



Detektory promieniowania gamma na tokamaku JET

Projekt EUROfusion_NCBJ_JET4

Izabella Zychor



NARODOWE
CENTRUM
BADAŃ
JĄDROWYCH
ŚWIERK

ŚRODOWISKOWE SEMINARIUM PLAZMOWE, Warszawa, 15.10.2019

Projekt **EUROfusion_NCBJ_JET4**, realizowany od 2014 roku w Narodowym Centrum Badań Jądrowych, obejmuje przygotowanie, zainstalowanie oraz testowanie zmodernizowanych urządzeń do diagnostyki promieniowania gamma na tokamaku JET znajdującym się w Culham w Wielkiej Brytanii.



Kamera gamma wykorzystuje szybkie scyntylatory $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ oraz zaprojektowane i wykonane w NCBJ układy elektroniczne, przeznaczone do działania w warunkach naświetlania dużymi strumieniami promieniowania gamma.

Do spektrometru gamma przygotowany został detektor z szybkim scyntylatorem CeBr_3 i aktywnym dzielnikiem napięcia.

Nowe układy detekcji zapewnią rejestrację strumieni promieniowania gamma o natężeniu co najmniej 0.5 miliona zliczeń na sekundę w czasie planowanej na rok 2020 kampanii deuter-tryt na tokamaku JET.

Oba zmodernizowane układy do diagnostyki promieniowania gamma zostały już wykonane i dostarczone do laboratorium JET.

Przedstawione zostaną wyniki testów i pomiarów przeprowadzonych zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i w czasie kampanii eksperymentalnych na tokamaku JET.

- GCU** modernizacja kamery gamma w tokamaku JET
- GSU** modernizacja spektrometru gamma w tokamaku JET
- LRM** budowa nowego układu do diagnostyki cząstek alfa – anulowane w 2016

1.01.2014 – 31.12.2017– 31.12.2018 – 31.12.2019 – 31.12.2020

Program EUROfusion_NCBJ_JET4

JET Enhancements JET4

This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium and has received funding from the Euratom research and training programme 2014-2018 and 2019-2020 under grant agreement No 633053. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.

This scientific work was partly supported by Polish Ministry of Science and Higher Education within the framework of the scientific financial resources in the years 2015-2020 allocated for the realization of the international co-financed project.

Udział polskich instytucji w programie JET4-EUROFusion 2014-2018

Izabella Zychor
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

DEMO - Demonstration Fusion Power Plant

- pierwszy reaktor termojądrowy produkujący energię elektryczną (2050)

ITER - *International Thermonuclear Experimental Reactor* - "**The Way**" po łacinie

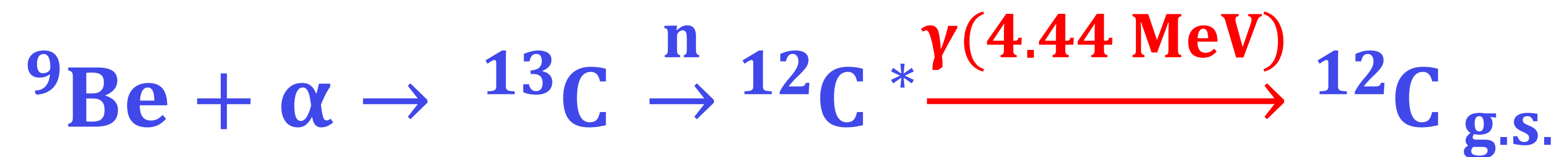
- 2025- DD, 2035 - DT
- prototypowy reaktor - istotnym krokiem na drodze do DEMO

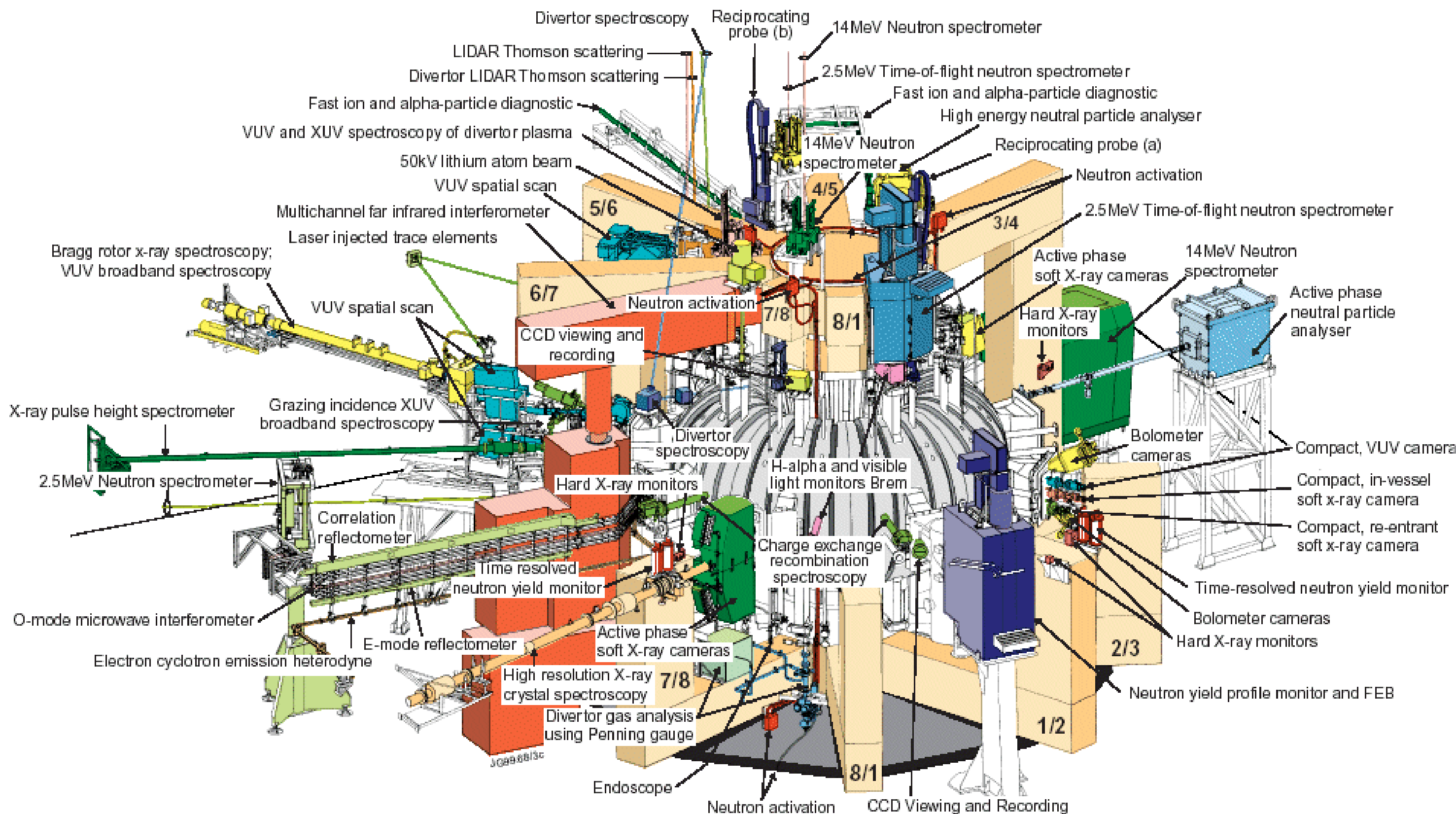
JET - Joint European Torus

- w dalszym ciągu najpotężniejszy działający tokamak
- możliwość sprawdzania rozwiązań dla ITERa
- w dalszym ciągu dobre miejsce do prowadzenia prac badawczych

JET → ITER → DEMO

$$\mathbf{D + T \rightarrow \alpha + n + 17.59\ MeV}$$





- około 100 różnych diagnostyk dostępnych na tokamaku JET - 60 w czasie eksperymentu
- rozkłady przestrzenne z wysoką rozdzielczością
- pomiary w czasie rzeczywistym
- 1 dzień pomiarów – 20 eksperymentów – 1 TB danych – 8 GB w jednym strzale
- dane dostępne natychmiast i w przyszłości, na miejscu oraz w dowolnym instytucie

BADANIE UWIĘZIONYCH CZĄSTEK ALFA

poprzez rejestrację promieniowania gamma z reakcji jądrowych zachodzących w plazmie

- wysoka moc w plazmie w kampanii DT
- duża intensywność strumieni neutronów oraz promieniowania gamma
- ograniczona poprzez istniejące systemy przestrzeń wokół JETa
- modernizacja detektorów sprzed ponad 20 lat
- szybki detektor o dobrej zdolności rozdzielczej
 - krótki czas zaniku: 20 ns
 - zdolność rozdzielcza: 5% at 1.1 MeV
- **kamera gamma**: układ do detekcji neutronów oraz promieniowania gamma, obserwacja promieniowania z 10 horyzontalnych i 9 wertykalnych kierunków, określenie położenia źródła promieniowania, scyntylatory $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$
- **spektrometr gamma**: scyntylator $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ oraz CeBr_3 rejestrujący promieniowanie gamma

Dedykowane laboratorium w NCBJ dla badań fuzyjnych (i nie tylko)

Pracownia izotopowa klasy Z – źródło ^{137}Cs o aktywności 400 MBq



Scyntylatory

CsI:TI, NaI:TI, LaBr₃:Ce, CeBr₃, GAGG:Ce

*czas zaniku, wydajność, energetyczna zdolność rozdzielcza,
nieproporcjonalność*

FOTODETEKTORY

współpracujące ze scyntylatorami

- fotopowielacz „klasyczny” (photomultiplier PMT)
- dioda typu PIN
- fotopowielacz krzemowy (silicon photomultiplier SiPM, multi pixel photon counter MPPC)

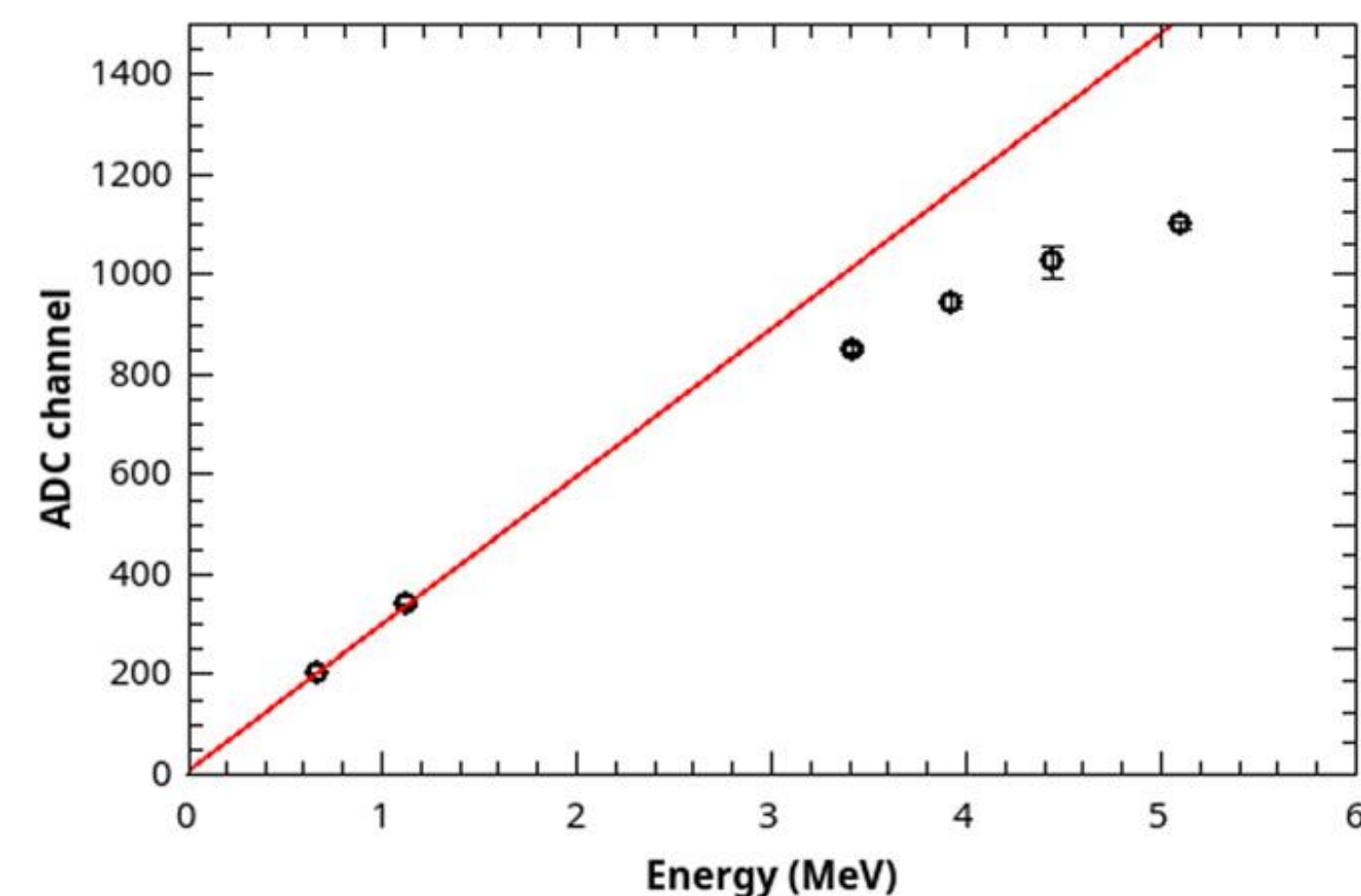
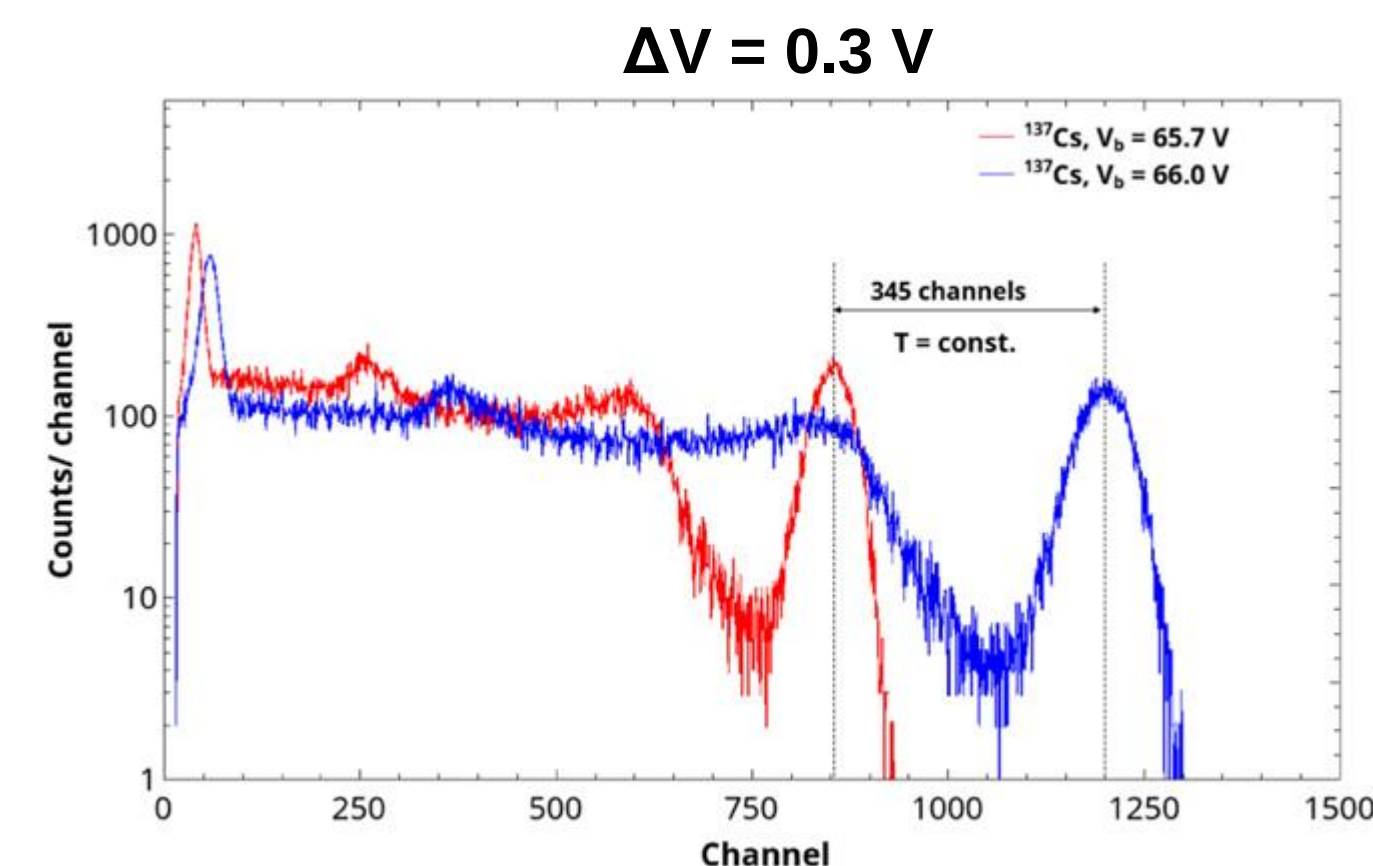
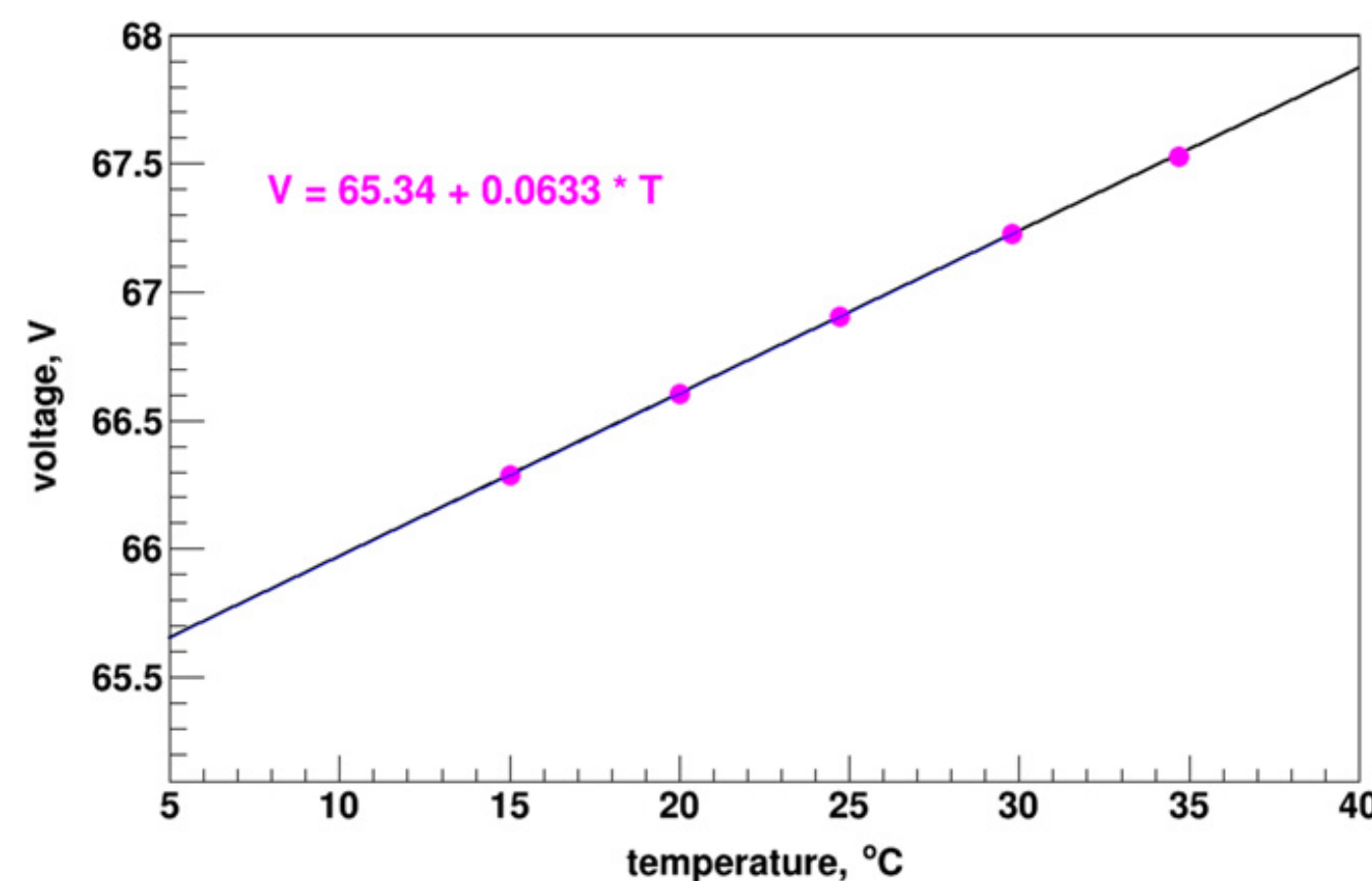
FOTOPOWIELACZE KRZEMOWE

