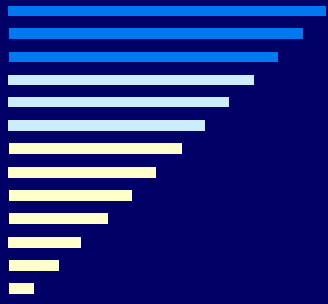


Nowe scyntylatory w ochronie granic

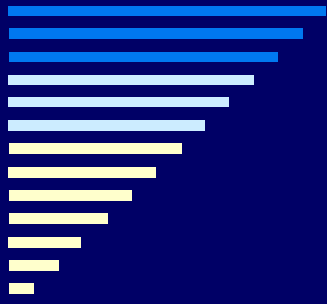
Agnieszka Syntfeld-Każuch
Instytut Problemów Jądrowych, Świerk

13 maja 2009



Główne zagadnienia

- ❑ Scyntylatory – najnowsze obserwacje, odkrycia
- ❑ Wykrywanie materiałów niebezpiecznych – kryteria doboru optymalnego detektora
- ❑ Detekcja neutronów



O nas

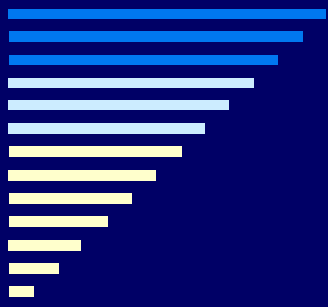
- Wrzesień 2001 – wzrost zainteresowania wykrywaniem materiałów niebezpiecznych na przejściach granicznych – kontrakty IAEA, Target (Niemcy) – obecnie ICx Technologies, **projekt AiD** (80 mln PLN /6 lat/)

„Rozwój specjalizowanych systemów wykorzystujących **AKCELERATORY** i **DETEKTORY** promieniowania jonizującego do terapii medycznej oraz wykrywania materiałów niebezpiecznych i odpadów toksycznych”

Radiografia X

Aktywacja neutronowa

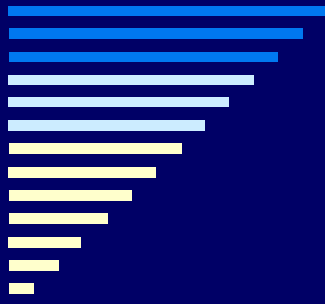
Fotorozszczepienie



Scyntylator - charakterystyka

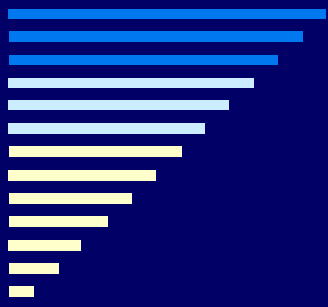
Scyntylator idealny

- ❑ Duża wydajność świetlna (liczba fotonów per MeV)
- ❑ Szybki impuls świetlny
- ❑ Wysoka wydajność detekcji (gęstość, Z_{eff})
- ❑ Bardzo dobra energetyczna zdolność rozdzielcza
- ❑ Proporcjonalny
- ❑ Brak poświaty
- ❑ Odporny mechanicznie, nie chłonie wilgoci, TANI !



Własności wybranych scyntylatorów

Parametr	NaI(Tl)	CsI(Tl)	⁶ LiI(Eu)	LaBr ₃ (Ce)
Gęstość [g/cm ³]	3,67	4,51	4,08	5,3
Czas rozpadu τ	230 ns	<u>730 ns</u> 3.2 μ s, 16 μ s	1,2 μ s	18 ns
Z _{eff}	50	54	53	46,9
Ilość światła [fotony/MeV]	40 000	53 000	15 000	60 000
Widmo emisyjne [nm]	420	550	475	380
Nieproporcjonalność dla 22 keV [%]	+20	+17/+11	+14	-5
$\Delta E/E$ dla 662 keV [%]	6,5	5,8/5,2	7,5	2,7

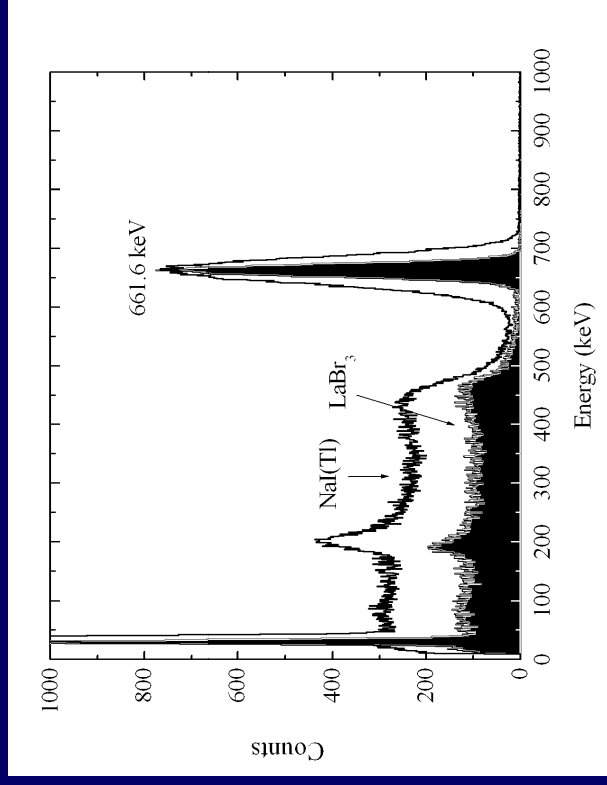


LaBr₃(Ce) – bezkonkurencyjny, ale...

opatentowany (Saint-Gobain Crystals)

wysoka cena: 3" x 3" **30 000 €**

wewnętrzna radioaktywność (²²⁷Ac, 1,6-2,6 MeV, mniej niż 0,15 zliczeń/s*cm³)



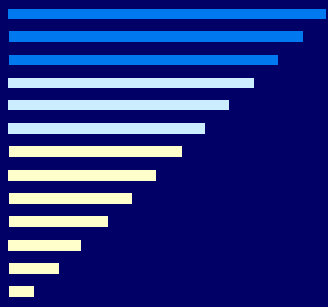
1"x1" LaBr₃ vs. 1"x30 mm NaI(Tl)

