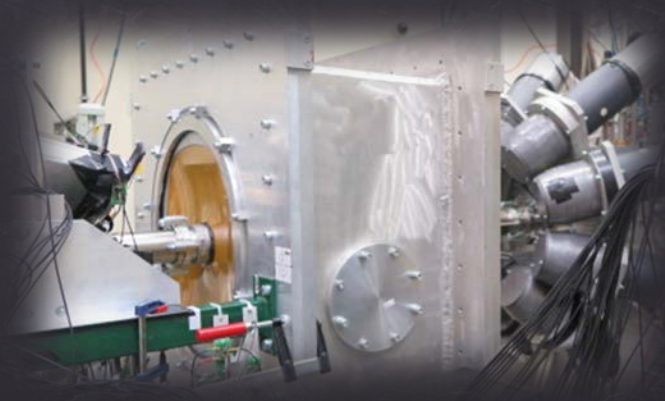




Pomiary rozpadu gamma kolektywnych wzbudzeń jąder atomowych wytwarzanych z zastosowaniem wiązek protonów w CCB IFJ PAN w Krakowie

Maria Kmieciak

IFJ PAN Kraków



Centrum Cyklotronowe Bronowice IFJ PAN w Krakowie

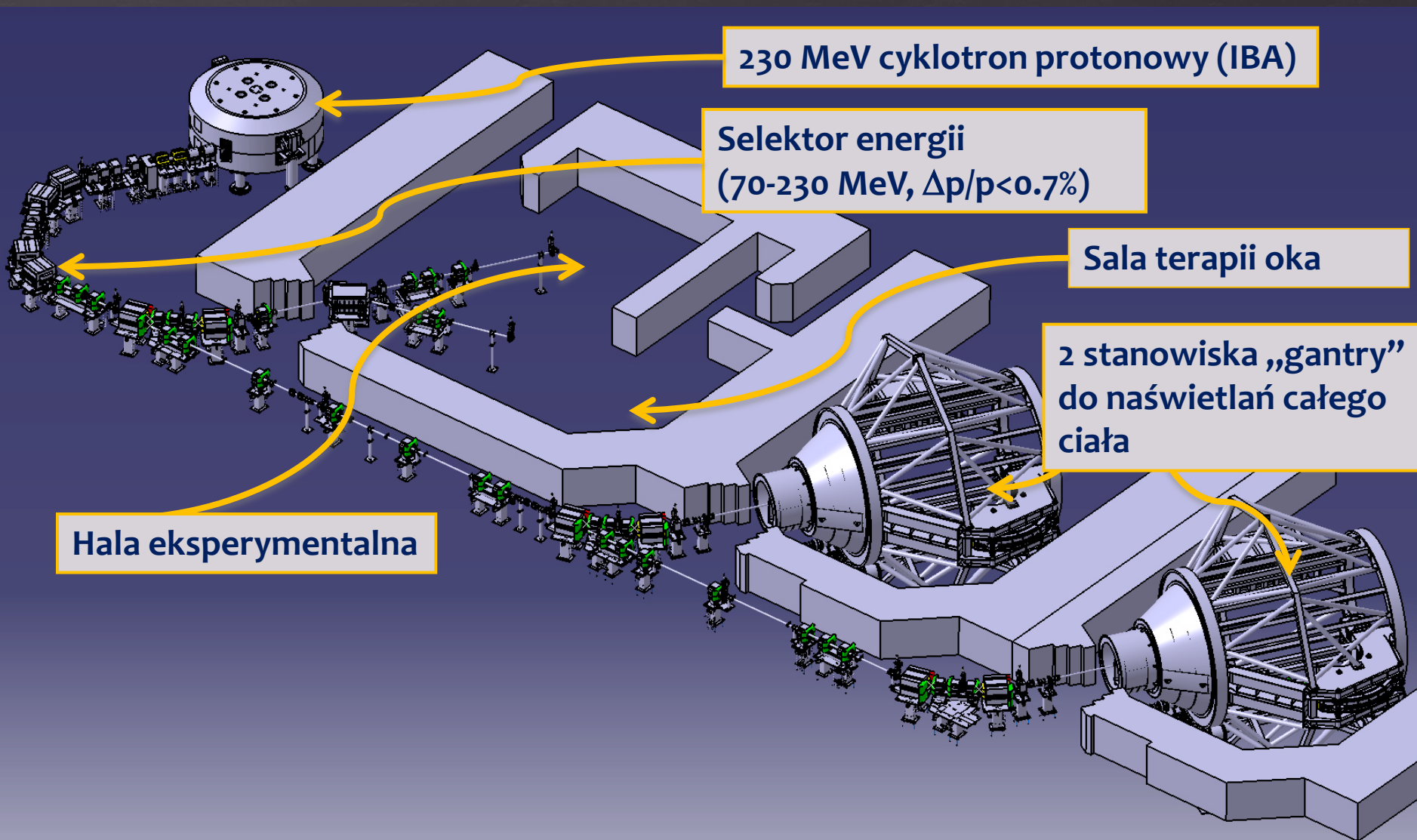
Dostarcza wiązki protonów o energii $E_{\text{beam}}=70\text{-}230\text{ MeV}$

Główne zastosowanie: - terapia protonowa,
oraz dodatkowo badania podstawowe
dotyczące:

- ⊗ fizyki jądrowej,
- ⊗ radiobiologii,
- ⊗ dozymetrii,
- ⊗ fizyki medycznej.



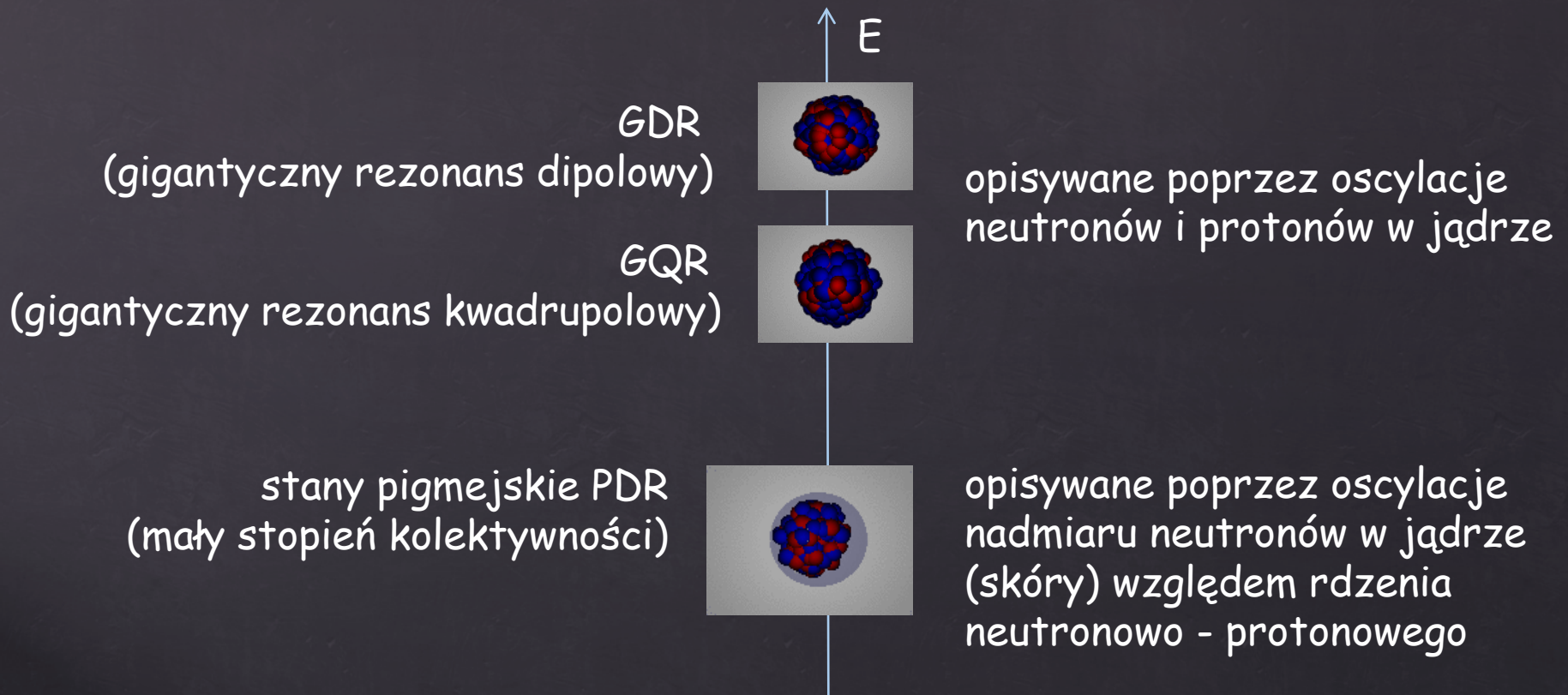
Centrum Cyklotronowe Bronowice IFJ PAN w Krakowie



Wzbudzenia kolektywne

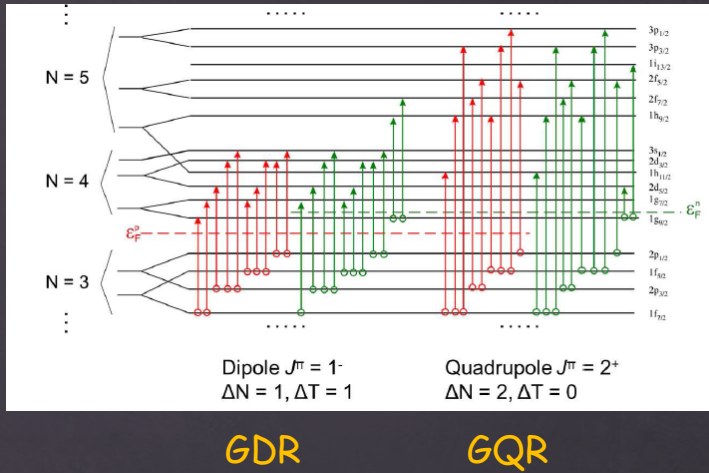
bierze w nich udział wiele nukleonów w jądrze

mogą powstawać w wyniku reakcji z utworzeniem jądra złożonego lub rozpraszania (γ, γ') , (p, p') , (α, α') oraz ciężkich jonów na jądrach tarczy

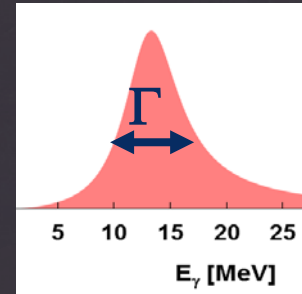


Wzbudzenie i rozpad gigantycznych rezonansów

M. N. Harakeh and A. van der Woude, *Giant Resonances; Fundamental High-Frequency Modes of Nuclear Excitation*, Oxford University Press, Oxford (2001)

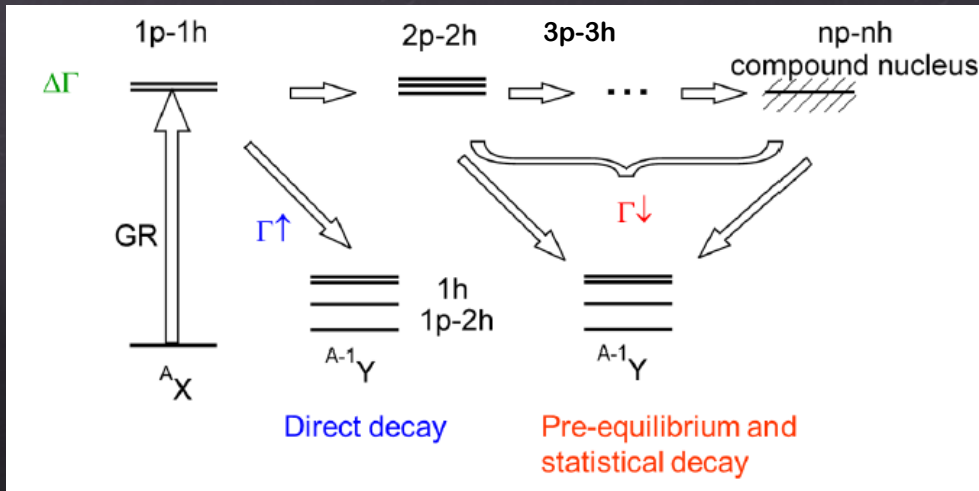


GR - opis mikroskopowy:
koherentne wzbudzenie
wielu stanów cząstka - dziura



nasilenie - funkcja Lorentza

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



Γ - szerokość rozpadu rezonansu

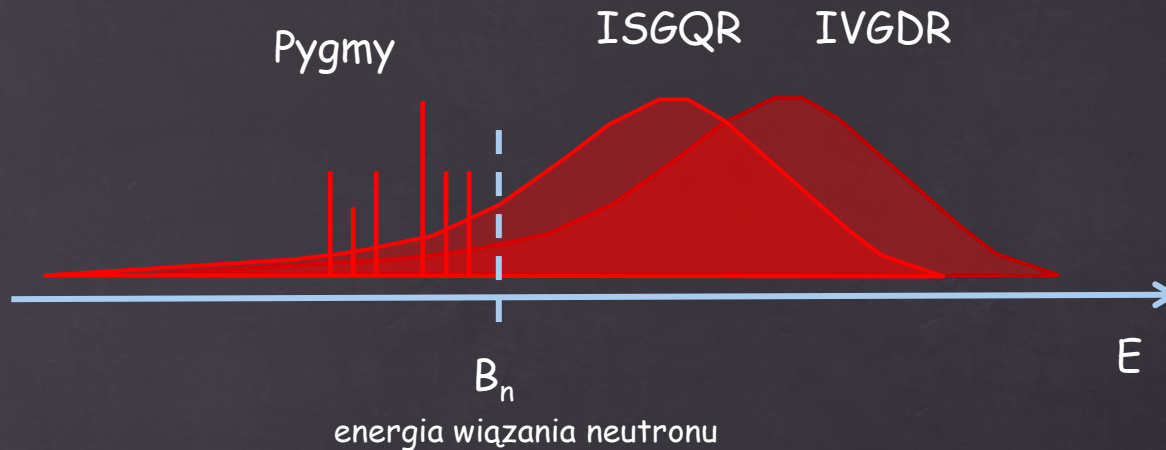
$$\Gamma = \Delta\Gamma + \Gamma\uparrow + \Gamma\downarrow$$