ZALETY

- małe rozmiary
- wysokie wzmocnienie wewnętrzne
- brak czułości na pole magnetyczne
- praca przy niskich napięciach

WADY

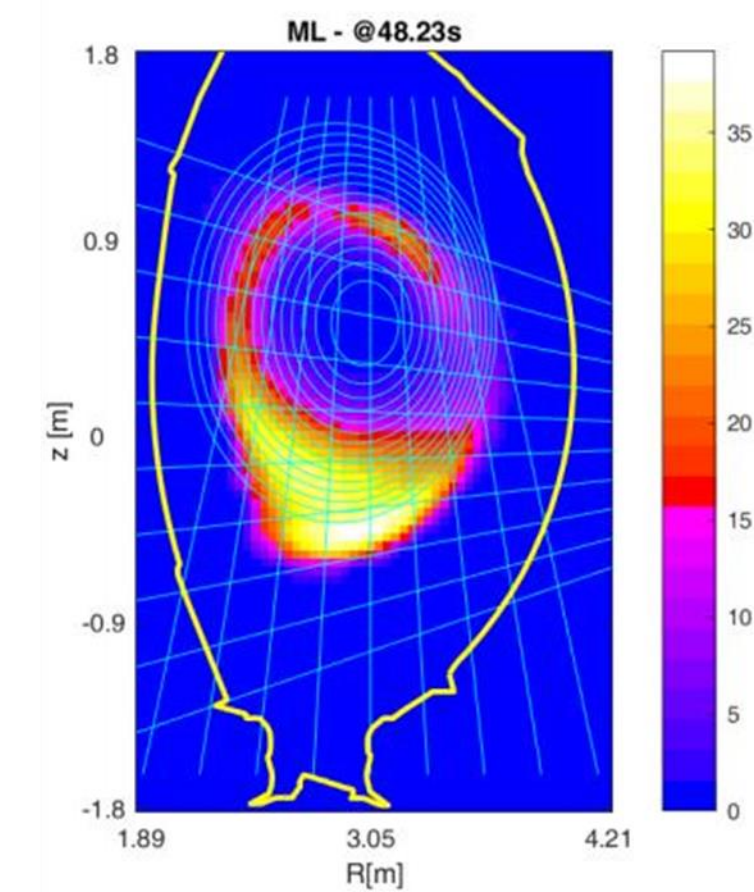
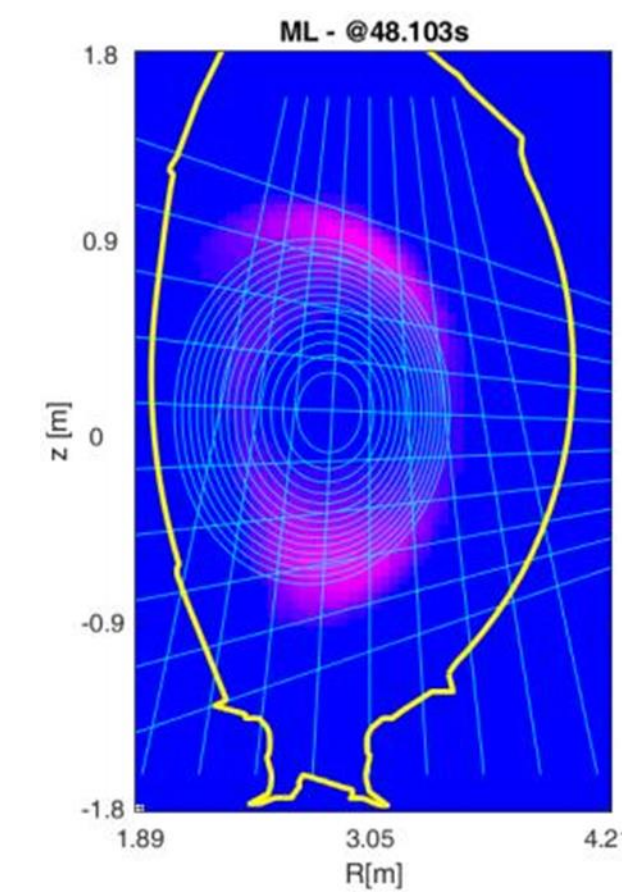
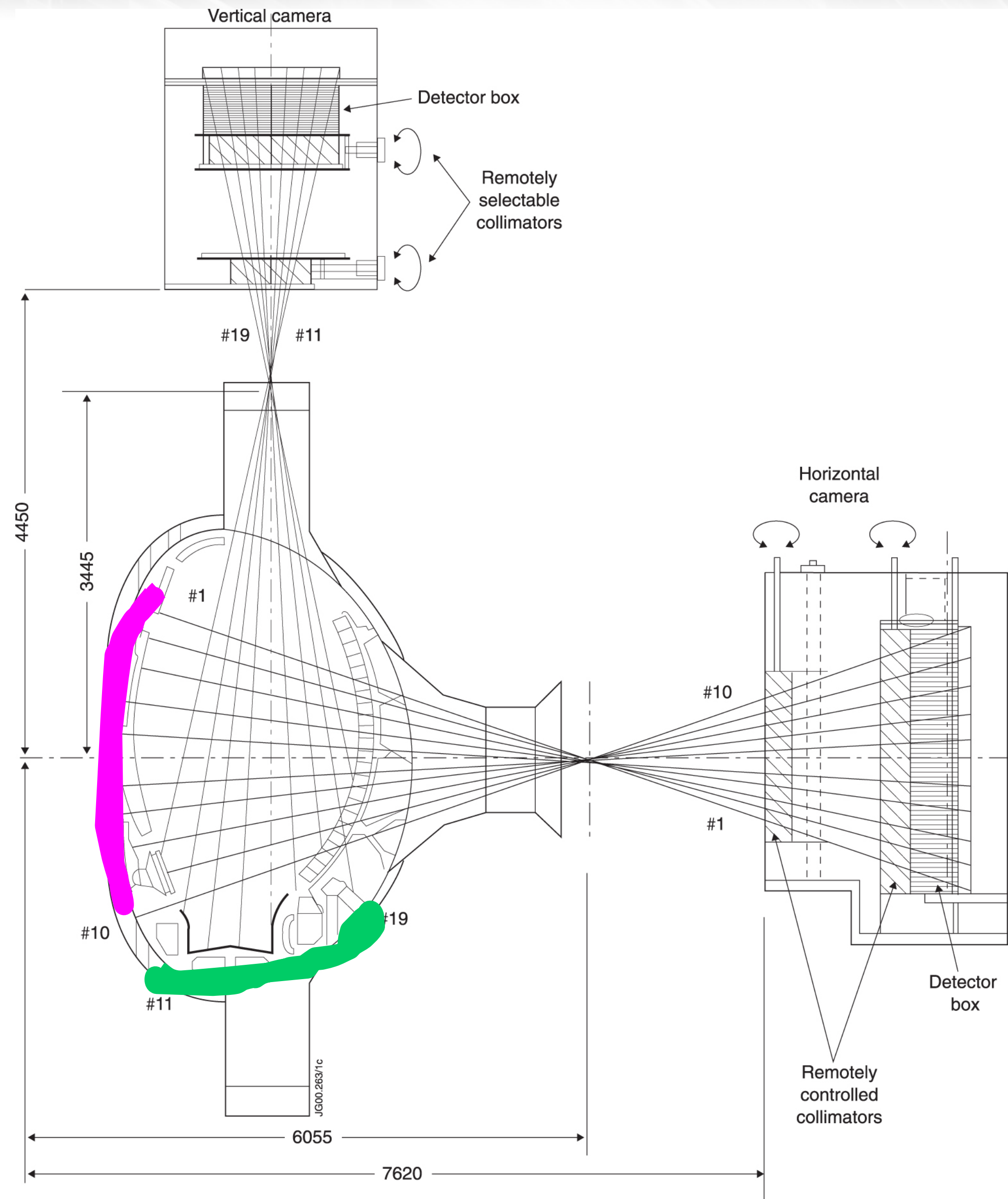
- (silna) zależność amplitudy sygnału od temperatury i napięcia pracy
- ograniczona liniowość w funkcji energii



KAMERA GAMMA

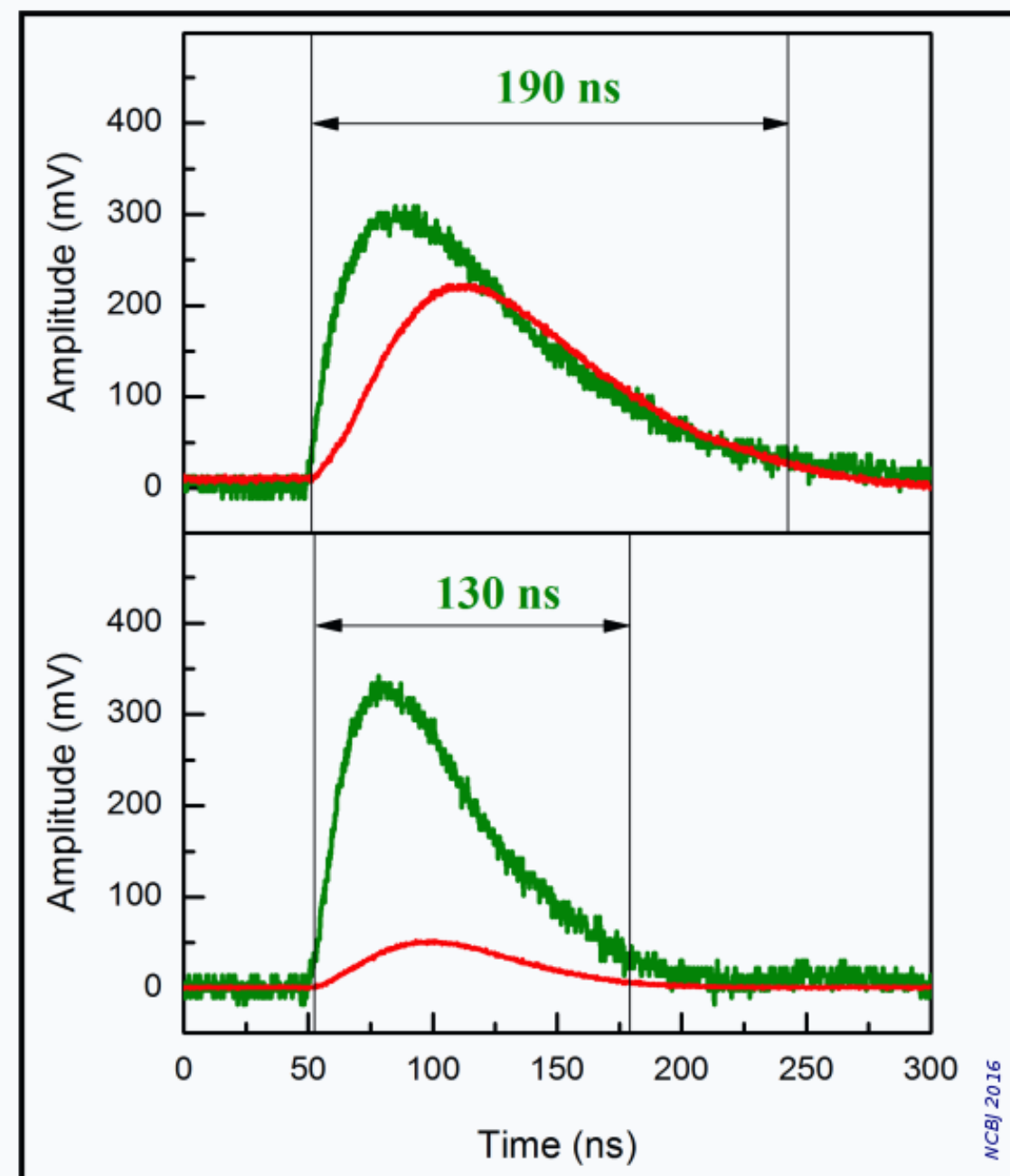
OBSERWACJA PROMIENIOWANIA GAMMA

- z 10 horyzontalnych i 9 wertykalnych kierunków
- energia promieniowania gamma: kilka do kilkunastu MeV
- przy dużych natężeniach promieniowania

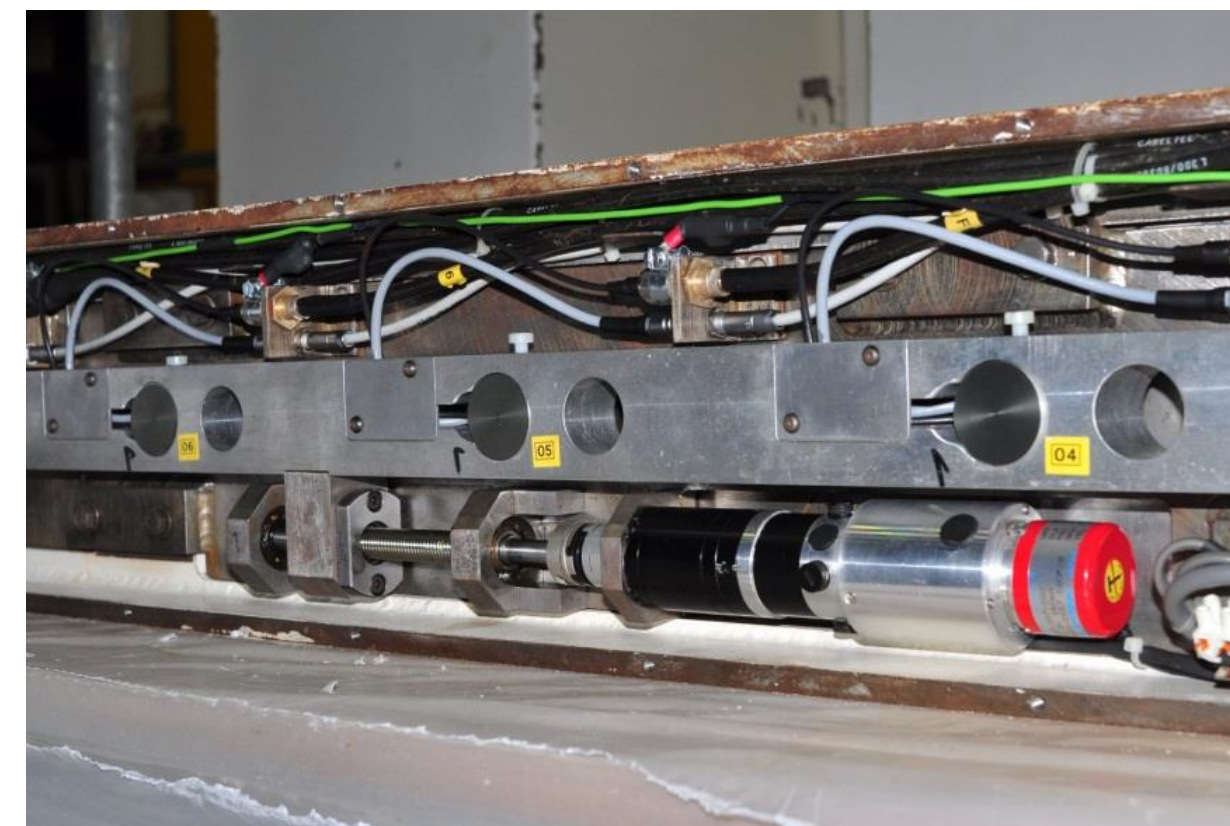
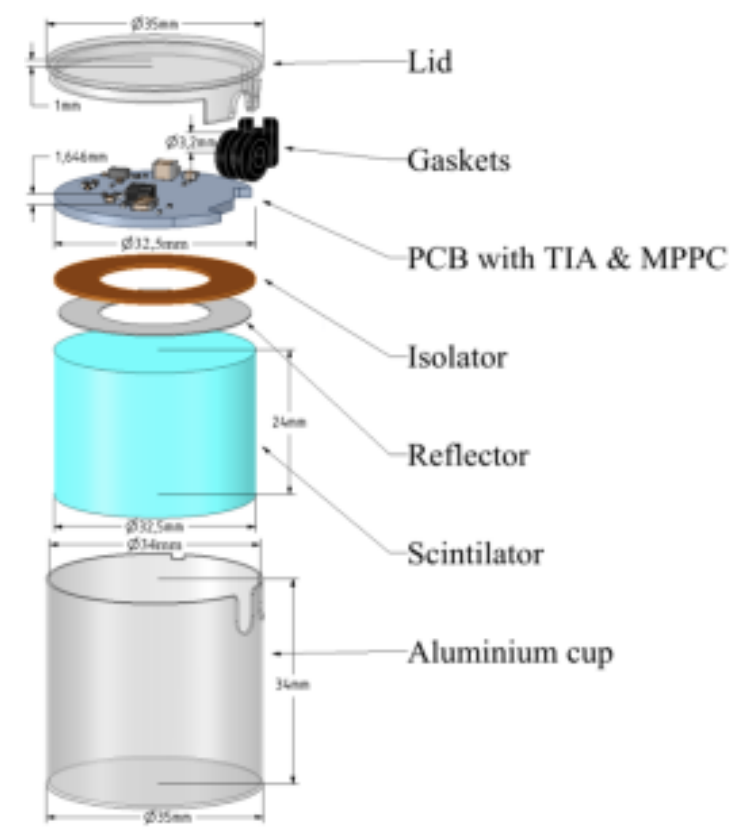


KAMERA GAMMA

UKŁADY SKRACAJĄCE SYGNAŁ w detektorach wykorzystujących MPPC



Porównanie amplitud sygnału zmierzonego w układzie **aktywnym (zielony)** oraz **pasywnym (czerwone)** dla dwóch długości sygnału: 190 ns (górny rysunek) oraz 130 ns (dolny rysunek)



