

Rynek scyntylatorów A.D. 2015 - quo vadis?



Winicjusz Drozdowski

Zespół Spektroskopii Materiałów Scyntylacyjnych i Fosforów

Zakład Optoelektroniki

Instytut Fizyki

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

ul. Grudziądzka 5

87-100 Toruń

skrót prezentacji przedstawionej podczas

Seminarium IF ZUT

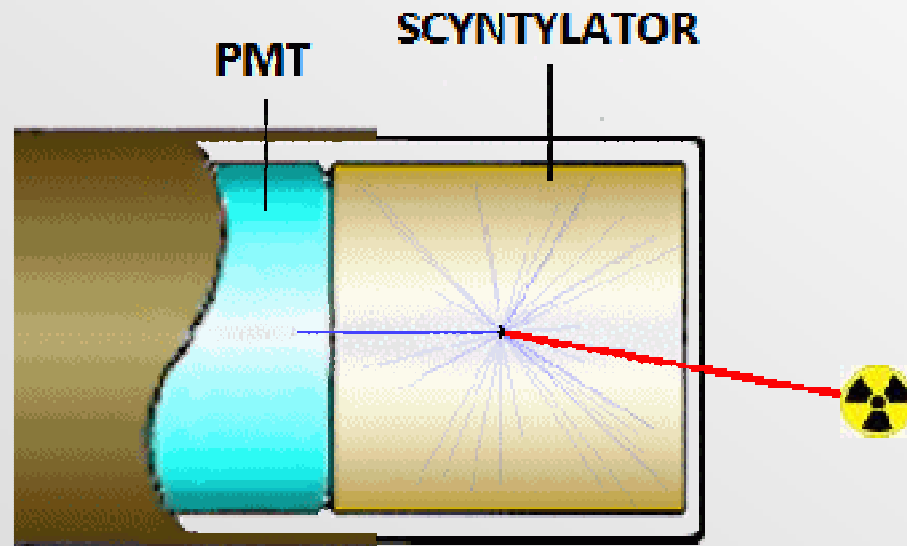
Szczecin, 2015-05-29

Plan

- zjawisko scyntylacji
- rys historyczny
- nowoczesne zastosowania scyntylatorów
 - $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$
 - $\text{LuAG}:\text{Pr}$ i $\text{LuYAG}:\text{Pr}$
- quo vadis?
 - $\text{LuI}_3:\text{Ce}$
 - $\text{SrI}_2:\text{Eu}$
 - $\text{GAGG}:\text{Ce}$

Zjawisko scyntylacji

- radioluminescencja - emisja światła (najczęściej widzialnego lub nadfioletu) z danej próbki przy wzbudzeniu promieniowaniem jonizującym
- scyntylator - materiał wykazujący radioluminescencję
- scyntyłacja - błysk świetlny powstający w wyniku zaabsorbowania przez scyntylator kwantu lub cząstki jonizującej
- fazy procesu scyntylacji
 - konwersja
 - transfer
 - luminescencja



Transfer energii

- trzy podstawowe mechanizmy
 - transfer ekscytonowy
 - sekwencyjny wychwyt nośników ładunku
 - transfer promienisty
- istotne znaczenie dla scyntylacji - możliwość kompensacji niskiej wydajności konwersji czy luminescencji przez efektywny transfer

Luminescencja

- najlepiej zbadana faza procesu scyntylacji
- rodzaje wykorzystywanych emisji
 - emisje własne (często o charakterze ekscytonowym)
 - emisje domieszek pełniących rolę centrów luminescencji
- mnogość scyntylatorów o bardzo wysokiej wydajności kwantowej luminescencji, np. materiałów z szeroką przerwą energii, bazujących na interkonfiguracyjnej emisji $4f^{n-1}5d \rightarrow 4f^n (d-f)$ jonów ziem rzadkich

Potencjalne scyntylatory

- kryształy tlenków lutetu, itru i gadolinu oraz fluorków ziem alkalicznych
 - szeroka przerwa energii
 - łatwość i stabilność hodowli
- aktywacja jonami ziem rzadkich
 - szybka i wydajna luminescencja *d-f*
 - dobre dopasowanie do sieci krystalicznej (RE³⁺ bez kompensacji w tlenkach; RE³⁺ z kompensacją i RE²⁺ bez kompensacji we fluorkach)