Dwa razy lepsza energetyczna
zdolność rozdzielcza LaBr₃

Fotopik/Compton

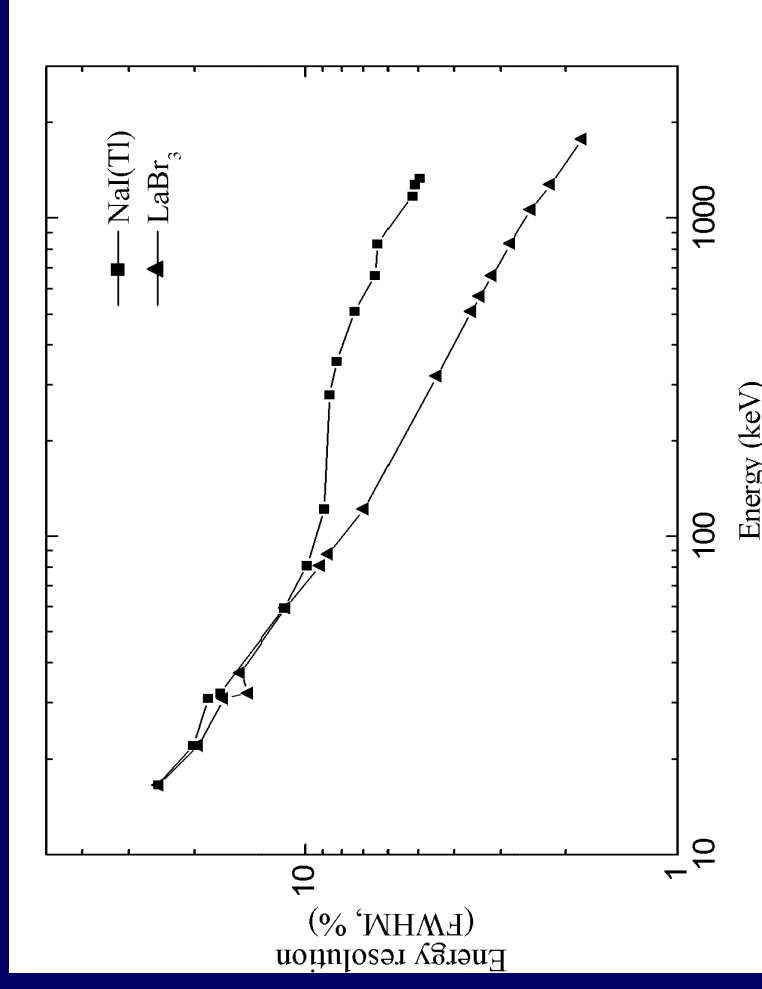
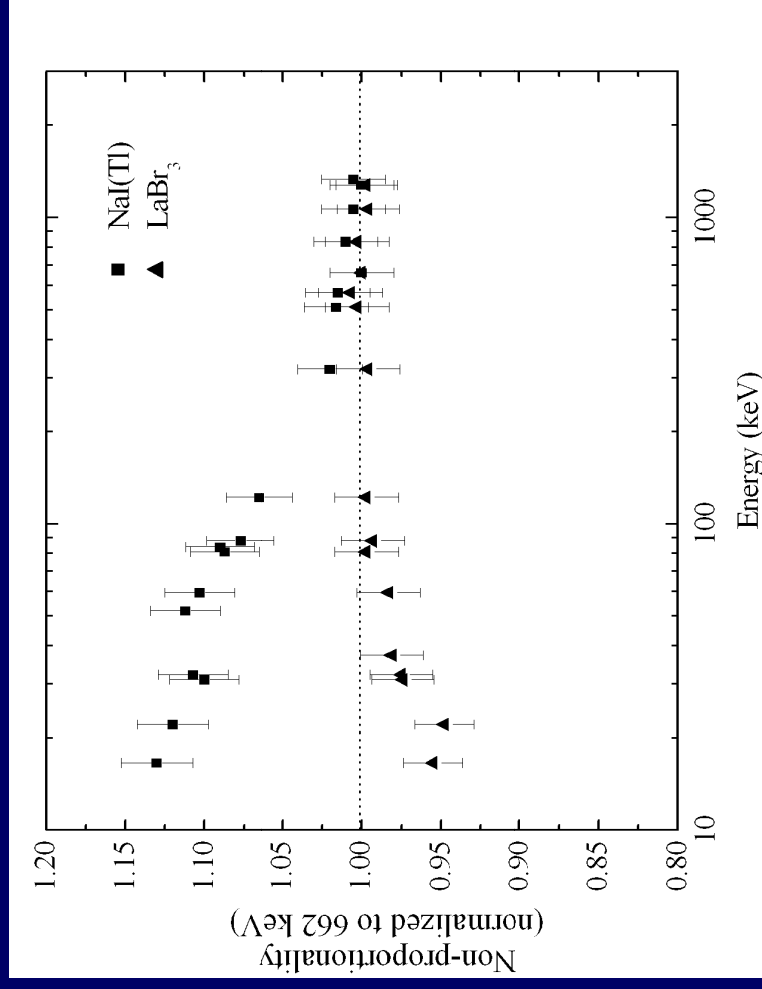
LaBr₃ 5,8

