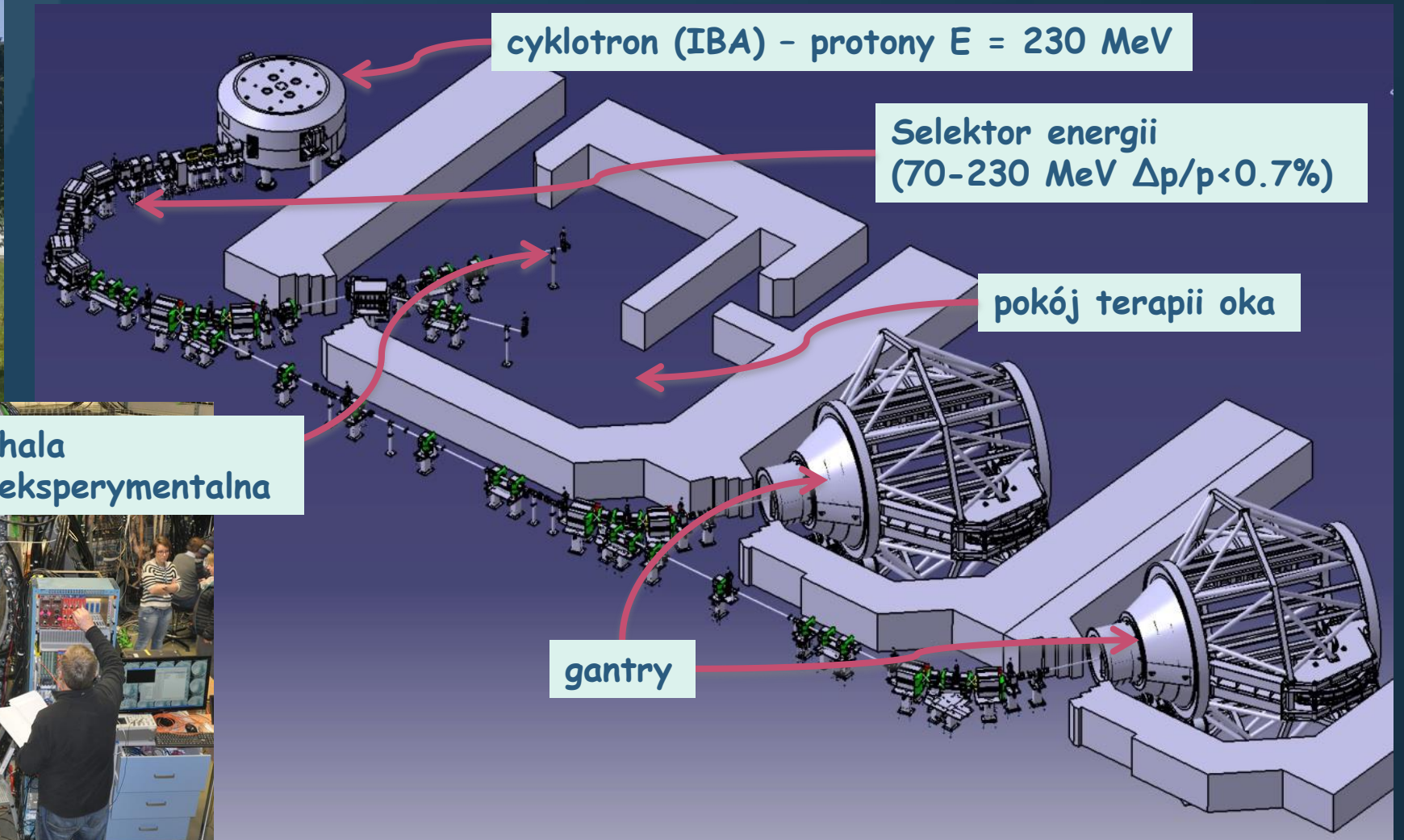
- GDR
- GQR
- PDR
- Stany „rozciągnięte”

stan podstawowy (ground state - g. s.)





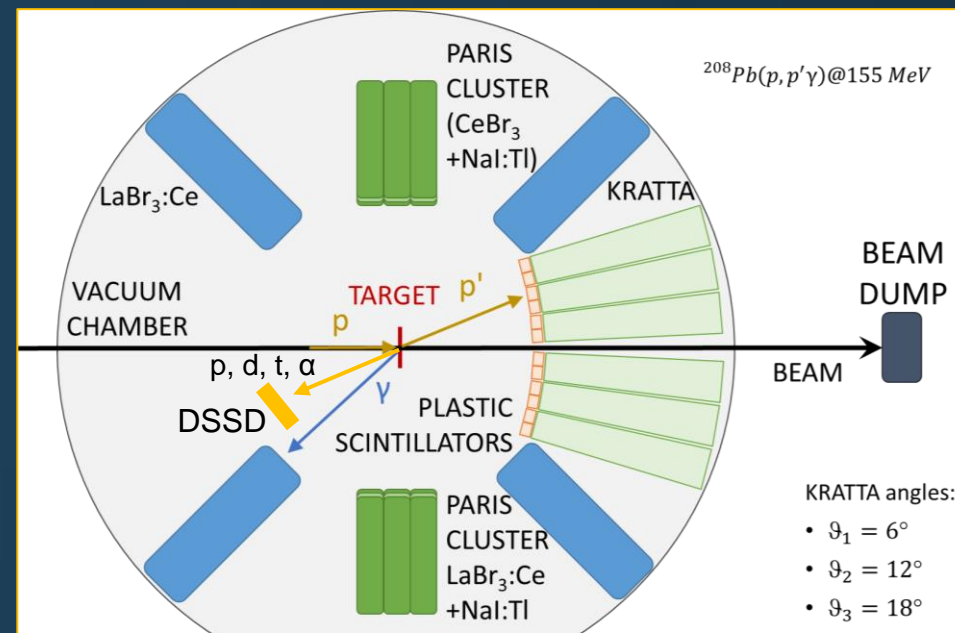
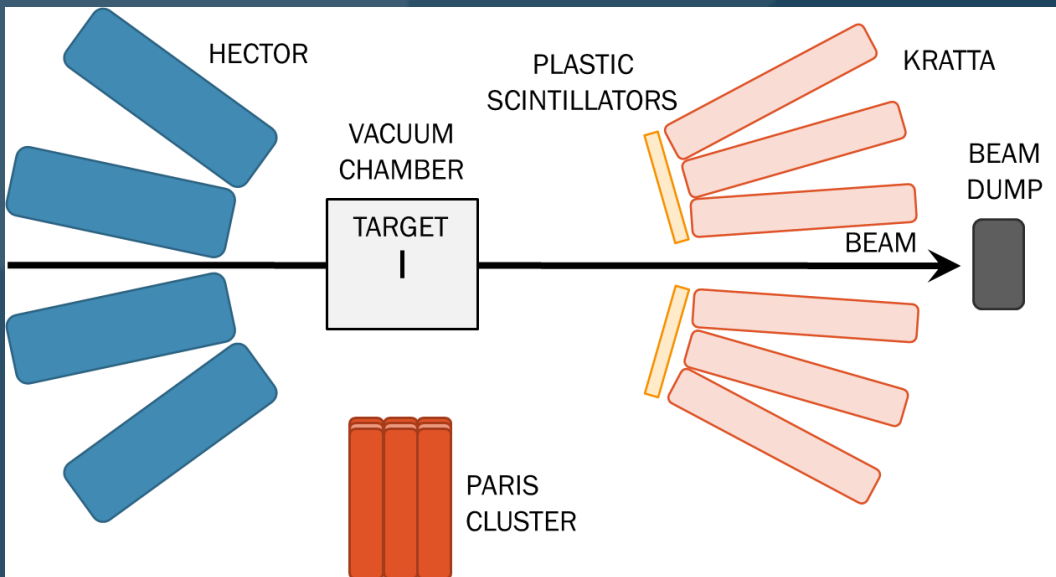
# CCB - Centrum Cyklotronowe Bronowice IFJ PAN