Rys historyczny



UMK
WFAiS

- schyłek XIX w.: CaWO_4 , ZnS i sole uranu pierwszymi scyntylatorami (Roentgen, Becquerel, Crookes, Rutherford)
- 1948 r.: NaI:Tl (Hofstadter)
- lata 80. i 90. XX w.: materiały aktywowane cerem
- początek XXI wieku: $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ (grupa Dorenbosa)
- zwrot zainteresowań badawczych w kierunku innych ziem rzadkich

Cechy scyntylatorów

- wydajność
- energetyczna zdolność rozdzielcza
- proporcjonalność
- szybkość
- widmo emitowanego promieniowania
- gęstość
- właściwości optyczne i mechaniczne
- odporność radiacyjna
- stabilność termiczna parametrów scyntylacyjnych
- cena

Zastosowania scyntylatorów

- badania naukowe
 - fizyka (jądrowa, wysokich i średnich energii)
 - astronomia
 - chemia
- diagnostyka medyczna
 - tomografia pozytonowa
- urządzenia przemysłowe
 - systemy kontroli ładunku
 - poszukiwania ropy naftowej

Fizyka wysokich energii

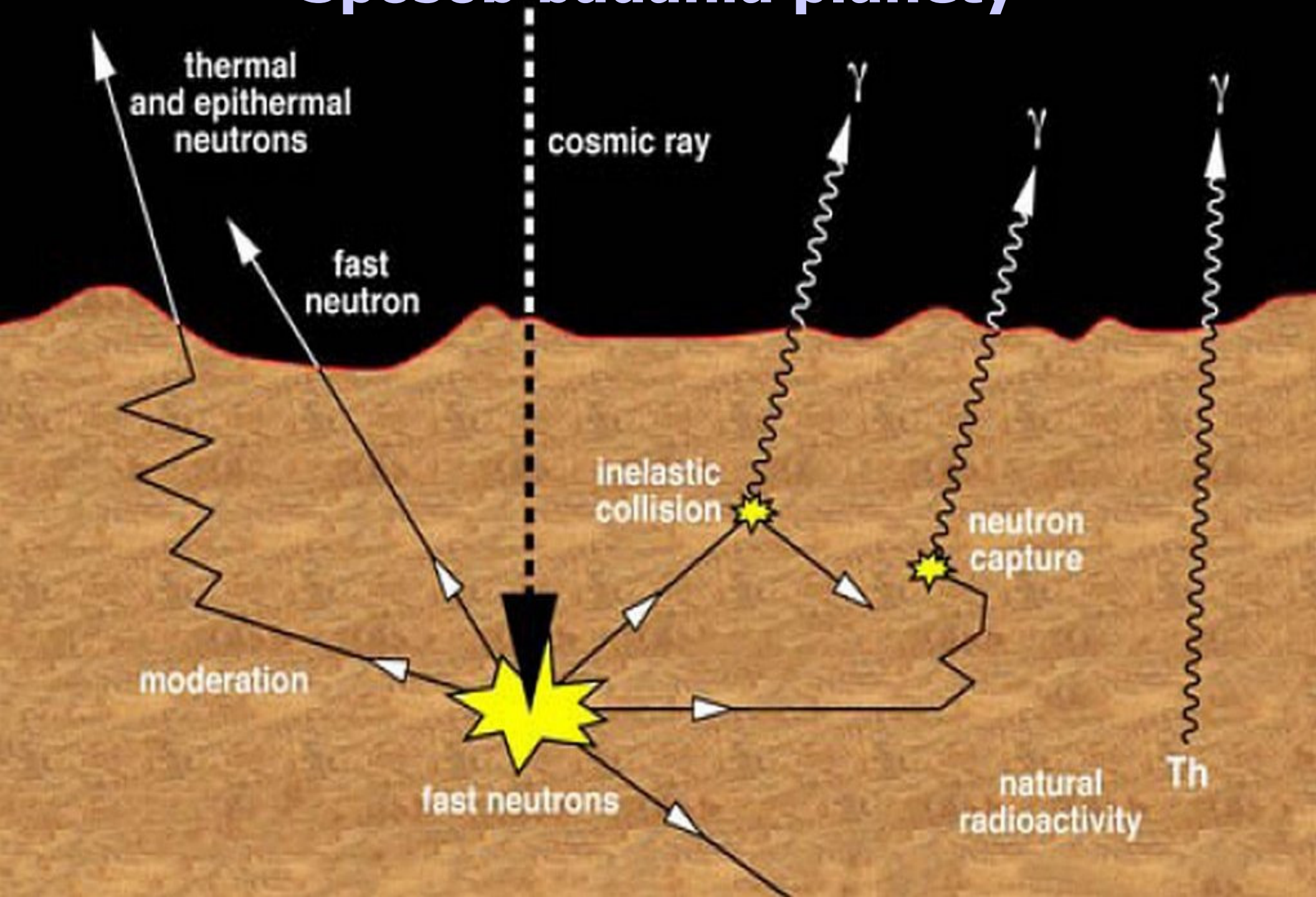
- scyntylatory gęste, szybkie i odporne radiacyjnie
- niezbyt wysoka cena ze względu na znaczne sumaryczne objętości
- niekoniecznie wysoka wydajność scyntylacji
- przykład: kalorymetr wchodzący w skład systemu CMS (*ang.* Compact Muon Solenoid) przy zderzaczu LHC (*ang.* Large Hadron Collider) w genewskim ośrodku CERN, zawierający ponad 60000 kryształów PbWO_4 w kształcie ostrosłupów ściętych o podstawach $26 \times 26 \text{ mm}^2$ i $22 \times 22 \text{ mm}^2$ oraz wysokości 230 mm