NaI(Tl) 3,2

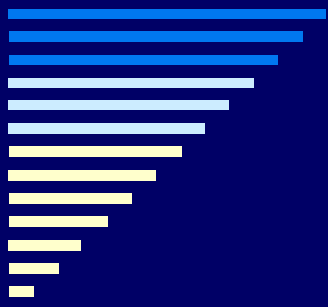


LaBr₃ – nieproporcjonalność, energetyczna zdolność rozdzielcza

A. Syntfeld et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 53 (2006) 3938



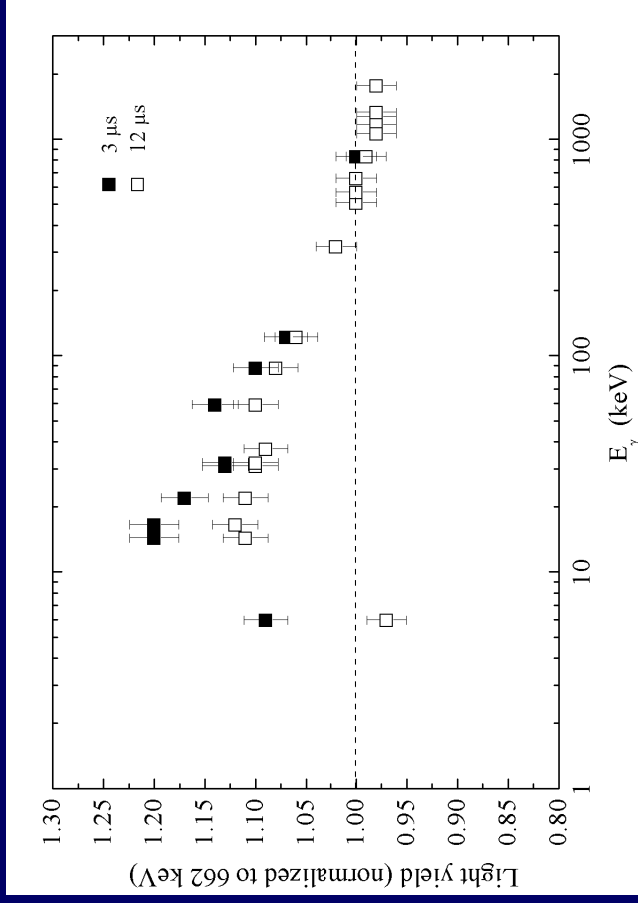
1" x 1" LaBr₃ vs. 1" x 30 mm NaI(Tl)



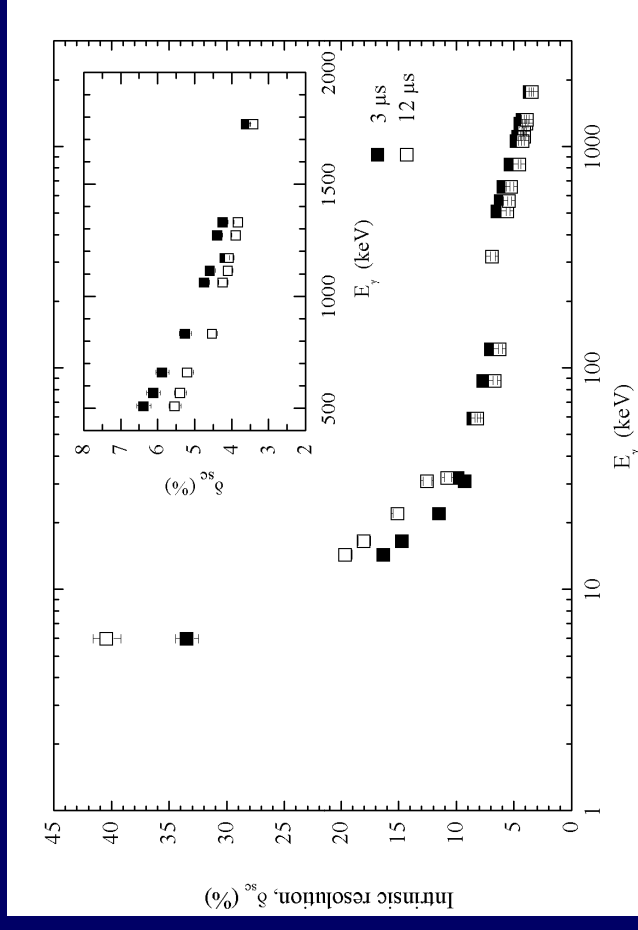
CsI(Tl) - optymalizacja

- Długie całkowanie impulsu świetlnego (kilkanaście μs) poprawia nieproporcjonalność i energetyczną zdolność rozdzielczą

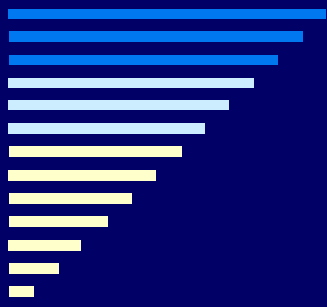
A. Syntfeld-Każuch et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 54 (2007) 1836



Krzywa nieproporcjonalności

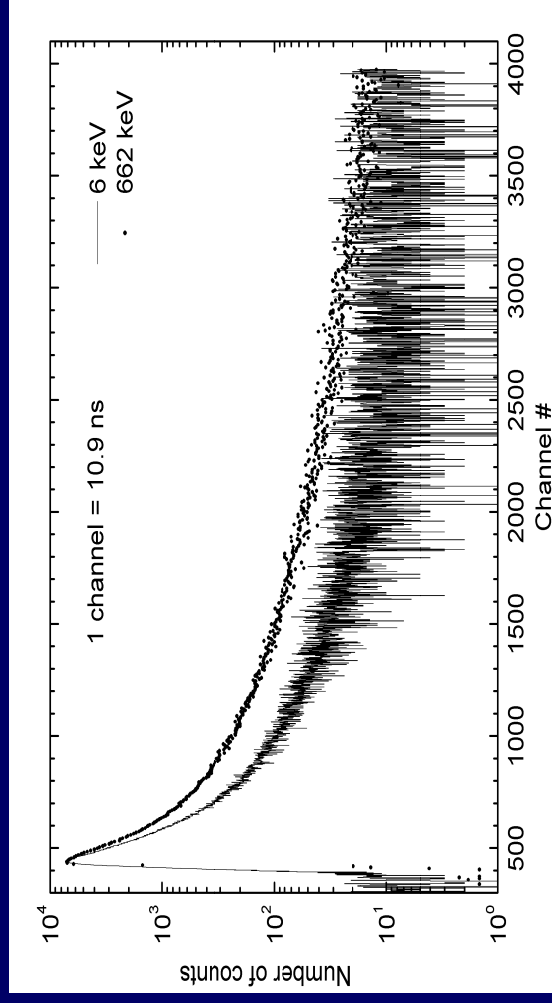


Wewnętrzna zdolność rozdzielcza vs. E_γ



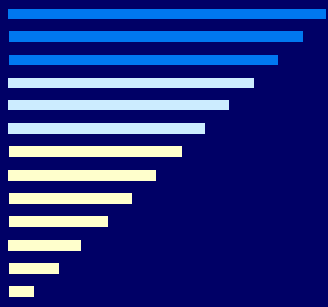
CsI(Tl) – impuls świetlny

- Kształt impulsu świetlnego zależy od energii promieniowania γ : 730 ns (40-50%), 3,1 μ s, 16 μ s
- Dla $E_\gamma < 60$ keV redystrybucja intensywności w kierunku od wolnych składowych do szybkiej
- Skrócenie czasu trwania impulsu wraz ze wzrostem dE/dx (elektrony, cząstki α)



