

Udział polskich instytucji w programie JET4-EUROFusion 2014-2018

Izabella Zychor
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

STRESZCZENIE

W ramach europejskiego programu fuzji jądrowej realizowanego przez Konsorcjum EUROfusion prowadzone są prace nad zmianami w systemach detekcji promieniowania gamma obecnie działających na tokamaku JET.

Omówione zostaną projekty, w których uczestniczy Narodowe Centrum Badań Jądrowych oraz Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrośyntezy.

Przedstawione zostaną ulepszenia, które w czasie kampanii deuter-tryt, planowanej na rok 2017, zapewnią efektywne wykorzystanie detektorów scyntylicyjnych do diagnostyki promieniowania gamma.

EFDA

European Fusion Development Agreement

prace nad poszukiwaniem źródeł energii
w oparciu o reakcje syntezy jądrowej

DEMO - Demonstration Fusion Power Plant

- pierwszy reaktor termojądrowy produkujący energię elektryczną (2050)

ITER - International Thermonuclear Experimental Reactor

- prototypowy reaktor - istotnym krokiem na drodze do DEMO

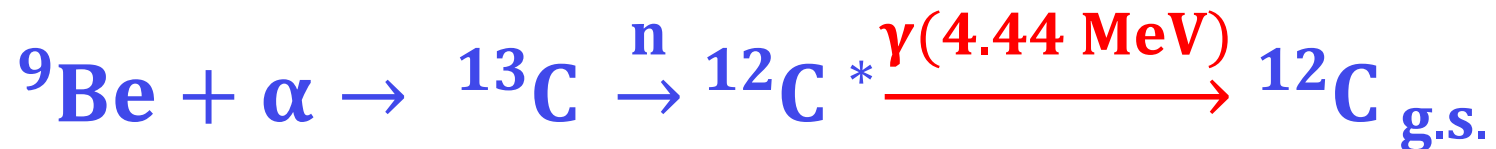
JET - Joint European Tokamak

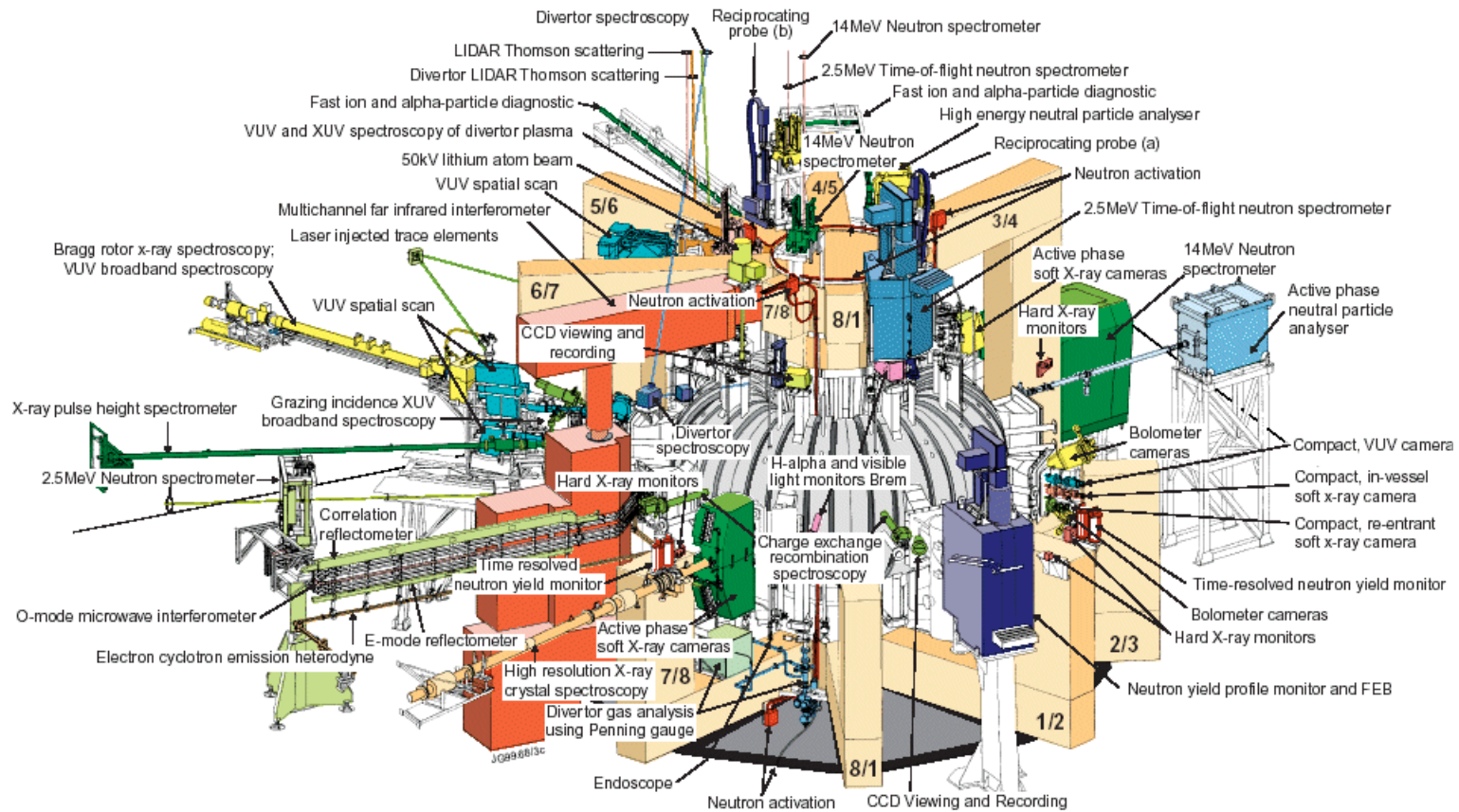
- najpotężniejszy działający tokamak
- możliwość sprawdzania rozwiązań dla ITERa
- idealny miejsce do prowadzenia prac badawczych

JET → ITER → DEMO

JET

- **unikalny** - badanie reakcji syntezy termojądrowej DD oraz DT
- **rekordowy** - 16 MW mocy syntezy termojądrowej





około 100 różnych diagnostyk dostępnych na tokamaku JET

- temperatura plazmy: 100 milionów stopni Celsjusza
- rozkłady przestrzenne z wysoką rozdzielczością
- pomiary w czasie rzeczywistym
- 100 różnych diagnostyk – 60 w czasie eksperymentu
- 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
- konieczna walidacja poprzez analizy programami komputerowymi, ale także przez doświadczonych ludzi
- ...