KAMERA GAMMA

MTCD@NCBJ

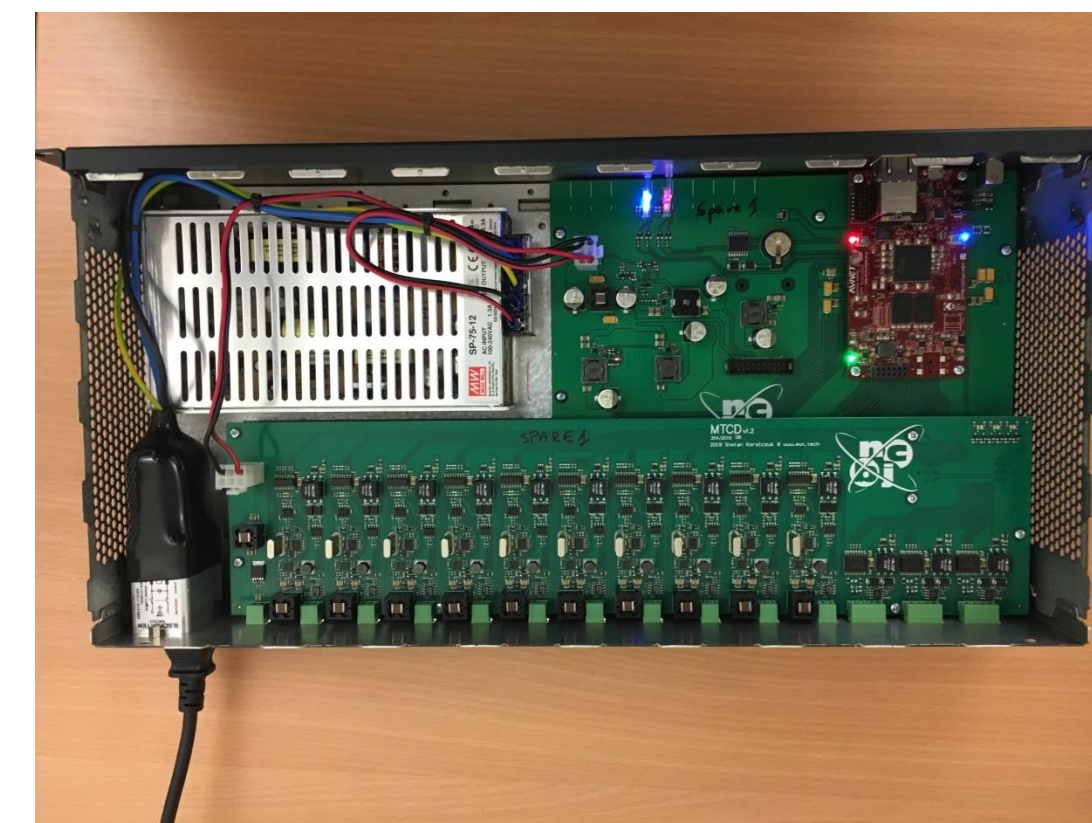
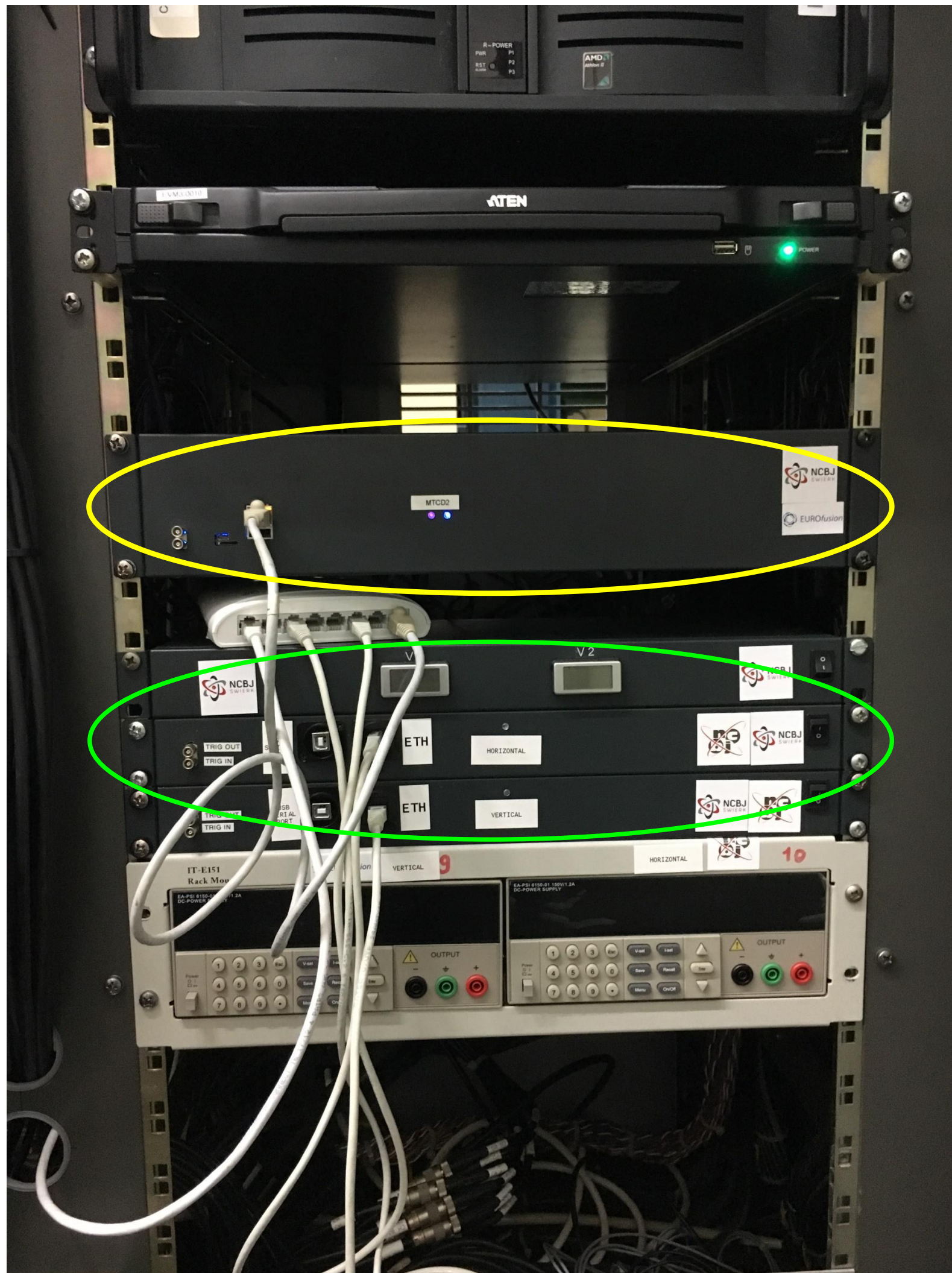
MPPC Temperature Compensation Device @NCBJ

Ze względu na silną zależność wzmocnienia od temperatury konieczne było przygotowanie układu elektronicznego, który pozwala na sterowanie napięciem zasilania detektora na podstawie odczytów temperatury.

W tym celu zaprojektowano, wykonano oraz przetestowano urządzenie MTCD@NCBJ.

Układ ten zapewnia pracę detektora przy tej samej wartości wzmocnienia niezależnie od temperatury otoczenia.

W 2019 roku została zainstalowana nowa prostsza wersja urządzenia, MTCD2@NCBJ.



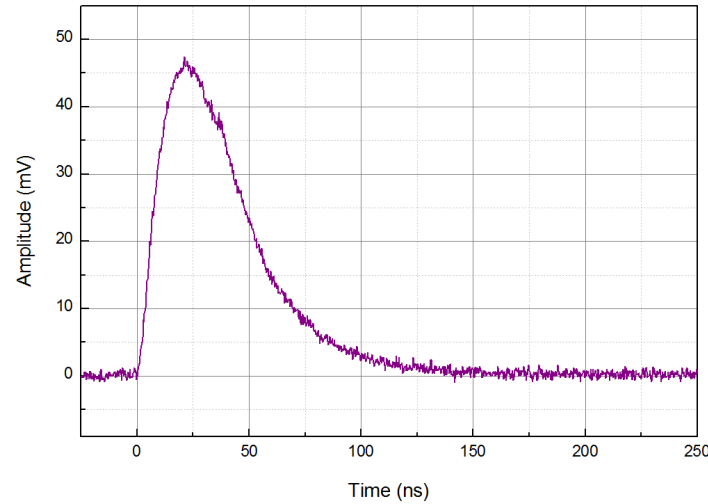
KAMERA GAMMA

Measurements at NCBJ 2017

Detector: #10
Scintillator: #11570
MPPC: #1163
Cables: #1163
Voltage: 54.7 V



Channel	Energy (keV)	FWHM/E (%) $\pm 0,07$	Peak Area $\pm 5\%$
245	184	--	21251
273	212	--	29365
810	662	5,57	158615
1388	1173	3,74	37903
1558	1333	3,59	39777
3487	3421	3,32	269523
3895	3932	2,64	85672
4267	4443	2,04	56049
4721	5106	1,89	9958
5057	5617	1,59	3487
5364	6128	1,26	1038

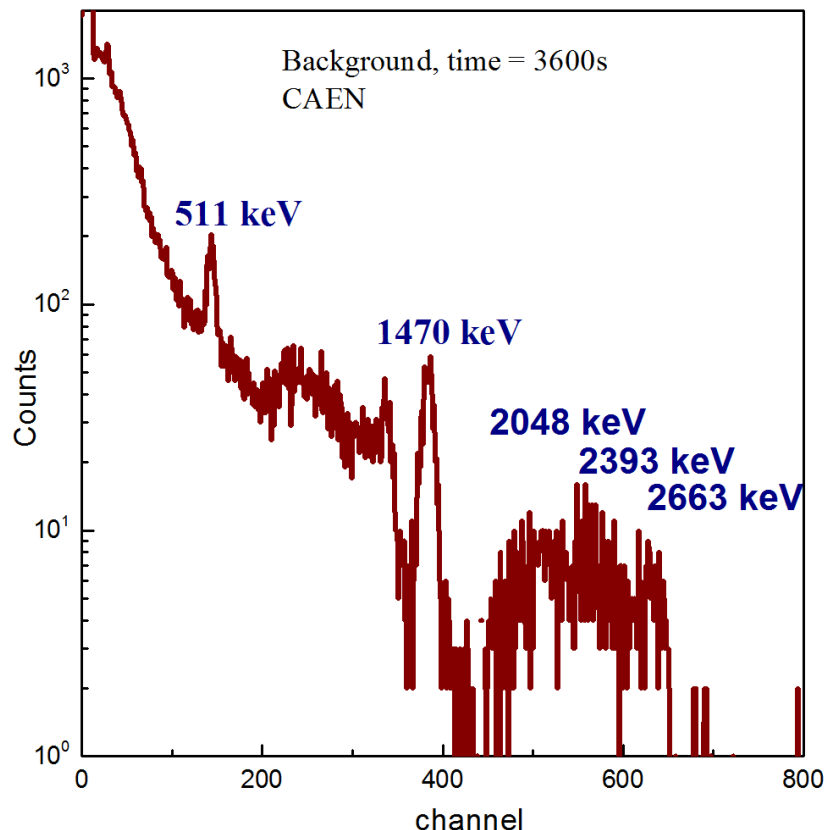
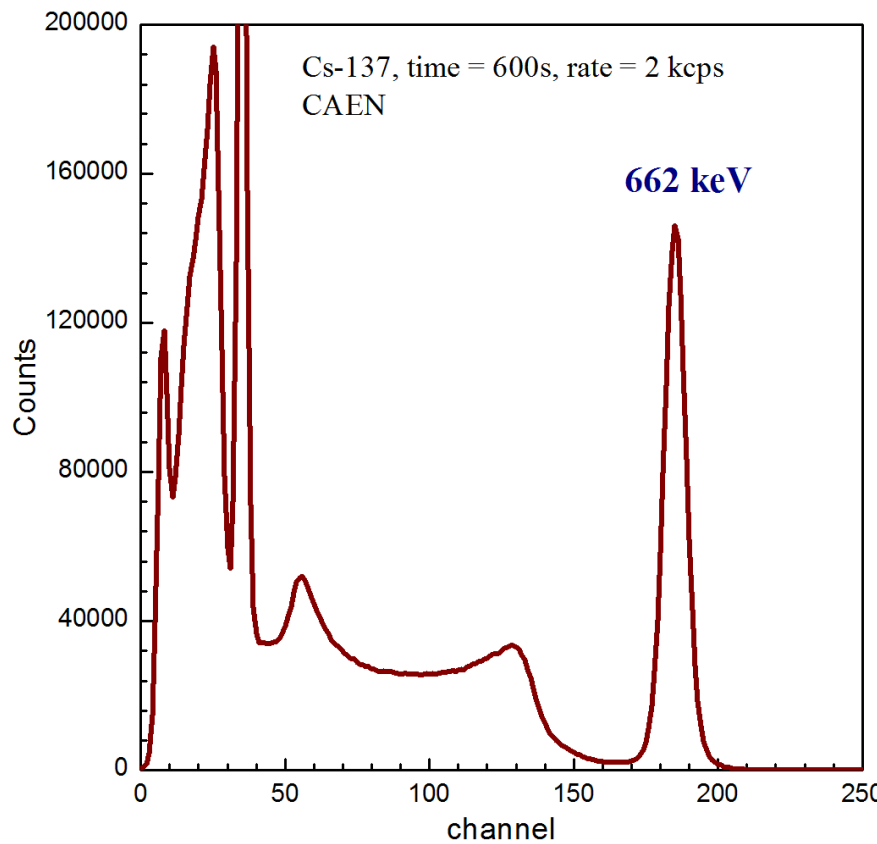
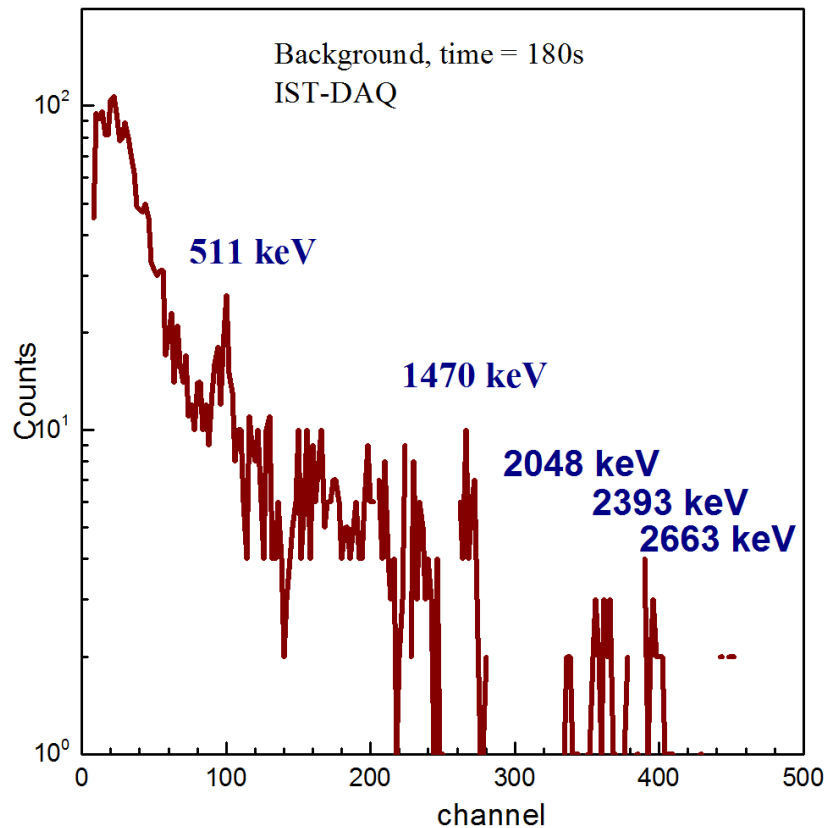
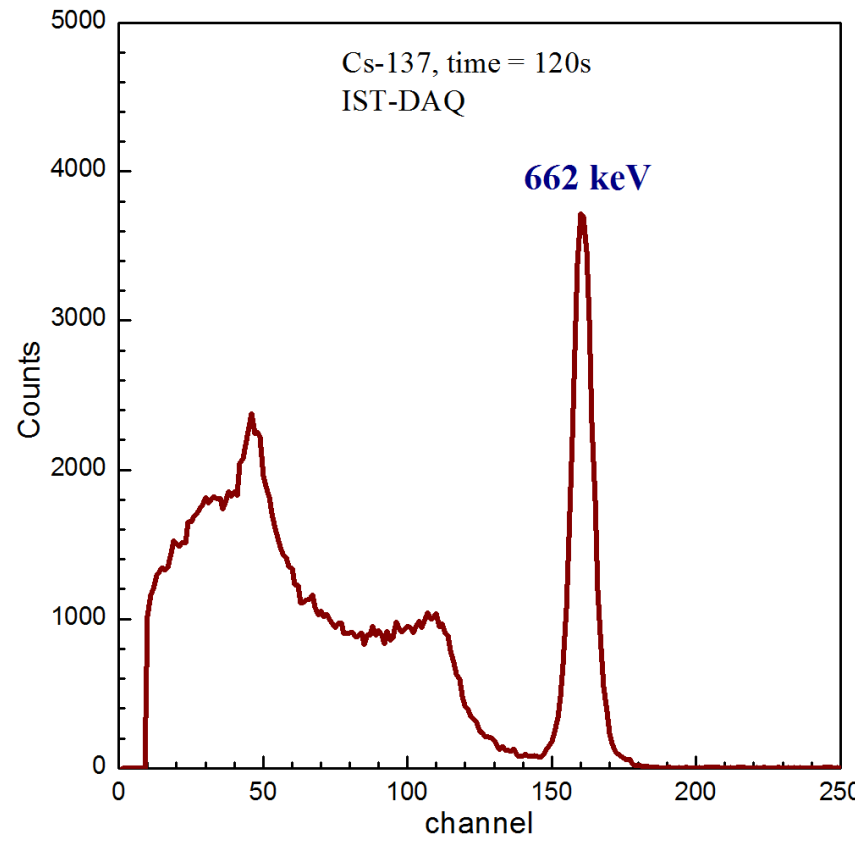
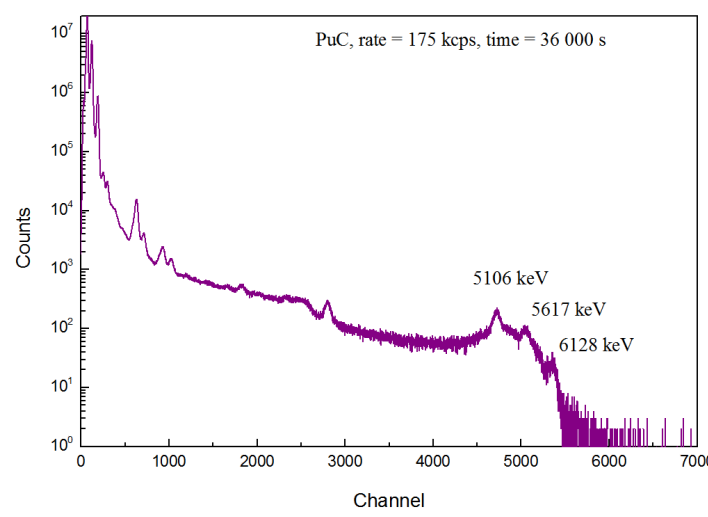
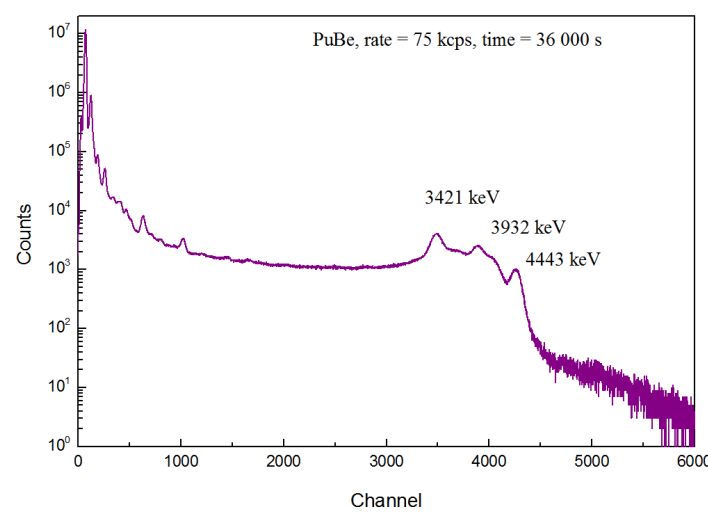
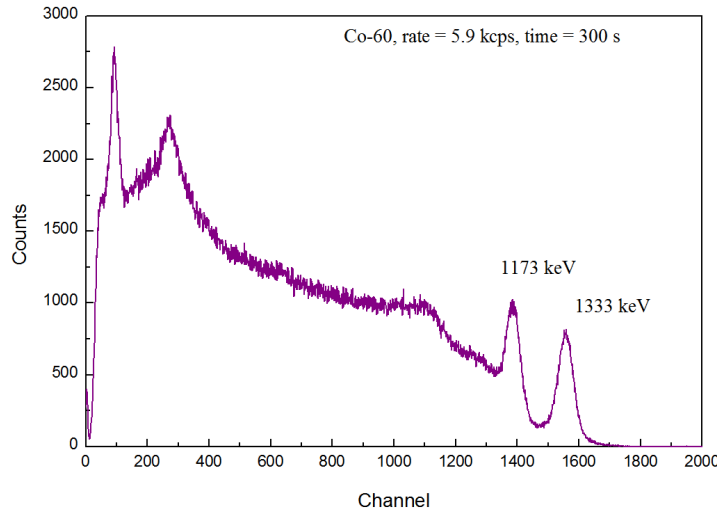
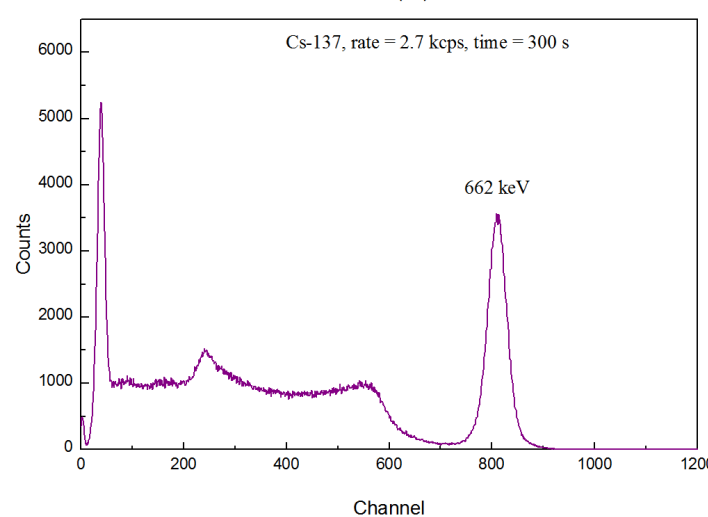
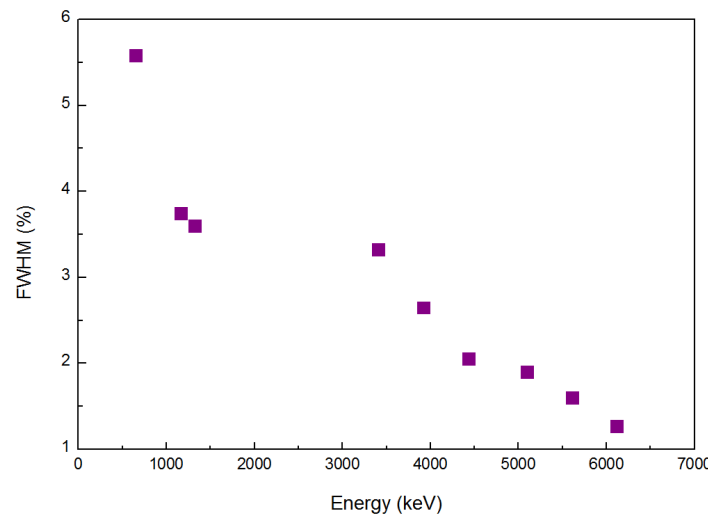
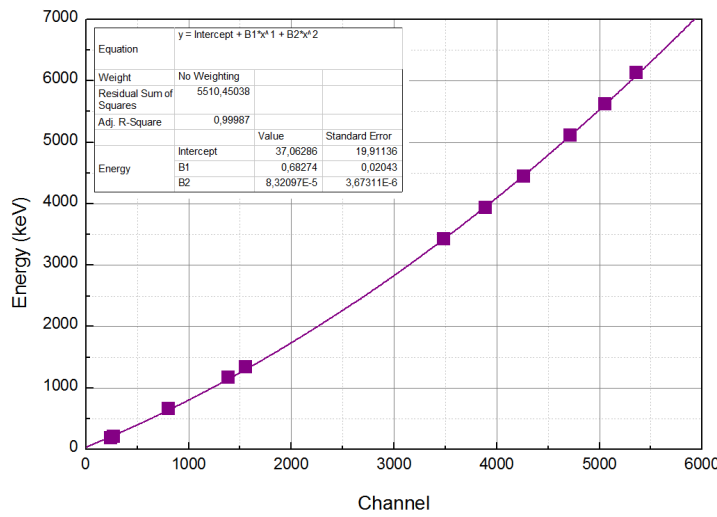
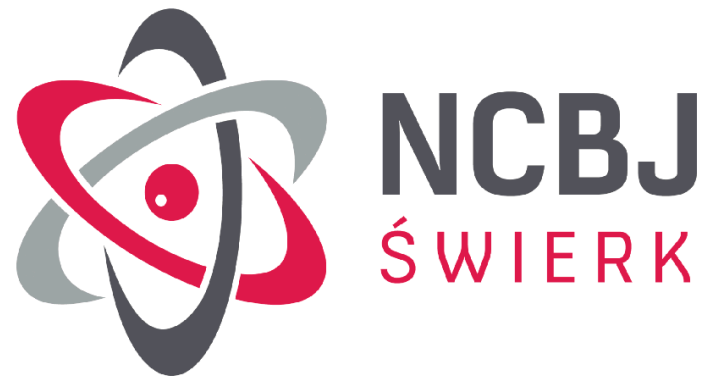