$\Delta\Gamma$ - superpozycja wielu stanów cząstka - dziura „inherent width”

$\Gamma\uparrow$ - rozpad stanu jednocząstkowego (natychmiastowa emisja cząstki) „escape width”

$\Gamma\downarrow$ - energia rozdzielana na stany wielocząstkowe „spreading width”

Widma gamma rozpadu stanów wzbudzonych



□ Stany „pigmejskie”

□ Rozpad gamma gigantycznych rezonansów

niewielkie prawdopodobieństwo rozpadu GDR, GQR poprzez emisję kwantu gamma: $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$

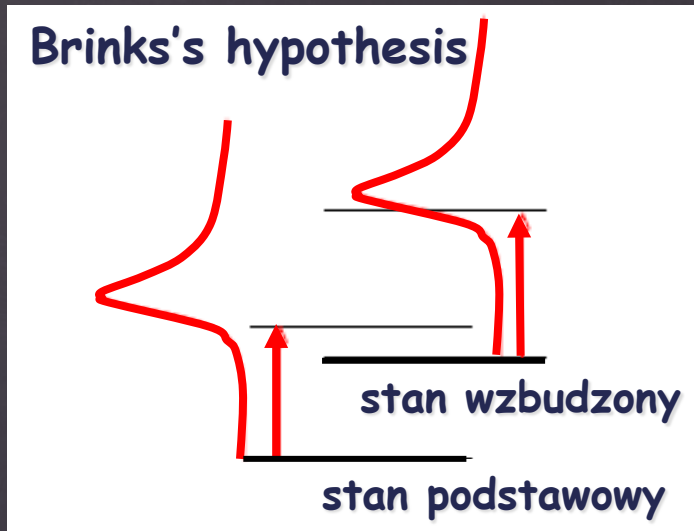
Motywacja pomiaru rozpadu gamma wzbudzeń kolektywnych

- ❑ GDR - dość dobrze zbadany rozpad poprzez emisję kwantów gamma - kształt jąder, deformacja - pomiary dla jąder z różnych obszarów temperatury i momentu pędu
- ❑ rozpad stanów „pigmejskich” - coraz lepiej poznawany - pomiary dostarczają danych do weryfikacji modeli teoretycznych
- ❑ rozpad gamma GQR - przekroje czynne, stosunki rozgałęzień - nie jest dobrze poznany

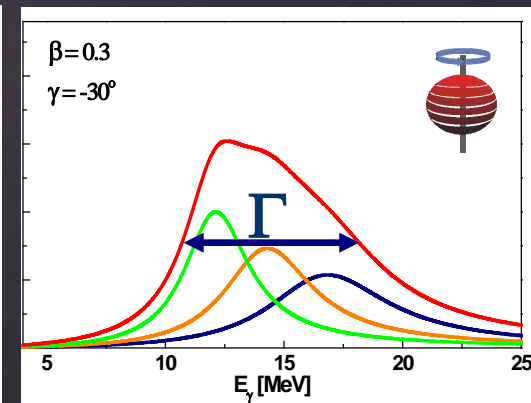
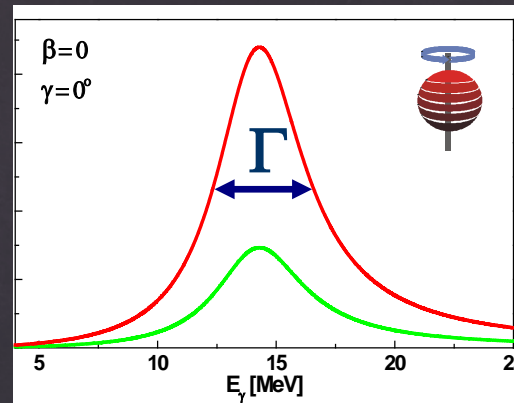
Badania rozpadu gamma GDR

(w jądrach zimnych i gorących)

D.M. Brink, 1955



funkcja nasilenia GDR - deformacja jądra



ponad 50 lat badań IVGDR

(doświadczalnych i teoretycznych) -

w tym czasie uzyskano informację na temat kształtu wielu jąder o różnych masach, temperaturach i krętach (momentach pędu)

IVGDR stanowi narzędzie do badań własności jąder gorących

Początki udziału polskich Fizyków w badaniach GDR (w gorących jądrach)

Współpraca:

Warszawa - Seattle

Kurt A. Snover

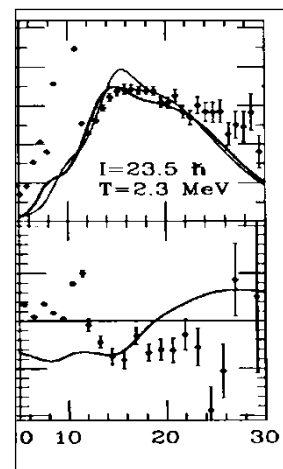
Marta Kicińska - Habior

Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1986. 36: 545-603
 Copyright © 1986 by Annual Reviews Inc. All rights reserved

GIANT RESONANCES IN EXCITED NUCLEI

Kurt A. Snover

Department of Physics, Nuclear Physics Laboratory GL-10,
 University of Washington, Seattle, Washington 98195



M. Kicińska-Habior
 et al., Phys. Lett.
 B308 (1993) 225:
 Seattle exp. -
 przejście Jacobiego
 w jądrze ^{45}Sc

Współpraca:

Kraków-Kopenhaga-Mediolan

Jens Jørgen Gaardhøje

Adam Maj

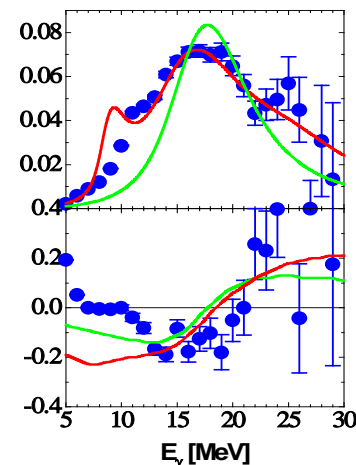
Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1992. 42:483-536
 Copyright © 1992 by Annual Reviews Inc. All rights reserved

NUCLEAR STRUCTURE AT HIGH EXCITATION ENERGY STUDIED WITH GIANT RESONANCES

Jens Jørgen Gaardhøje

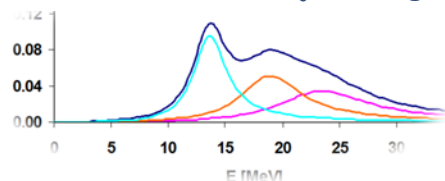
Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Blegdamsvej 15-17,
 Copenhagen 2100, Denmark

A. Maj et al.,
 Nucl. Phys. A687
 (2001) 192:
 NBI exp. -
 przejście Jacobiego
 w jądrze ^{46}Ti



GDR dla kształtu trójosiowego

(zmiana kształtu
 jądra: spłaszczony
 - trójosiowy
 - wydłużony)



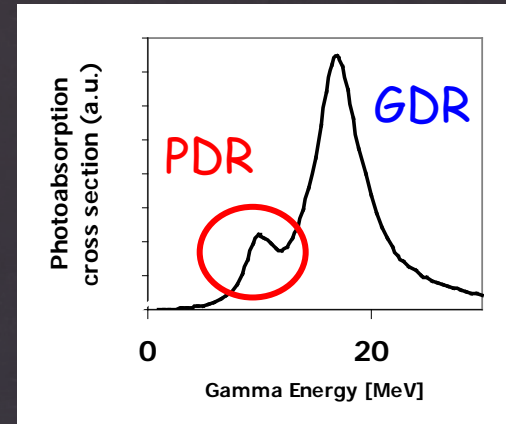
Wybrane publikacje w ramach współpracy Kraków-Mediolan-(Kopenhaga):

- A.Maj et al., “Phase Space Selection of the GDR gamma-ray emission from hot ^{162}Yb nuclei”, Phys. Lett. 291, 385 (1992)
- A.Bracco et al., “Increase in width of the GDR in hot nuclei: shape change or collisional damping?” PRL 74, 3748 (1995)
- F.Camera et al. “Probing the shape of hot ^{194}Hg at high spins with the GDR decay in selected cascades”, PRC 60, 014306 (1999)
- T.Tveter et al., “Collective Dipole Motion in highly excited ^{272}Hs ($Z=108$) nuclei”, PRL 76, 1035 (1996)
- G.Benzoni et al., “Effect of E1 decay in the population of superdeformed structures”, Phys. Lett. 540B, 199 (2002)
- A.Maj et al, “Evidence for the Jacobi shape transition in hot ^{46}Ti ”, Nucl. Phys. A731, 319 (2004)
- M.Kmiecik et al., “Probing nuclear shape close to the fission limit with the GDR in ^{216}Rn ”, Phys. Rev. C 90, 064317, 2004
- M. Kmiecik et al., “GDR feeding of the highly-deformed band in ^{42}Ca ”, Acta Phys. Pol. B36, 1169 (2005).
- M. Brekiesz et al, “Deformation Effects in Hot Rotating ^{46}Ti Probed by the Charged Particle Emission and GDR γ -Decay”, Nucl. Phys. A788, 224c (2007)
- A.Corsi et al., “Measurement of isospin mixing at a finite temperature in ^{80}Zr via giant dipole resonance decay”, Phys. Rec. C 84, 041304 (2011)
- M. Ciemala et al., “Giant Dipole Resonance built on hot rotating nuclei produced during evaporation of light particles from ^{88}Mo compound nucleus”, Phys. Rev. C 91, 054313 (2015)

Pigmejski rezonans dipolowy PDR -stany pigmejskie

(Soft Dipole Mode)

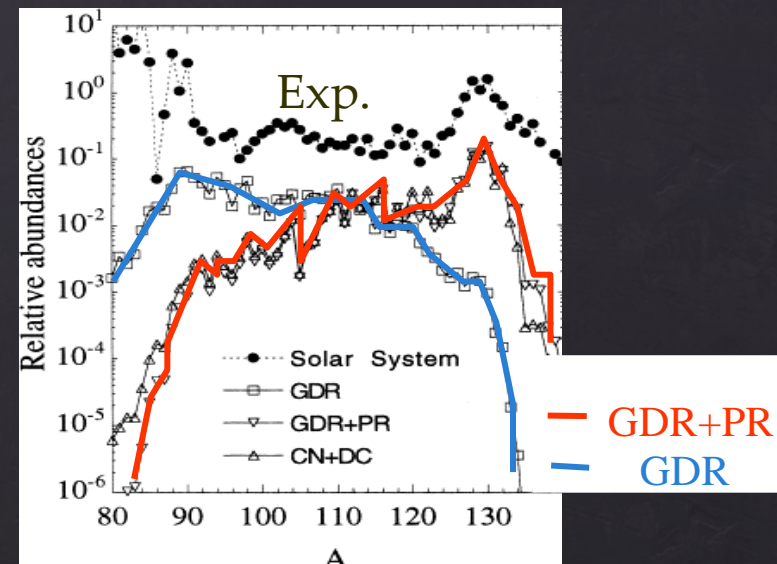
niskoenergetyczna część
wzbudzenia dipolowego



- Rezonanse pigmejskie odgrywają ważną rolę w procesie r nukleosyntezy
- Wpływ na poprawne określenie równania stanu materii jądrowej - związek parametrów PDR z grubością skórki neutronowej, a przez to z energią symetrii

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

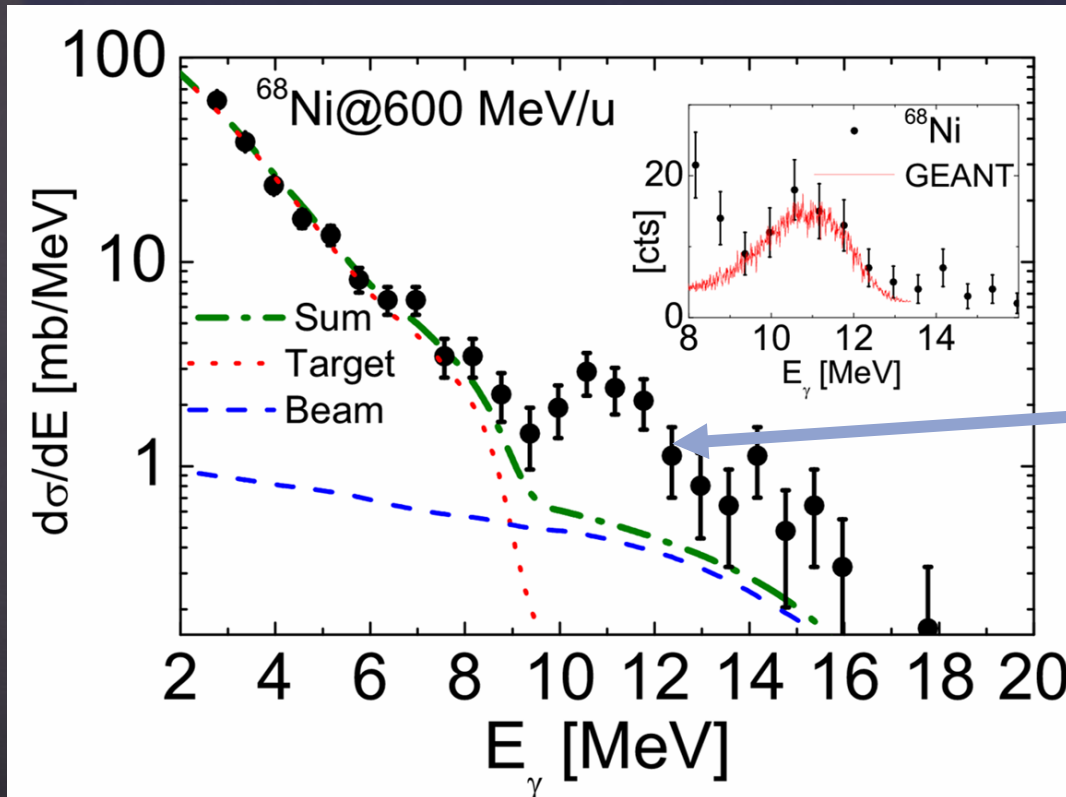
S.Goriely and E. Khan, Nucl. Phys. A706 (2002) 217