BADANIE CZĄSTEK ALFA

UWIĘZIONE (CONFINED) CZĄSTKI ALFA

poprzez rejestrację promieniowania gamma z reakcji jądrowych zachodzących w plazmie

- **kamera gamma KN3**: układ do detekcji neutronów oraz promieniowania gamma, obserwacja promieniowania z 10 horyzontalnych i 9 wertykalnych kierunków, określenie położenia źródła promieniowania, scyntylatory CsI:TI
- **spektrometr gamma KM6**: scyntylator BGO rejestrujący promieniowanie gamma

BADANIE CZĄSTEK ALFA

TRACONE (LOST) CZĄSTKI ALFA

bezpośrednie pomiary traconych cząstek alfa
poprzez pomiar strumienia cząstek alfa, rozkładów
przestrzennych oraz składowych prędkości

- **KA2** - diagnostyka przy użyciu puszki Faradaya, całkowity strumień cząstek
- **KA3** - detektory scyntylicyjne, analiza pojedynczych cząstek
- **KA4** – nowa diagnostyka z wykorzystaniem scyntylatorów

Kampania DT

- wysoka moc w plazmie w kampanii DT
- duża intensywność strumieni neutronów
- ograniczona poprzez istniejące systemy przestrzeń wokół JETa
- szybki detektor o dobrej zdolności rozdzielczej
 - krótki czas zaniku: 20 ns
 - zdolność rozdzielcza: 5% at 1.1MeV

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

1.01.2014 – 31.12.2017

Program JET Enhancements JET4 **NCBJ + IFPiLM**

SCYNTYLATORY

- LaBr_3 , CeBr_3 , NaI, CsI, GAGG, BGO, ...
- wymiary: $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ do $3'' \times 3''$
- prostopadłościany i walce

Scyntylator CeBr_3 (Scionix)

20 mm × 20 mm

zewewnętrzne wymiary

28 mm × 24 mm

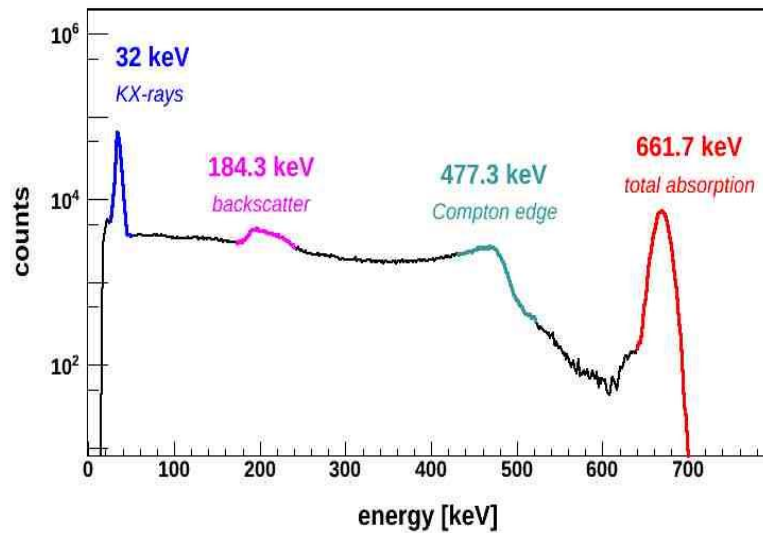


Źródła promieniotwórcze

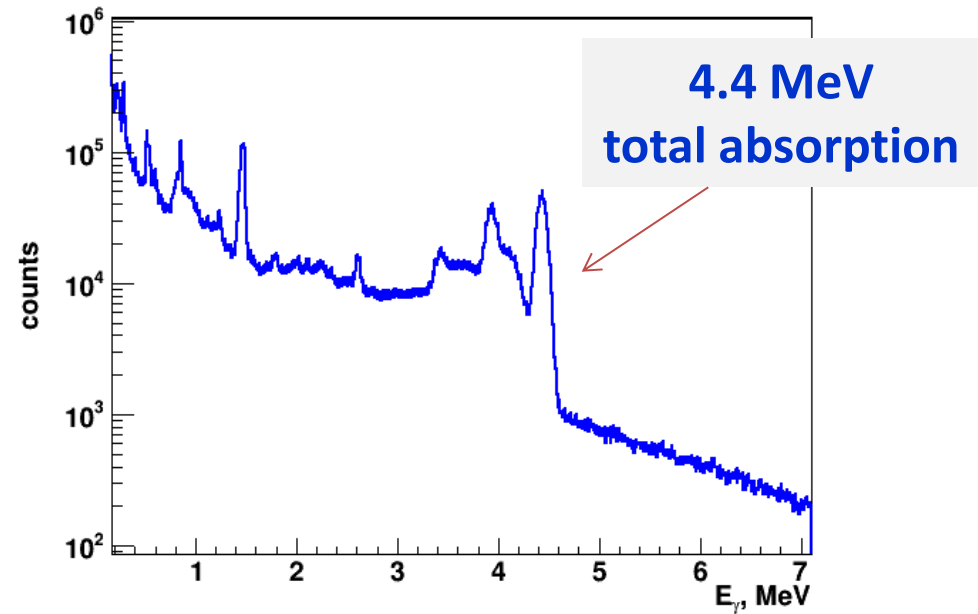
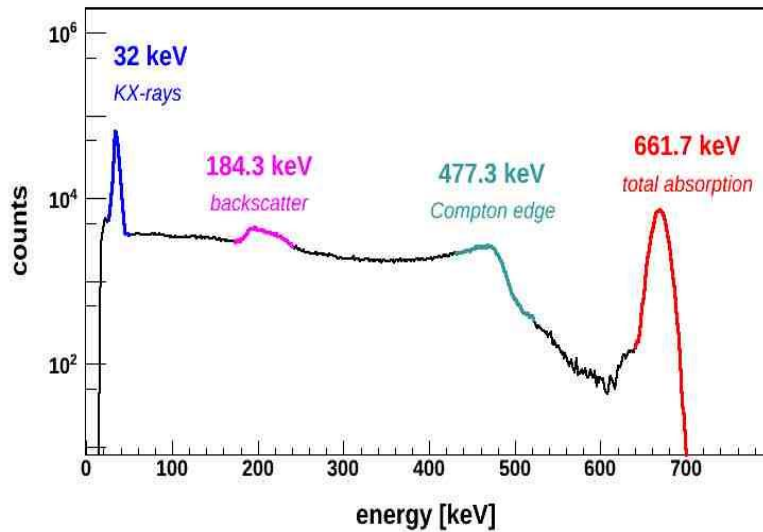
- standardowe źródła promieniowania γ
 - ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{60}Co , ...
- **PuBe** energia linii γ : 4.4 MeV
- **PuC** energia linii γ : 6.1 MeV