↓ Zakres 50 μ s

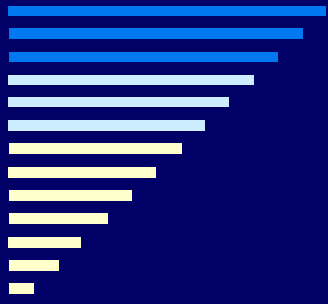
A. Syntfeld-Każuch et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 55 (2008) 1246



Wykrywanie materiałów niebezpiecznych (jądrowe, narkotyki, odpady toksyczne)

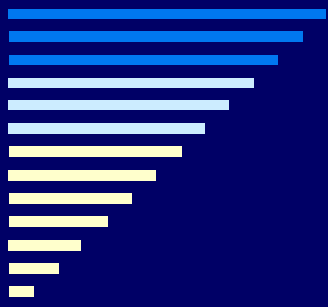
- Wg IAEA: materiały radioaktywne naturalnie występujące w przyrodzie (NORM), specjalne materiały jądrowe (SNM), radioizotopy medyczne, przemysłowe
- Specjalne materiały jądrowe : ^{233}U , ^{239}Pu
w tym: Reactor Grade Pu (do 93% ^{239}Pu)
Weapons Grade Pu (powyżej 93% ^{239}Pu)
HEU (highly enriched U np. 90% ^{235}U)
- Próbki plutonu: ^{239}Pu + ^{240}Pu + ^{241}Pu + ^{242}Pu
 ^{239}Pu : 20 szybkich neutronów na sekundę/kg oraz promieniowanie γ 300-770 keV
 ^{240}Pu : 10^5 razy więcej neutronów niż ^{239}Pu

Detekcja neutronów !!



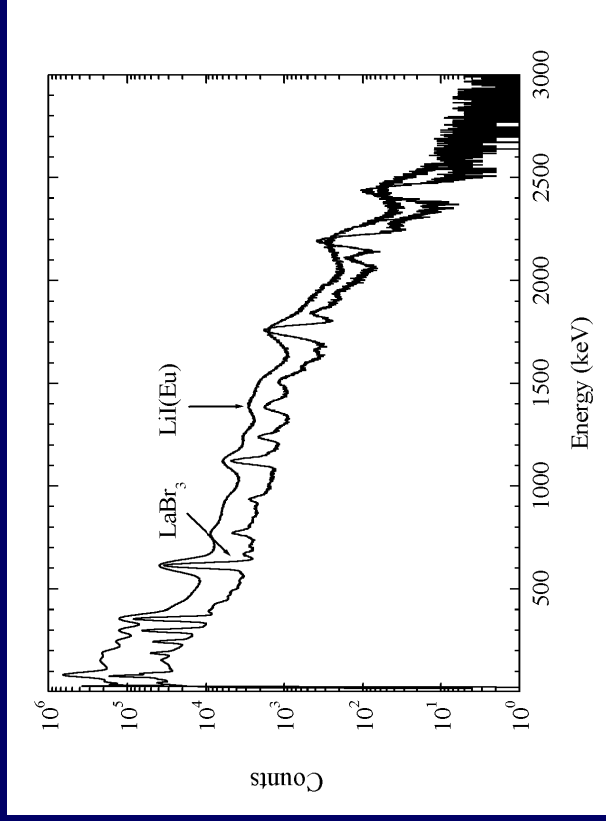
Kryteria doboru detektorów promieniowania γ

- ❑ **Wysoka czułość** pozwalająca znaleźć słabe źródło promieniowania γ (duża objętość zapewnienia wykrycie rozproszonego promieniowania γ)
- ❑ **Dobra energetyczna zdolność rozdzielcza** – w szczególności w zakresie niskich energii, gdzie gęstość linii γ wzrasta)
- ❑ Szybki czas odpowiedzi (szybki czas zaniku impulsu lub zbierania ładunku, CdZnTe)
- ❑ Możliwość pracy detektora przy dużych tempach zliczeń, do 100 k z/s (sytuacje awaryjne)
- ❑ Inne (odporność mechaniczna, stabilność temperaturowa, niska cena, dostępność)