PDR w ^{68}Ni - wzbudzenie kulombowskie

^{68}Ni @ 600 A MeV na tarczy ^{197}Au

widmo z det. BaF2 (HECTOR)



po raz pierwszy
zbadano PDR w reakcji
o energii relatywistycznej
za pomocą pomiaru
kwantów gamma

nasilenie związane
z emisją z jąder pocisku

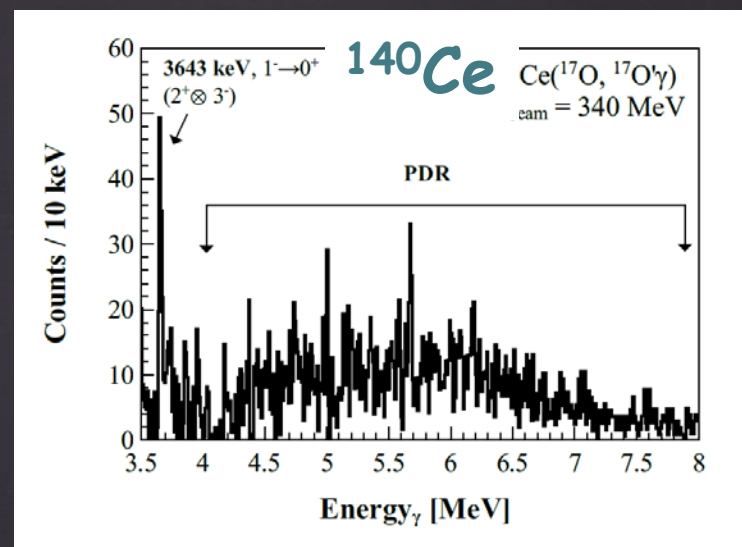
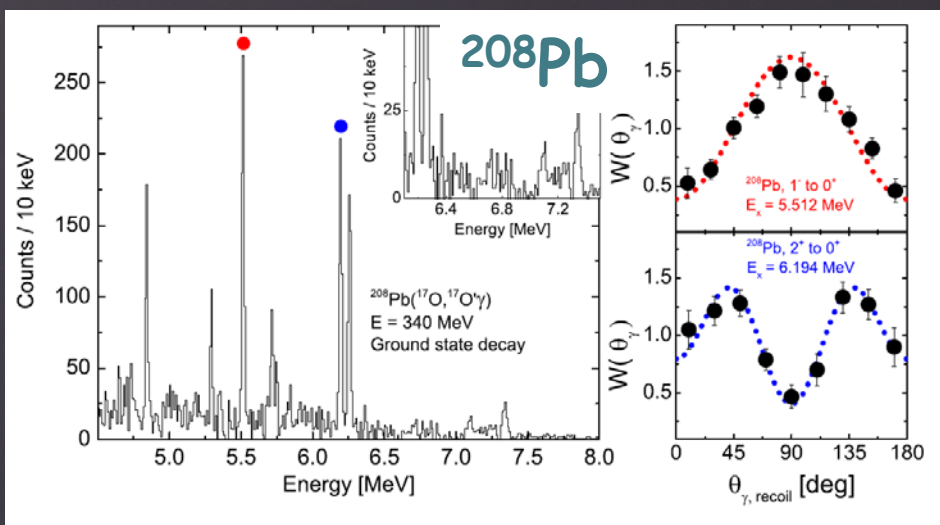
$E = 11.0(5) \text{ MeV}$,
 $\text{EWSR} = 5(2)\%$

O. Wieland, (A. Maj, P. Bednarczyk, J. Grębosz,
M. Kmiecik, W. Męczyński, J. Styczeń) et al., PRL102(2009) 092502;

Pomiar stanów pigmejskich w ^{208}Pb i ^{140}Ce

nieelastyczne rozpraszanie ^{17}O @ 20 MeV/u

widmo z detektorów HpGe (AGATA)



F.C.L. Crespi, (A. Maj, M. Kmiecik),
et al., Phys.Rev.Lett. 113, 012501 (2014)

M. Krzysiek, M. Kmiecik, A. Maj,
P. Bednarczyk et al.,
Phys. Rev. C 93, 044330 (2016)

Współpraca: Mediolan-Kraków+AGATA

Pomiar rozpadu gamma GQR

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

- tylko jeden opublikowany do tej pory pomiar promieniowania gamma emitowanego z rozpadu GQR

rozpraszanie 381 MeV ^{17}O na tarczy ^{208}Pb

- Pomiar kwantów gamma w koincydencji z rozproszonymi jonami

- Układ detektorów:

- Spin Spektrometr ORNL HHIRF - 72 detektory NaI - gamma
- 6 detektorów Si umieszczonych pod kątem 13° - rozproszona wiązka

- Wartość energii wzbudzenia uzyskana z energii rozproszonej wiązki

$$E^* = E \text{ wiązki} - E \text{ rozproszonego jonu}$$

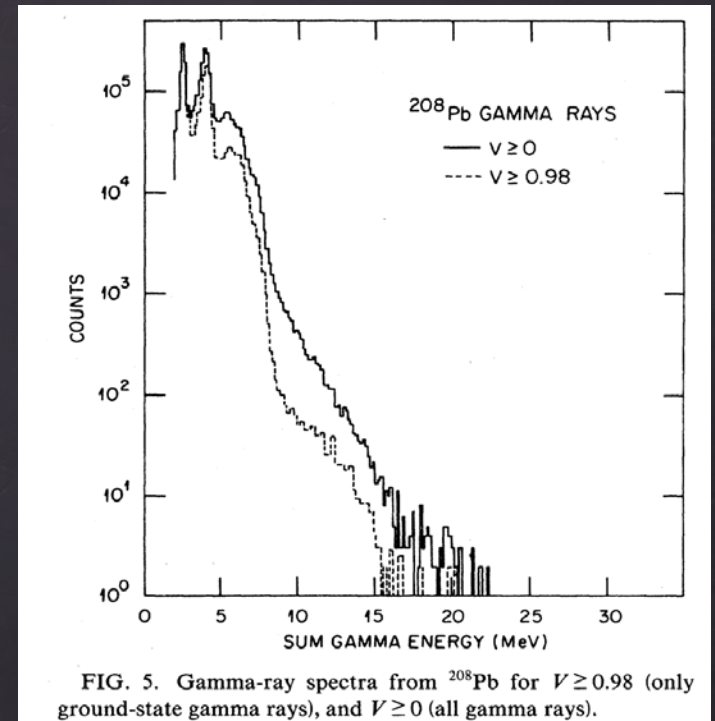
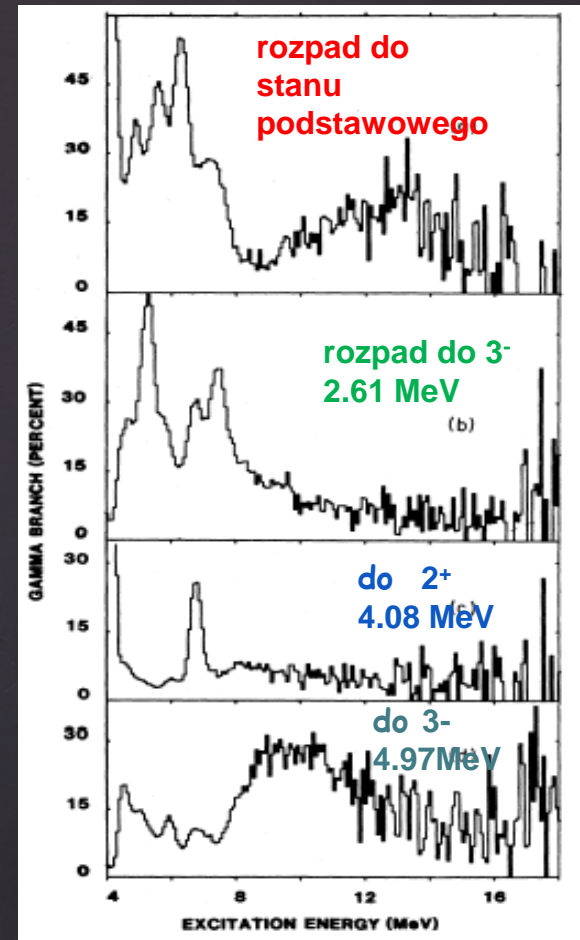
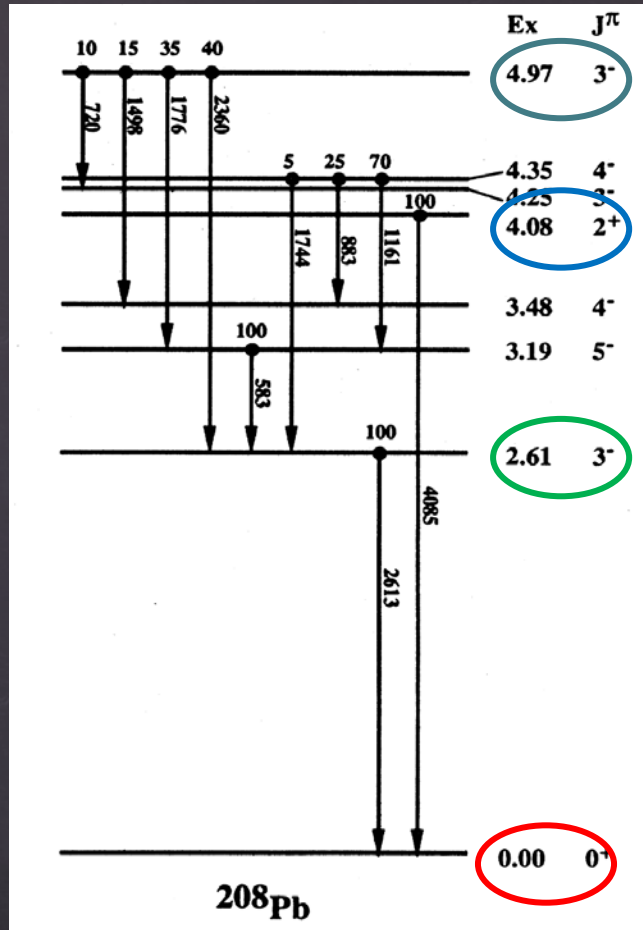


FIG. 5. Gamma-ray spectra from ^{208}Pb for $V \geq 0.98$ (only ground-state gamma rays), and $V \geq 0$ (all gamma rays).

widmo promieniowania gamma

Pomiar rozpadu gamma GQR

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

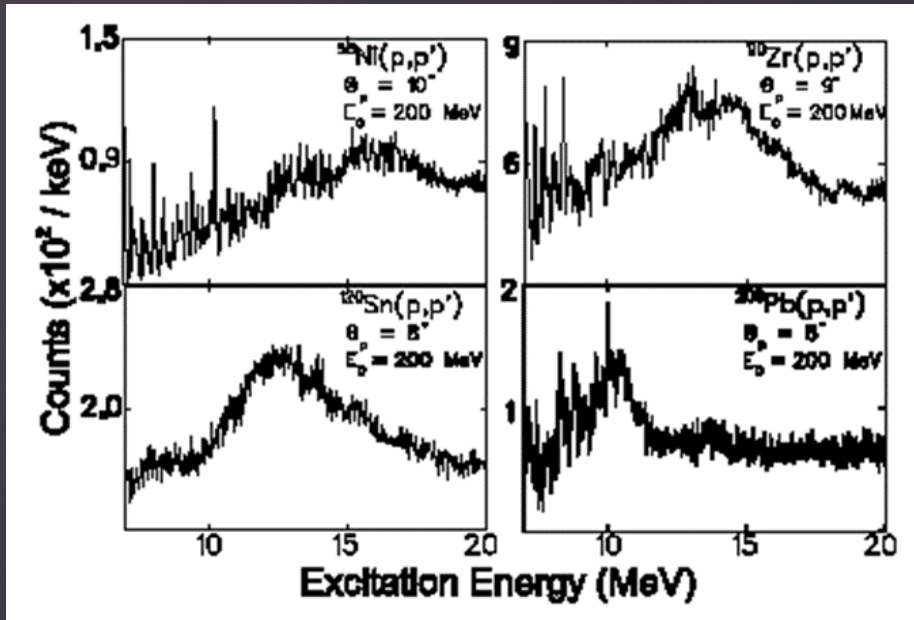


widmo energii wzbudzenia przy jednoczesnym pomiarze kwantów gamma

Pomiary z wykorzystaniem reakcji (p,p')