Typowe (?) widma



Typowe (?) widma



FOTODETEKTORY

współpracujące ze scyntylatorami

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

FOTOPOWIELACZ „KLASYCZNY”

Zalety

- wysokie wzmocnienie ładunkowe
- nie wymaga przedwzmacniacza

Wady

- rozmiar
- cena
- czuły na pole magnetyczne

DIODA TYPU PIN

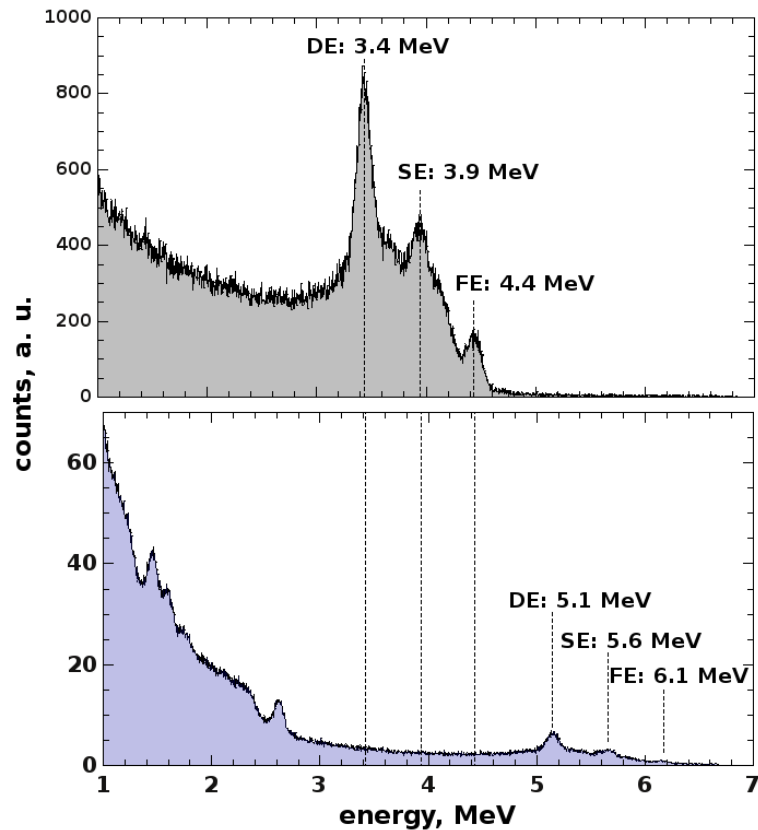
Zalety

- mały rozmiar
- niskie napięcia pracy (ok. 70 V)
- brak czułości na pole magnetyczne
- stosunkowo niska cena