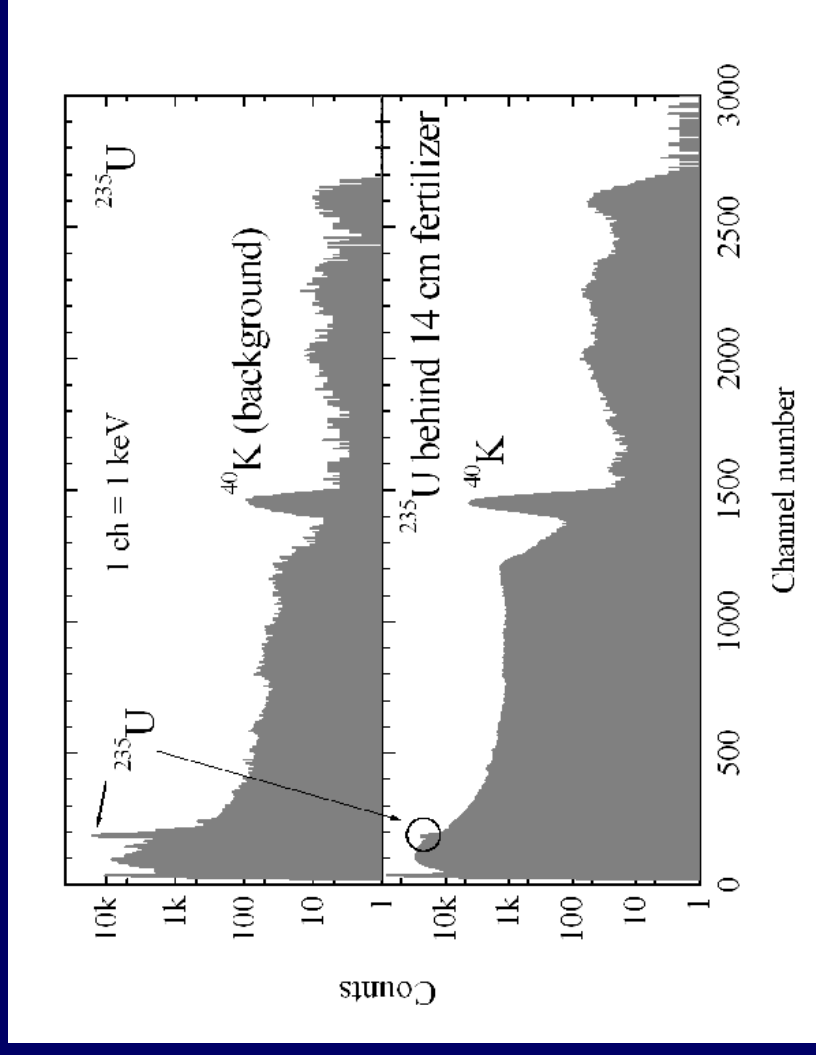
LaBr₃ – wykrywanie materiałów jądrowych

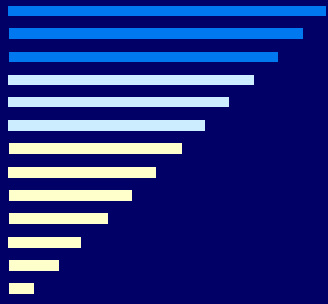
²²⁶Ra (NORM)



Linia 186 keV nadal widoczna!

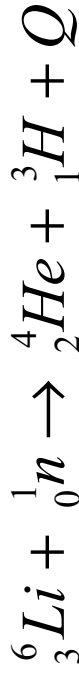
LEU (4,46% ²³⁵U)



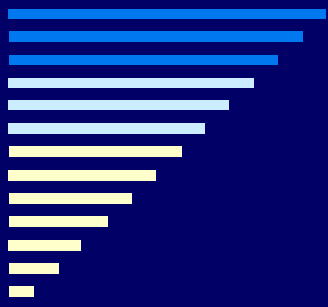


Detektory neutronów – ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$

- Wysoko wzbogacony litem-6 kryształ $\text{LiI}(\text{Eu})$ (96% ${}^6\text{Li}$) jako detektor neutronów termicznych ($\sigma_{\text{th}} = 940 \text{ b}$)



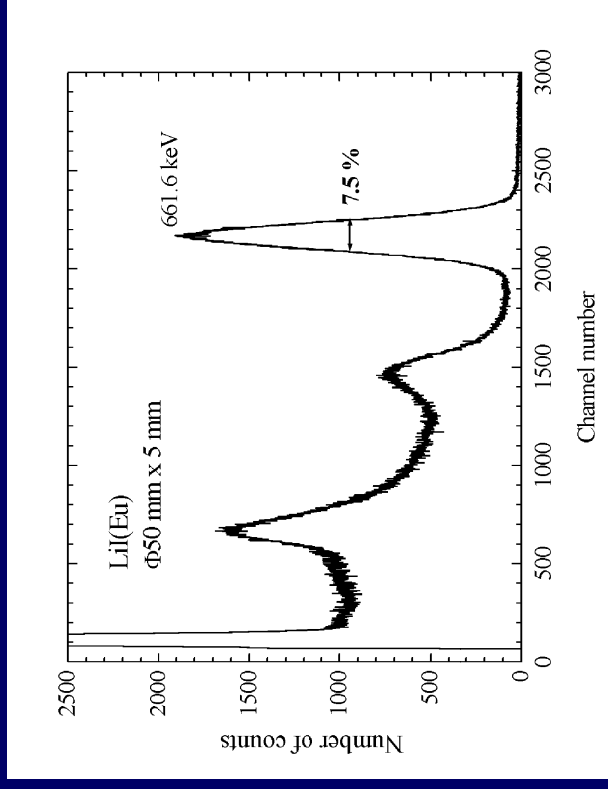
- $Q = 4.78 \text{ MeV}$, gdzie α (2,05 MeV) oraz t (2,73 MeV)
- Naładowanym cząstką rejestrowanym w scyntylatorze odpowiada duża gęstość jonizacji wzdłuż trajektorii – wygaszenie ilości światła generowanego w kryształ (GEE – gamma equivalent energy $\neq Q$)



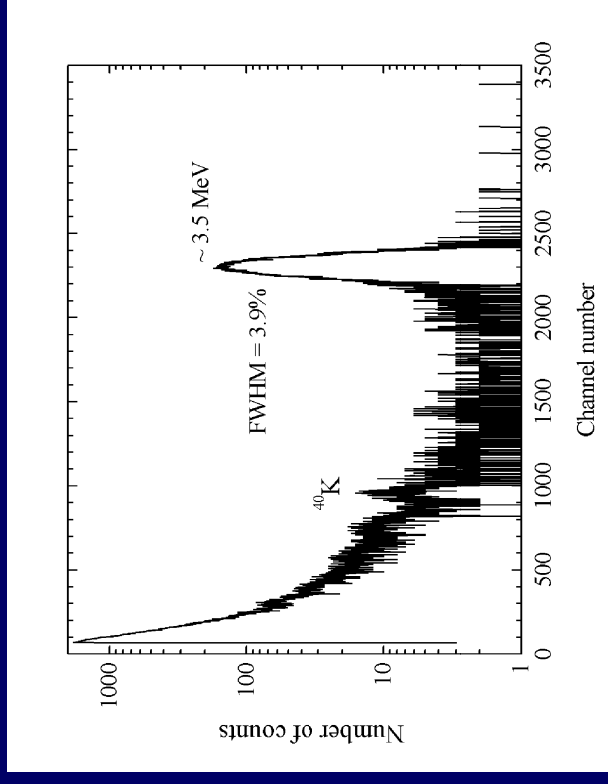
${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ – spektrometria γ i neutronów