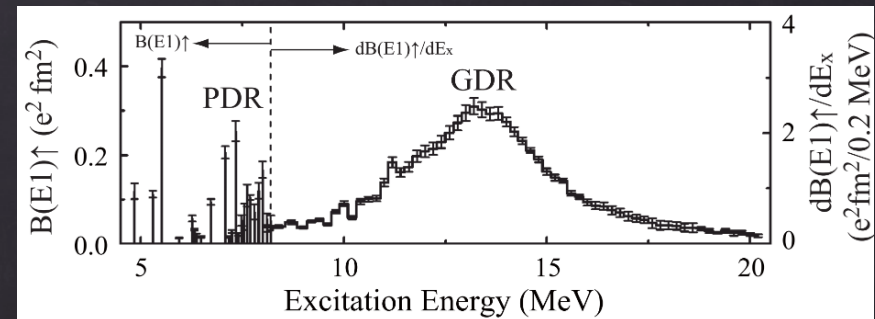
rozpraszanie protonów o energii 200 MeV

Shevchenko PRL93(2004)122501-1



rozpraszanie protonów o energii 295 MeV na tarczy ^{208}Pb

A. Tamii et al., PRL107(2011) 062502;
A. Tamii et al., Eur. Phys. J. A50 (2014) 28



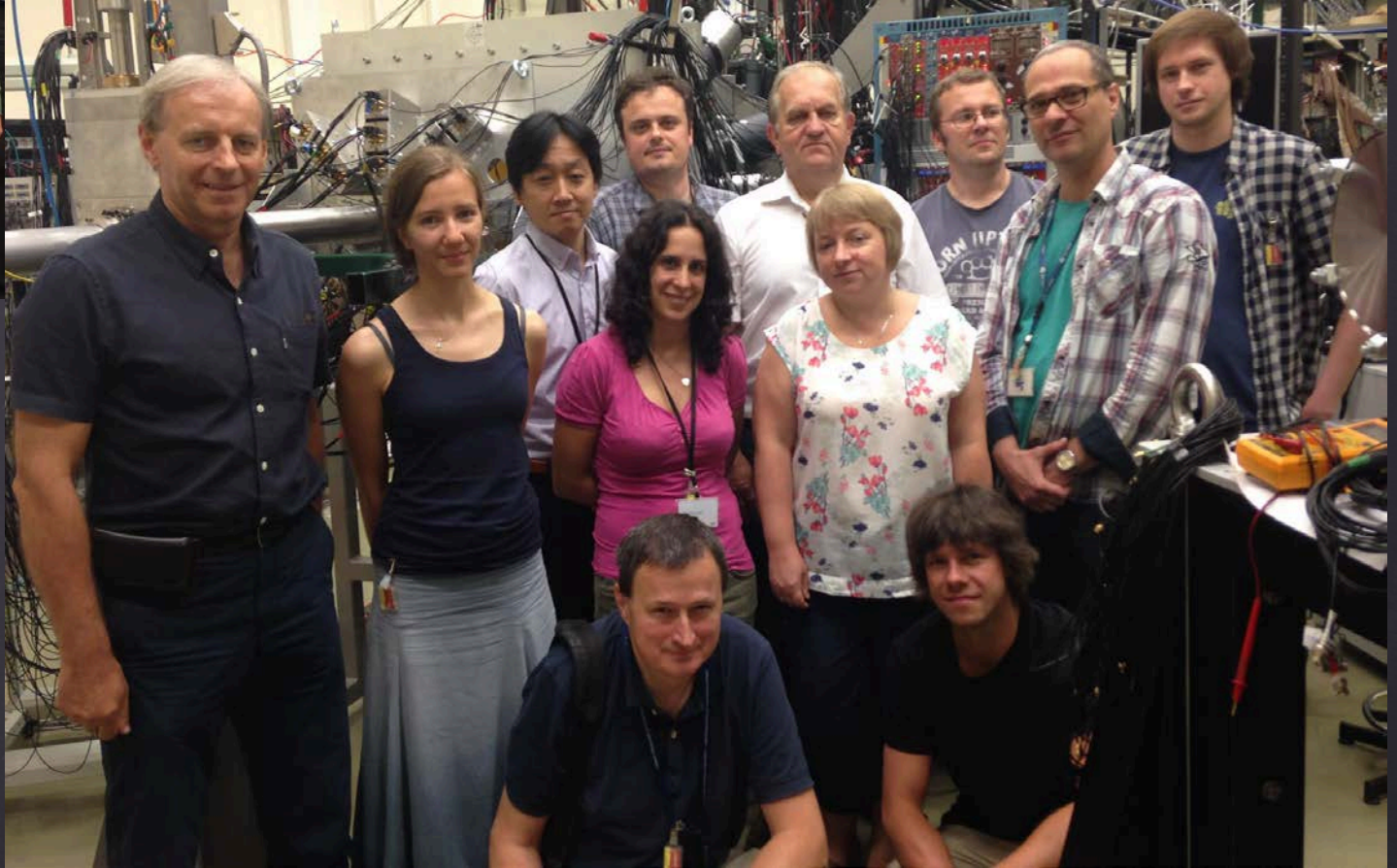
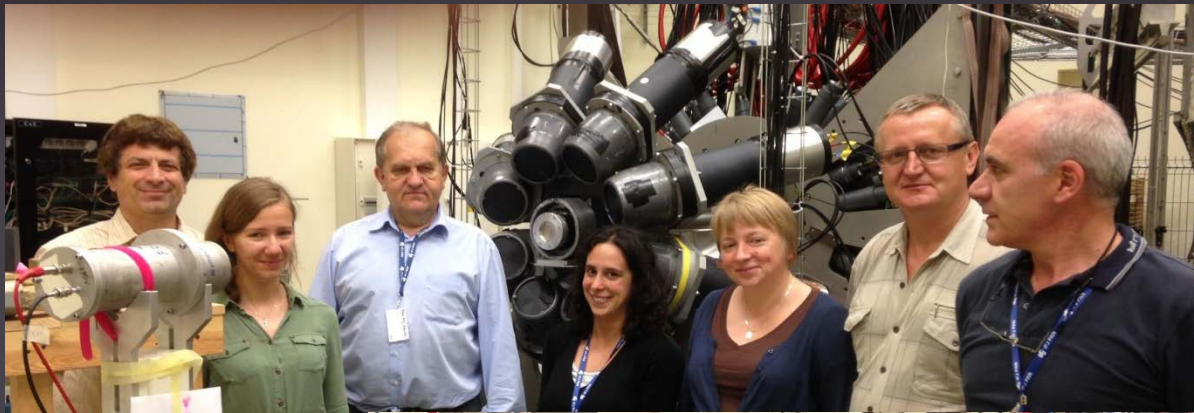
Eksperymenty w CCB IFJ PAN



Główne cele:

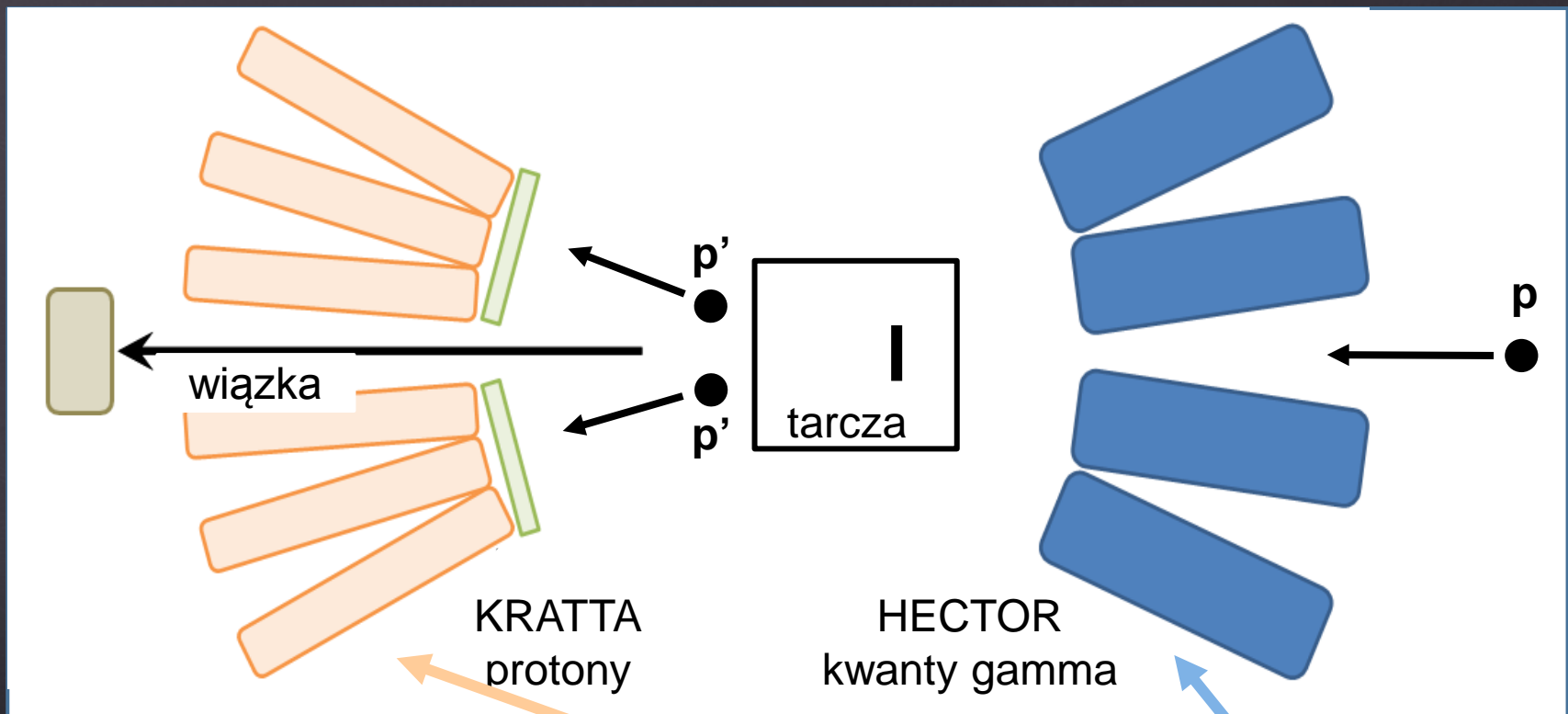
- Pomiar rozpadu gamma GQR - badanie struktury mikroskopowej ISGQR
- Pomiar stanów pigmejskich - korelacja z kątem rozproszenia protonu

Porównanie z wynikami pomiarów z innych ośrodków (RNCP, i-Themba LABS, ELI-NP, KVI Groningen, LNL Legnaro, Uniwersytet w Kolonii)



Idea pomiaru - nieelastyczne rozpraszanie protonów ($p, p' \gamma$) ^{208}Pb

$p @ 85 \text{ MeV}$ na tarczy ^{208}Pb o grubości $48 \mu\text{m}$ (54.5 mg/cm^2)



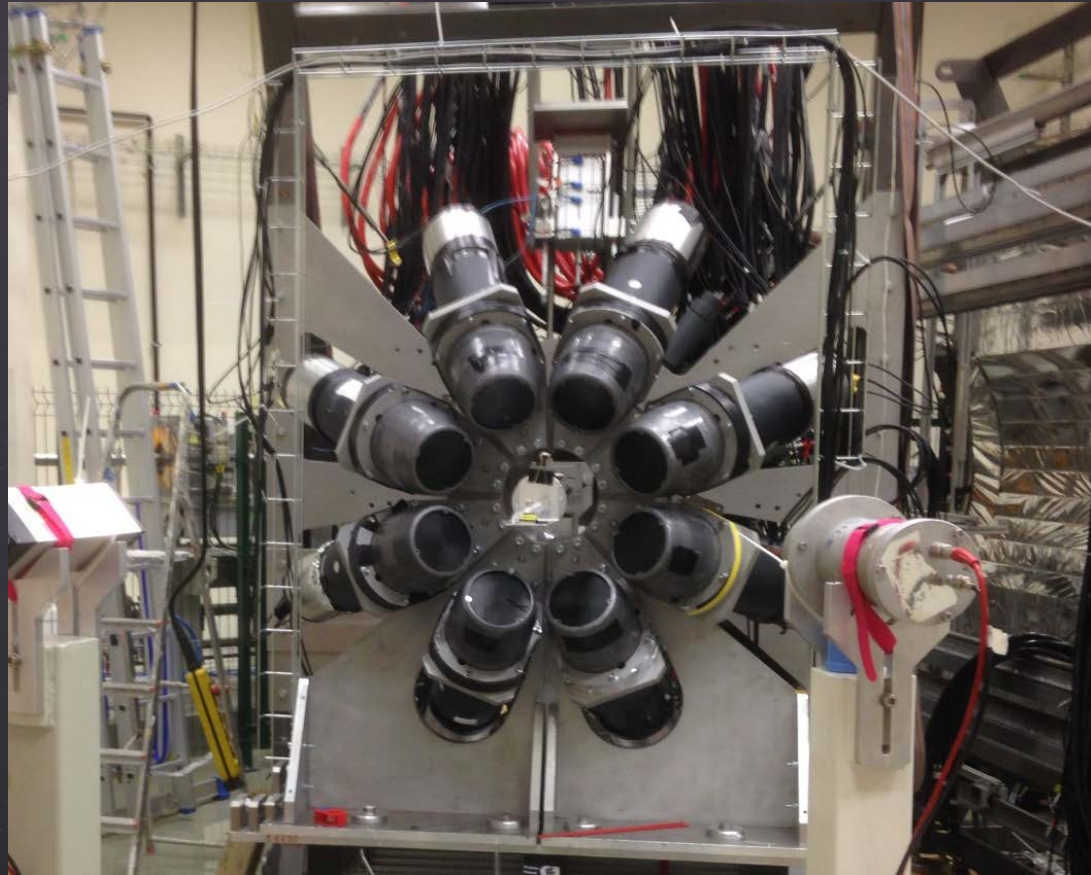
jednoczesny pomiar rozproszonych protonów i kwantów gamma

HECTOR (High Energy gamma-ray deteCTOR)

HECTOR - 8 dużych detektorów BaF_2 :

- ✓ 14.5 cm (φ) x 17.5 cm (kryształy)
- ✓ $\Delta E_\gamma/E_\gamma$ (^{60}Co) $\approx 10\%$
- ✓ wydajność (15 MeV) $\approx 1\%$
- ✓ $\Delta t < 1$ ns

*(współpraca
Mediolan-Kraków)*

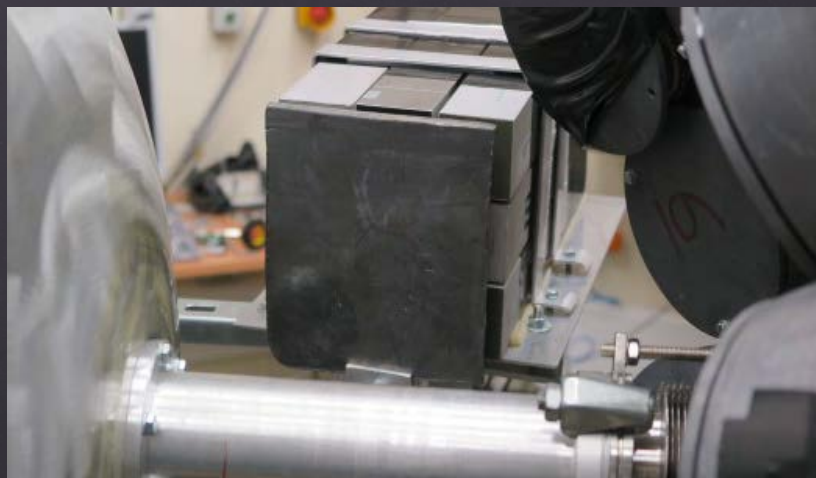


PARIS (Photon Array for studies with Radioactive Ion and Stable beams)

Klaster :