Measurements performed
at JET in a cubicle

Channel no. 10
Detector #10
V = 55,1

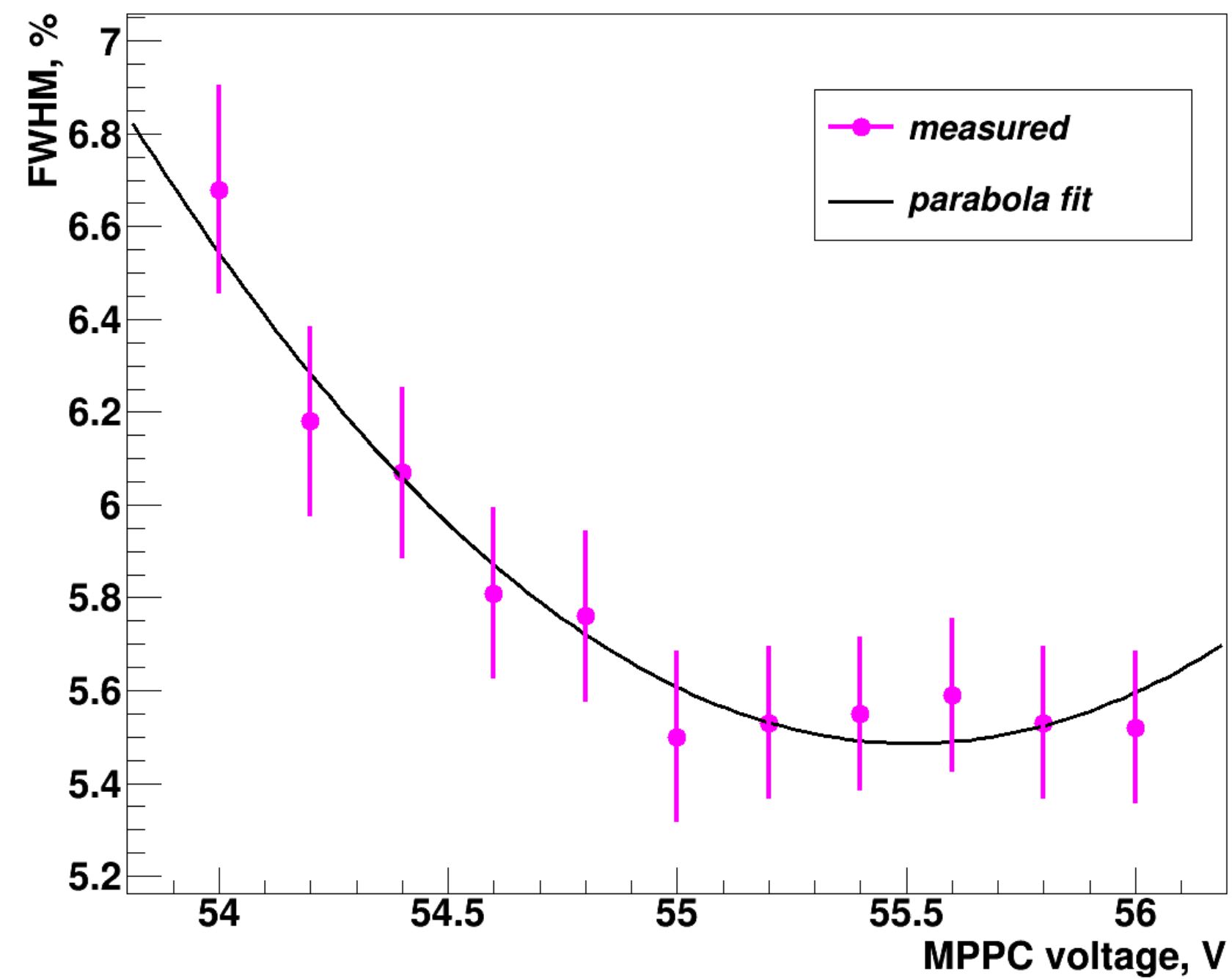
FWHM
(662 keV, IST-DAQ) = 5,4 %

FWHM
(662 keV, CAEN) = 4,9 %



KAMERA GAMMA

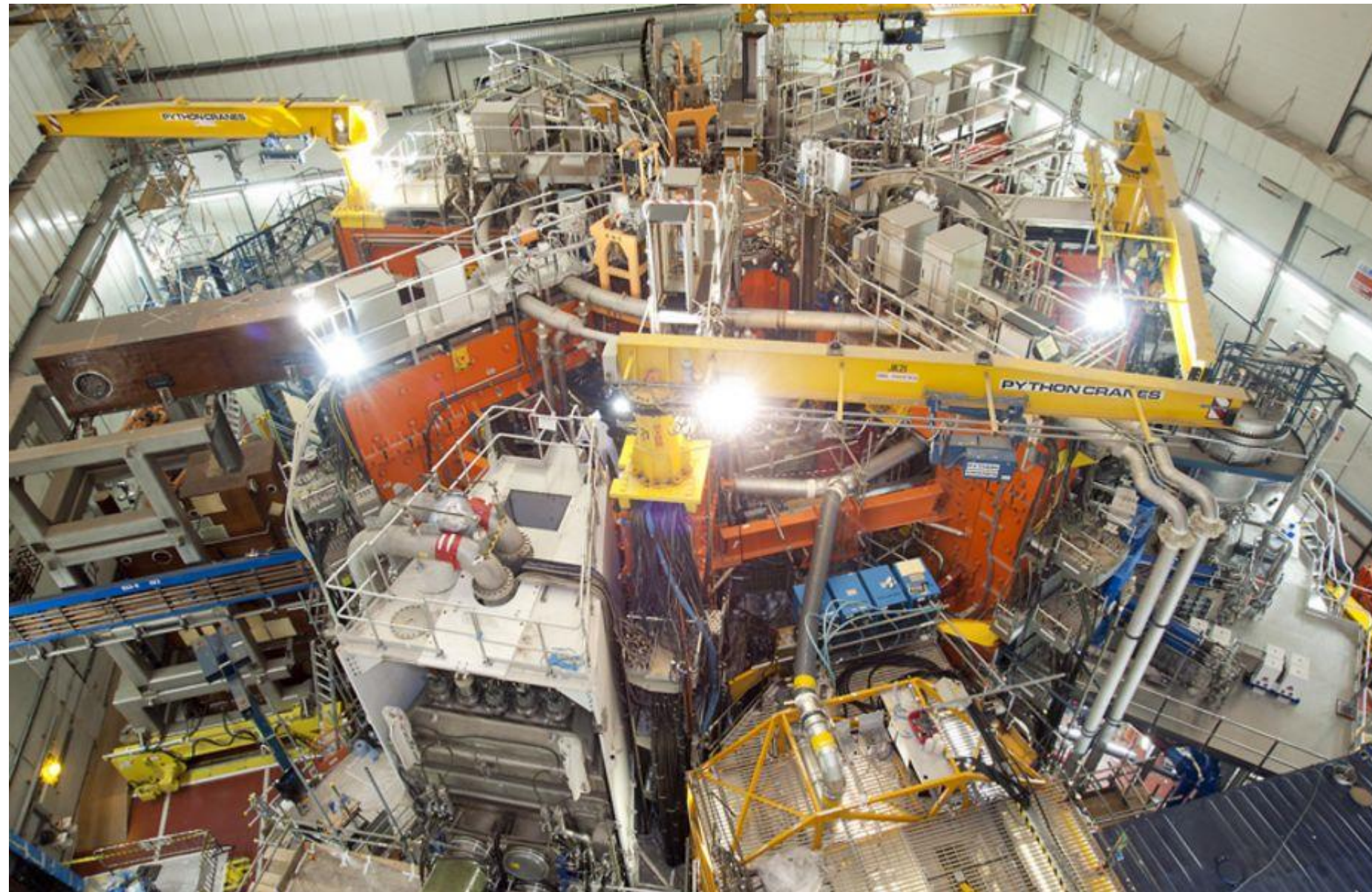
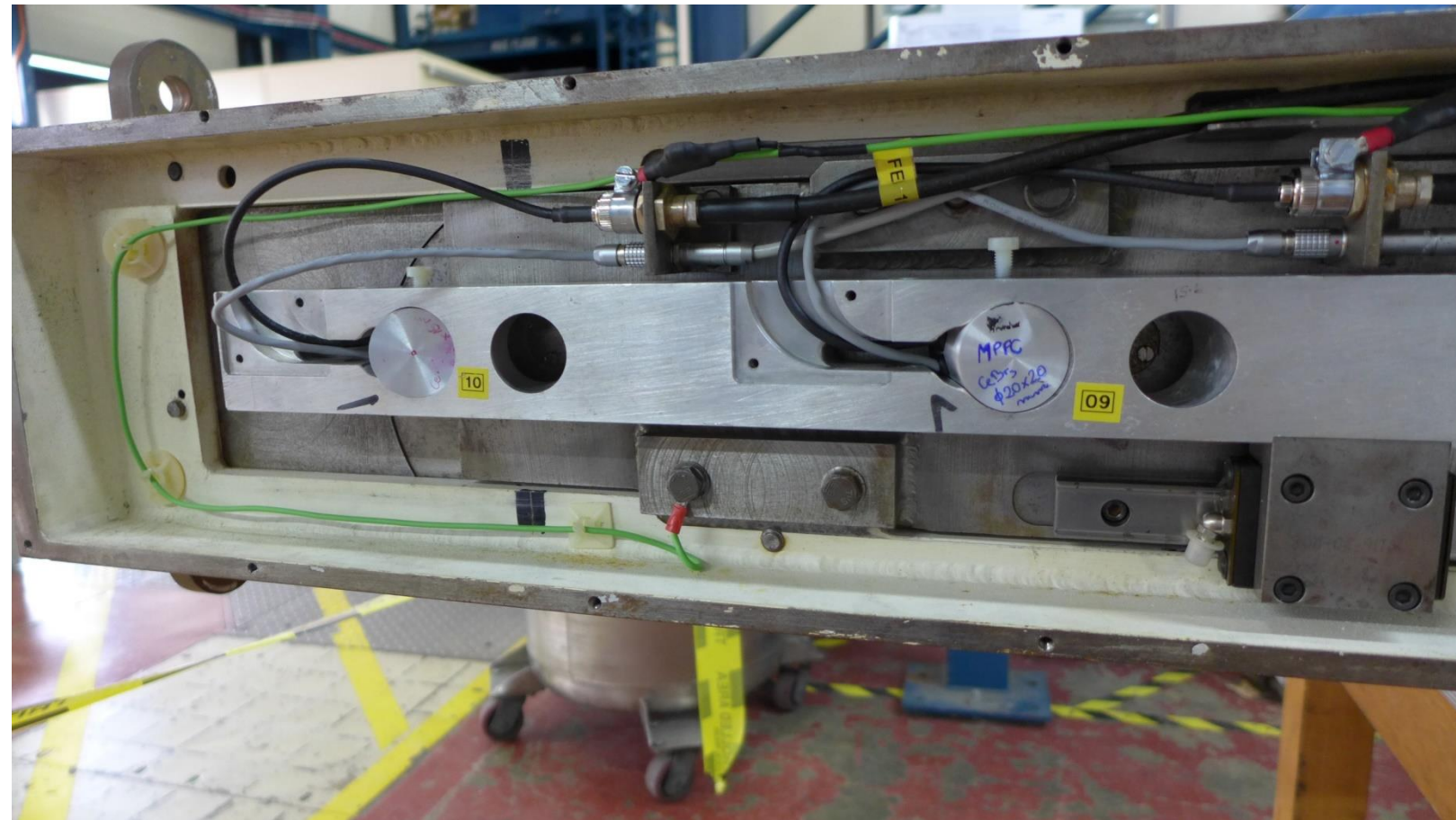
optymalne napięcia dla detektorów



Zależność energetycznej zdolności rozdzielczej (FWHM) od napięcia dla MPPC .
Linia gamma o energii 0.662 MeV obserwowana w ^{137}Cs .
Detektor #17: optymalne napięcie to 55.51 V.