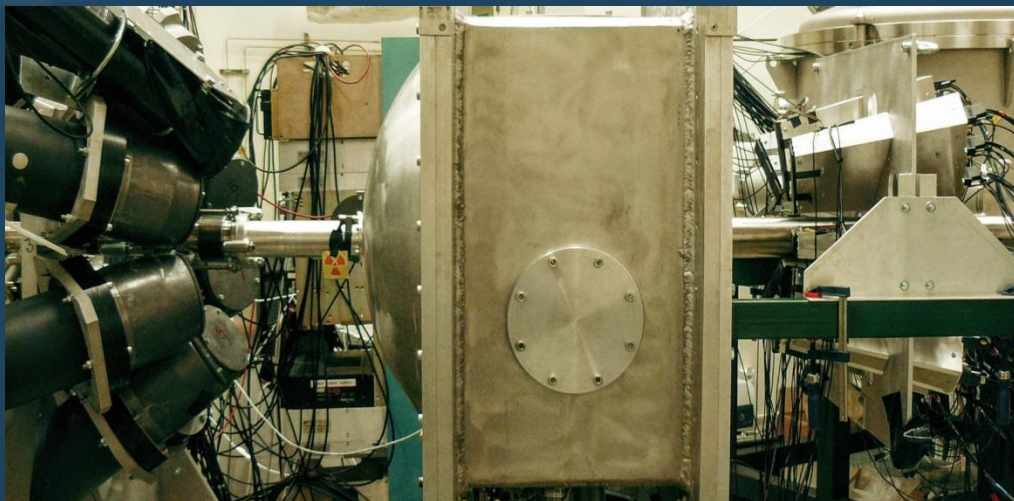


# Układ pomiarowy

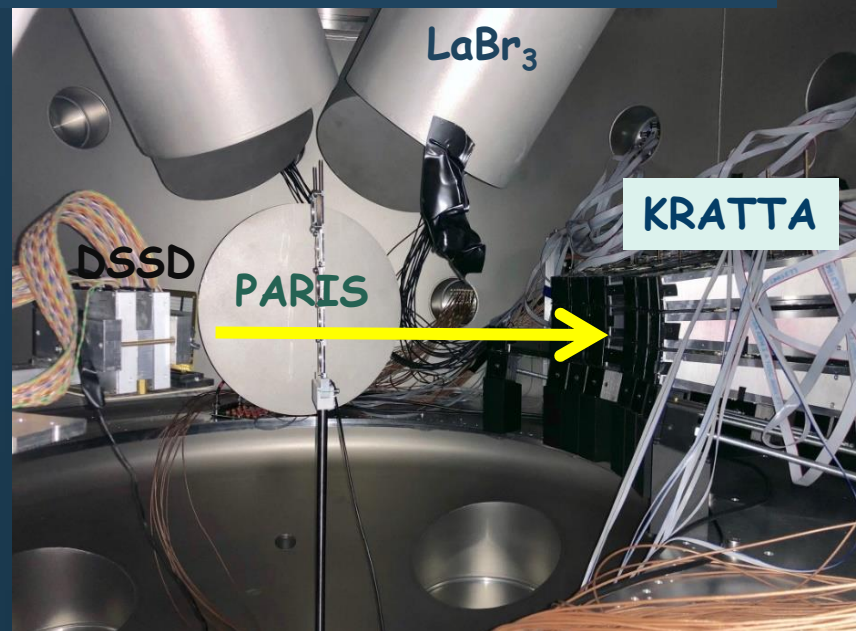
Wersja pierwotna: KRATTA na zewnątrz komory rozproszeń



Układ po modernizacji: KRATTA wewnątrz komory rozproszeń



- KRATTA -  $p'$  (rozproszone)
- HECTOR ( $\text{BaF}_2$ ) +  $\text{LaBr}_3$  + PARIS -  $\gamma$
- DSSD -  $p, d, t, \alpha$



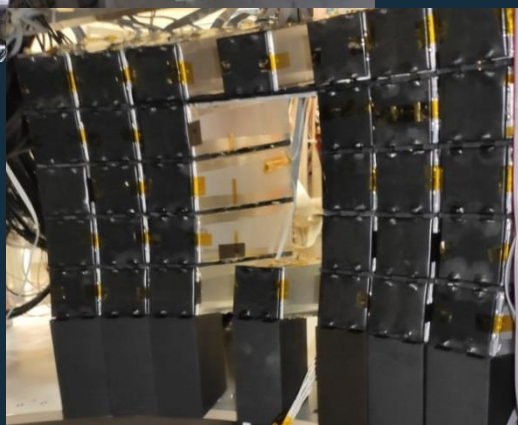
# Detektory

Pomiar koincydencyjny rozproszonych protonów (energia wzbudzenia) i kwantów  $\gamma$  (oraz cząstek emitowanych z rozpadu)

## rozproszone protony

**KRATTA** (det. teleskopowe Si+CsI+ CsI, 8-15.3°) + det. plastikowe

Układ 1:  
16 detektorów

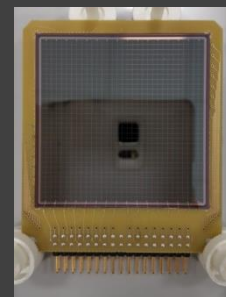


Układ 2:  
KRATTA  
wewnątrz  
komory  
- 32 detektory

lekkie cząstki naładowane  
(p, d, t,  $\alpha$ ) emitowane z rozpadu  
stanów wzbudzonych