Wady

- wzmocnienie ładunkowe: 1
- wymaga przedwzmacniacza

scyntylator CeBr_3
średnica: 20 mm, długość: 20 mm
dioda PIN: 10x10 mm

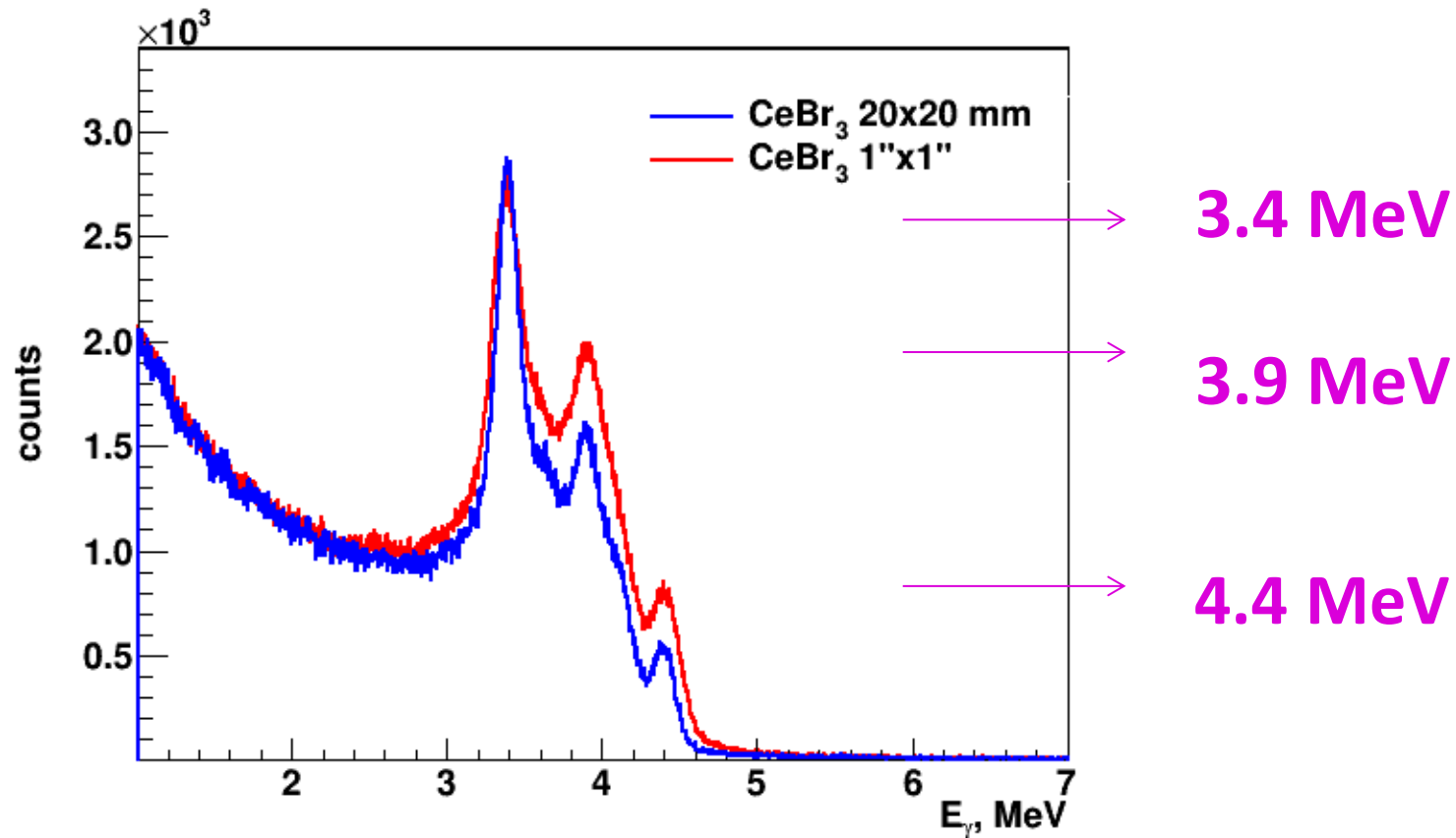


źródło PuBe
 $E_\gamma = 4.4 \text{ MeV}$

źródło PuC
(mała intensywność)
 $E_\gamma = 6.1 \text{ MeV}$

S.Mianowski i in.

scyntylator CeBr_3 + dioda PIN



S.Mianowski i in.

FOTOPOWIELACZE KRZEMOWE

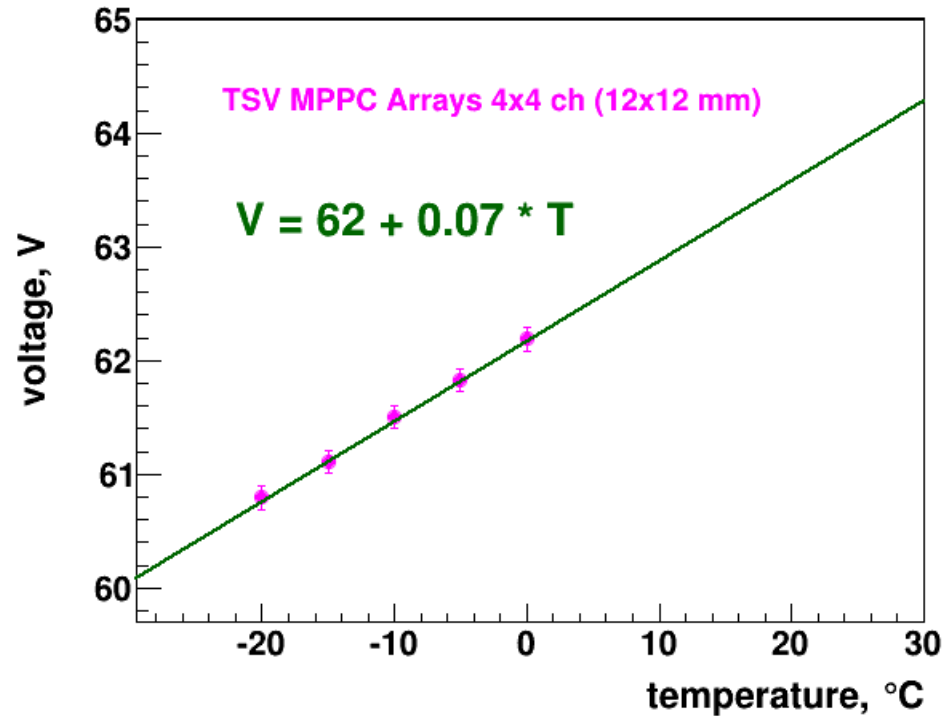
ZALETY

- 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

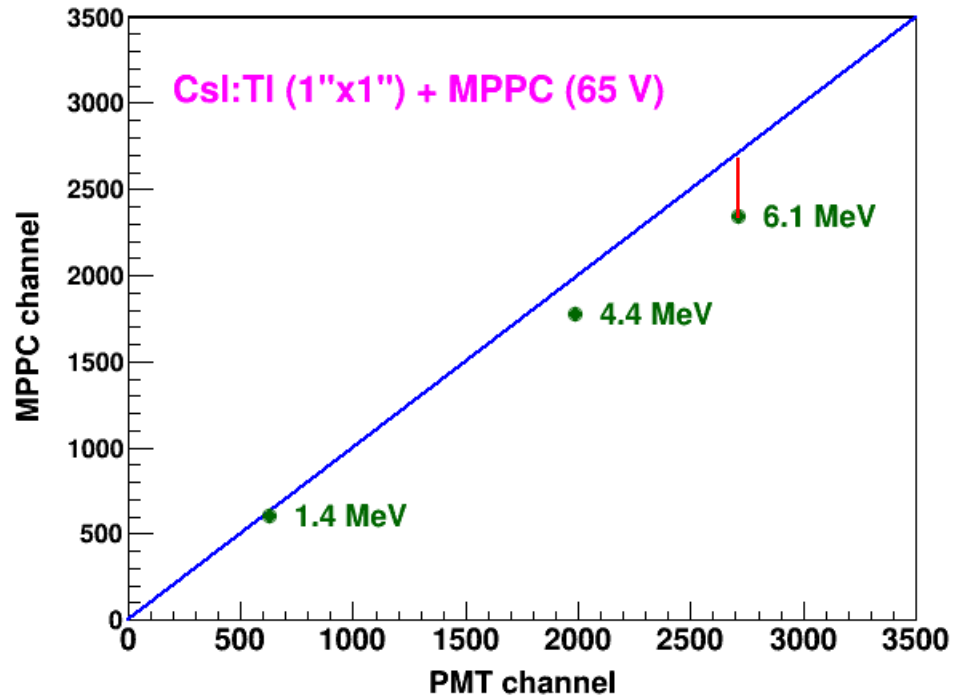
FOTOPOWIELACZ KRZEMOWY ZALEŻNOŚĆ OD TEMPERATURY



M.Grodzicka i in.

- współczynnik: 70 mV/°C
- oszacowane różnice około $\pm 10\%$ dla badanych fotopowielaczy

FOTOPOWIELACZ KRZEMOWY NIELINIOWOŚĆ



M.Grodzicka i in.