Joint European Torus



Spektrometr gamma w tokamaku JET



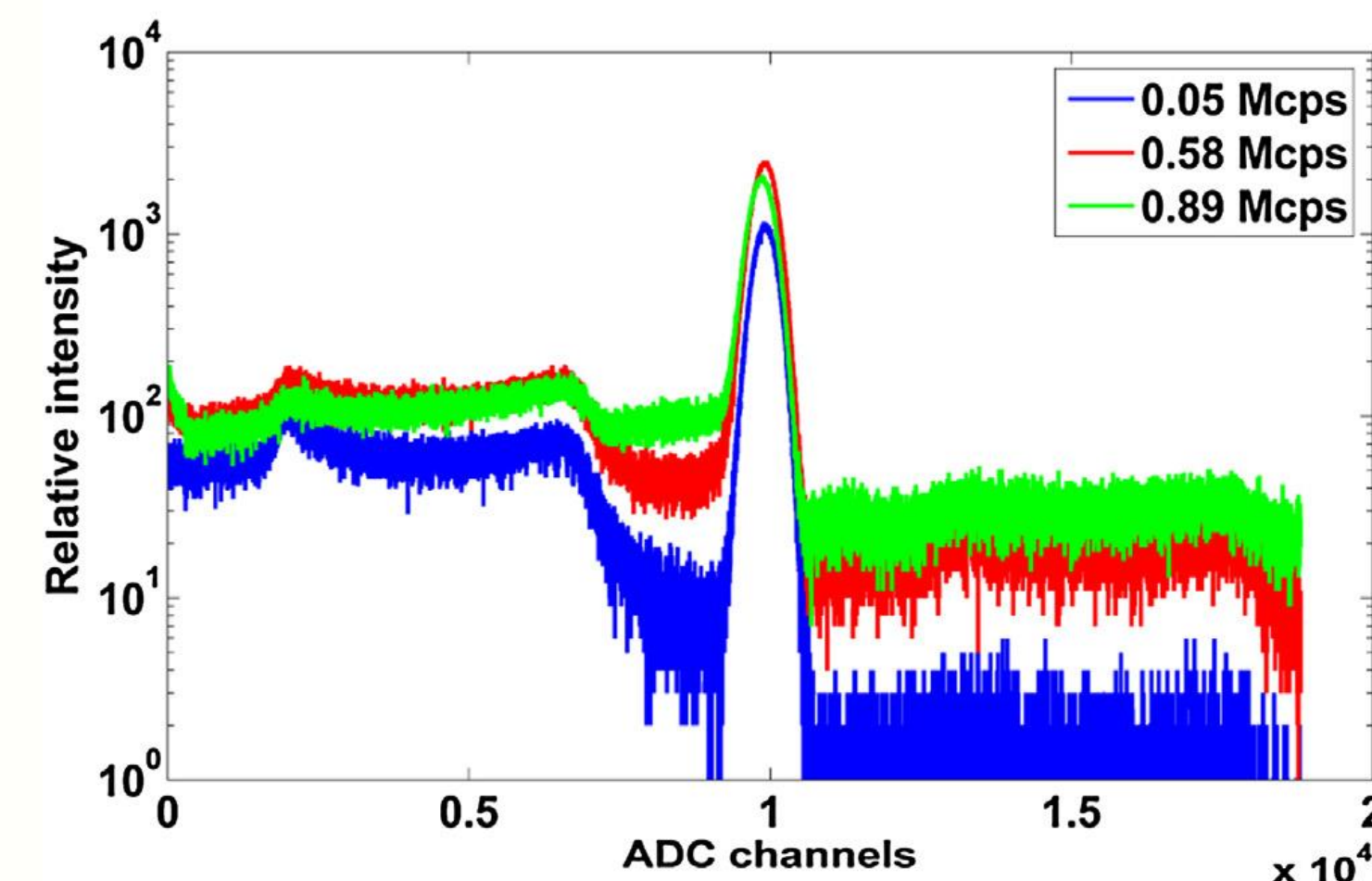
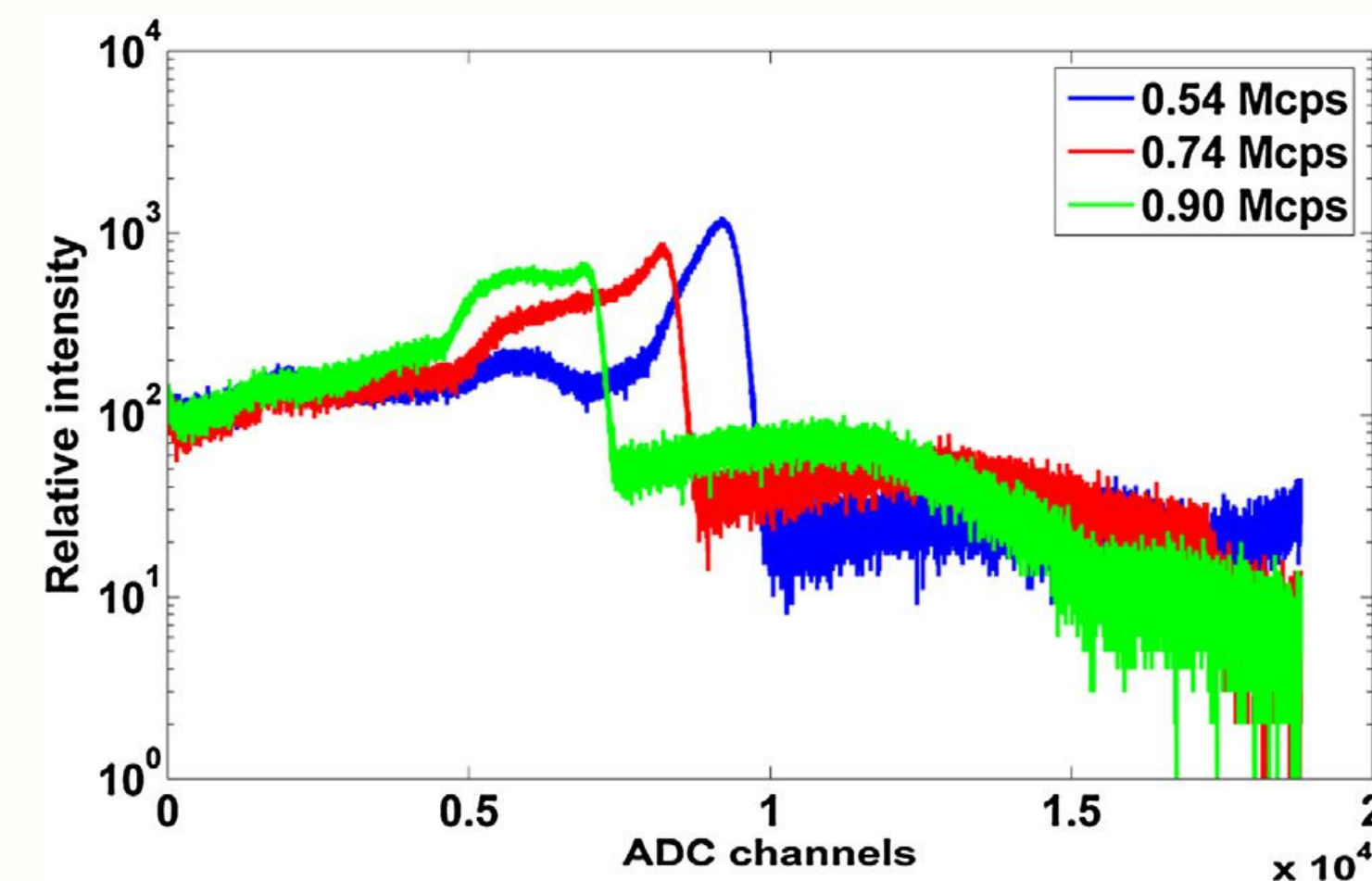
Elementy modułu DM2

scyntylnator 3"×3" CeBr₃ wraz z aktywnym dzielnikiem napięcia, zasilaczem oraz uchwytem

AKTYWNY DZIELNIK NAPIĘCIA AVD@NCBJ dla fotopowielacza do pomiarów ze źródłami o wysokich natężeniach

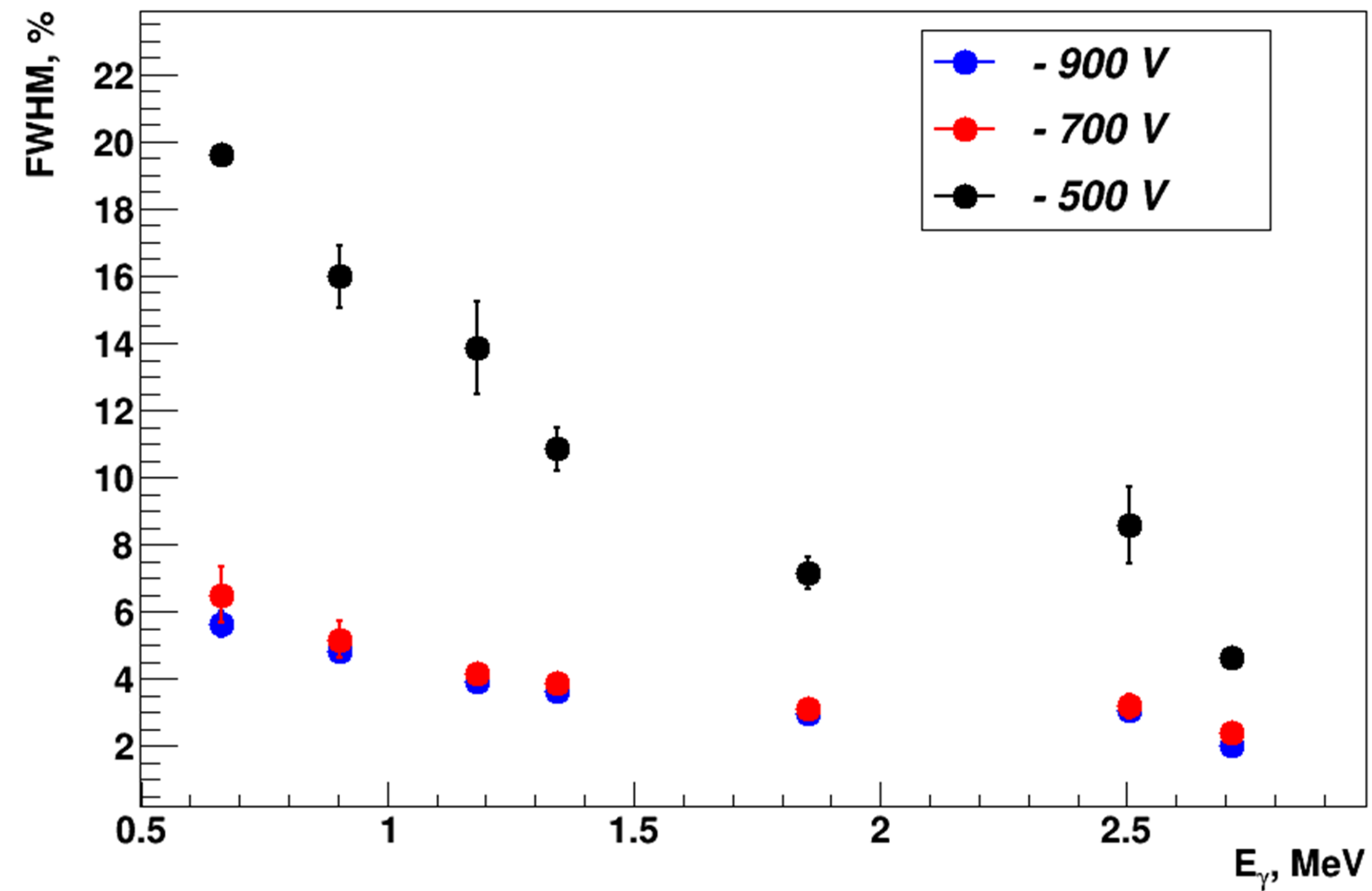
standardowy dzielnik napięcia firmy Scionix

AVD@NCBJ

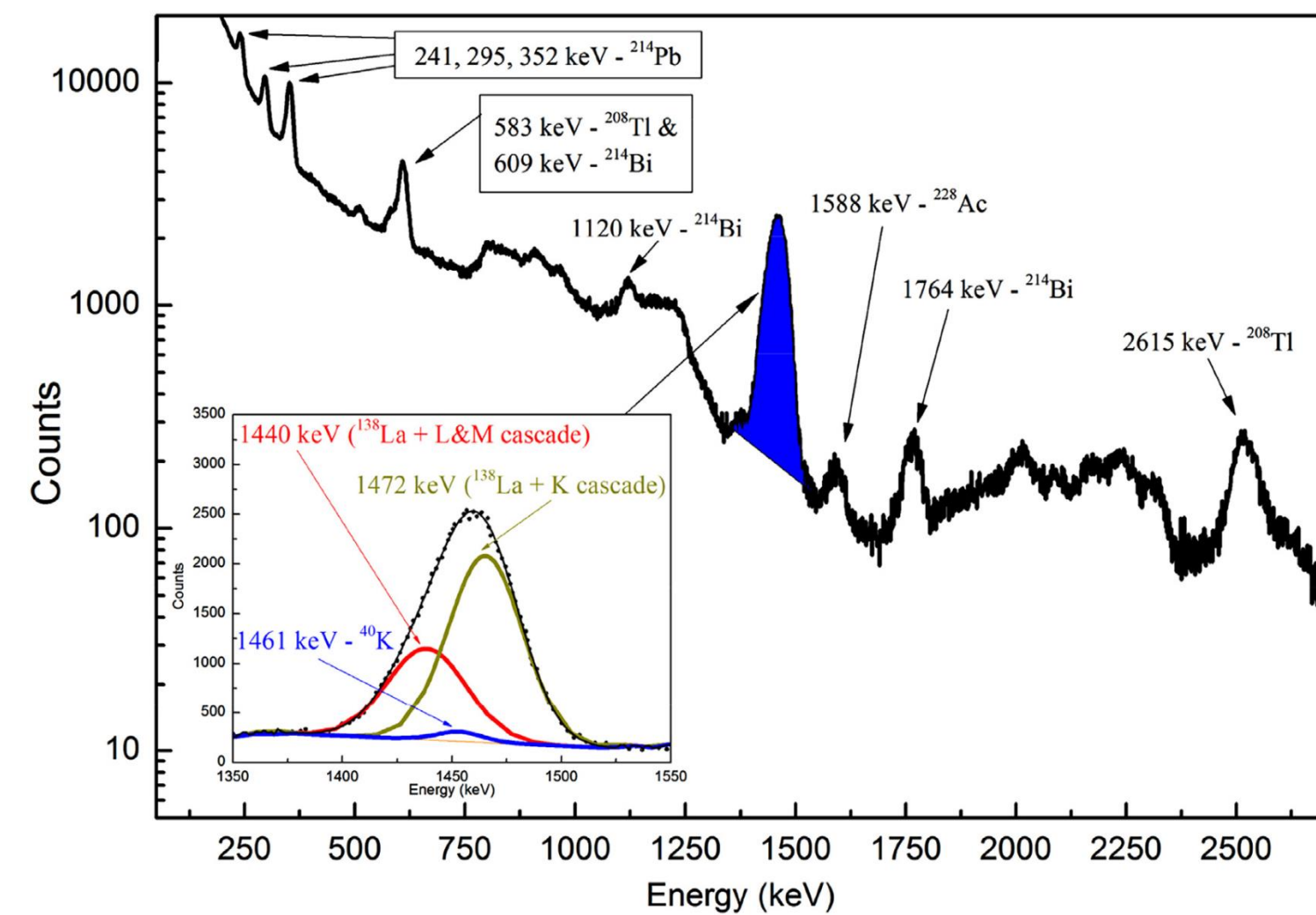


Spektrometr gamma w tokamaku JET

3"×3" CeBr₃

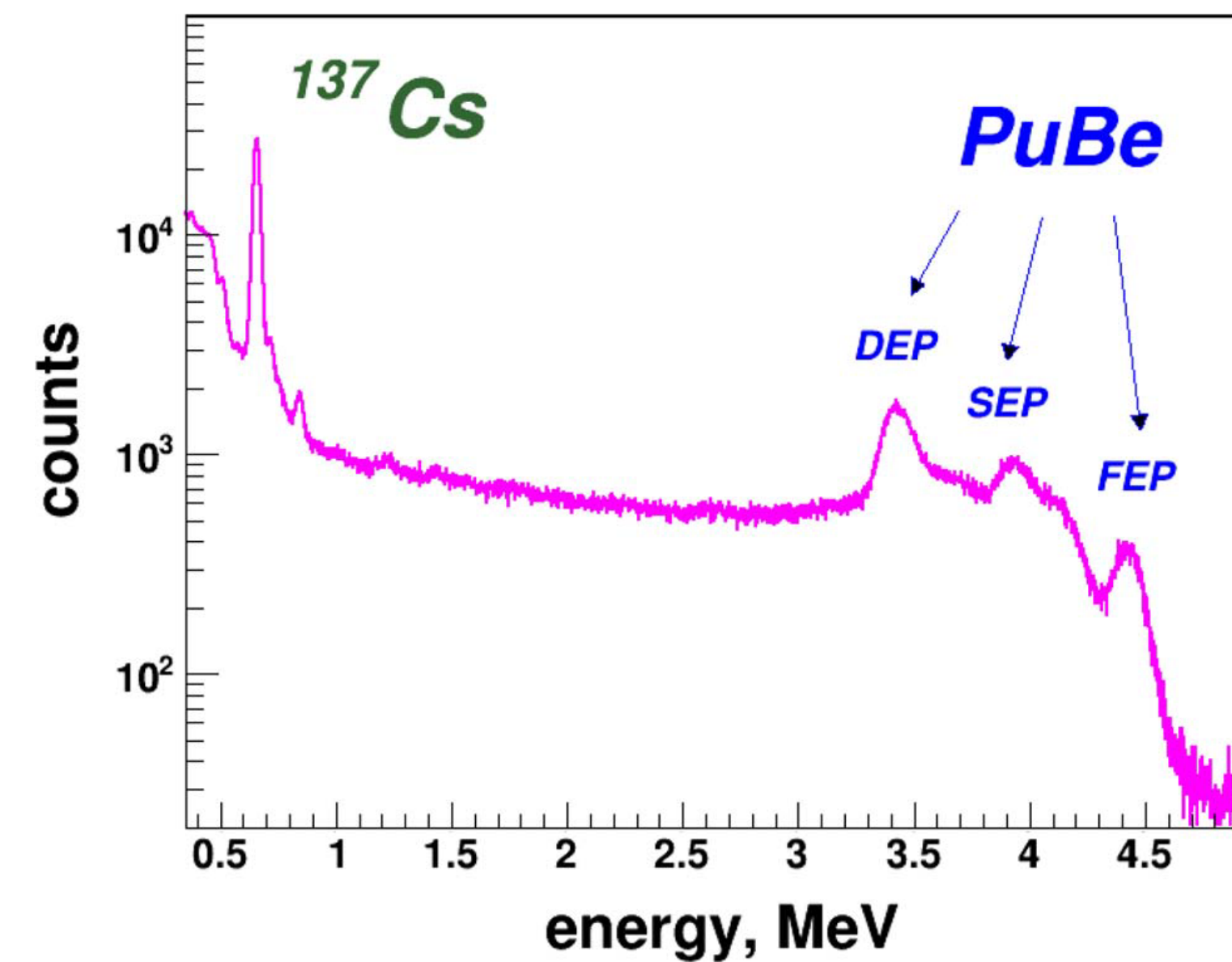
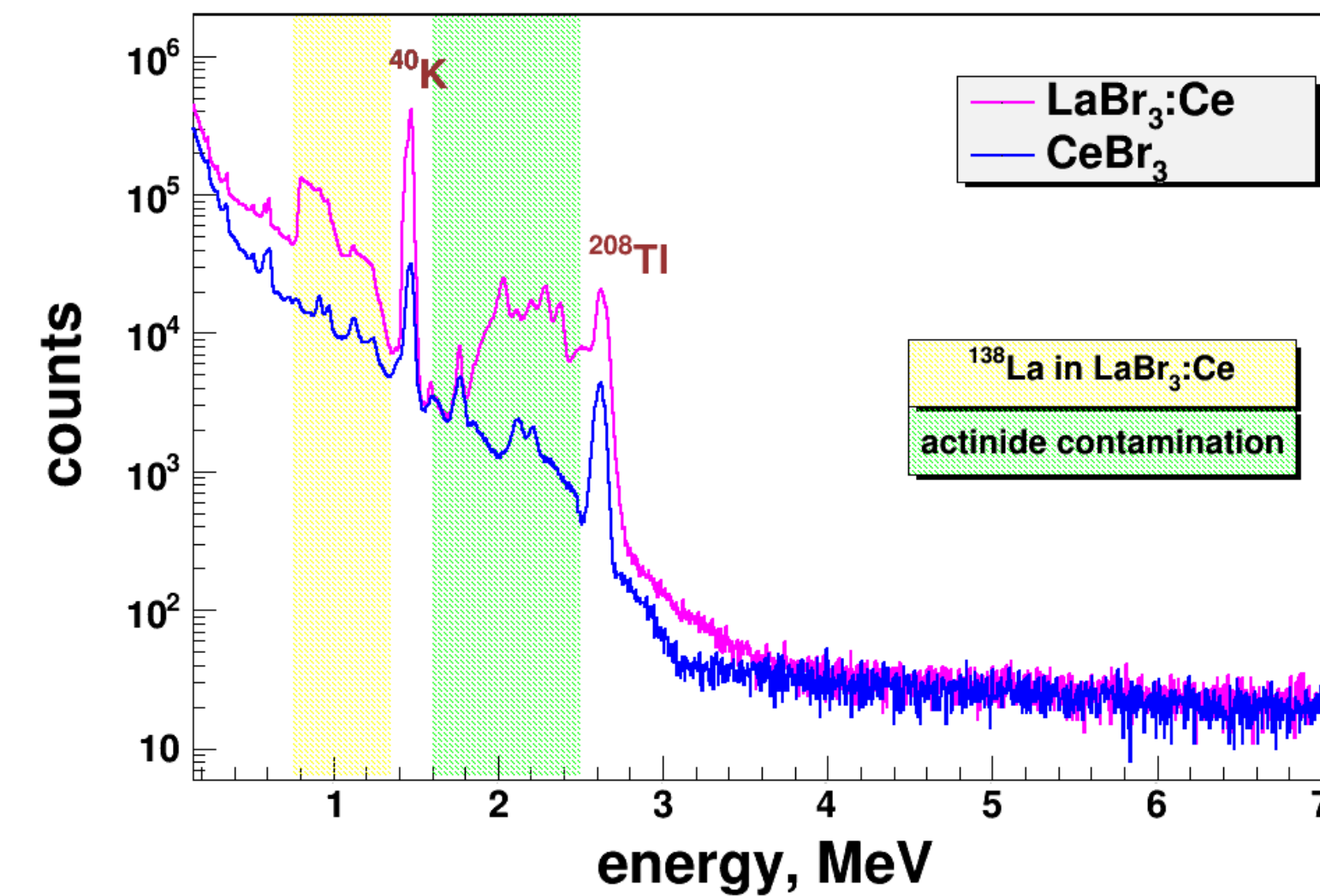