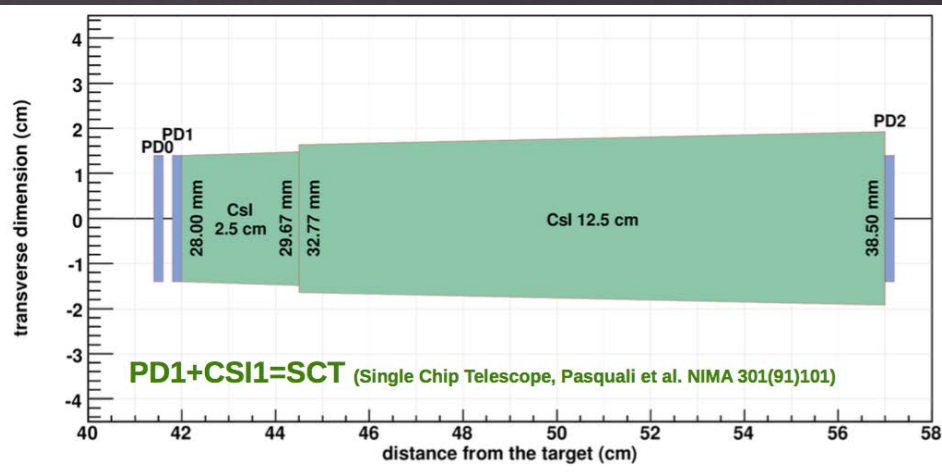
9 detektorów typu foswich $\text{LaBr}_3/\text{CeBr}_3 + \text{NaI}$
($2'' \times 2'' \times 2'' + 2'' \times 2'' \times 6''$):

- ✓ $\Delta E_\gamma / E_\gamma (^{60}\text{Co}) \approx 4\%$
- ✓ wydajność (15 MeV) $\approx 0.5\%$
- ✓ $\Delta t \sim 500 \text{ ps}$

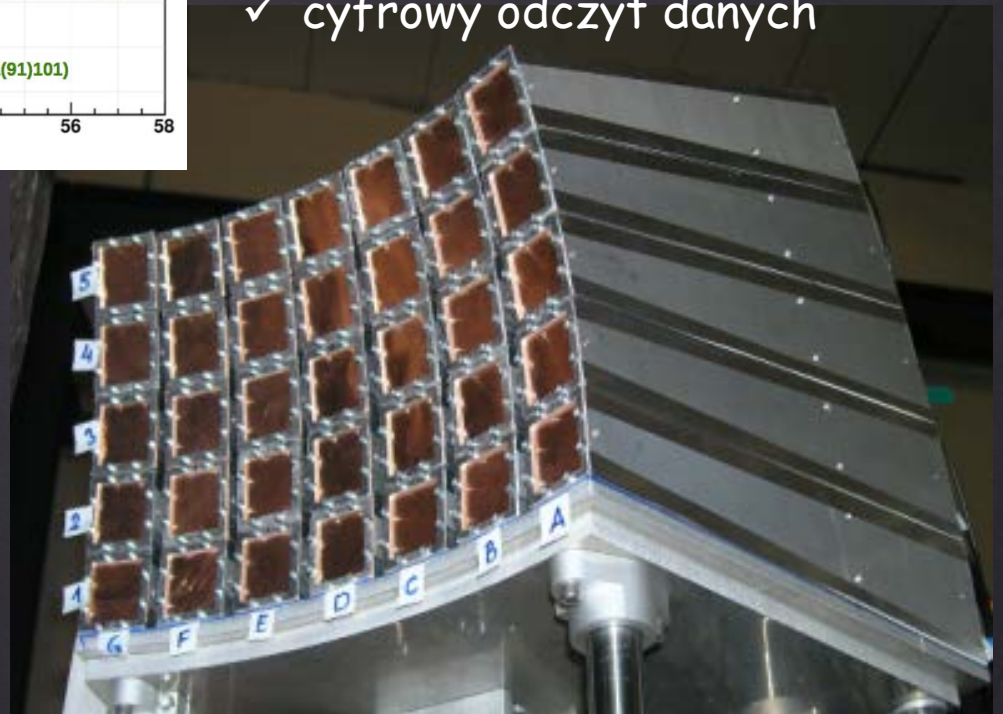
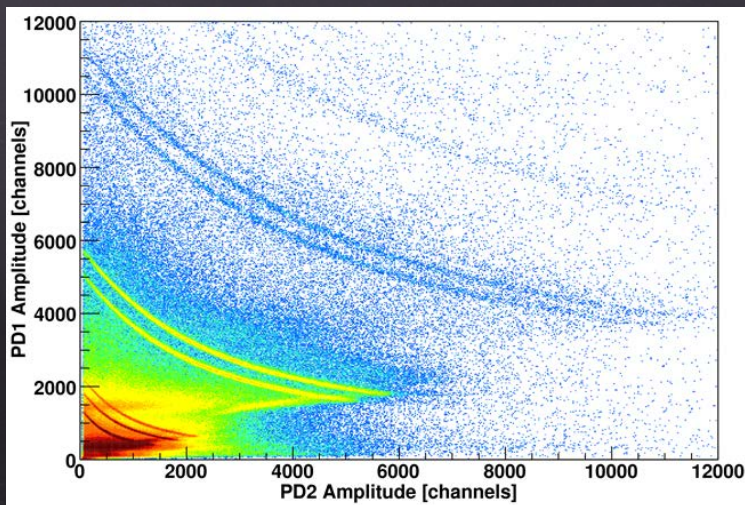


KRATTA (KRAków Triple Telescope Array)

35 detektorów teleskopowych CsI



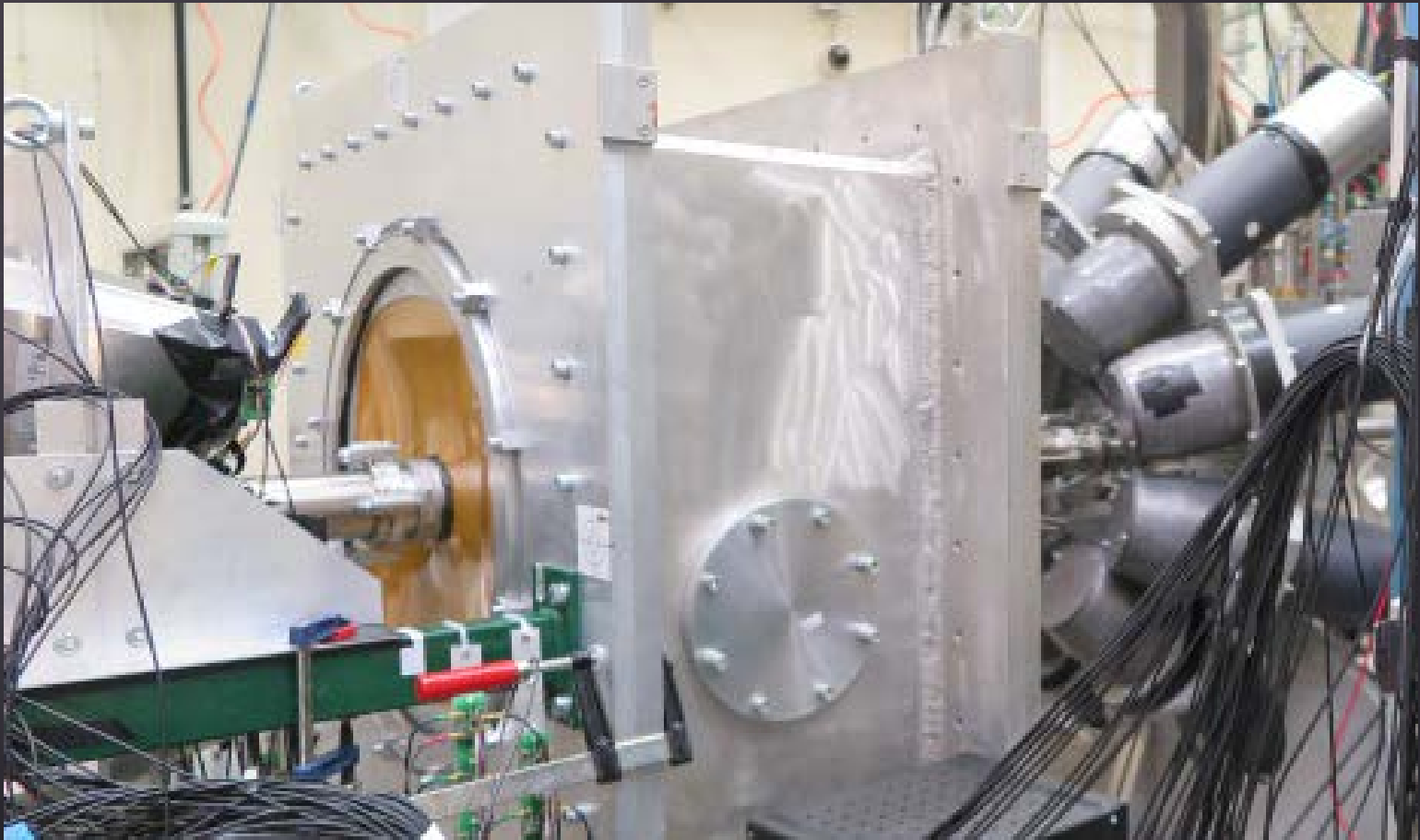
- ✓ energia mierzonych protonów: 2.5 - 260 MeV
- ✓ rozdzielczość energetyczna: 1-2%
- ✓ rozdzielczość kąтова: 3.9°
- ✓ cyfrowy odczyt danych



Układ eksperymentalny

KRATTA (16 detektorów teleskopowych CsI)
przed układem KRATTA detektory scyntylacyjne

HECTOR (8 BaF₂)
LaBr₃ (o dużej objętości 8"x3.5")
PARIS (klaster 9 detektorów
typu „phoswich”
LaBr₃/CeBr₃ + NaI)

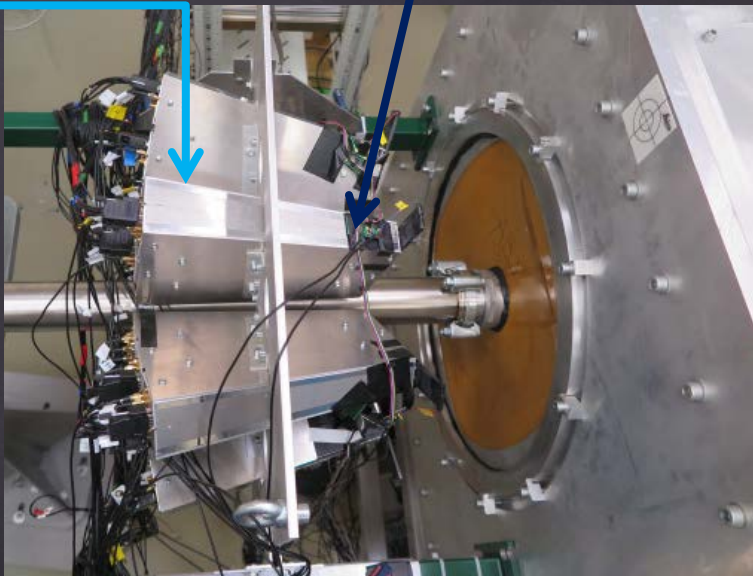


Detektory

detekcja rozproszonych protonów

KRATTA (16 detektorów teleskopowych CsI, umieszczonych pod kątami 8-15.3°)

przed układem KRATTA detektory scyntylacyjne (szybka odpowiedź, definicja detekcji protonu)



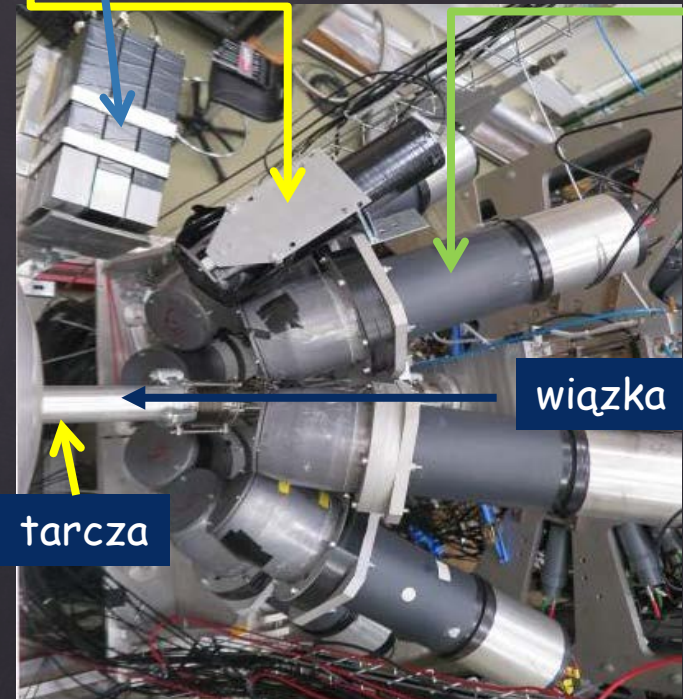
odległość 90 cm od tarczy

detekcja promieniowania gamma

HECTOR (8 BaF₂)

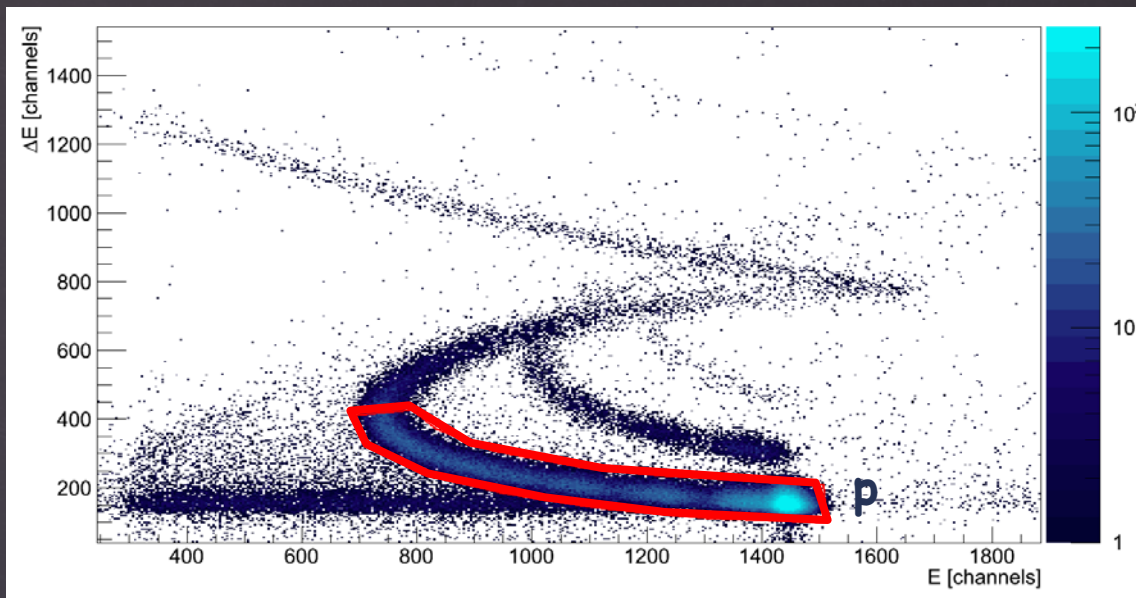
LaBr₃ (o dużej objętości 8"x3.5")