Misja BepiColombo



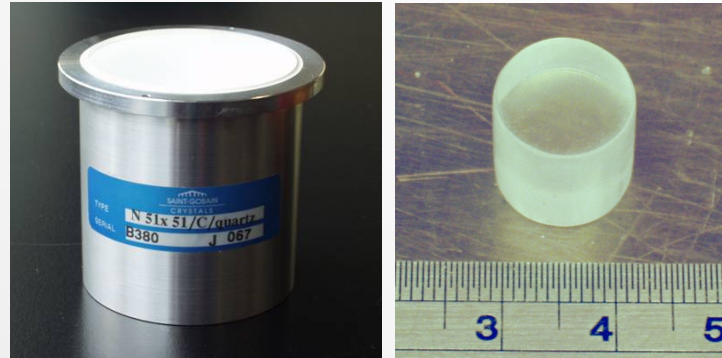
- misja Europejskiej Agencji Kosmicznej ESA (z udziałem Japońskiej Agencji Kosmicznej JAXA)
- cel: dokładne zbadanie budowy geologicznej Merkurego
- planowany termin: 2017-2026
 - start z Ziemi: styczeń 2017 r.
 - 7-letni lot w pobliże Merkurego
 - faza badawcza misji: 2024-2025
 - możliwość przesłużenia misji do 2026 r.

Sposób badania planety



LaBr₃:Ce

- debiut w 2001 r.
- $\rho = 5.1 \text{ g/cm}^3$
- $Y > 70000 \text{ ph/MeV}$
- $R \geq 2.5\%$ (662 keV)
- $\lambda_{max} \sim 370 \text{ nm}$
- $\tau \sim 15 \text{ ns}$
- higroskopijność
- trudna hodowla





Saint-Gobain Model 51551 BrillanCe 380 detectors with 2"x2" crystal integrally mounted to a 2.2" diameter PMT.



Saint-Gobain model 51551 BrillanCe 380 detector with a 2" x 2" crystal.