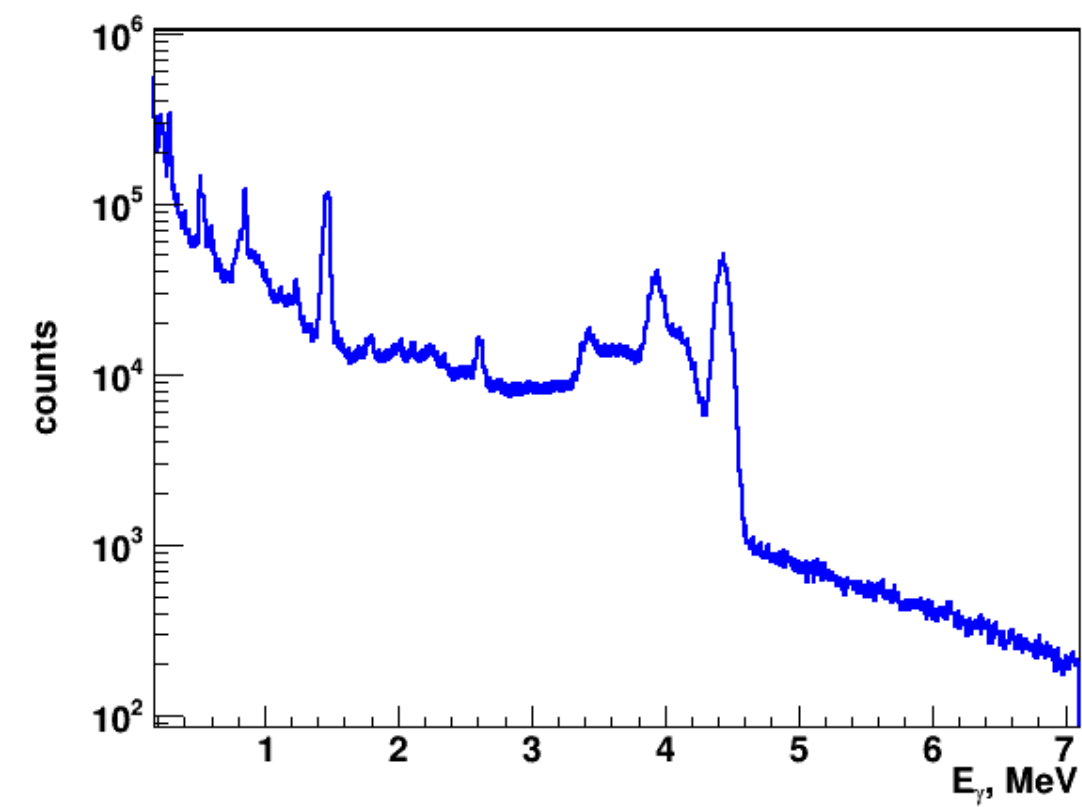
Zależność energetycznej zdolności rozdzielczej (FWHM) od napięcia zasilania



Widmo promieniowania gamma pochodzącego z naturalnych źródeł:

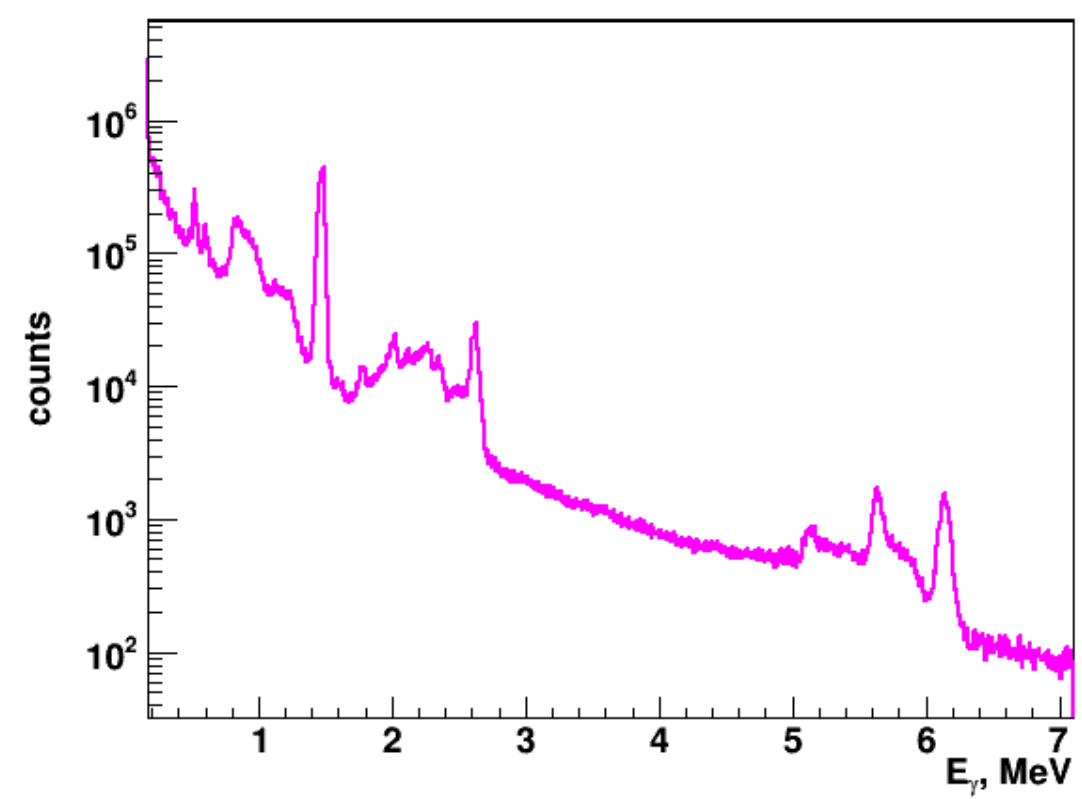
- tło w laboratorium
- wewnętrznej aktywności scyntylatora