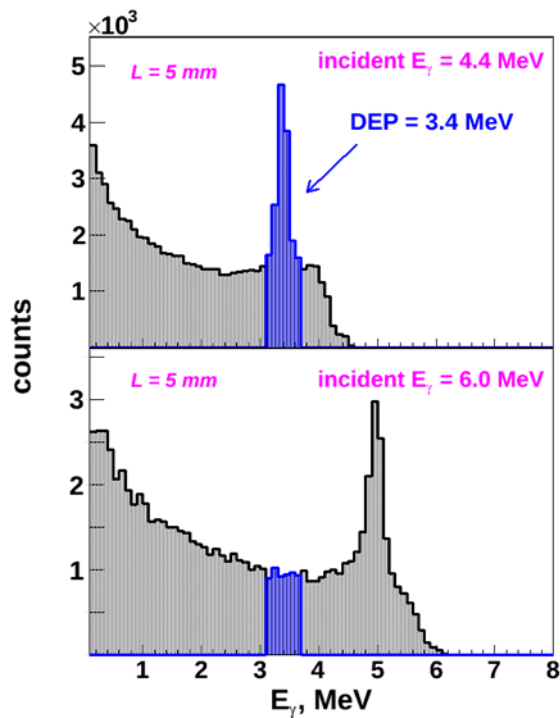
SYMULACJE METODĄ MONTE CARLO

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

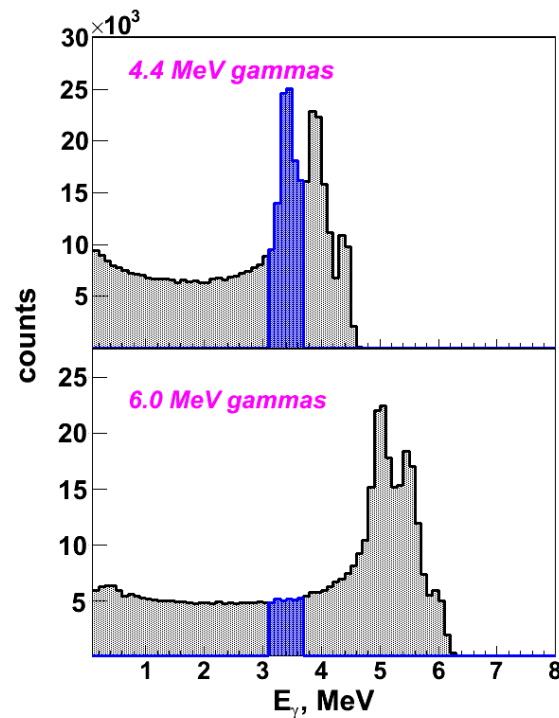
Geant4 - NCBJ

MCNP - NCBJ oraz IFPiLM

SYMULACJE PROGRAMEM Geant4



$L = 5 \text{ mm}, \quad \phi = 20 \text{ mm}$



$L = 35 \text{ mm}, \quad \phi = 35 \text{ mm}$

I.Zychor

SYMULACJE METODĄ MONTE CARLO

If you don't trust logic, then you can make
a little Monte Carlo...

by HEP

SYMULACJE METODĄ MONTE CARLO

If you don't trust logic, then you can make a little Monte Carlo...

by HEP



Wikipedia

SYMULACJE METODĄ MONTE CARLO

If you don't trust logic, then you can make a little Monte Carlo...

by HEP



Wikipedia



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

1.01.2014 – 31.12.2017

Program JET Enhancements JET4 NCBJ + IFPiLM

GCU modernizacja kamery gamma w tokamaku JET

wymiana 19 scyntylatorów CsI:TI o wymiarach $\Phi=20$ mm, L=15 mm

- czas zaniku dla CsI:TI: 1000 ns – zbyt długi ze względu na intensywne promieniowania oczekiwane w kampanii DT
- zastąpienie CsI kryształami o krótkim czasie zaniku, np. CeBr₃ lub LaBr₃:Ce o czasie zaniku około 20 ns
- dodatkowo: nowe scyntylatory nie mogą zawierać tlenu za względu na reakcję *tlen+neutron*, która jest powoduje pojawienie się niepożądanego tła promieniowania gamma

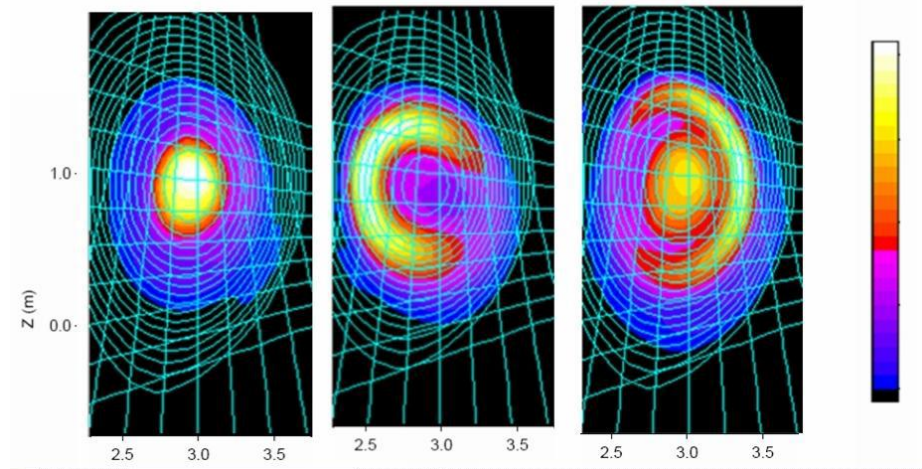
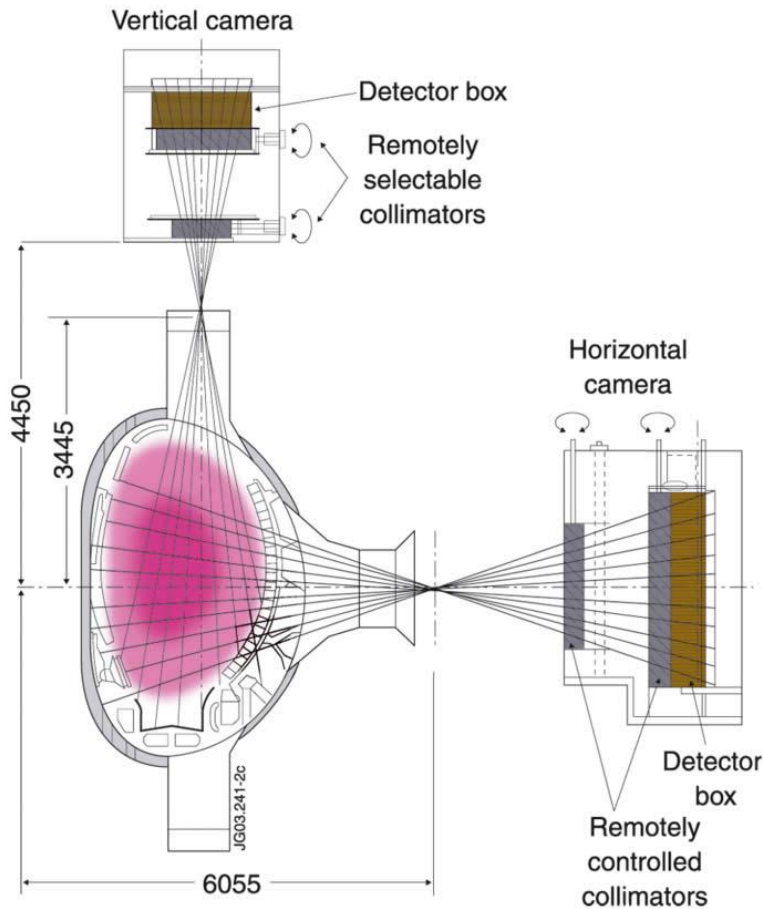
1. Modernizacja kamery gamma w tokamaku JET