PARIS (klaster 9 detektorów typu „phoswich” LaBr₃/CeBr₃ + NaI)



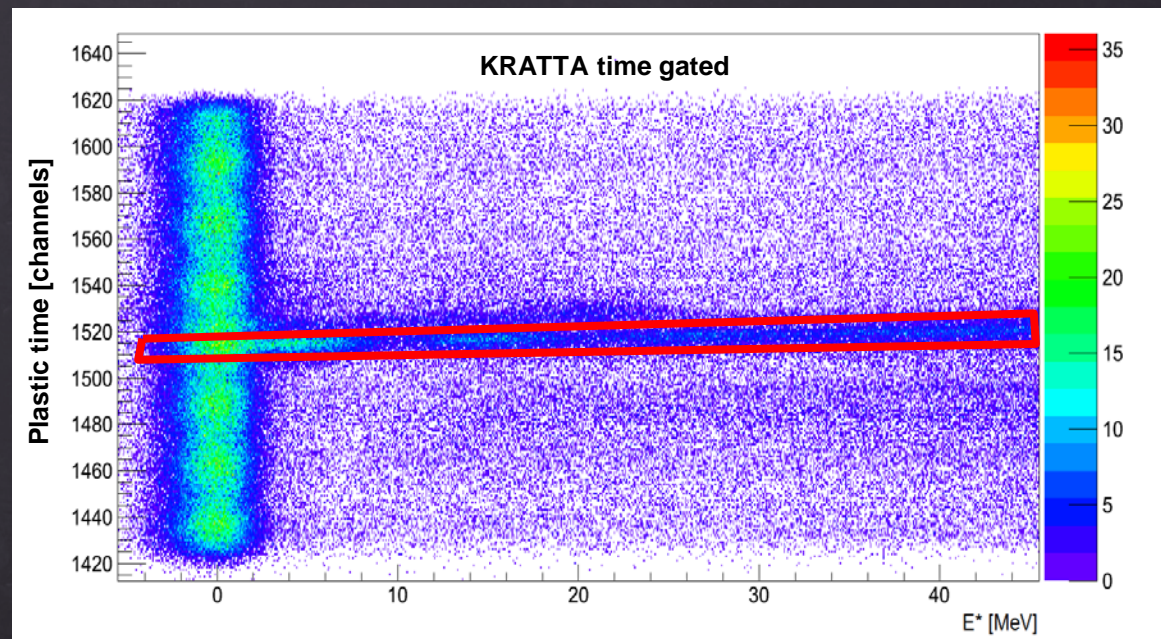
odległość 35 cm od tarczy

Analiza danych pomiarowych



Wymagania:

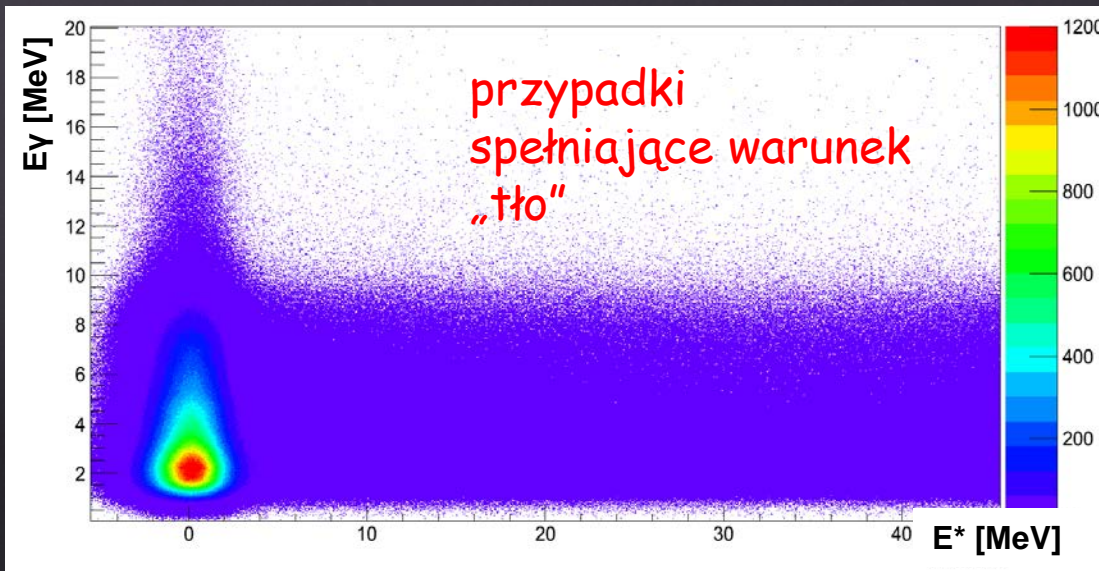
- identyfikacja protonu
- pomiar koincydencyjny protonu i kwantu gamma (warunki wyboru przedziałów czasu mierzonego przez poszczególne detektory)



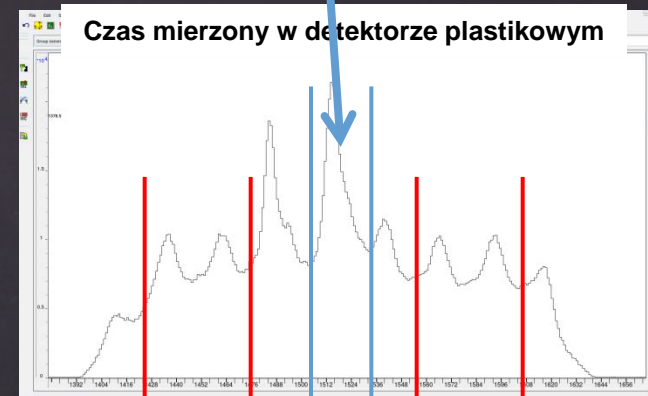
analiza: Basia Wasilewska

Odejmnowanie tła

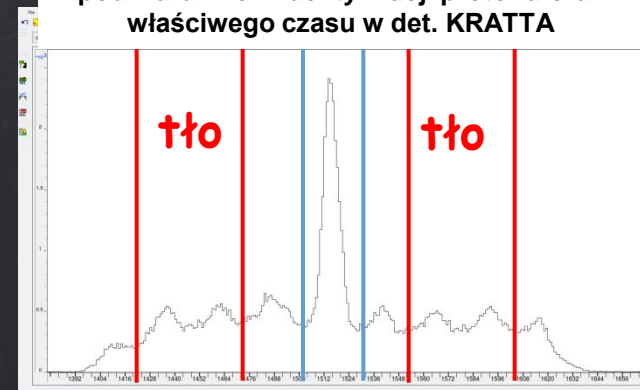
Zależność energii gamma od energii wzbudzenia



rozproszenie nieelastyczne



Czas mierzony w detektorze plastikowym pod warunkiem identyfikacji protonu oraz właściwego czasu w det. KRATTA

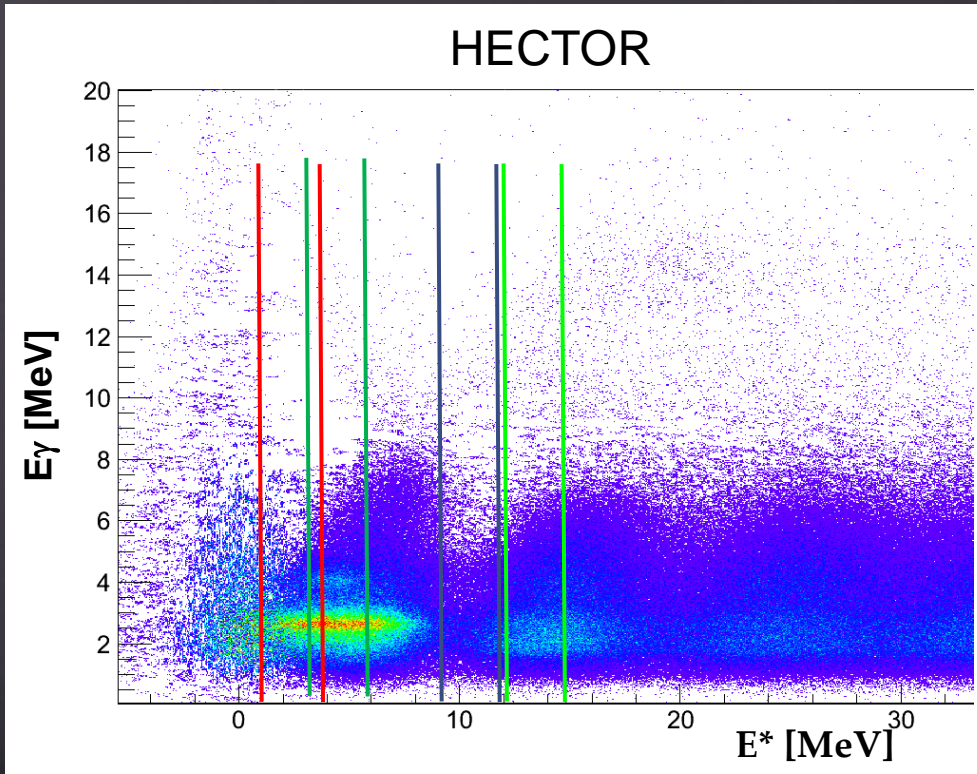


100 ns

18.01.2018

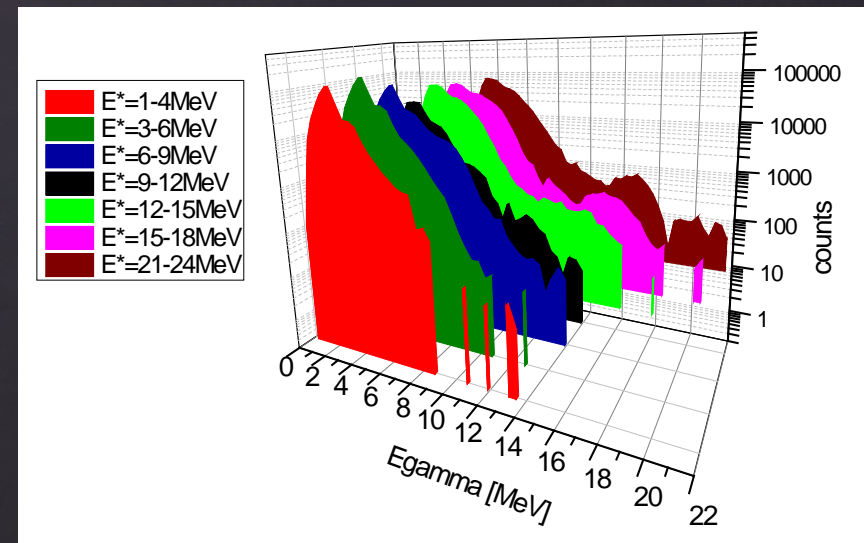
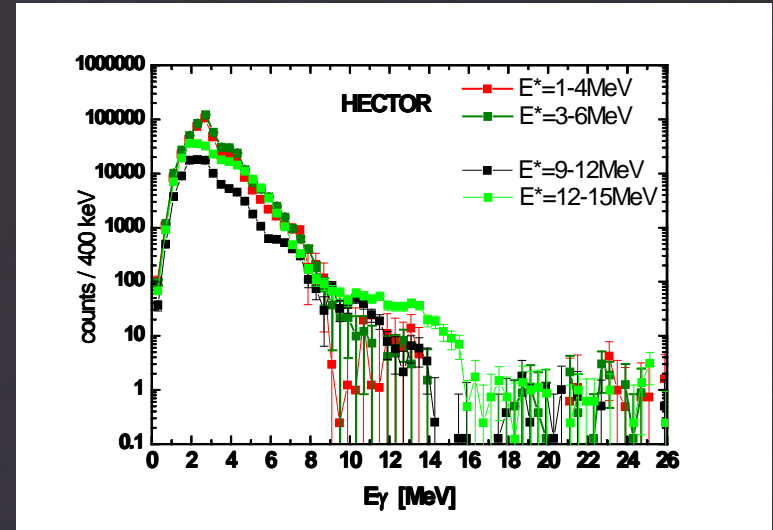
Macierz koincydencji