**DSSSD** (Double Sided  
Silicon Strip Detector)

Obszar aktywny: 50mm x 50mm  
Liczba pasków: 32 (16 na stronę)  
Grubość: 1.5 mm

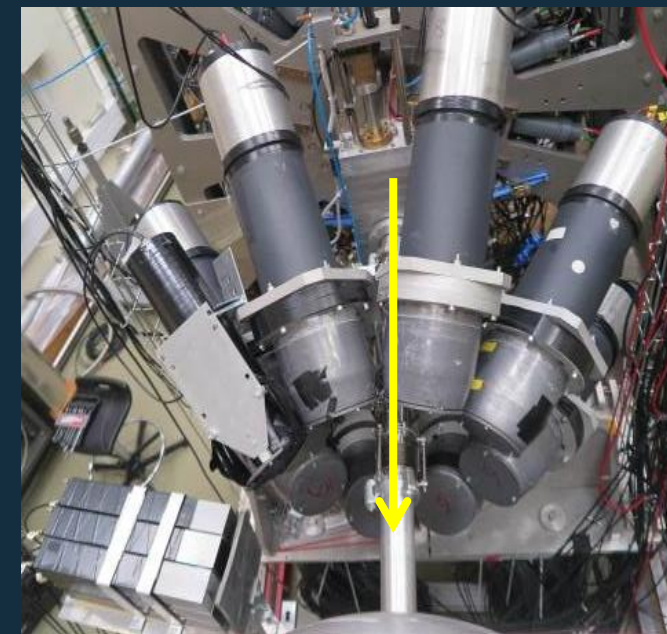


kwanty  $\gamma$  emitowane z rozpadu  
stanów wzbudzonych

**HECTOR** (8 BaF<sub>2</sub> - 14.5 cm ( $\phi$ ) x 17.5 cm)

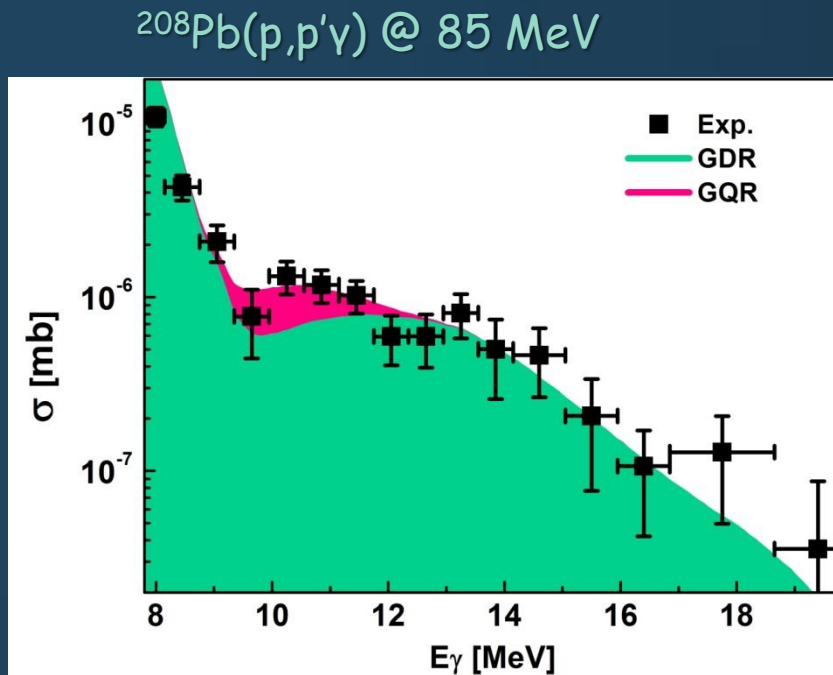
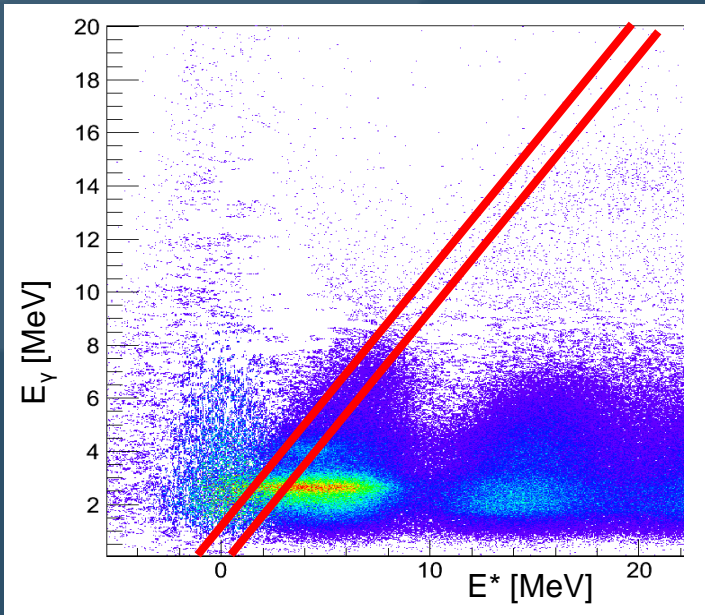
**LaBr<sub>3</sub>** (dużej objętości 3.5"x8")

**PARIS** (klaster 9 detektorów  
typu „phoswich” LaBr<sub>3</sub>/CeBr<sub>3</sub> + NaI)

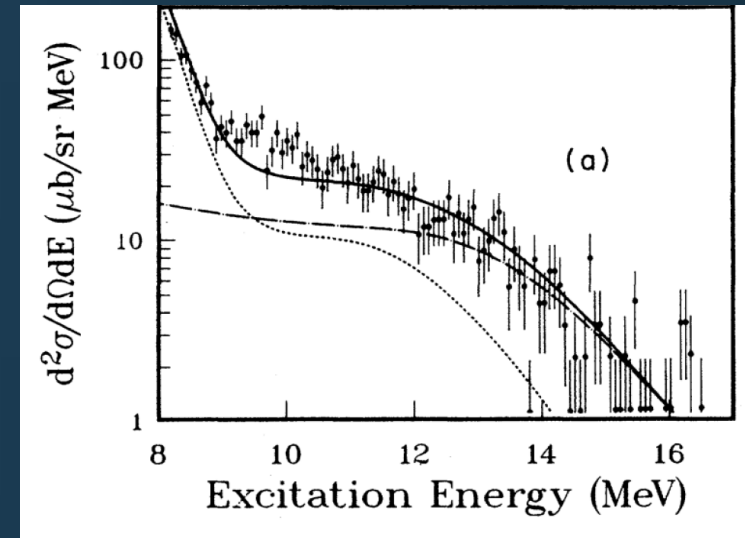




# Rozpad $\gamma$ GQR wzbudzonego w $^{208}\text{Pb}$

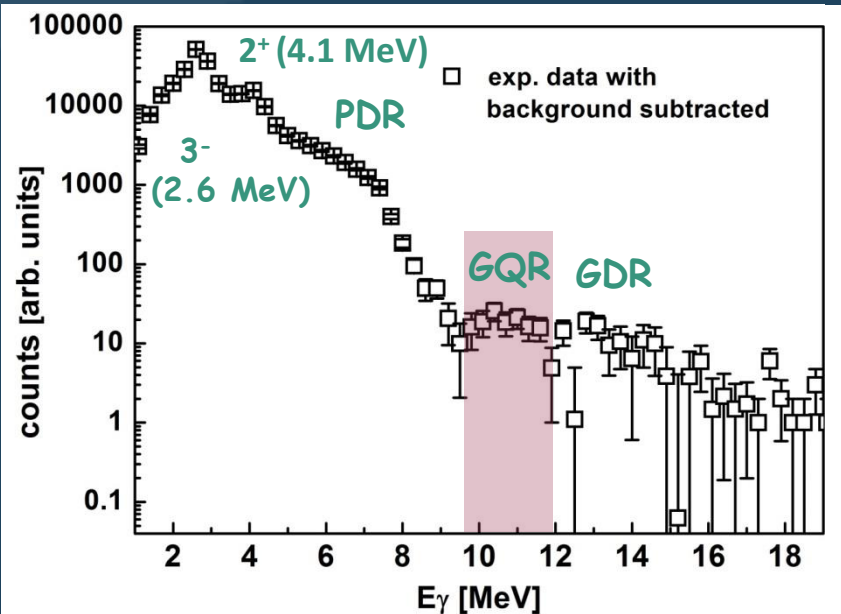


$^{208}\text{Pb} (^{17}\text{O}, ^{17}\text{O}'\gamma)$  @ 381 MeV



B. Wasilewska et al., PRC105, 014310 (2022)

J.Beene et al., PRC39, 1307 (1989)



Stosunek rozgałęzień (branching ratio) - prawdopodobieństwo rozpadu poprzez emisję kwantu  $\gamma$

$$\left(\frac{\Gamma_{\gamma 0}}{\Gamma}\right)_{GQR} = 3 \times 10^{-4} \pm 1 \times 10^{-4}$$

$$\left(\frac{\Gamma_{\gamma 0}}{\Gamma}\right)_{GQR} = 4 \times 10^{-4} \pm 1 \times 10^{-4}$$

Wartość zgodna z wynikiem otrzymanym z zastosowaniem reakcji rozpraszania ciężkich jonów