Gamma Camera Upgrade (GCU)

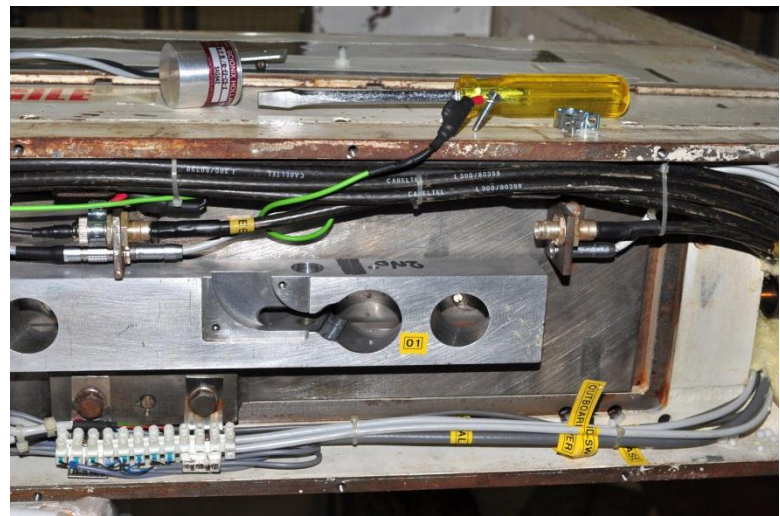
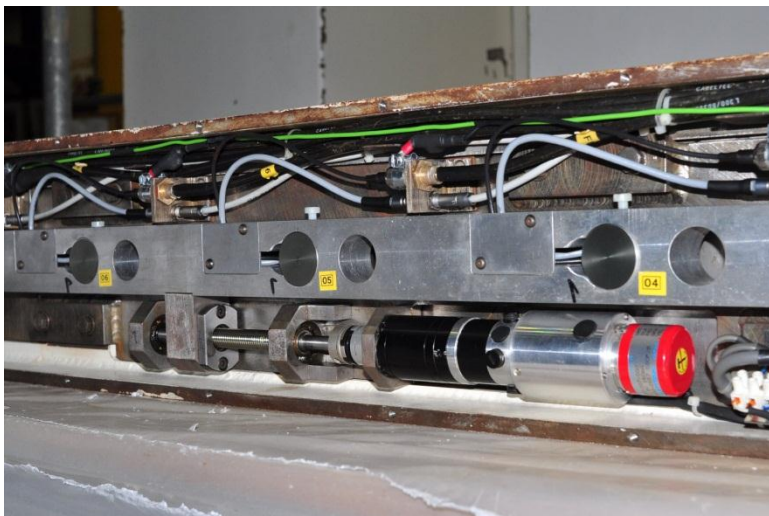
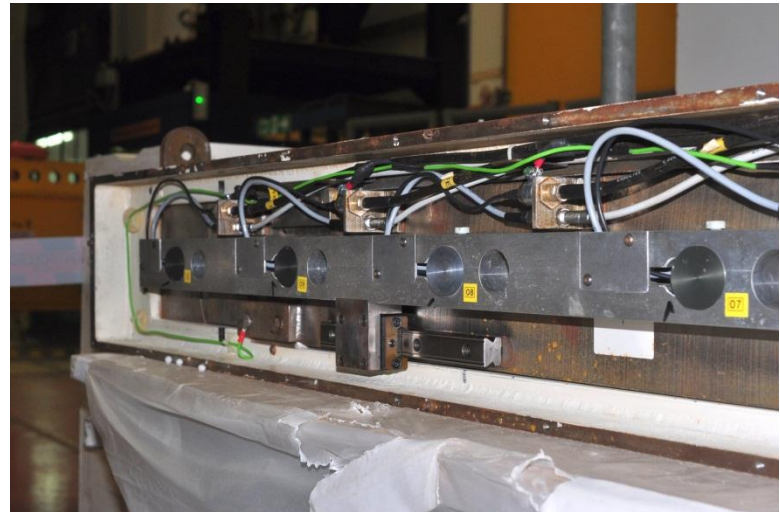
- 1.1. Wybór scyntylatora oraz optymalnej geometrii.
- 1.2. Określenie wymagań dotyczących fotodetektora oraz optymalizacja parametrów pracy fotopowielaczy krzemowych.
- 1.3. Zaprojektowanie i wykonanie prototypu detektora.
- 1.4. Wyznaczenie funkcji odpowiedzi detektorów na promieniowanie gamma oraz neutrony.
- 1.5. Zaprojektowanie, wykonanie, przetestowanie oraz instalacja 19 detektorów na tokamaku JET.

Kamera gamma w tokamaku JET

- informacja przestrzenna
- informacja czasowa
- ...