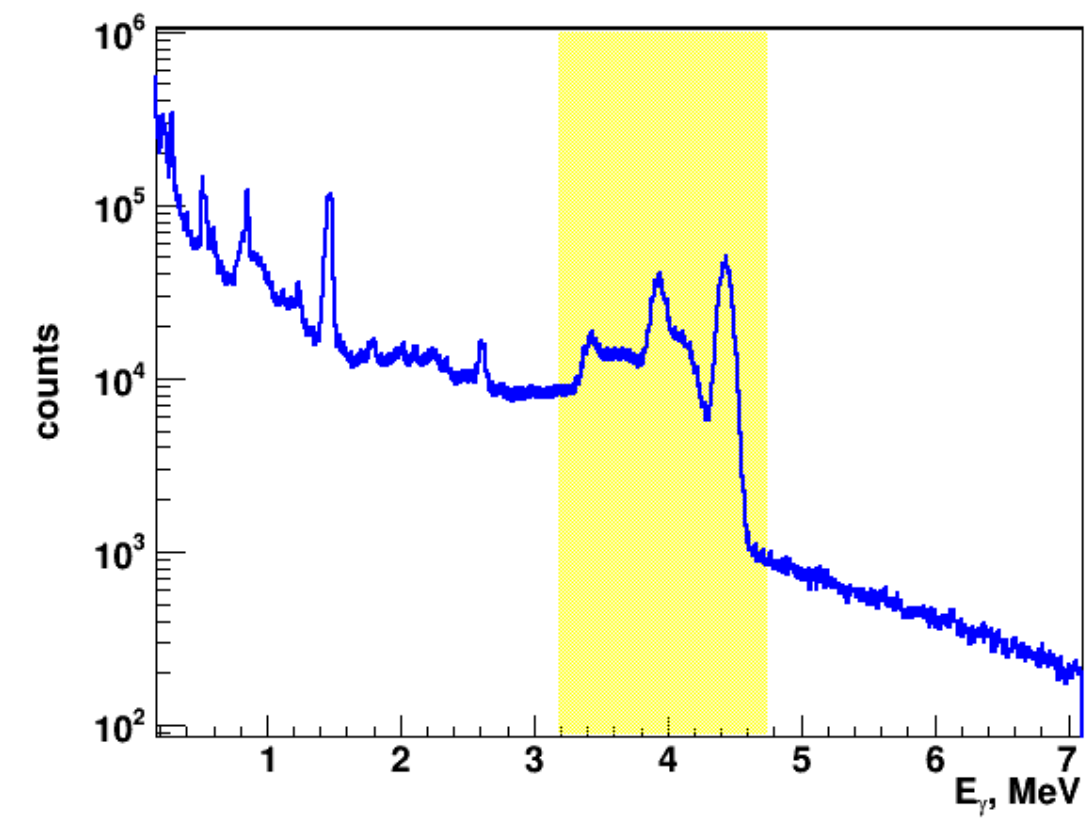


3" × 3" LaBr₃:Ce

PuBe: $E_\gamma = 4.4$ MeV

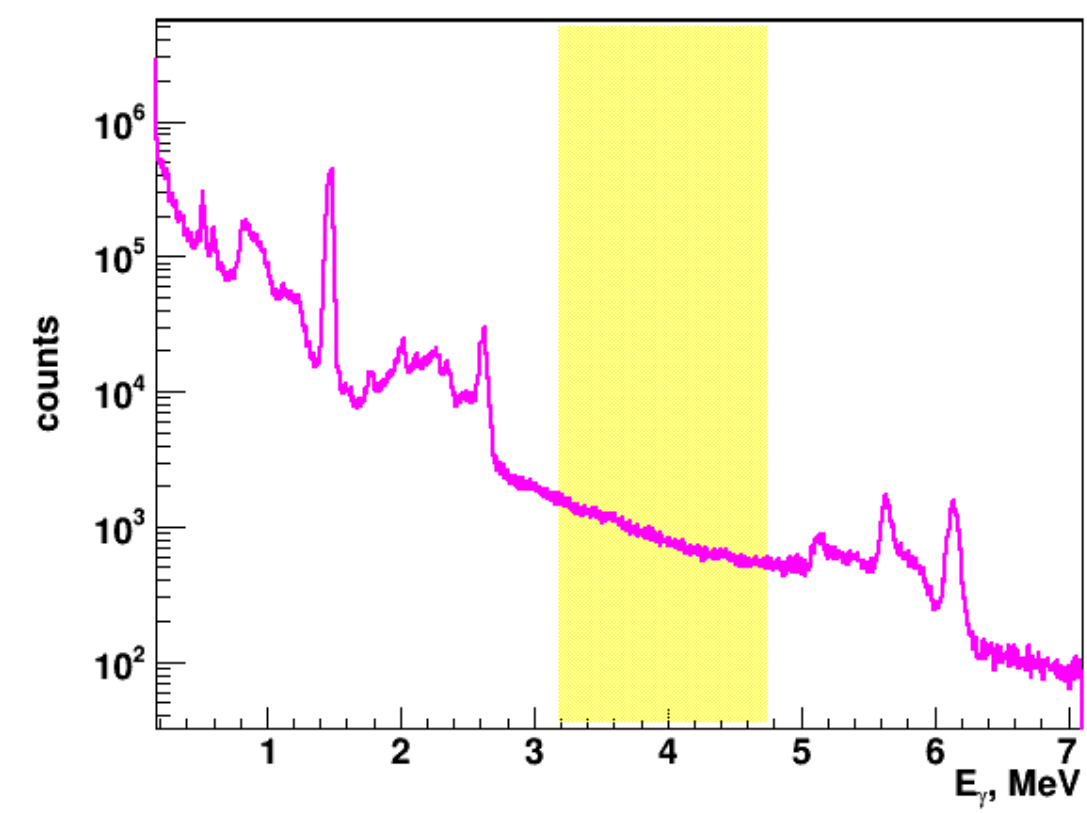


PuC: $E_\gamma = 6.1$ MeV



3" × 3" LaBr₃:Ce

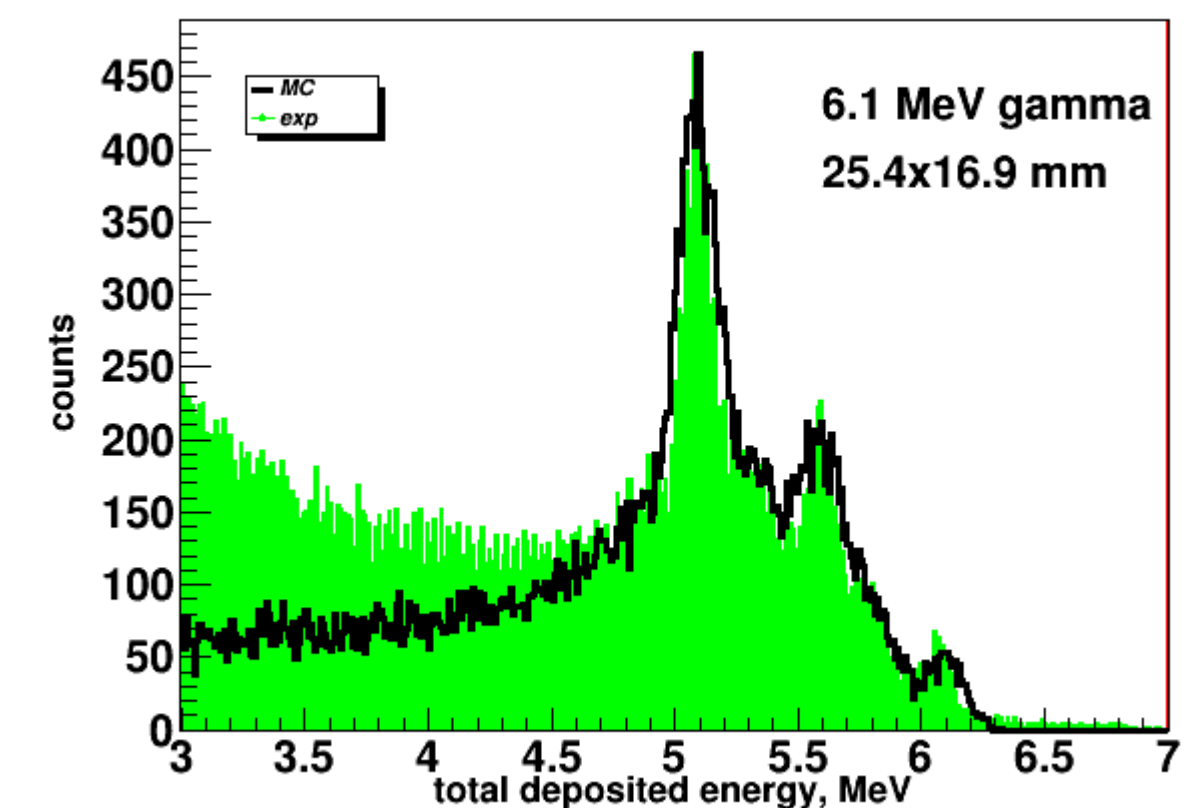
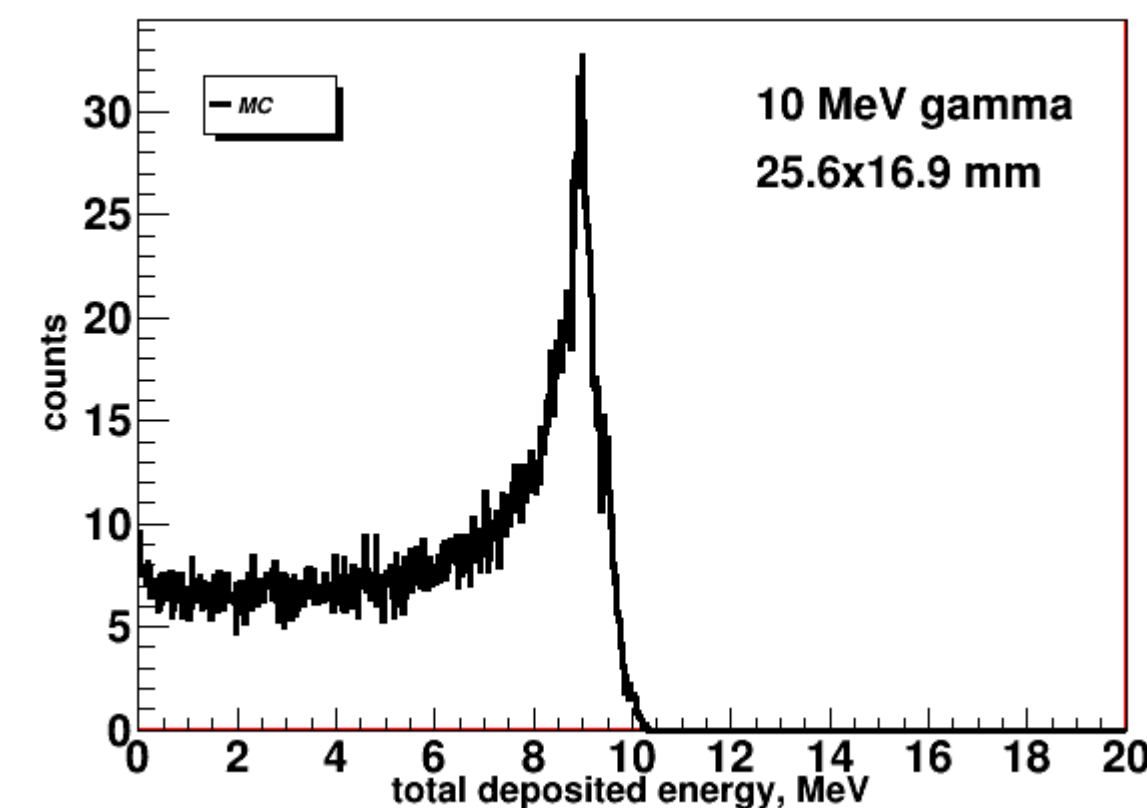
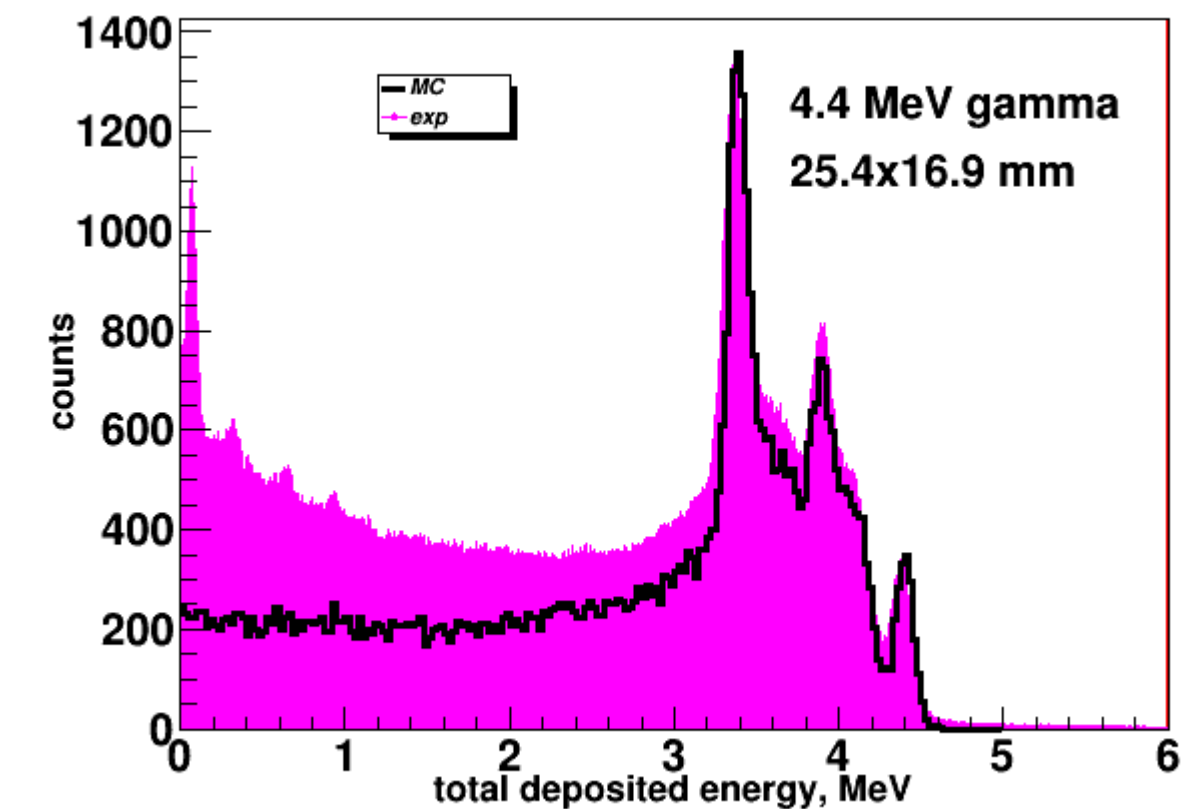
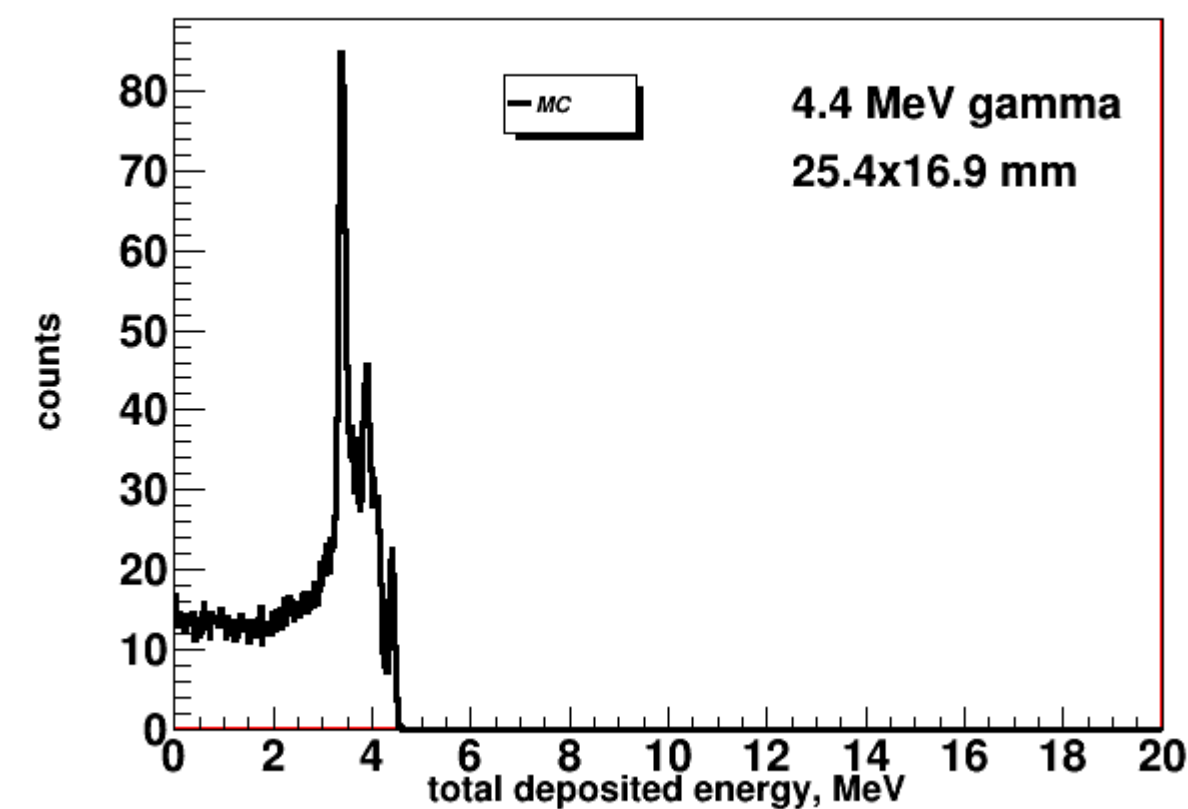
PuBe: $E_\gamma = 4.4$ MeV



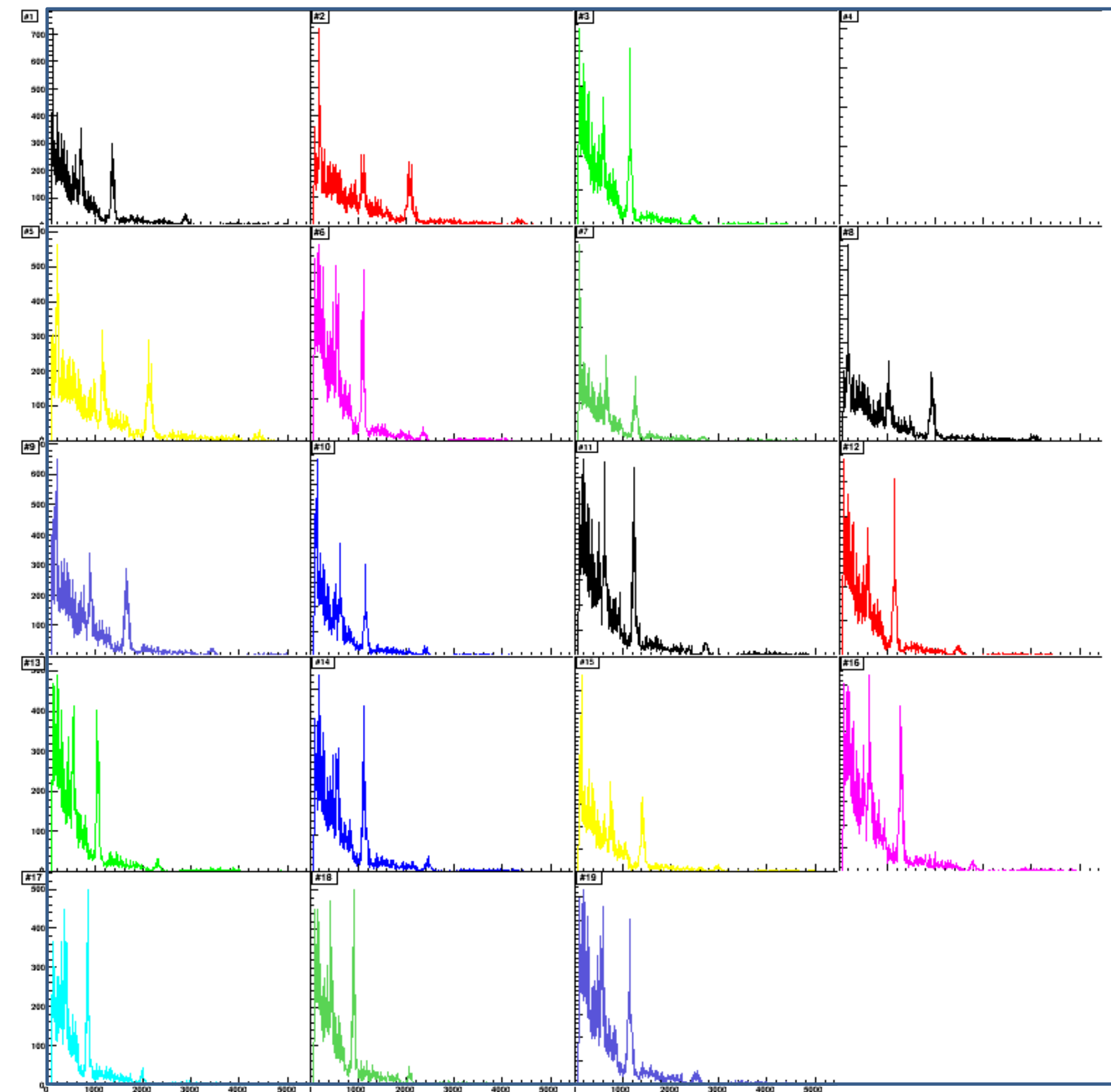
PuC: $E_\gamma = 6.1$ MeV

SYMULACJE METODĄ MONTE CARLO przy użyciu programu Geant4

- projektowanie i optymalizacja układów detekcji
- analizowane oddziaływanie promieniowania gamma z detektorami
- analiza zjawisk zachodzących w tokamakach:
 - dane wejściowe z różnych modeli teoretycznych

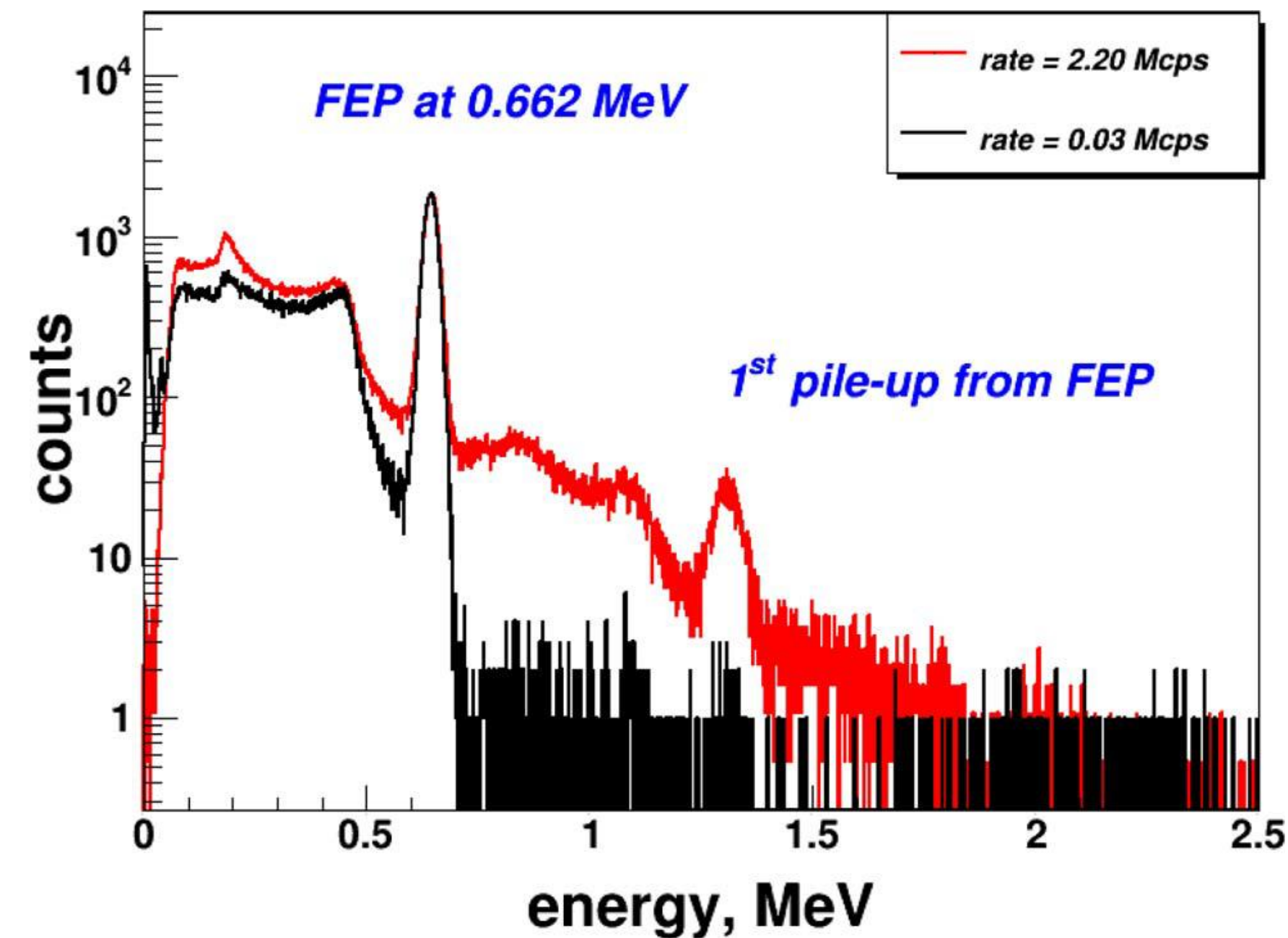


**Widma kalibracyjne zmierzone we wrześniu 2019
przy użyciu kamery gamma w czasie eksperymentu
dotyczącego produkcji elektronów ucieczki (run-away)**



Eksperymenty z dużymi natężeniami promieniowania gamma

Zdarzenia bez pełnego rozdzielenia czasowego,
w których więcej niż jeden kwant gamma jest rejestrowany, tzw. „pile-up events”



$$1.324 \text{ MeV} = 2 \times \text{FEP for } ^{137}\text{Cs}$$

Eksperymenty z dużymi natężeniami promieniowania gamma

Obserwacja zdarzeń bez pełnego rozdzielenia czasowego, w których więcej niż jeden kwant gamma jest rejestrowany, tzw. „pile-up events”

konieczność dekompozycji zdarzeń typu „pile-up”, aby można było zrekonstruować energię kwantów gamma

W większości metod wykorzystywane jest założenie, że kształt każdego impulsu pochodzącego z tego samego systemu detekcyjnego (np. scyntylator z fotopowielaczem lub MPPC) jest stabilny w czasie i niezależny od energii cząstki.

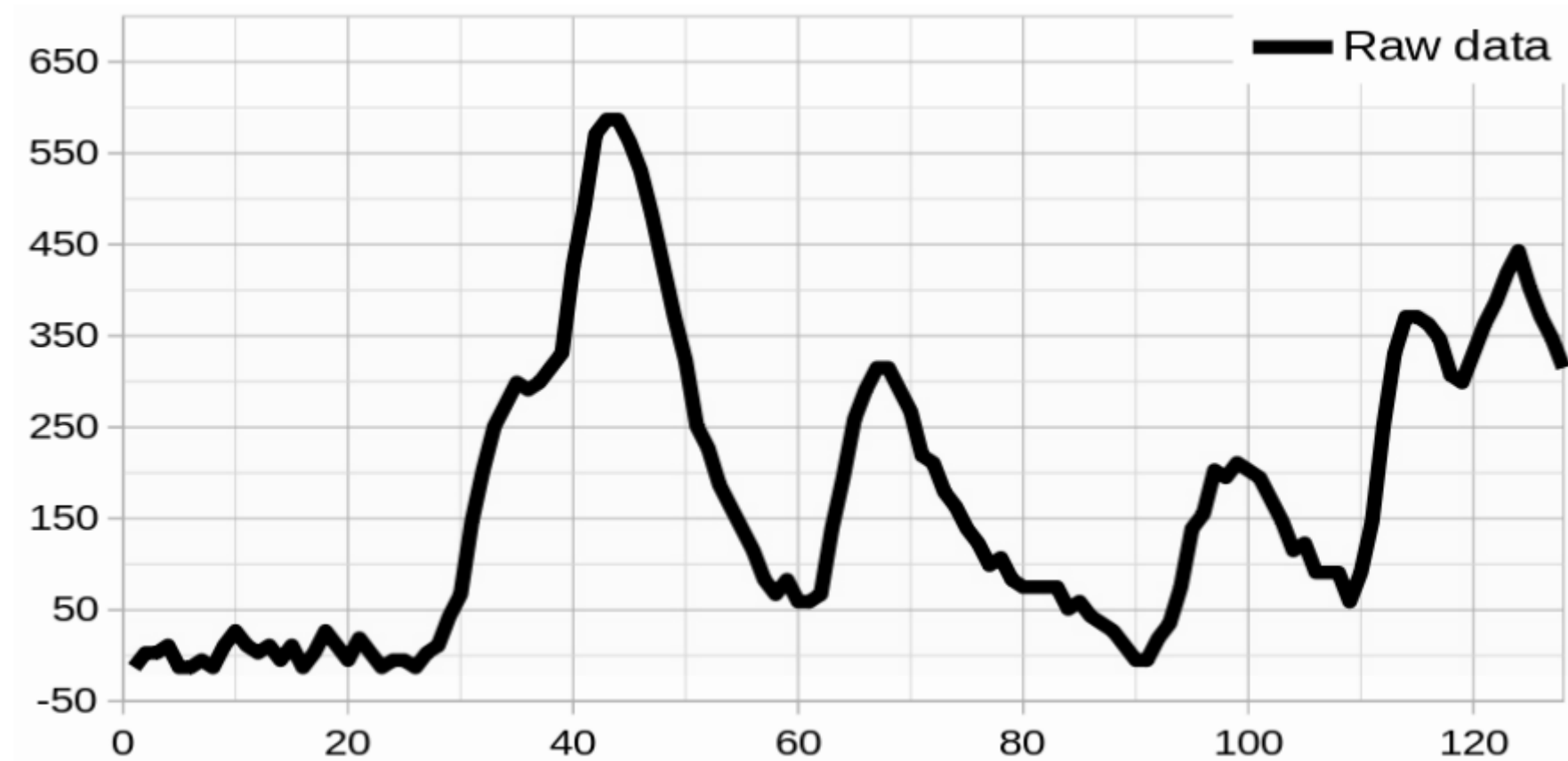
Wynikowy sygnał może być przedstawiony jako liniowa kombinacja pojedynczych impulsów przesuniętych w czasie.