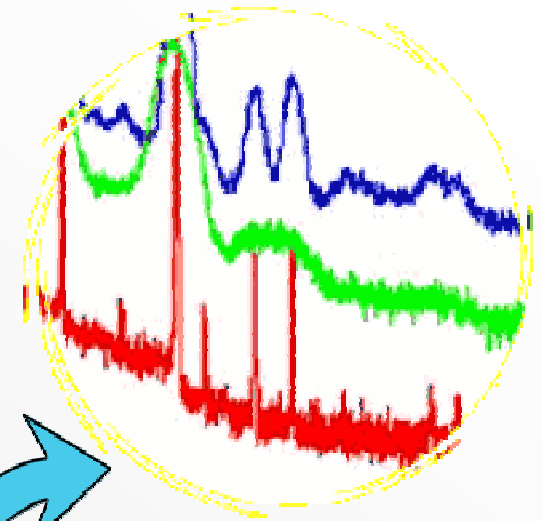
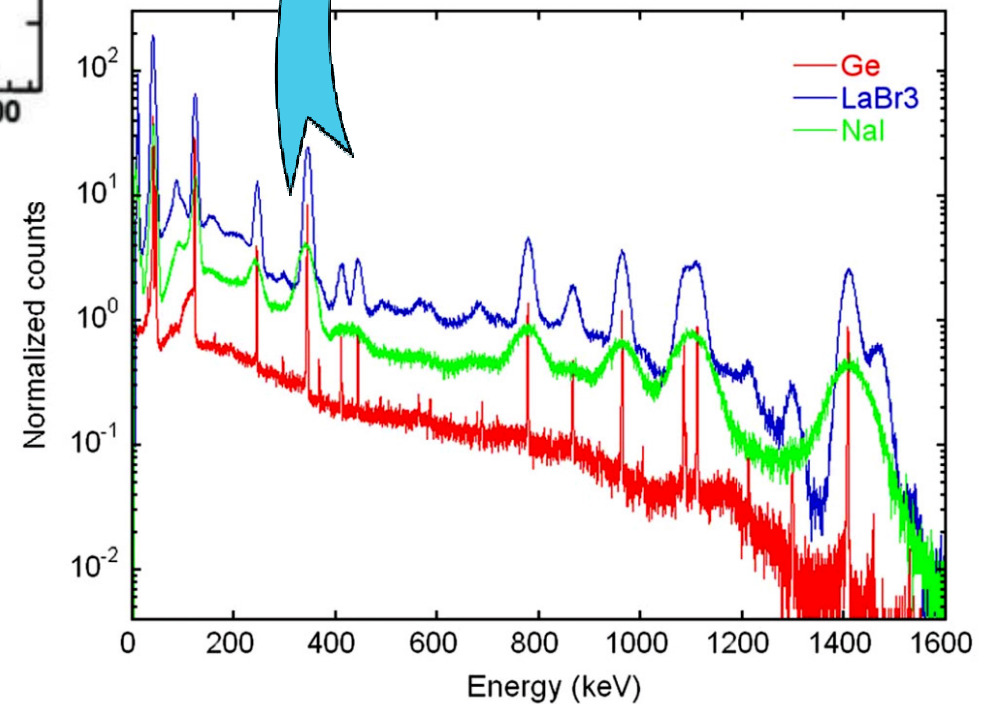
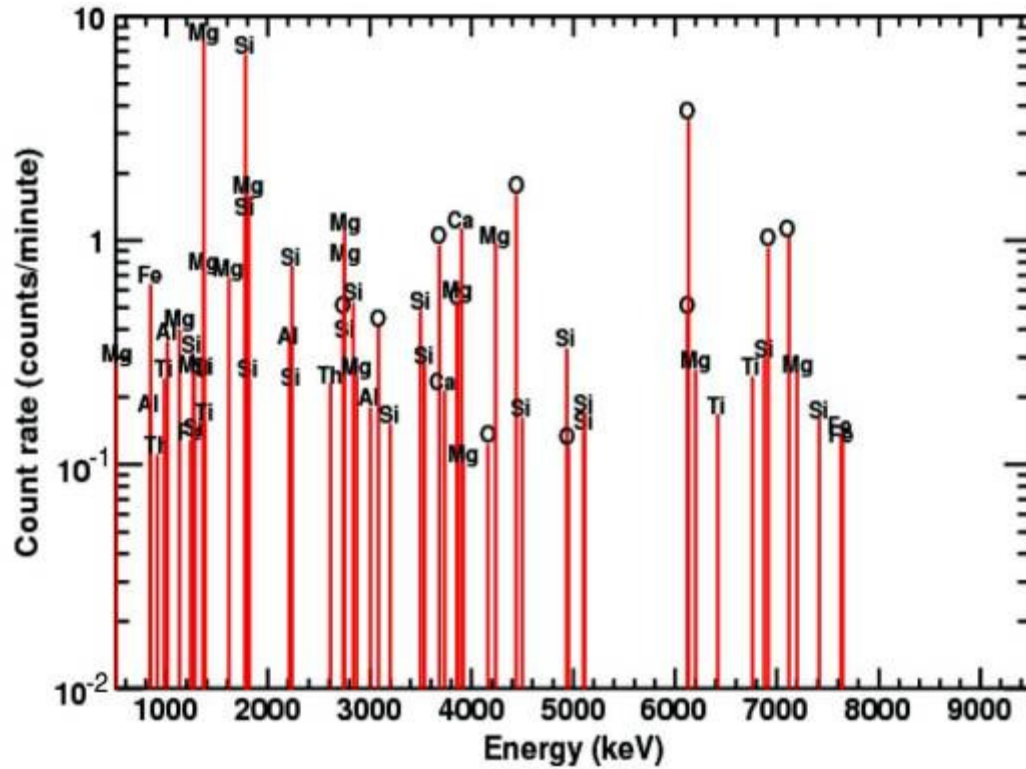