Zależność energii kwantu gamma od energii wzbudzenia
po odjęciu tła

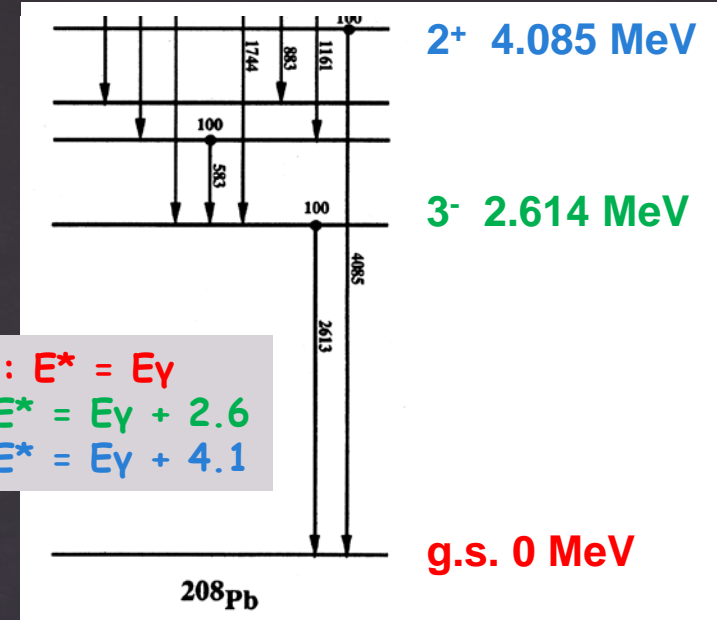
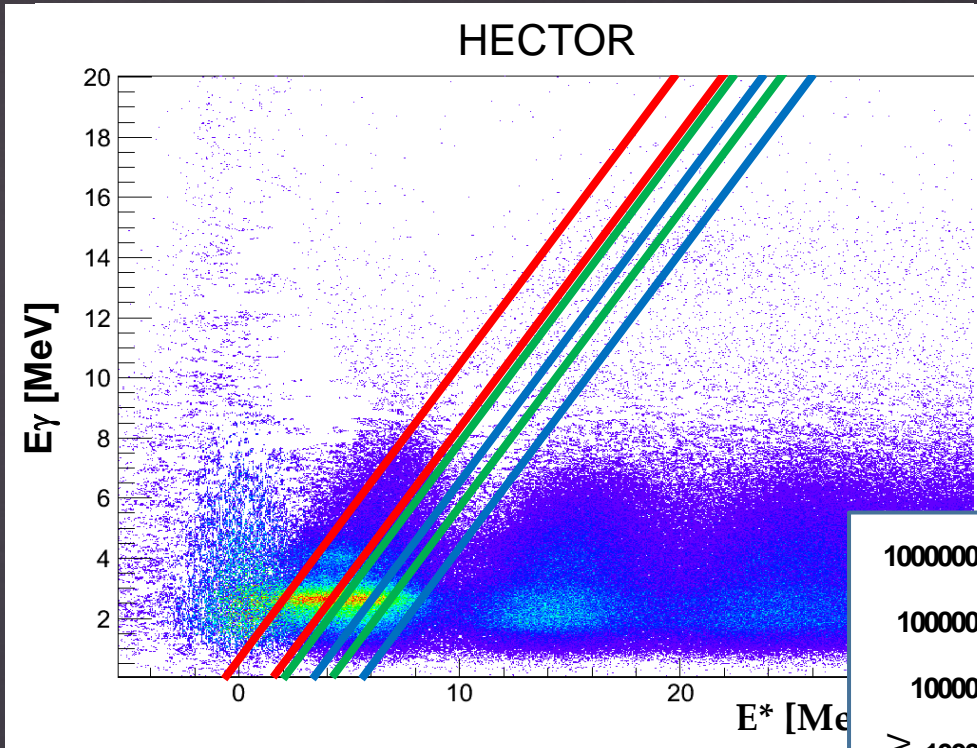


$$E^* = E \text{ wiązki} - E \text{ rozproszonego protonu}$$

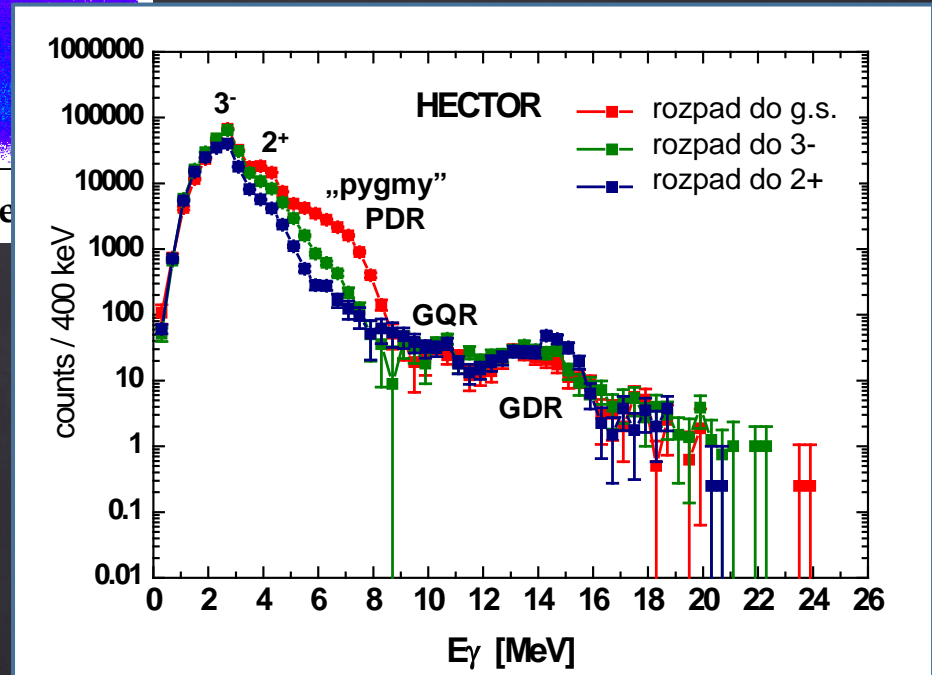
widma gamma odpowiadające różnym zakresom energii wzbudzenia



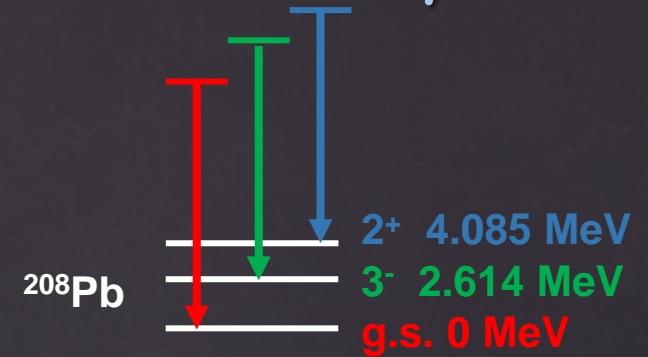
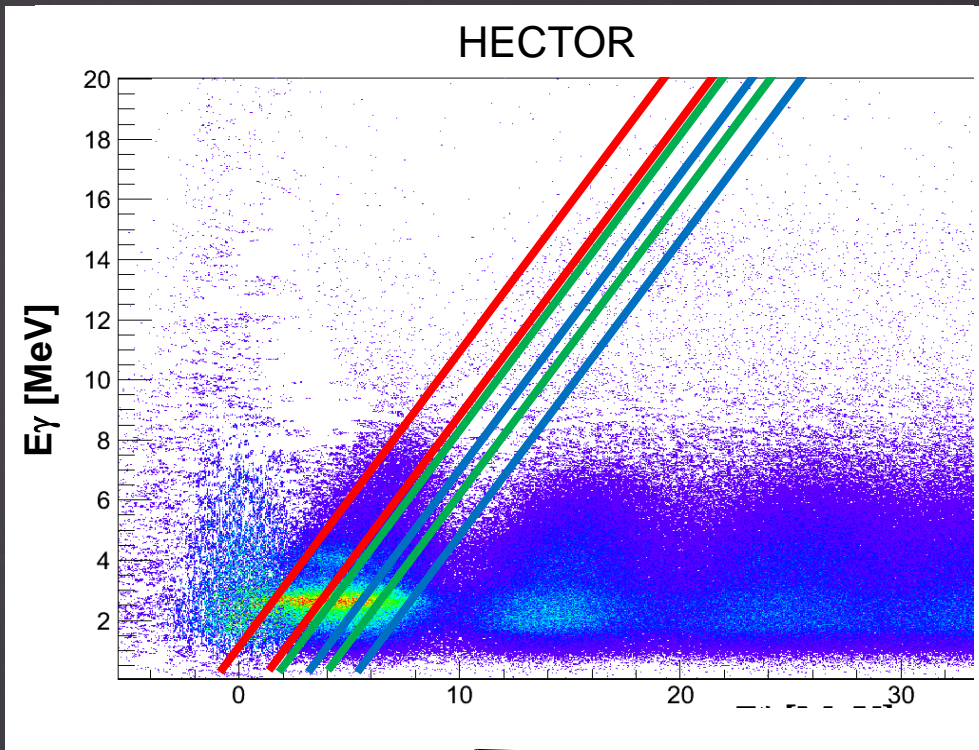
Wstępne rezultaty



obserwacja rozpadu gamma gigantycznych rezonansów (GDR, GQR) oraz stanów „pigmejskich”

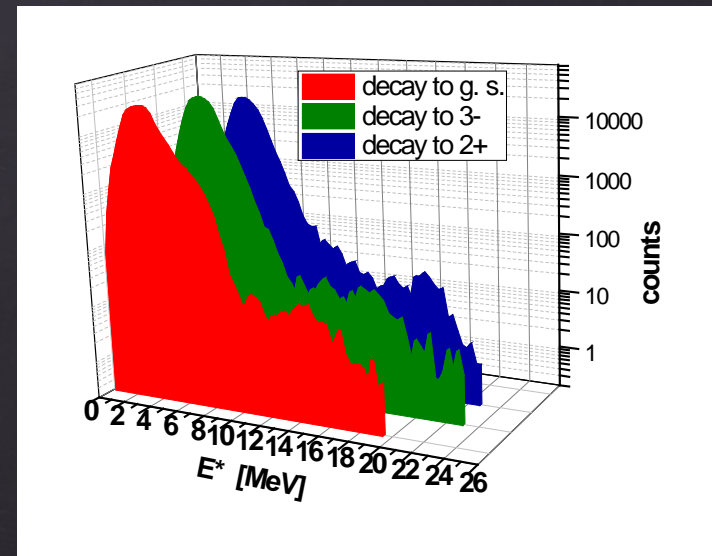
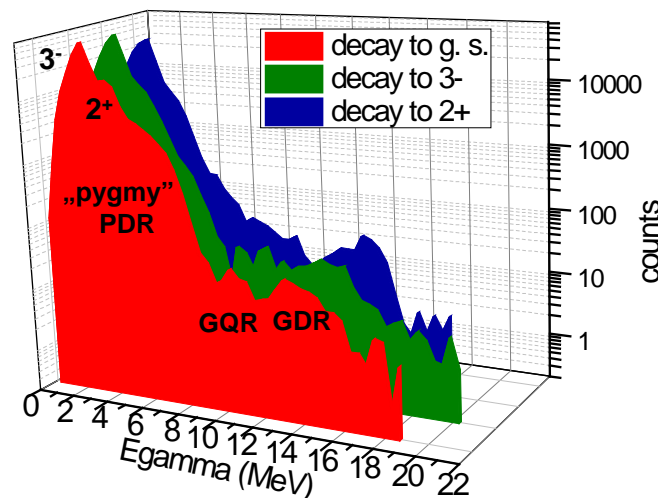


Rozpad gamma do różnych stanów końcowych



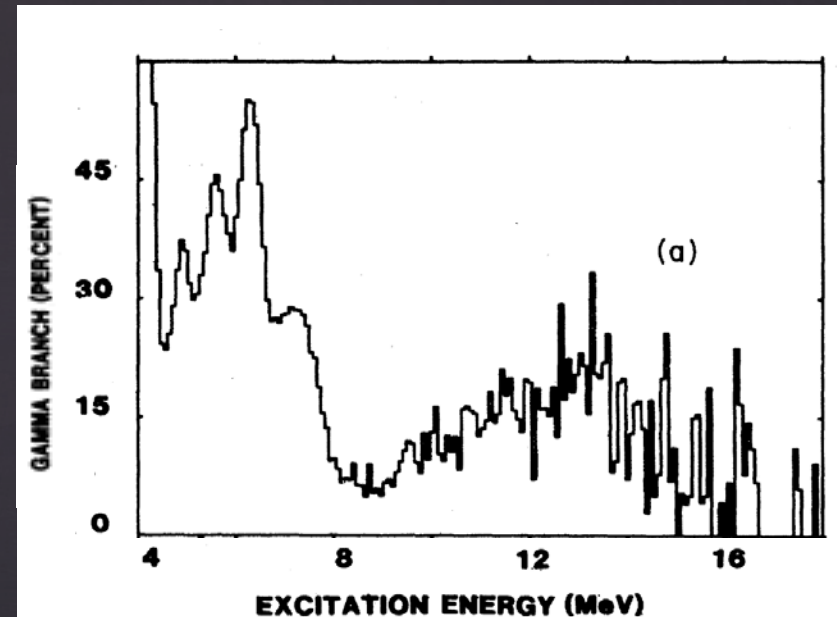
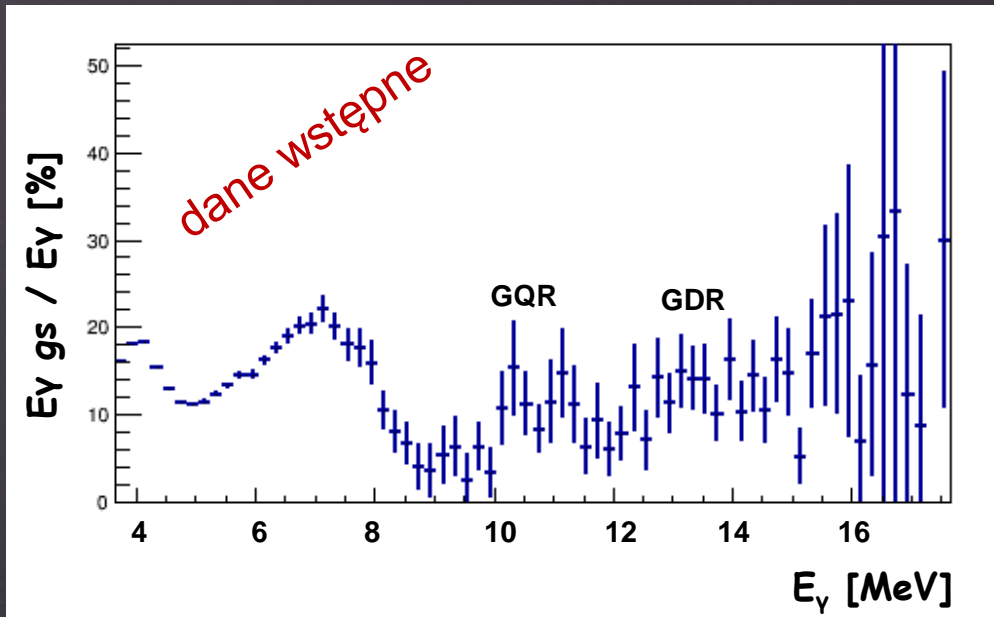
obserwacja rozpadu GDR do różnych stanów końcowych (g.s., 3-, 2+)

Potwierdzenie hipotezy D. Brinka?
„GDR can be built on any state”