- $\text{Ø}50 \times 5$ mm + światłowód + XP5200 PMT

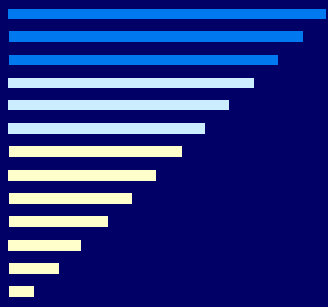
A. Syntfeld et al. IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 3151



${}^{137}\text{Cs}$, $t_{\text{RC}} = 6 \mu\text{s}$

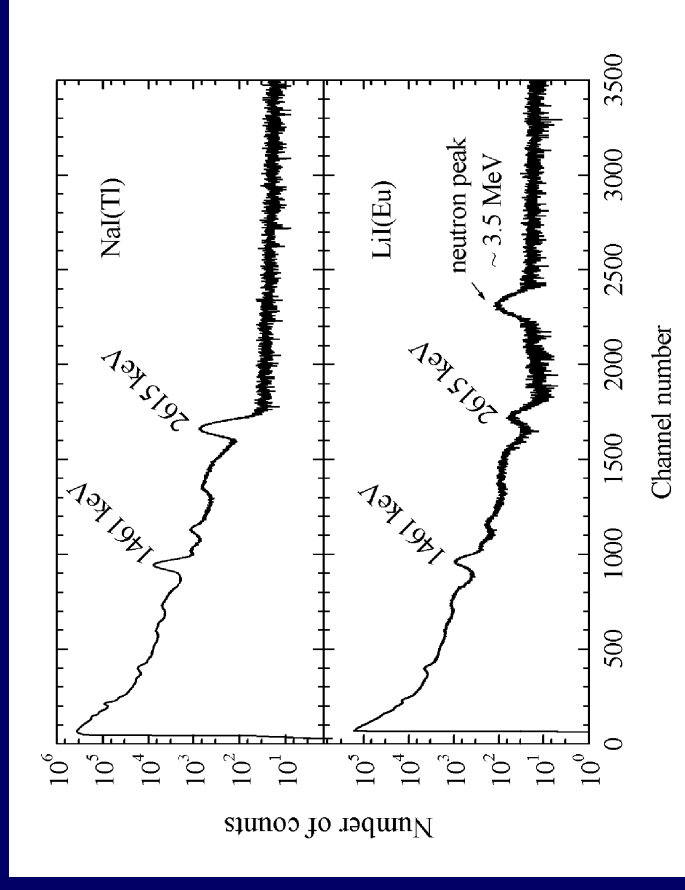
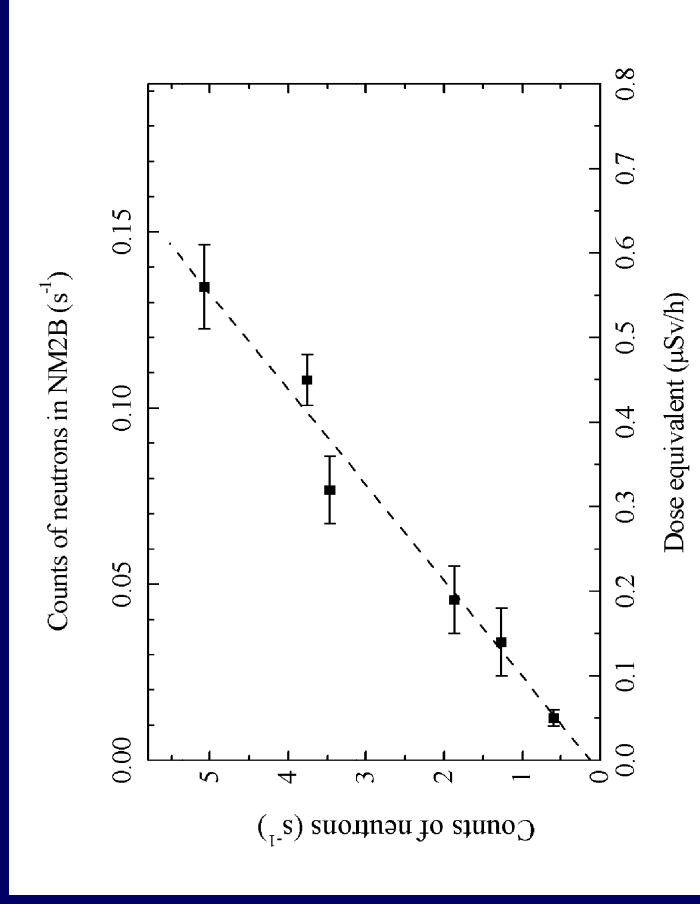


Źródło neutronów Pu-Be
osłonięte parafiną i ołowiem

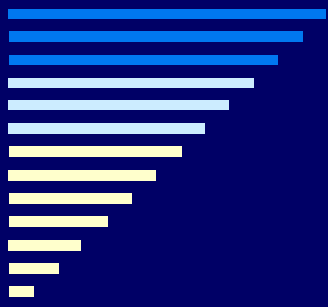


${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ – spektrometria neutronów

- $\varnothing 50 \times 5$ mm + światłowod + XP5200 PMT
- Monitor neutronowy NM2B do pomiaru dawki promieniowania