This 4" BrillanCe 380 bar illustrates the superb material uniformity we are achieving.

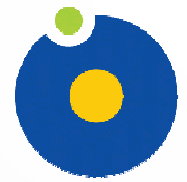

SAINT-GOBAIN

CRYSTALS

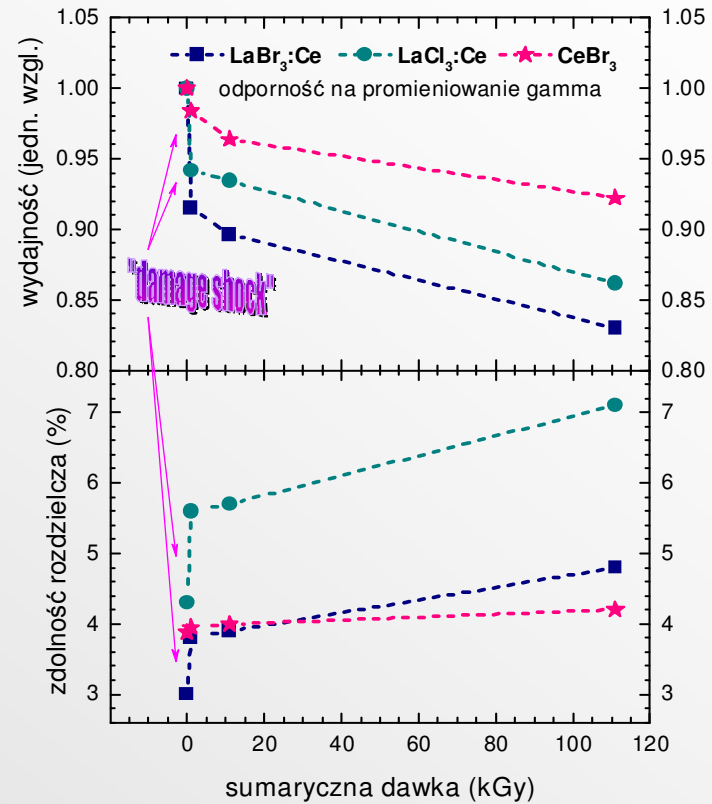