# Rozpad $\gamma$ GQR wzbudzonego w $^{208}\text{Pb}$



EurekAlert! AAAS

NEWS RELEASES MULTIMEDIA MEETINGS LOGIN REGISTER

NEWS RELEASE 17-FEB-2022

## Extremely rare observation of 'tennis-like' vibrations of lead

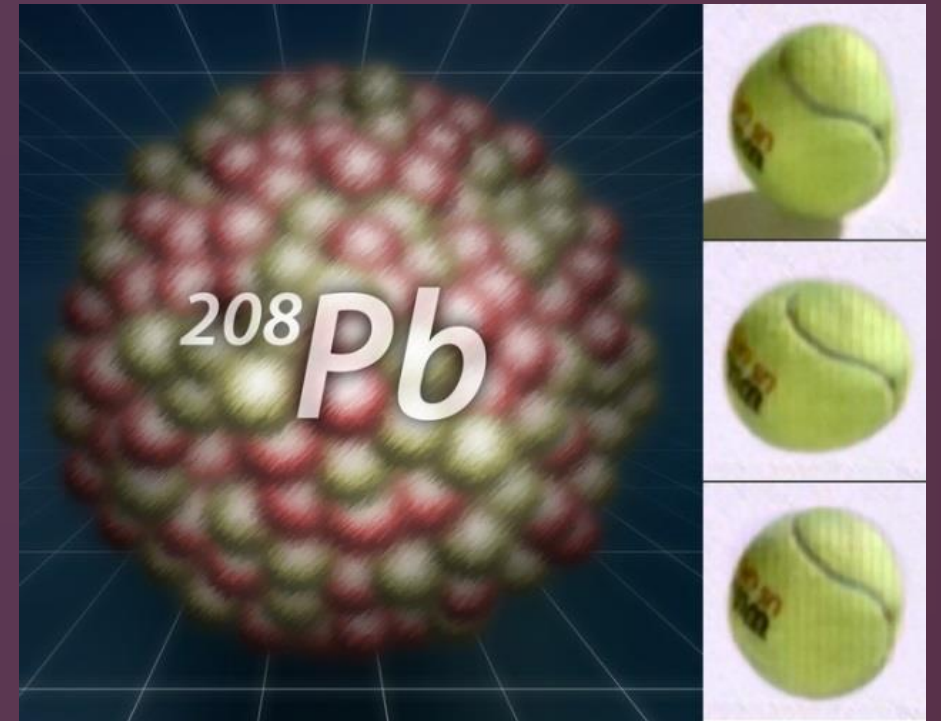
Peer-Reviewed Publication

THE HENRYK NIEWODNICZANSKI INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS POLISH ACADEMY OF SCIENCES

f t m g + Print Email App

Po zderzeniu z rakietą czy ścianą **piłka tenisowa wykonuje kilka szybkich oscylacji, spłaszczając się i wydłużając wzdłuż kierunku ruchu**. W Instytucie Fizyki Jądrowej PAN **poprzez pomiar kwantów gamma zarejestrowano ślady podobnych drgań zachodzących w jądrach ołowiu  $^{208}\text{Pb}$  wzbudzonych zderzeniami z protonami**. Jedyna wcześniejsza obserwacja analogicznego zjawiska liczy ponad trzydzieści lat.

Wyjątkowo rzadka obserwacja „tenisowych” drgań ołowiu

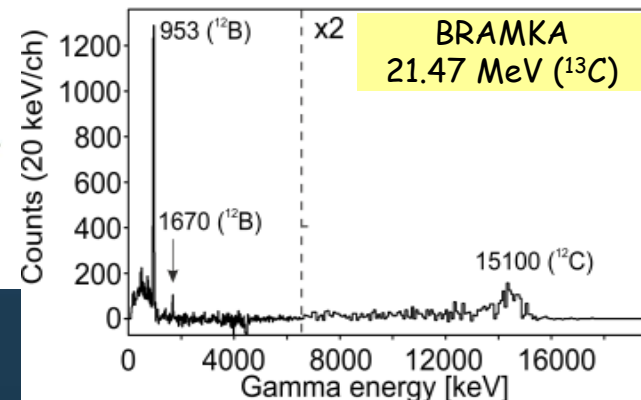
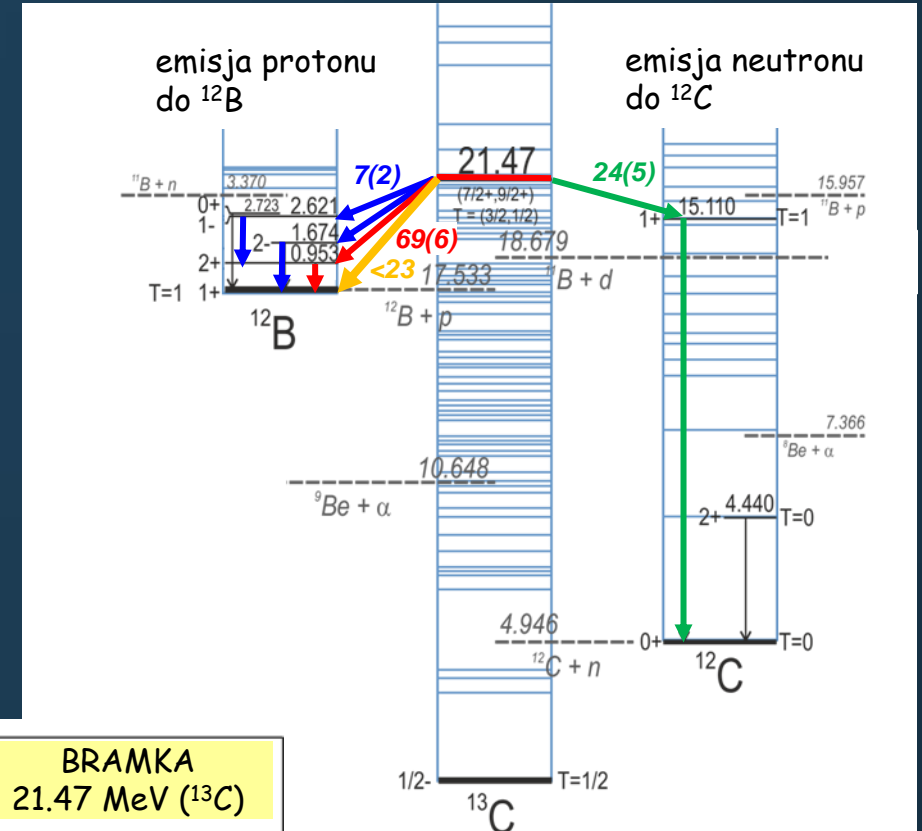
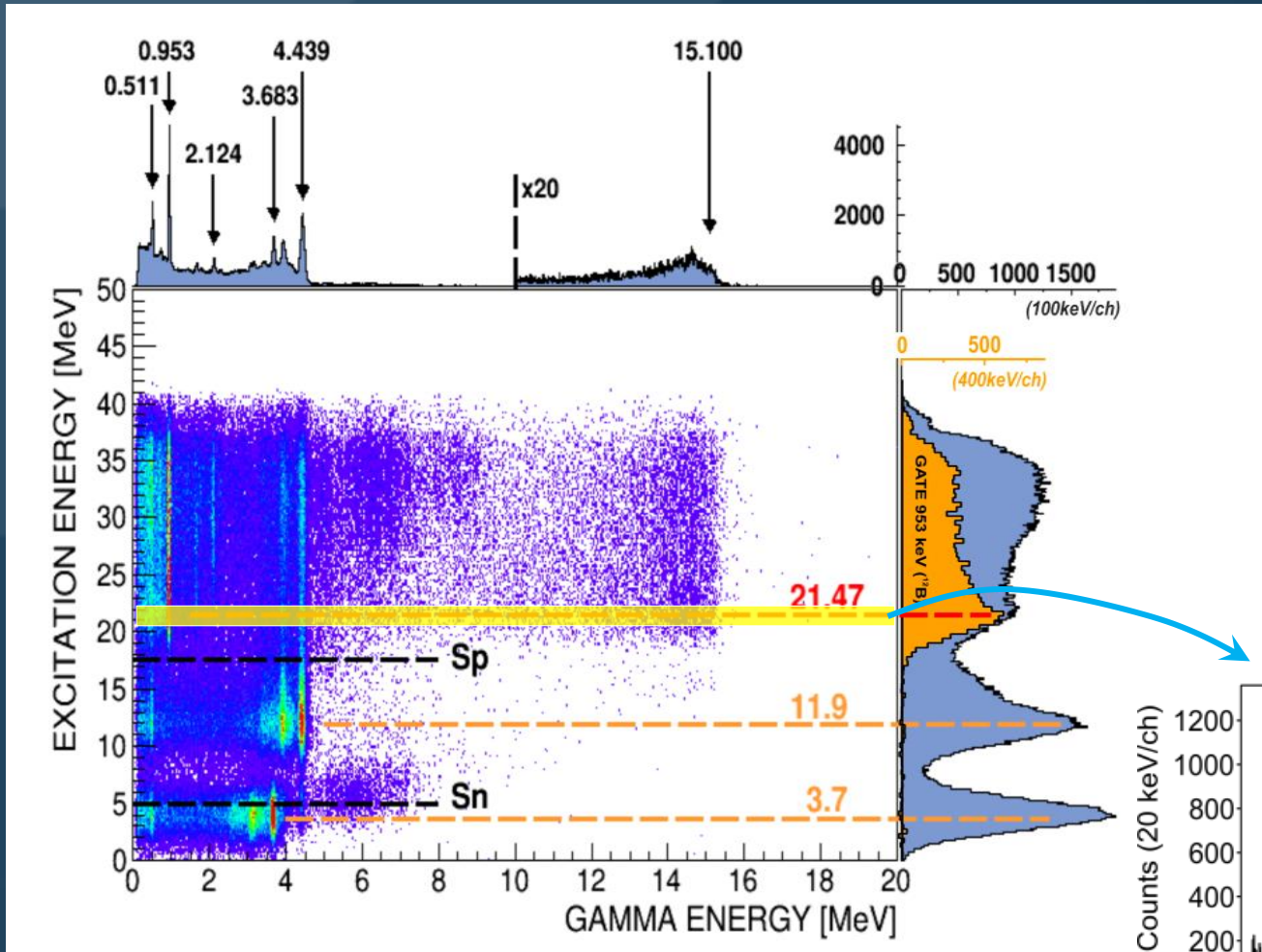