Aby odtworzyć kształt impulsów składowych, wymagana jest znajomość wzorca kształtu sygnału.

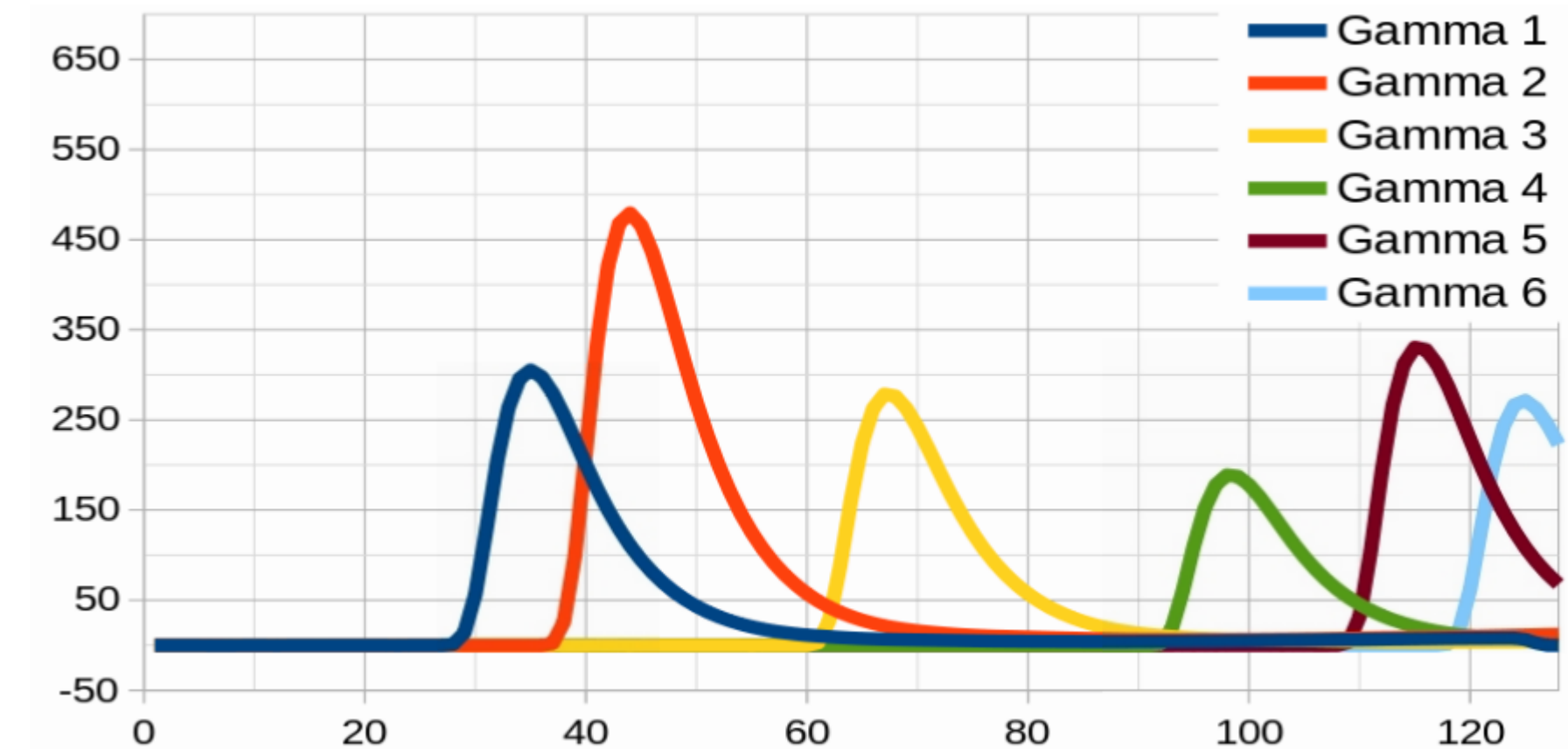
Wstępne wyniki zastosowania algorytmu do rekonstrukcji zdarzeń typu „pile-up” Kampania C38 na tokamaku JET, wrzesień 2019

M18-37, JET Pulse 95049, 6.09.2019, kamera gamma #9, zdarzenie 4131

6 nakładających się sygnałów gamma



6 rozdzielonych sygnałów

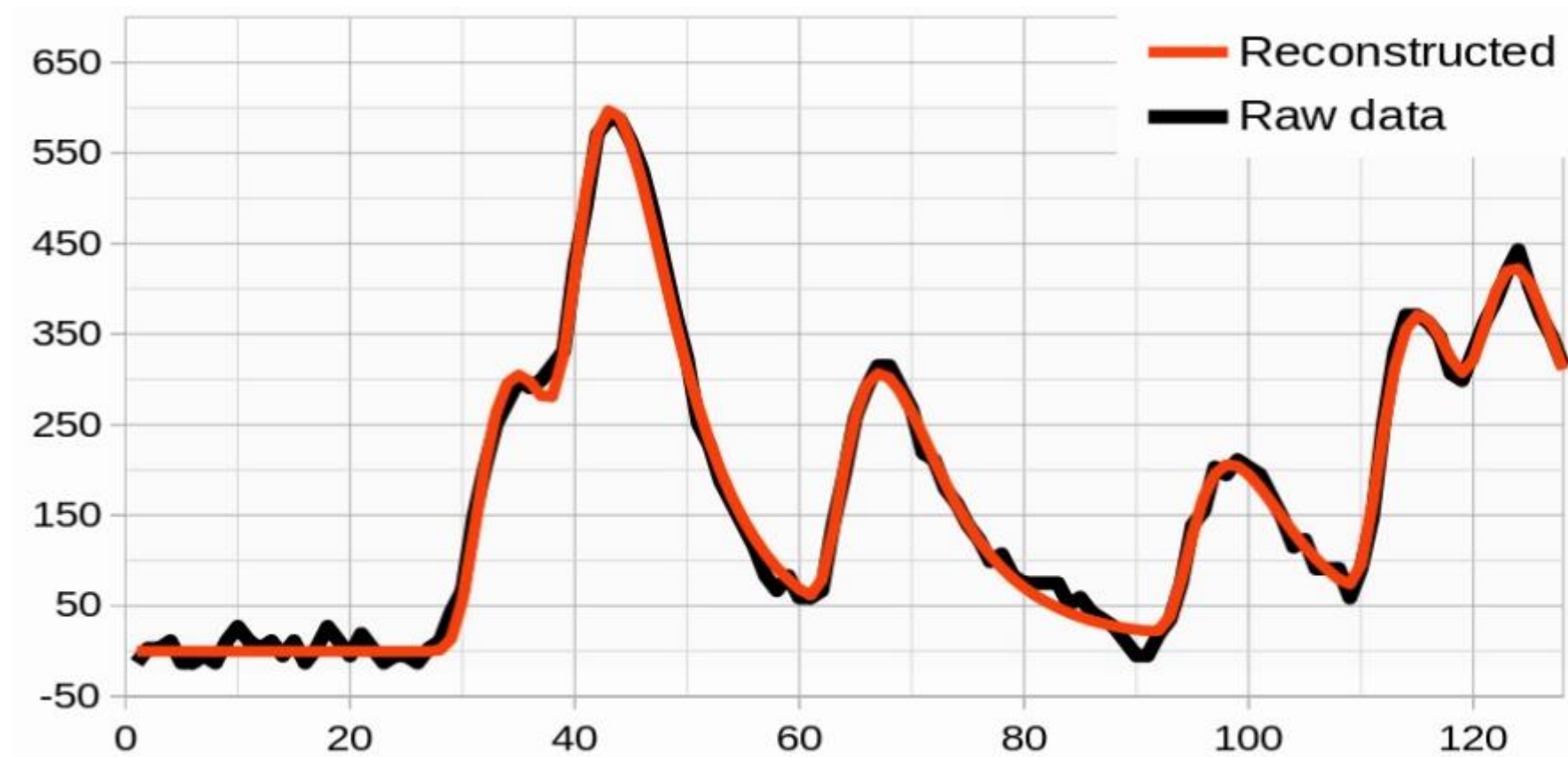


Wstępne wyniki zastosowania algorytmu do rekonstrukcji zdarzeń typu „pile-up”

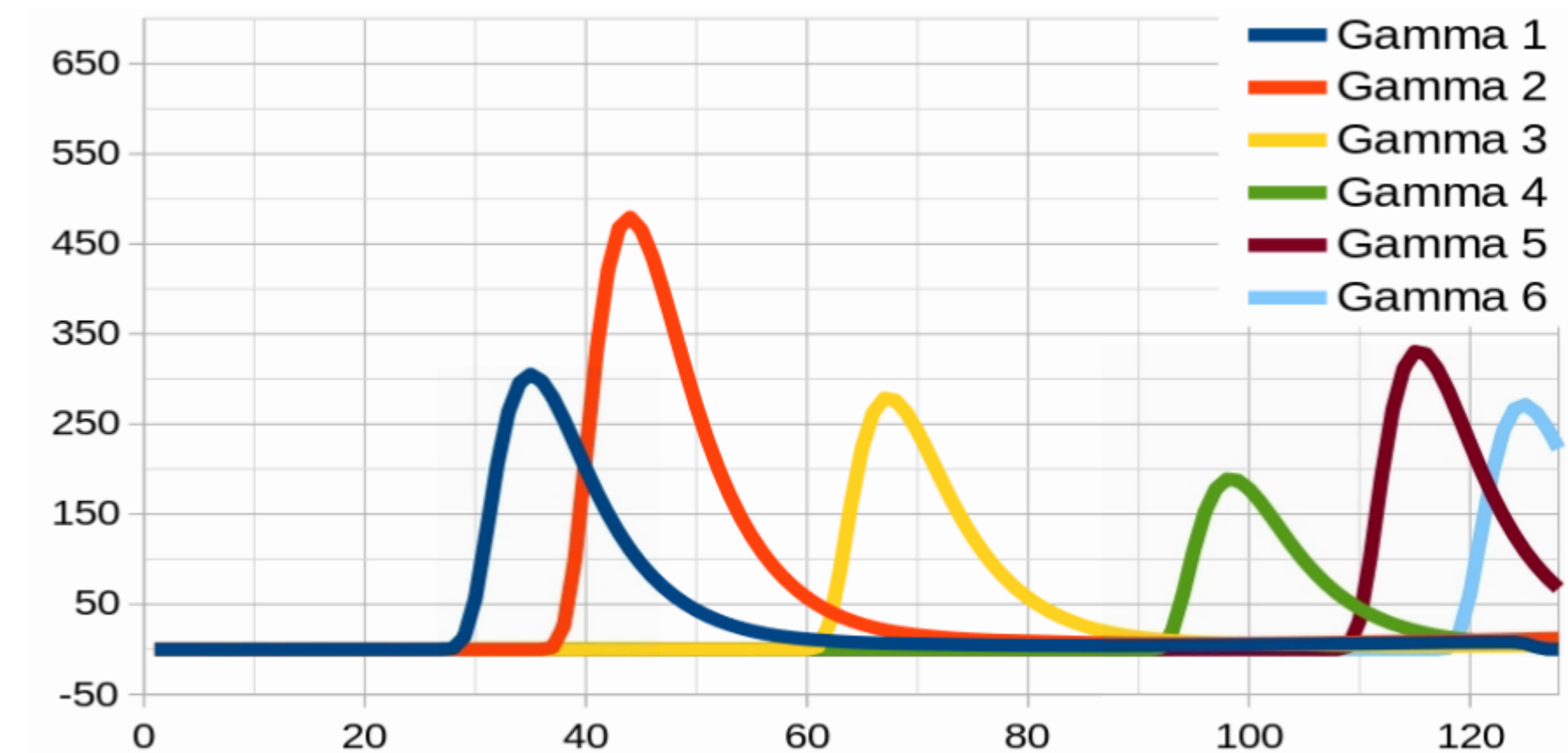
Kampania C38 na tokamaku JET, wrzesień 2019

M18-37, JET Pulse 95049, 6.09.2019, kamera gamma #9, zdarzenie 4131

6 nakładających się sygnałów gamma



6 rozdzielonych pików



Projekt ENS

Early Neutron Source

International Fusion Materials Irradiation Facility-DEMO Oriented Neutron Source (IFMIF-DONES)
based on Engineering Validation and Engineering Design Activities (IFMIF/EVEDA)

Budowa dedykowanego źródła neutronów pochodzących z reakcji deuter-lit, w której będą powstawać neutrony o właściwościach zbliżonych do produkowanych w reakcji DT.

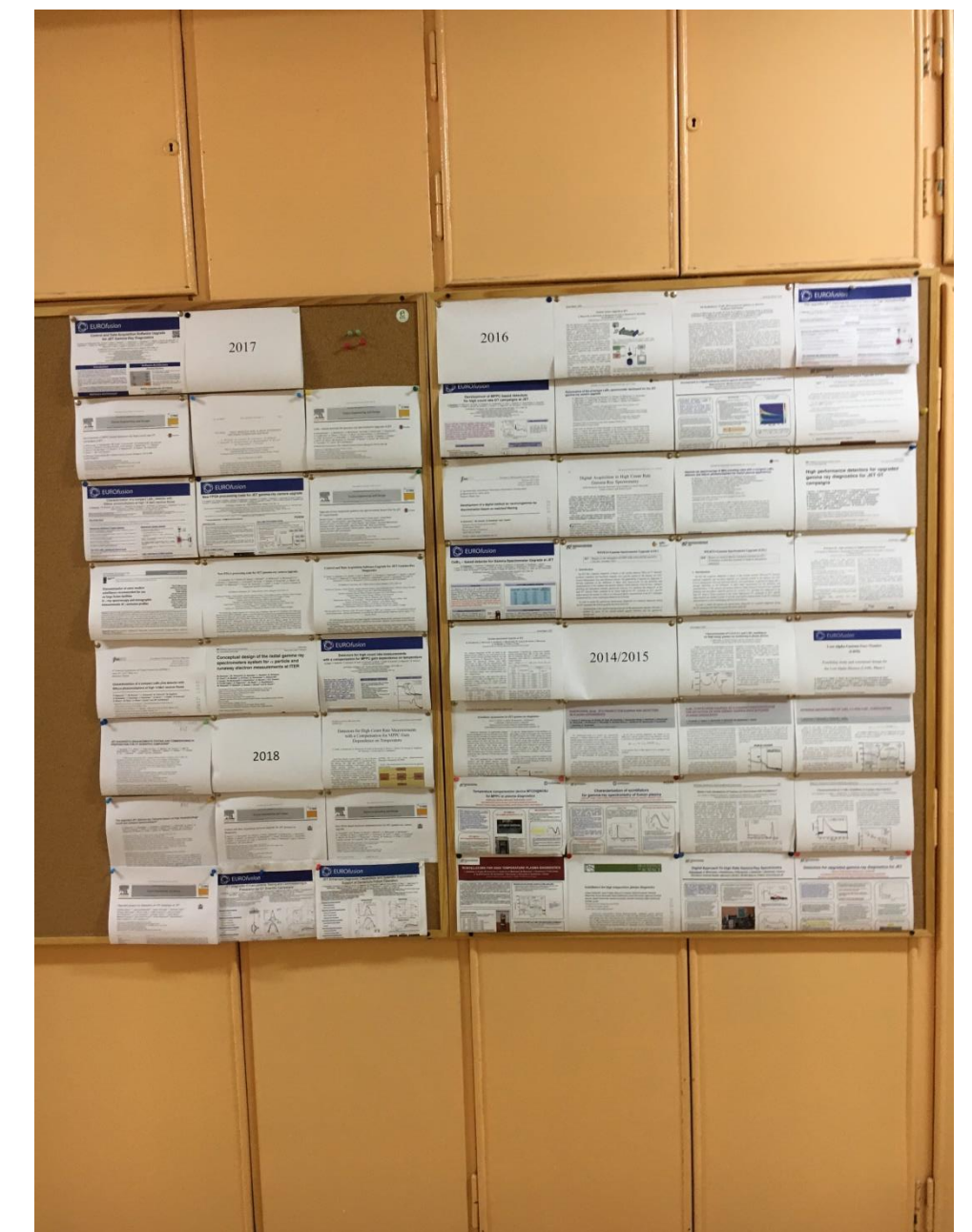
Testowanie materiałów, z których ma być zbudowany reaktor DEMO.

Udział polskich instytutów w kilku zadaniach, m.in. eksperyment w reaktorze MARIA, określenie odpowiedzi detektorów modułu STUMM (Start-up and Monitoring Module).

PODSUMOWANIE

- Udział w wieloletnim projekcie obejmujących prace obliczeniowe, projektowe, budowę detektorów oraz instalację i testowanie na tokamaku JET.
- Udział w kampaniach eksperymentalnych w projekcie JET1 Campaigns
- Dobra współpraca z zespołami z Portugalii, Rumunii, Wielkiej Brytanii i Włoch.
- Liczne publikacje oraz prezentacje na konferencjach, fusion.ncbj.gov.pl

JET → ITER → DEMO



Zespół pracujący od 2014 roku w projekcie

- pracownicy (byli i obecni) Departamentu Aparatury i Technik Jądrowych (DTJ) w NCBJ:
P.Adrich, G.Bołtruczyk, A.Brosławski, M.Gosk, S.Korolczuk, A.Urban, ...
- współpracownicy: T.Craciunescu, J.Figueiredo, V.Kiptily, M.Tardocchi,
N.Cruz, A.Fernandes, L.Giacomelli, M.Nocente,
R.C.Pereira, D.Rigamonti, B.Santos, ...