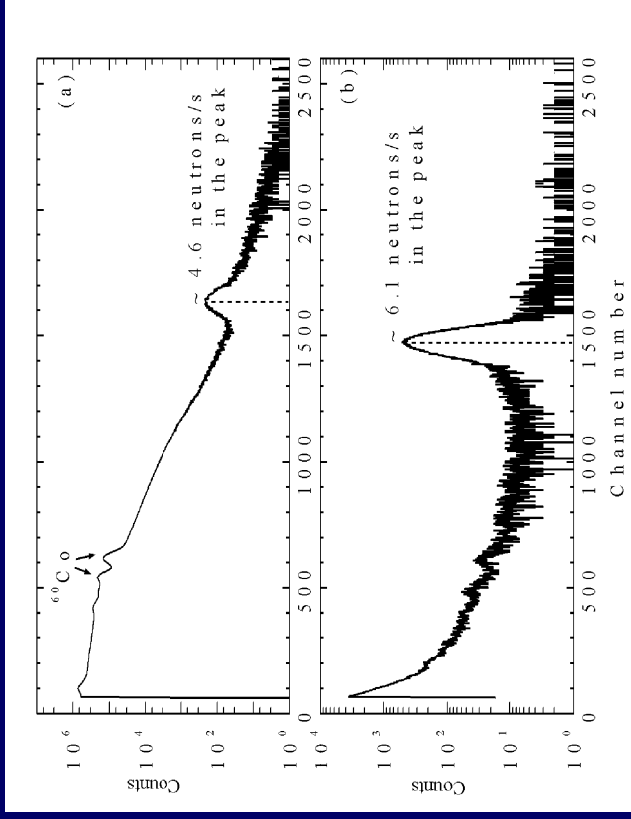
Pomiar tła, 93 h, **0,025 neutronów/s**



$^6\text{Li}(\text{Eu})$ – spektrometria neutronów

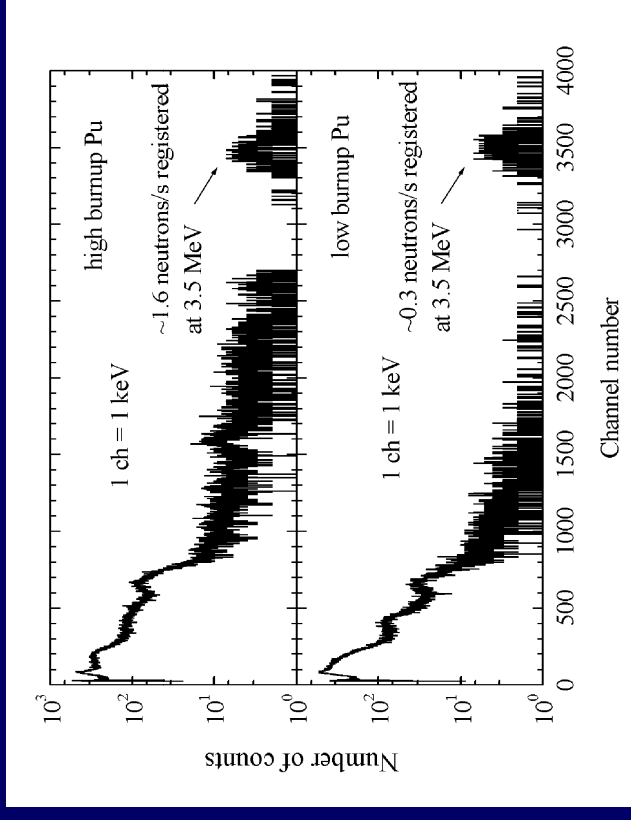
$^6\text{Li}(\text{Eu})$ w silnym polu promieniowania γ Dwie próbki Pu + 3 cm Pb, bez moderatora Pu-Be + ^{60}Co (kilkanaście MBq)

100 000 zliczeń- γ /s – górny rysunek



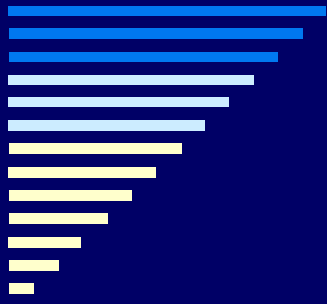
100 zliczeń- γ /s – dolny rysunek

High burnup Pu – 61% ^{239}Pu



Low burnup Pu – 93% ^{239}Pu

Nowe scyntylatory
w ochronie granic

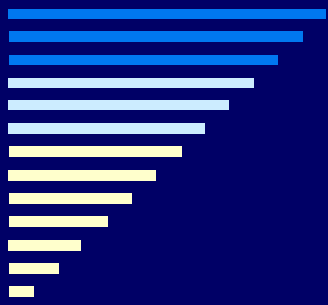


Dyskryminacja n/ γ dla ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$

- ❑ Detektor ${}^3\text{He}$ + moderator, jeśli małe rozmiary - to wysokie ciśnienie gazu (powyżej 2.8 atm)
- ❑ Alternatywa dla ${}^3\text{He}$ -> ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ pracujący (?) w mieszanym polu γ -n
- ❑ Dyskryminacja n/ γ spełniona (pik neutronowy $\sim 3,5$ MeV)
- ❑ $\Delta E/E$ @ 662 keV **7,5%** eliminuje scyntylator na korzyść LaBr_3
- ❑ Propozycja*: ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ jako licznik neutronów + Si-PIN

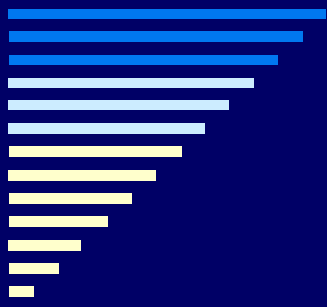
Si-PIN jako fotodetektor dla ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ i detektor promieniowania γ jednocześnie -> konieczna dyskryminacja kształtu impulsu z fotodiody (DSP)

* G. Pausch, J. Stein, *IEEE Trans. Nucl. Sci* 55 (2008) 1413



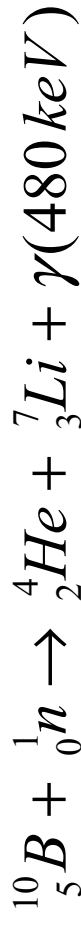
Ciekłe scyntylatory neutronowe

- Prognozowany wzrost cen detektorów ^3He -> scyntylatory ciekłe, kompozytowe
- Ciekłe scyntylatory organiczne wypełnione dodatkowo ^{10}B : **BC523A** oraz **EJ309B5**
- Jednoczesna detekcja neutronów i promieniowania γ – konieczne rozróżnianie po kształcie impulsu (PSD, Pulse Shape Discrimination)