B.Wasilewska et al., Phys. Rev. C 105 (2022) 014310

# Rozpad stanu M4 w jądrze $^{13}\text{C}$

N. Cieplicka-Oryńczak, et al., Phys. Lett. B 834 (2022) 137398

dr inż. Natalia Cieplicka-Oryńczak



Pierwszy pomiar rozpadu stanu rozciągniętego  $^{13}\text{C}$



# Rozpad stanu M4 w jądrze $^{13}\text{C}$



EurekaAlert! | AAAS

SEARCH ARCHIVE

ADVANCED SEARCH

HOME NEWS RELEASES MULTIMEDIA MEETINGS LOGIN REGISTER

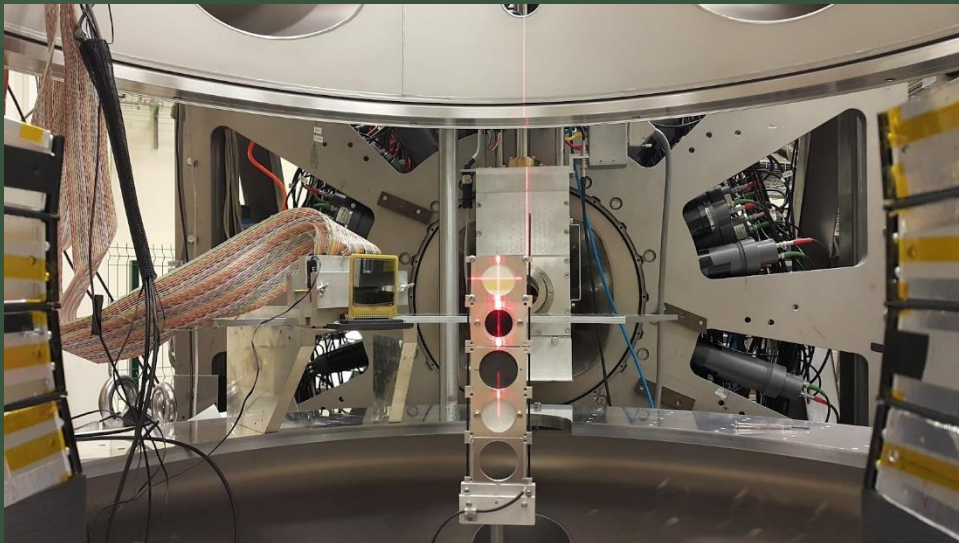
NEWS RELEASE 3-NOV-2022

## 'Stretched' nuclear states under the magnifying glass at the Cracow cyclotron

Peer-Reviewed Publication

THE HENRYK NIEWODNICZANSKI INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS POLISH ACADEMY OF SCIENCES

„...udało się w bezpośredni sposób ustalić, że jądro węgla  $^{13}\text{C}$  z badanego stanu rozciągniętego **rozpada się na dwa podstawowe sposoby, nazywane kanałami**. W kanale występującym najczęściej jądro **emituje proton** i przekształca się w bor  $^{12}\text{B}$ , który następnie emituje kwant gamma. W drugim kanale powstaje węgiel  $^{12}\text{C}$ , czemu towarzyszy **emisja neutronu** (którego w doświadczeniu jednak nie rejestrowano) **oraz kwantu gamma**.”