T.Craciunescu i in., 2008



scyntylator

**kasułka
z detektorem
(JET)**



fotopowielacz

dioda typu PIN

GSU modernizacja spektrometru gamma w tokamaku JET

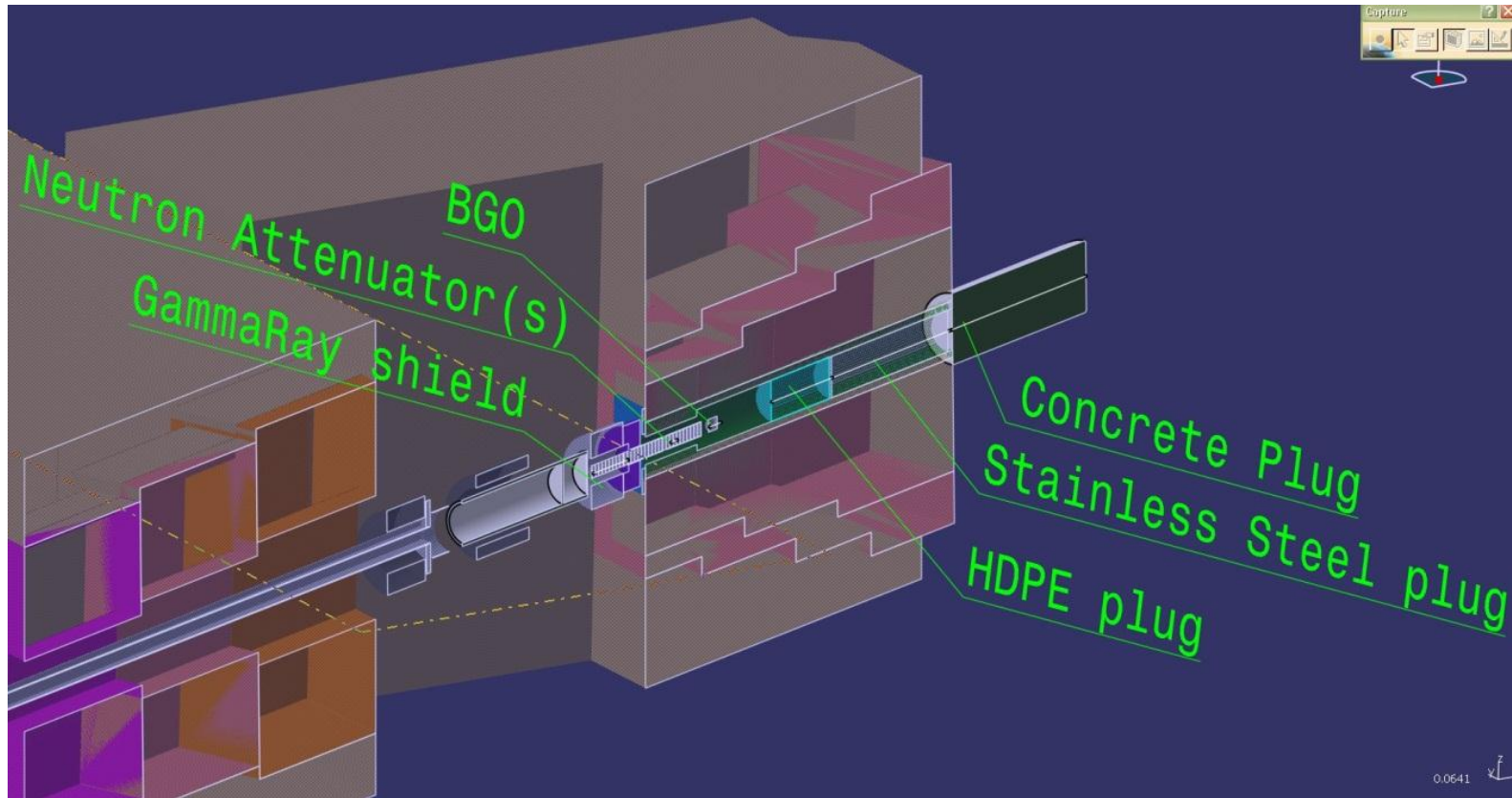
wymiana scyntylatora BGO

- czas zaniku dla BGO – zbyt długi ze względu na intensywne promieniowania oczekiwane w kampanii DT
- zastąpienie BGO kryształami o krótkim czasie zaniku, np. CeBr₃ lub LaBr₃:Ce o czasie zaniku około 20 ns
- dodatkowo: nowe scyntylatory nie mogą zawierać tlenu za względu na reakcję *tlen+neutron*, która jest powoduje pojawienie się niepożądanego tła promieniowania gamma
- zainstalowanie dwóch nowych scyntylatorów, pracujących jednocześnie

2. Modernizacja spektrometru gamma w tokamaku JET Gamma Spectrometer Upgrade (GSU)

- 2.1. Zaprojektowanie, wykonanie oraz zintegrowanie spektrometru gamma z (nowym) systemem akwizycji danych.
- 2.2. Wyznaczenie funkcji odpowiedzi detektorów na promieniowanie gamma oraz neutrony.
- 2.3. Instalacja oraz testy spektrometru na tokamaku JET.

Spektrometr gamma w tokamaku JET

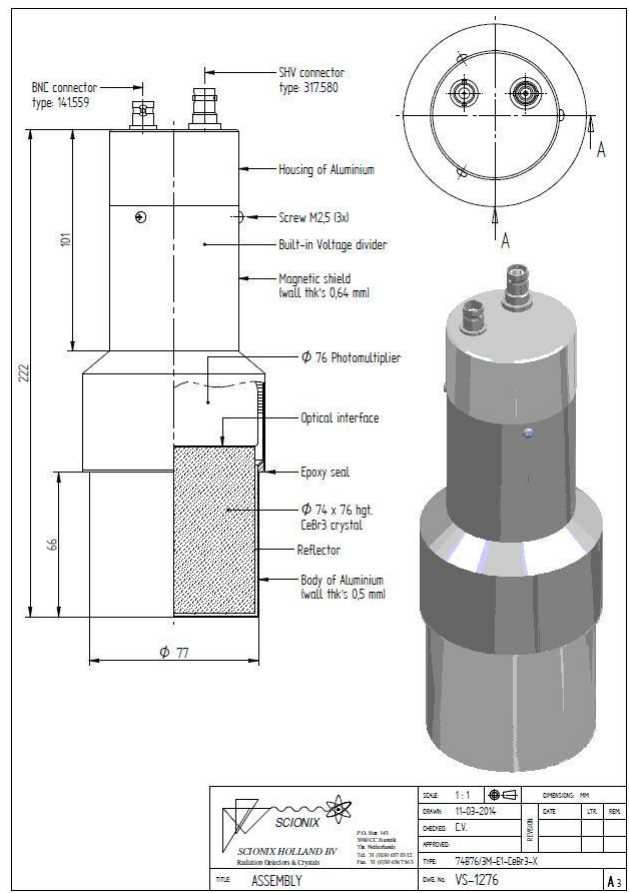


Spektrometr gamma w tokamaku JET

tylko stąd dostęp do scyntylatora



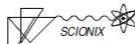
3" x 3" CeBr₃ (schemat)