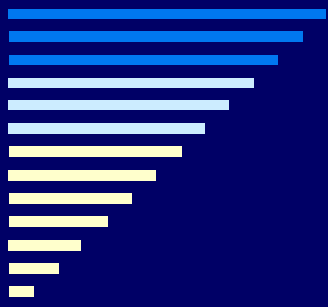


BC523A oraz EJ309B5

- Scyntylatory ciekłe jako detektory szybkich neutronów
- Dodanie ^{10}B – detekcja neutronów wolnych poprzez reakcję (n, α) $Q = 2.3 \text{ MeV}$



- Scyntylatory ciekłe – tanie, duże objętości, wada: niska temperatura zapłonu, BC523A – $8 \text{ }^\circ\text{C}$
- Scyntylator EJ309B5 (5% ^{10}B) + **$144 \text{ }^\circ\text{C}$**
- Niska wydajność świetlna dla zdarzeń wychwytu neutronu wolnego -> konieczne użycie fotopowielacza o wysokiej wydajności kwantowej (35%)



BC523A oraz EJ309B5

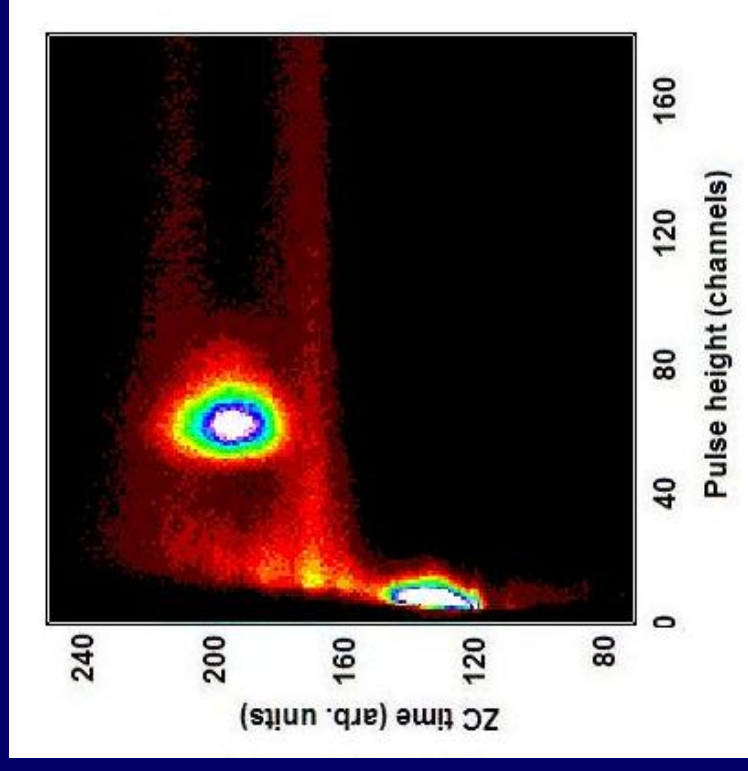
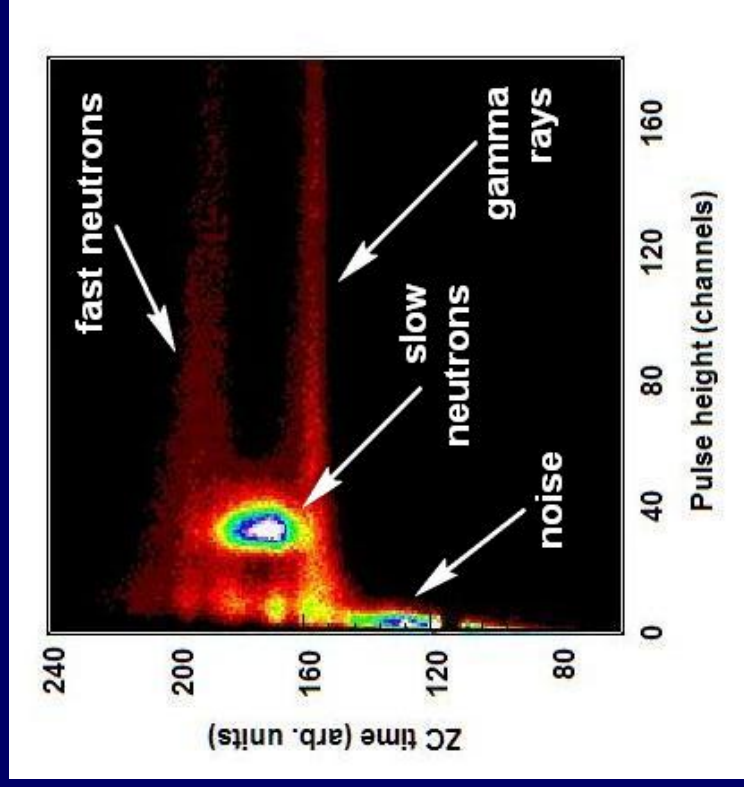
Ł. Świderski et al.. złożone do *IEEE Trans. Nucl. Sci.*

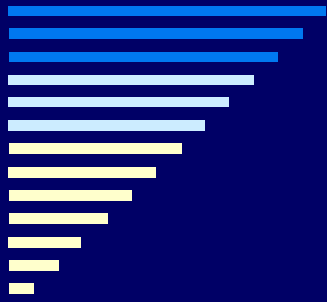
BC523A2 2%¹⁰B,

Pu-Be + parafina + ołów

EJ309B5 5%¹⁰B

Pu-Be + parafina + ołów





Podsumowanie

- Spektrometria γ – $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$: duża wydajność świetlna, szybki impuls, prawie proporcjonalny, stabilny termicznie, bardzo dobra energetyczna zdolność rozdzielcza (wysoka cena!)
- Spektrometria neutronów – ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ raczej jako licznik neutronów, łącznie z Si-PIN mały przenośny instrument (analiza wysokości i szerokości impulsu w dyskryminacji n- γ)
- Poszukiwanie alternatyw dla ${}^3\text{He}$: BC523A i EJ309B5, dodatkowo wypełnione ${}^{10}\text{B}$ (detekcja neutronów wolnych) – w fazie testów