N. Cieplicka-Oryńczak, et al., Phys. Lett. B 834 (2022) 137398

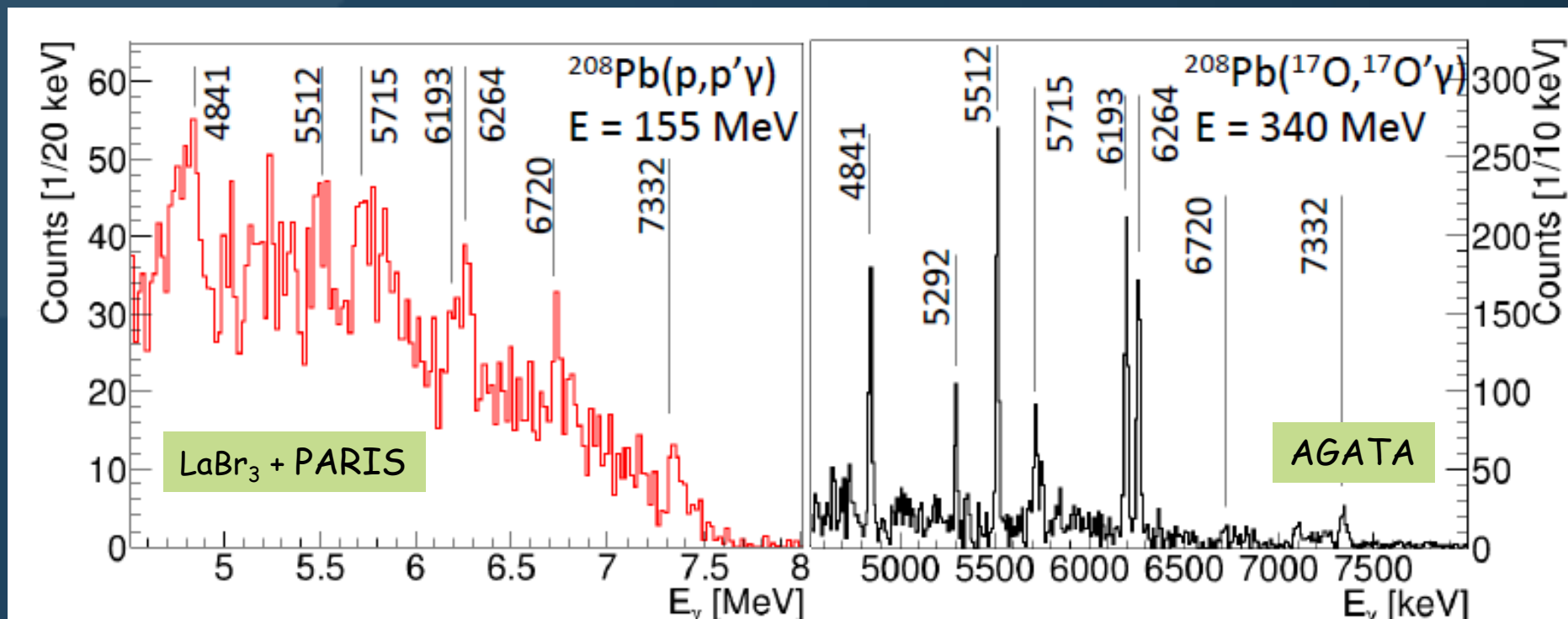
# Rozpad $\gamma$ PDR

Eksperyment  
IFJ PAN

dobra rozdzielczość energetyczna  
detektorów PARIS i LaBr<sub>3</sub>

Eksperyment  
LNL Legnaro, Włochy

detektory HpGe



B. Wasilewska et al., Acta Phys. Pol. B (2020) 677

F.C.L. Crespi et al., PRL113 (2014) 012501

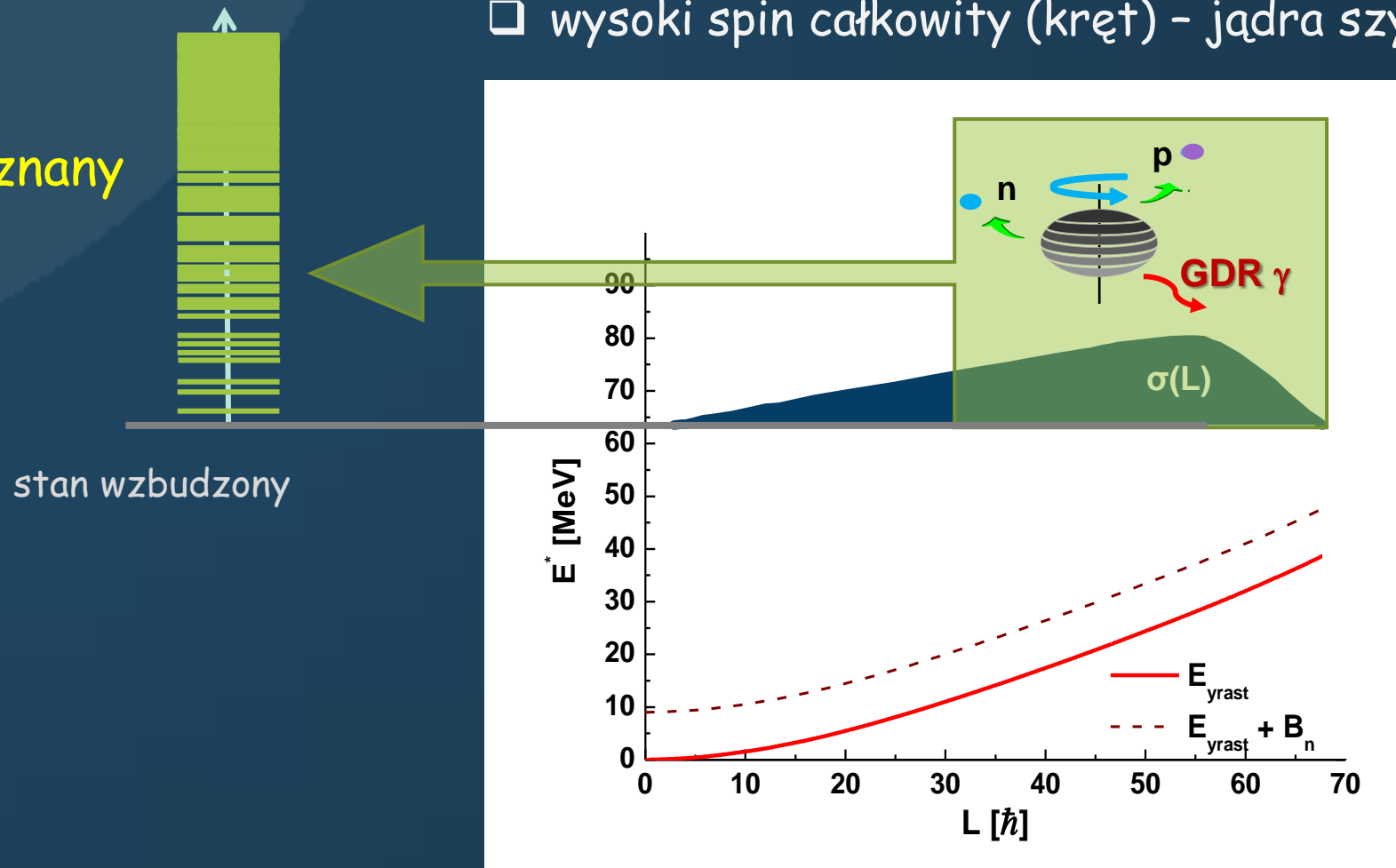
obserwowane podobne przejścia (pomimo zastosowanej innej reakcji)

# Pomiary wzbudzeń jąder „gorących”

Z zastosowaniem reakcji fuzji - ewaporacji

- wysoka energia wzbudzenia (temperatura) - jądra gorące,
- wysoki spin całkowity (kręt) - jądra szybko rotujące,

- GDR - znany
- GQR ?
- PDR ?



# GDR w gorącym szybko rotującym jądrze $^{46}\text{Ti}$

Dotychczasowe rezultaty

EUROBALL (HpGe) + HECTOR (BaF<sub>2</sub>) + EUCLIDES (Si)



Mierzone kwanty  $\gamma$  z rozpadu GDR wzbudzonego w jądrze złożonym  $^{46}\text{Ti}$  w koincydencji z przejściami dyskretnymi w jądrze końcowym  $^{42}\text{Ca}$

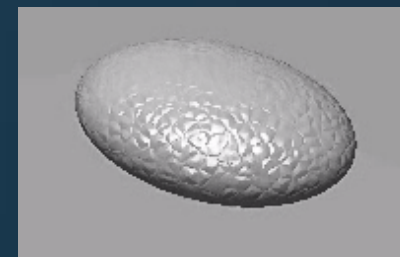
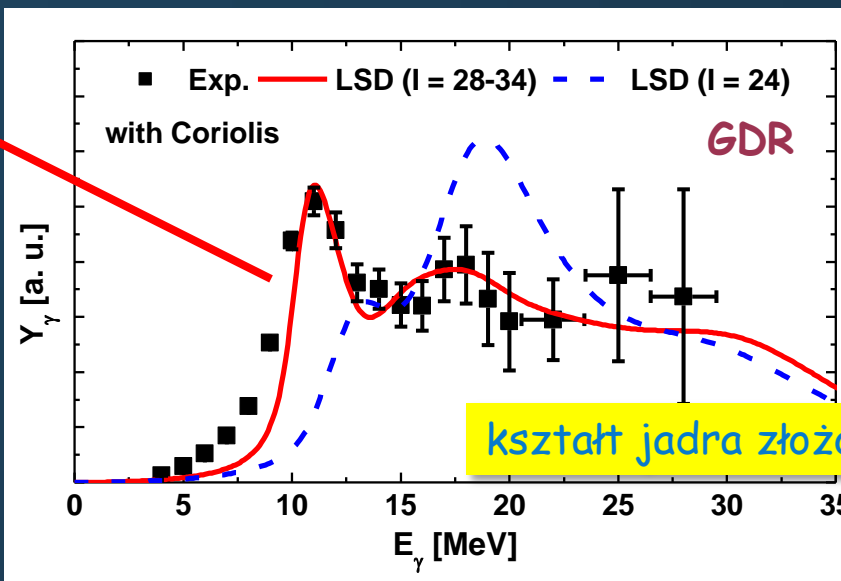
Zasilanie stanów o dużej deformacji przez niskoenergetyczną część GDR wzbudzonego w jądrze złożonym o dużej deformacji