Porównanie z wcześniejszym pomiarem

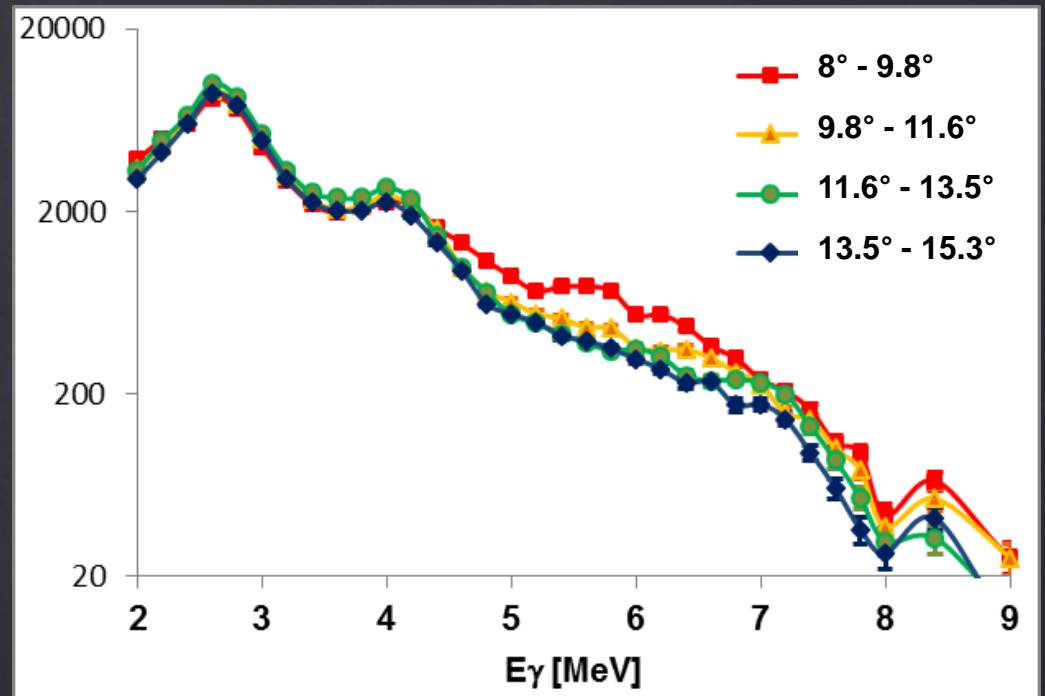
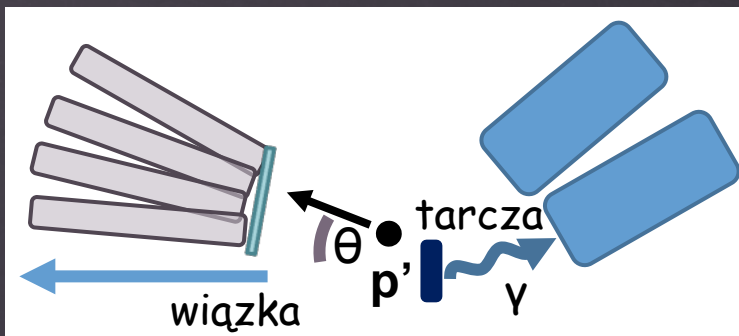
Względny udział rozpadu do stanu podstawowego



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

Widmo gamma z rozpadu do stanu podstawowego w funkcji kąta rozproszenia protonu

wzrost intensywności w obszarze stanów „pigmejskich”
dla mniejszych kątów rozproszenia protonów
- obserwacja zgodna z wynikami wcześniejszych pomiarów

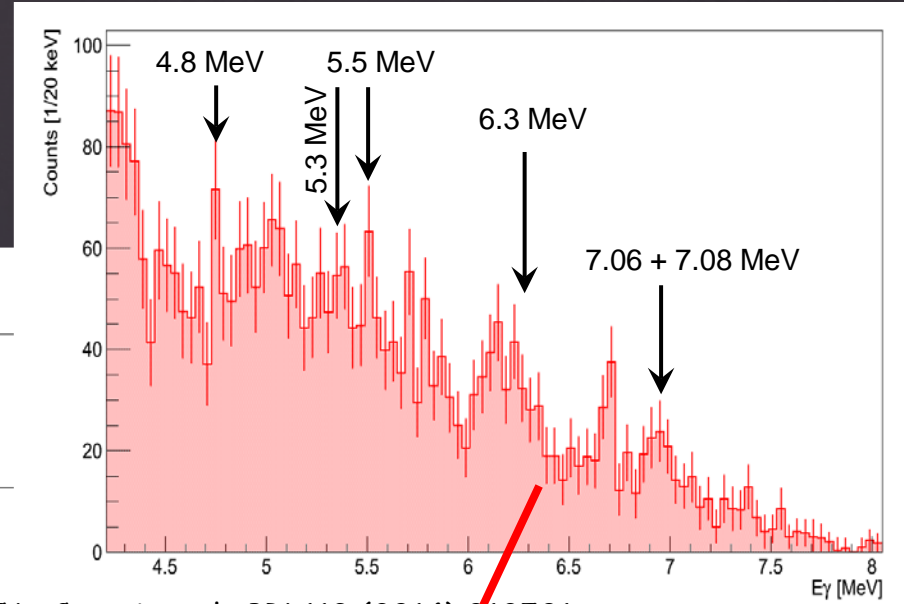
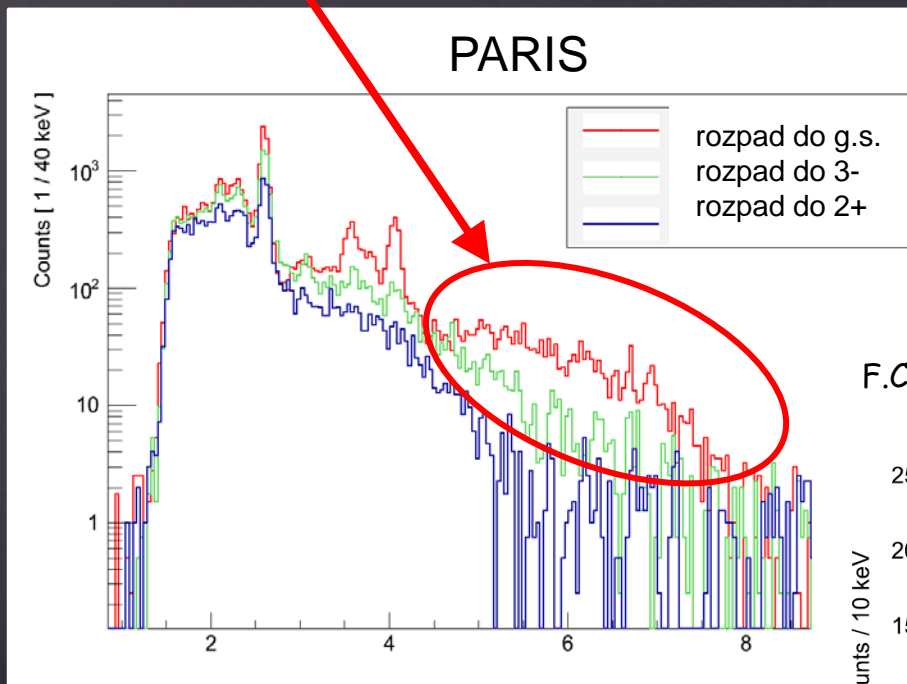


Pomiar za pomocą detektorów PARIS

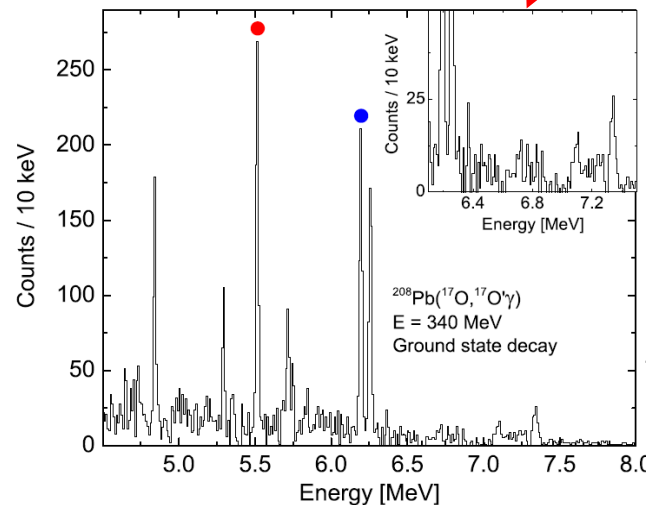


lepsza energetyczna
zdolność rozdzielcza

przejścia dyskretne w obszarze stanów
„pigmejskich”



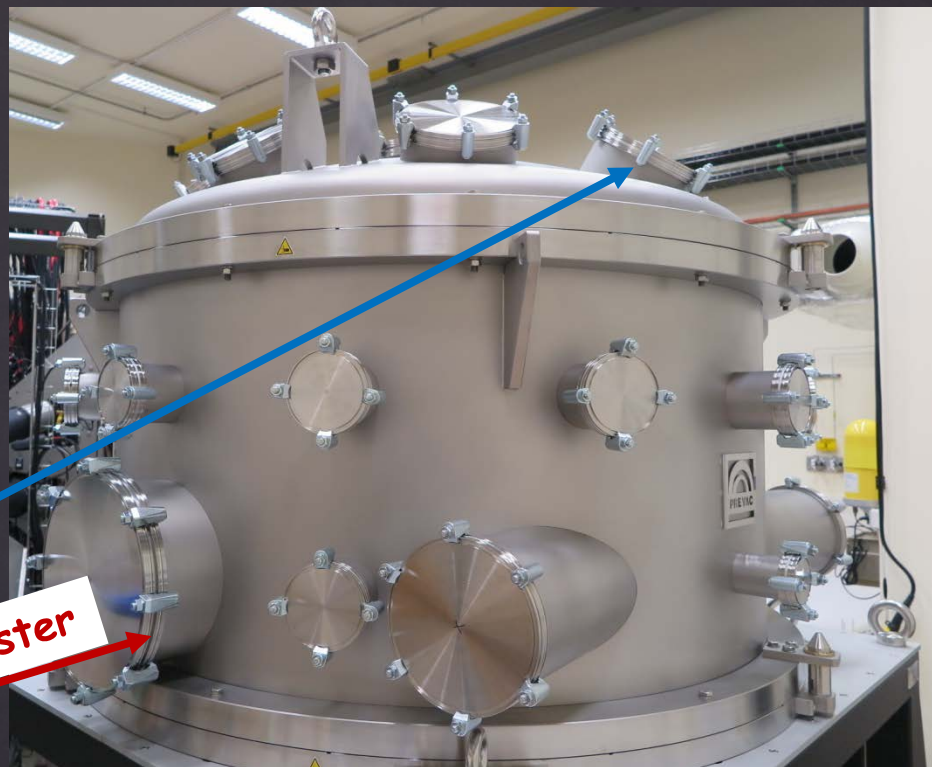
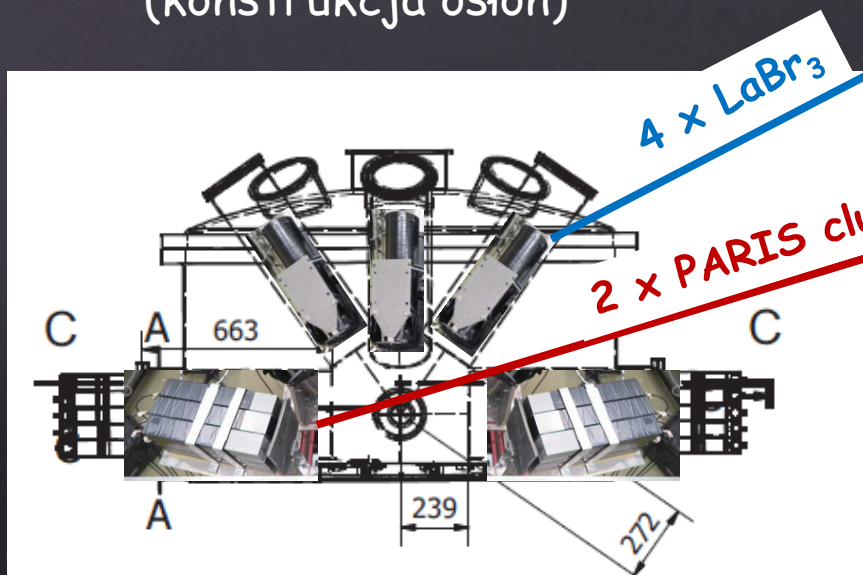
F.C.L. Crespi et al., PRL113 (2014) 012501



Plany

- ^{208}Pb (p,p' γ) @ ~150 MeV
(większy przekrój czynny na wzbudzenie GQR)
- ^{90}Zr (p,p' γ)

- ✓ pomiar protonów:
KRATTA w próżni
- ✓ Pomiar kwantów gamma:
4 LaBr₃ oraz
2 klastry układu PARIS
na zewnątrz
(konstrukcja osłon)



Podsumowanie

- ❑ W IFJ PAN w Krakowie rozpoczęto badania kolektywnych wzbudzeń jąder atomowych z wykorzystaniem wiązki protonów w Centrum Cyklotronowym Bronowice.
- ❑ Podczas pomiaru, w celu wzbudzenia jąder tarczy, zastosowano reakcję nieelastycznego rozpraszania protonów a promieniowanie gamma emitowane podczas rozpadu stanów wzbudzonych mierzono w koincydencji z rozproszonymi protonami.
- ❑ W zmierzonym widmie promieniowania gamma zaobserwowano struktury odpowiadające rozpadowi IVGDR, ISGQR oraz stanów z obszaru PDR. Podkreślić należy obserwację rozpadu gamma GQR.
- ❑ Dane są w trakcie analizy, która wymaga także przeprowadzenia porównania z modelami teoretycznymi.

Współpraca:

B. Wasilewska, A. Maj, M. Ziębliński, M. Ciemąta, J. Grębosz,
J. Łukasik, P. Pawłowski, P. Lasko, P. Bednarczyk, B. Fornal, M. Krzysiek,
Ł. Iskra, B. Sowicki, A. Szperłak, K. Mazurek, W. Parol, I. Ciepał,
N. Cieplicka-Oryńczak, M. Jastrząb, K. Guguła - **IFJ PAN Kraków**

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

M. Matejska-Minda, P. Napiorkowski, M. Saxena - **SLCJ Warszawa**

M. Kicińska-Habior - **UW Warszawa**

A. Tamii, J. Isaak - **RCNP Osaka**

M. Harakeh - **KVI Groningen**

A. Krasznahorkay - **ATOMKI Debrecen**

M. Lewitowicz - **GANIL Caen**

V. Guadilla - **IFIC Valencia**

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

LiQuiang Qi - **IPN Orsay**

M. Stanoiu - **NIPNE Bucharest**