dzielnik napięcia

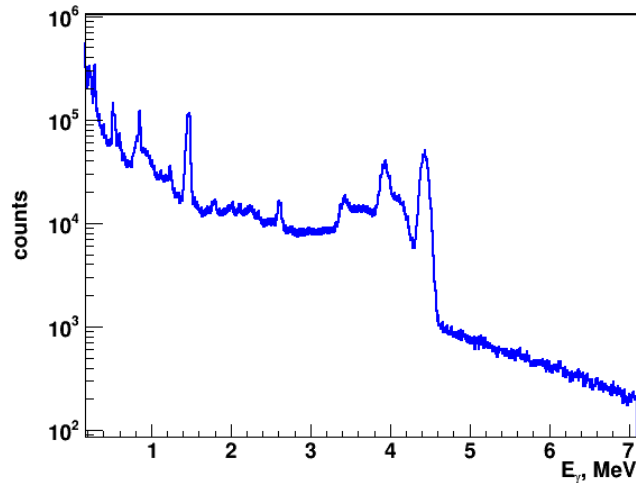
PMT

scyntylator

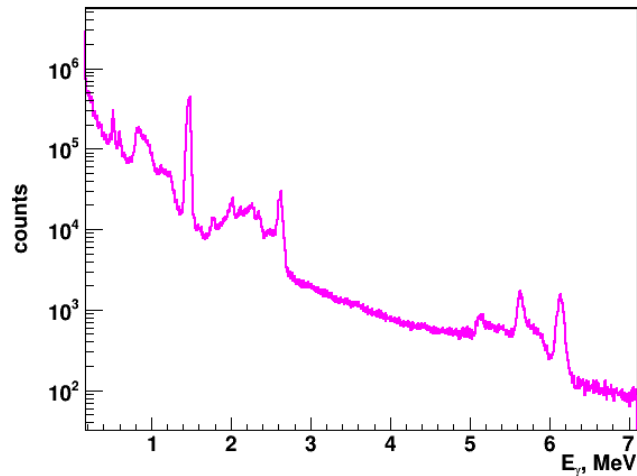
 SCIONIX HOLLAND BV Radiation Detectors & Crystals	SCALE: 1:1	DATE: 11-03-2014	DESIGNED: HPH
	DATE: 11-03-2014	DATE:	DATE:
	DESIGNED: EV	DATE:	DATE:
	APPROVED:	DATE:	DATE:
TITLE: ASSEMBLY	DWG. No: VS-1276	TYPE: 74x76/3M-E1-CeBr3-X	A 3

3" x 3" LaBr3

PuBe: $E_{\gamma} = 4.4 \text{ MeV}$



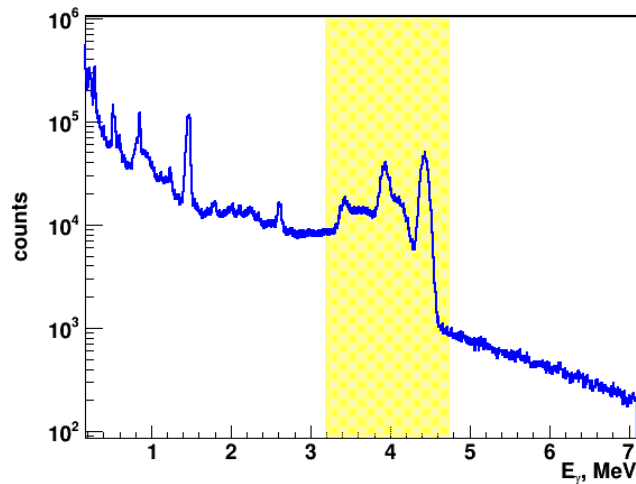
PuC: $E_{\gamma} = 6.1 \text{ MeV}$



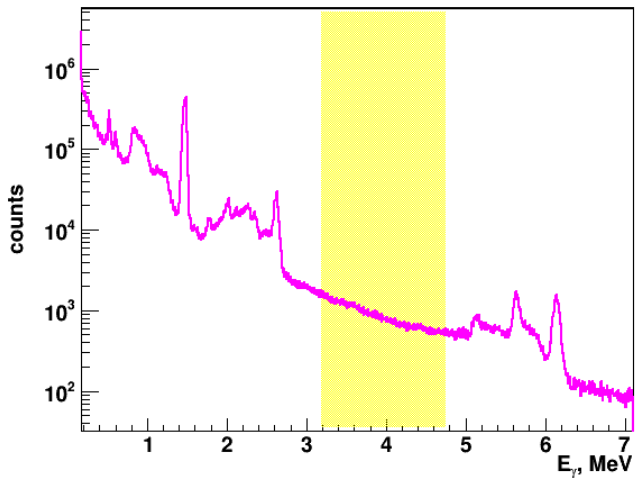
Ł.Świdorski i in.

3" x 3" LaBr3

PuBe: $E_{\gamma} = 4.4 \text{ MeV}$



PuC: $E_{\gamma} = 6.1 \text{ MeV}$



Ł.Świdorski i in.

LRM monitor traconych cząstek alfa

nie ma ostatecznej decyzji

kolejne spotkanie 22.10.2014

3. Budowa nowego układu do diagnostyki cząstek alfa w tokamaku JET

Lost Alpha Gamma Rays Monitor (LRM)

- 3.1. Wyznaczenie funkcji odpowiedzi detektorów na promieniowanie gamma w eksperymentach DT.
- 3.2. Zaprojektowanie detektorów dla diagnostyki KA4.
- 3.3. Ocena przydatności metod Monte Carlo przy testowaniu fizycznych modeli zjawisk w plazmie DT.
- 3.4. Wykonanie i instalacja detektorów dla diagnostyki KA4 na tokamaku JET.

PODSUMOWANIE

- Udział w trzech projektach, w tym jeden to budowa nowego układu
- Prace obliczeniowe, projektowe, budowa detektorów oraz testowanie w NCBJ oraz na tokamaku JET
- Zaangażowanie zespołu na 4 lata z perspektywą kontynuowania na ITERze

JET → ITER → DEMO