Deformacje jądrowe:  
K. Hadyńska - Klęk

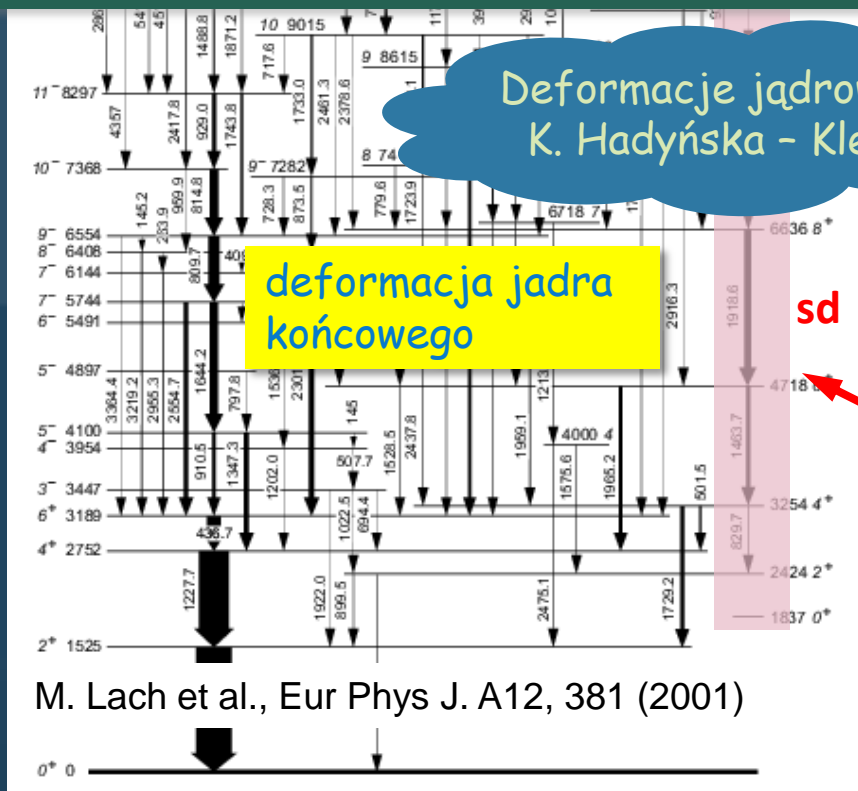
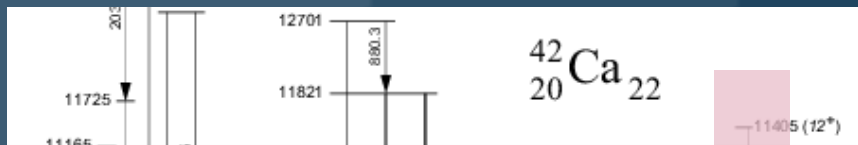
deformacja jądra końcowego

sd

M. Kmiecik et al., Acta Phys. Pol. B36 (2005) 1169



A. Maj et al., Nucl. Phys. A731 (2004) 319



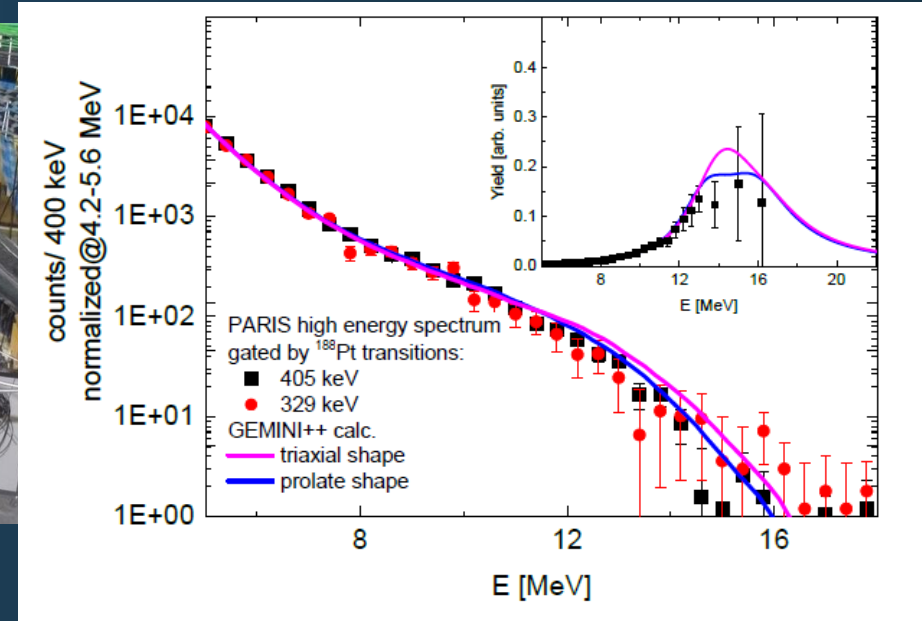
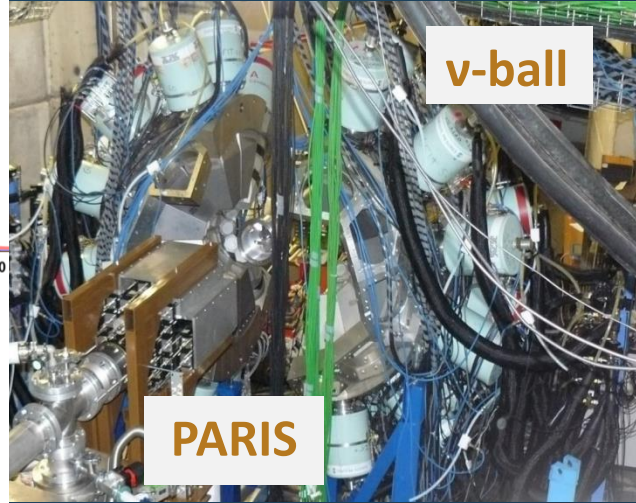
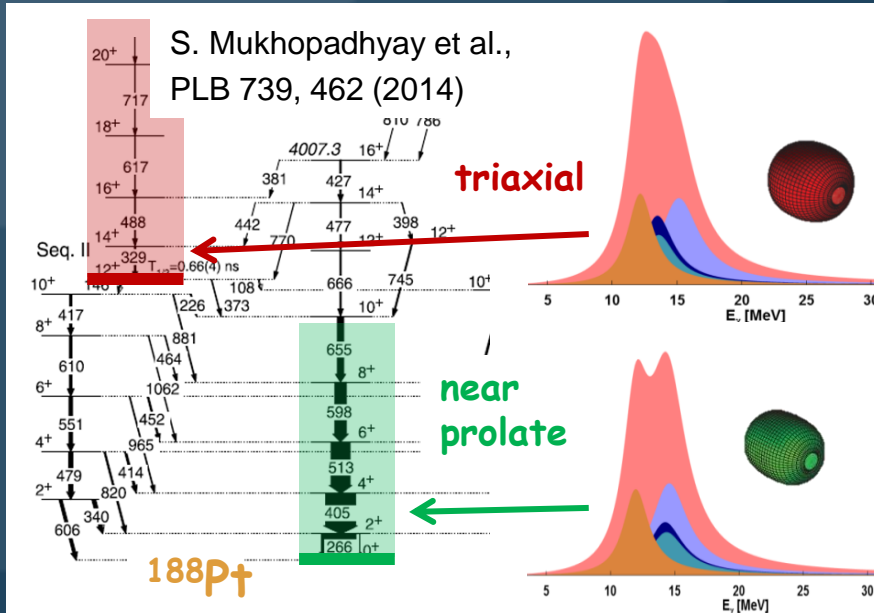
M. Lach et al., Eur Phys J. A12, 381 (2001)



# Badanie zachowania deformacji jądra podczas jego rozpadu



M. Ciemala et al., Acta Phys. Pol B Proc. Suppl. 16, 4-A3 (2023)



Eksperymenty w IJCLab, Orsay, Francja

Kontynuacja:



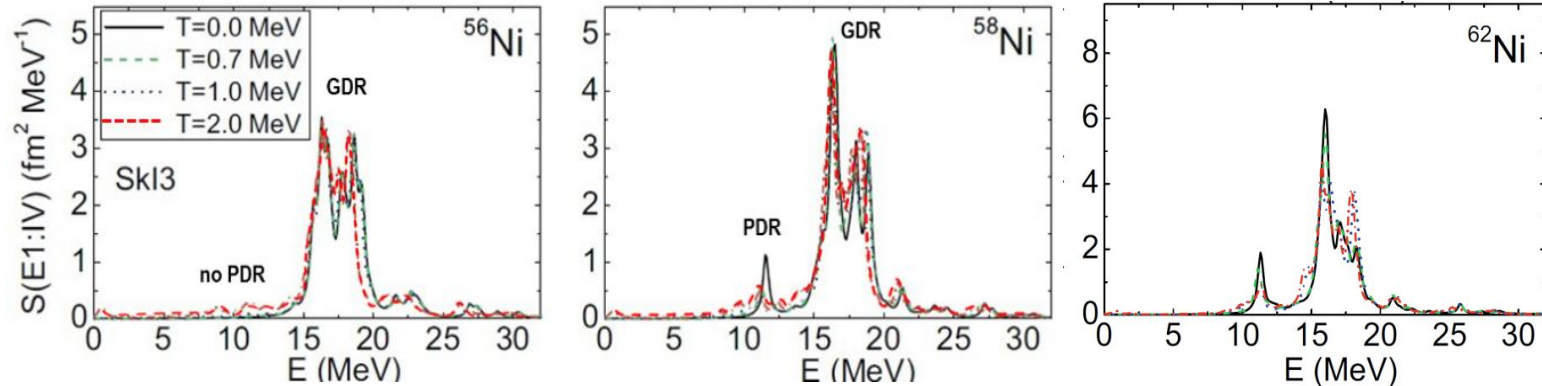
Bardzo podobne widma GDR dla obu przypadków (deformacji).

Lepsza zgodność z przewidywaniami teoretycznymi dla kształtu wydłużonego (prolate).

# PDR w gorącym jądrze $^{62}\text{Ni}$ ?

Oliver Wieland et al. – INFN Mediolan, Włochy  
współpraca: IFJ PAN Kraków  
IFIN-HH Bukareszt, Rumunia

Przewidywania teoretyczne nasilenia E1 dla  $^{56,58}\text{Ni}$  oraz  $^{62}\text{Ni}$ , dla różnych temperatur jądra



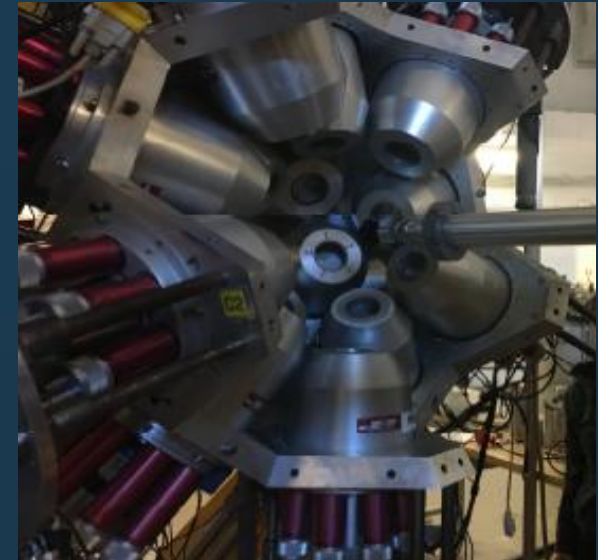
E. Yüksel et al., Eur. Phys. J. A (2019) 55: 230 and E. Yüksel private comm.

Eksperyment w IFIN-HH, Bukareszt, Rumunia



ELIFANT-GG@IFIN 2022

- 21 detektorów LaBr3 i CeBr3
- 4 HPGe



Wstępna analiza - obiecujące rezultaty

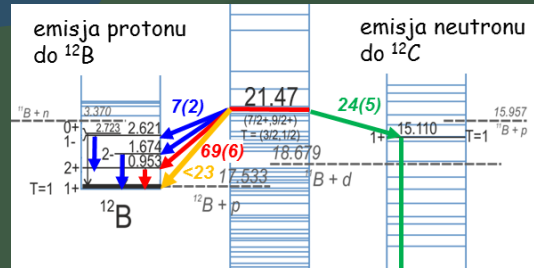


# Podsumowanie

## Jądra zimne

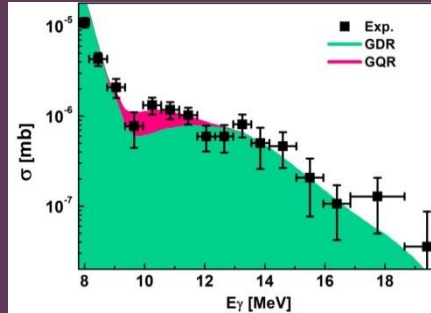
- Rozpad stanu „stretched” w  $^{13}\text{C}$

N. Cieplicka-Oryńczak, et al.,  
Phys. Lett. B 834 (2022) 137398



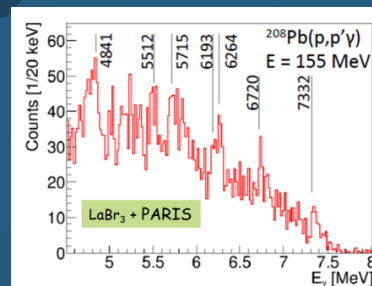
- Rozpad  $\gamma$  GQR w  $^{208}\text{Pb}$ , GDR jako tło

B. Wasilewska et al.,  
Phys. Rev. C 105 (2022) 014310



- PDR w  $^{208}\text{Pb}$  w reakcji (p,p'gamma)

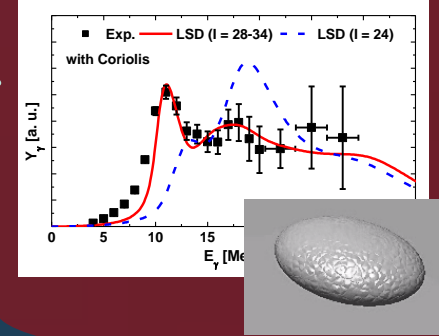
B. Wasilewska et al.,  
Acta Phys. Pol. B (2020) 677



## Jądra gorące

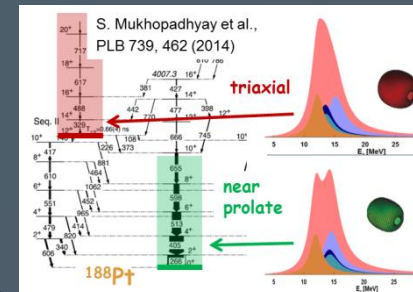
- kształt Jacobiego w  $^{46}\text{Ti}$
- Zasilanie stanów SD przez rozpad zdeformowanego jądra złożonego

A. Maj et al., Nucl. Phys. A731 (2004) 319  
M. Kmiecik et al., Acta Phys. Pol. B36 (2005) 1169



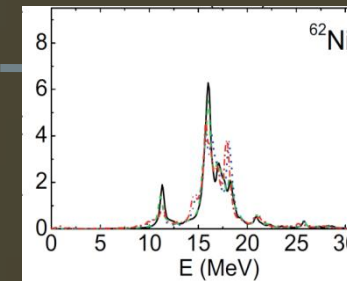
- GDR w gorącym jądrze  $^{192}\text{Pt}^*$  w koincydencji z  $^{188}\text{Pt}$

M. Ciemala et al., Acta Phys. Pol B  
Proc. Suppl. 16, 4-A3 (2023)



- PDR w gorącym jądrze  $^{62}\text{Ni}$  ?

O. Wieland, ... M. Kmiecik,  
M. Ciemala, A. Maj, ... et al



IFJ PAN

IPHC Strasbourg, Francja  
IJCLab, Orsay, Francja, IFIN-HH Bukareszt, Rumunia

# Współpraca

A. Maj, M. Ciemała, B. Wasilewska, N. Cieplicka-Oryńczak, M. Ziębliński, P. Pawłowski, B. Sowicki, J. Łukasik, J. Grębosz, B. Fornal, P. Bednarczyk, Ł. Iskra, M. Krzysiek, P. Lasko, K. Mazurek, M. Matejska-Minda - **IFJ PAN Kraków**

F.C.L. Crespi, A. Bracco, O. Wieland, S. Brambilla, S. Bottoni, F. Camera, S. Leoni, A. Giaz - **Università degli Studi di Milano and INFN, Milano**

P. Napiorkowski, K. Hadyńska-Klęk, M. Saxena - **SLCJ Warszawa**

M. Kicińska-Habior - **UW Warszawa**

M. N. Harakeh - **KVI Groningen**

A. Krasznahorkay - **ATOMKI, Debrecen**

M. Lewitowicz - **GANIL, Caen**

J. Wilson, I. Matea - **IJCLab, Orsay**

V. Guadilla - **IFIC Valencia**

Ch. Schmitt, O. Dorvaux, S. Kihel - **IPHC Strasbourg**

LiQuiang Qi - **IPN Orsay**

M. Stanoiu, S. Calinescu, C. Petrone, F. Rotaru - **NIPNE Bucharest**

A. Tamii - **RCNP, Osaka**

J. Isaak - **TU, Darmstadt**