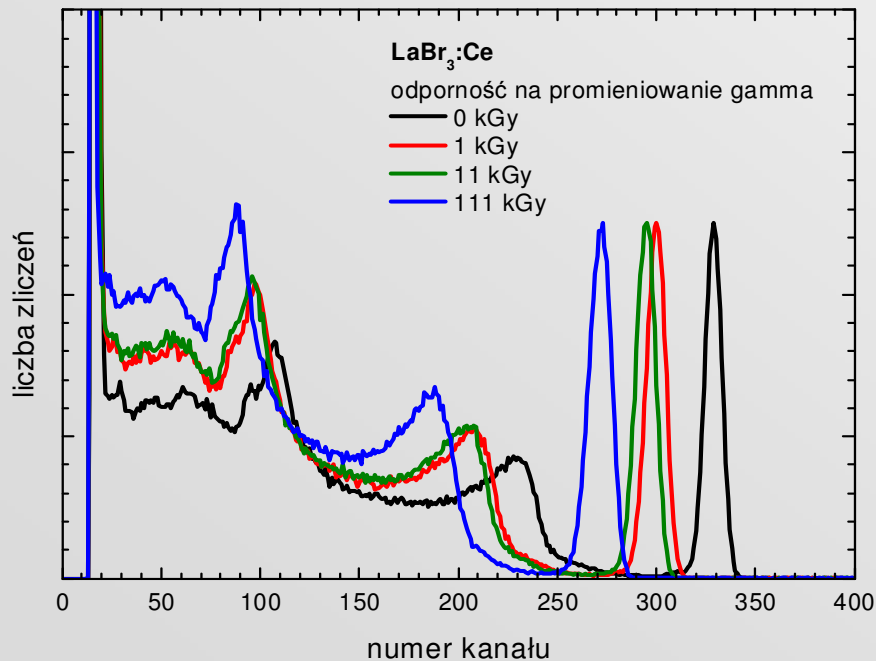
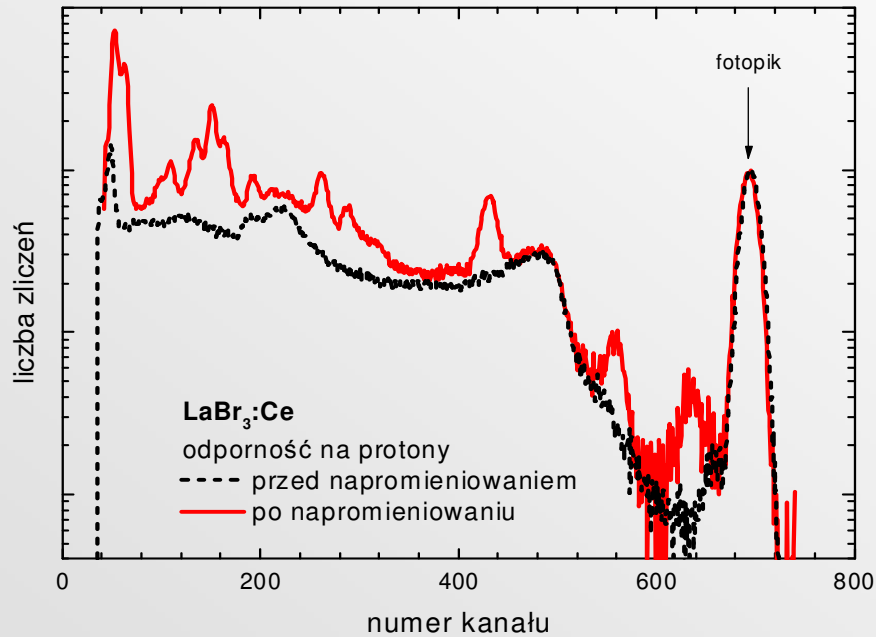
Zdolność rozdzielcza



Odporność radiacyjna



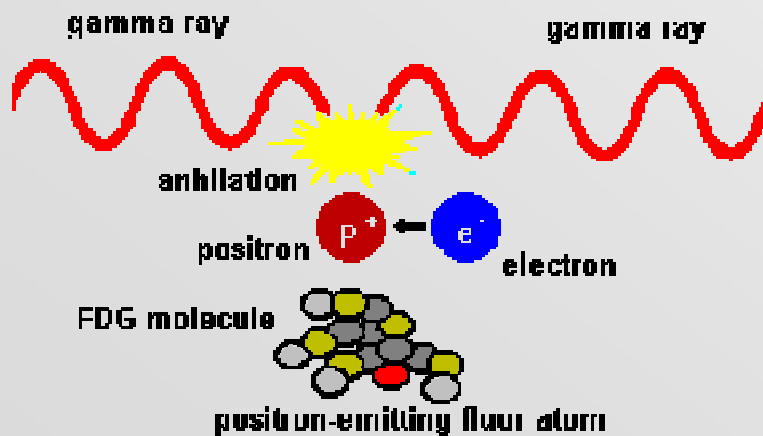
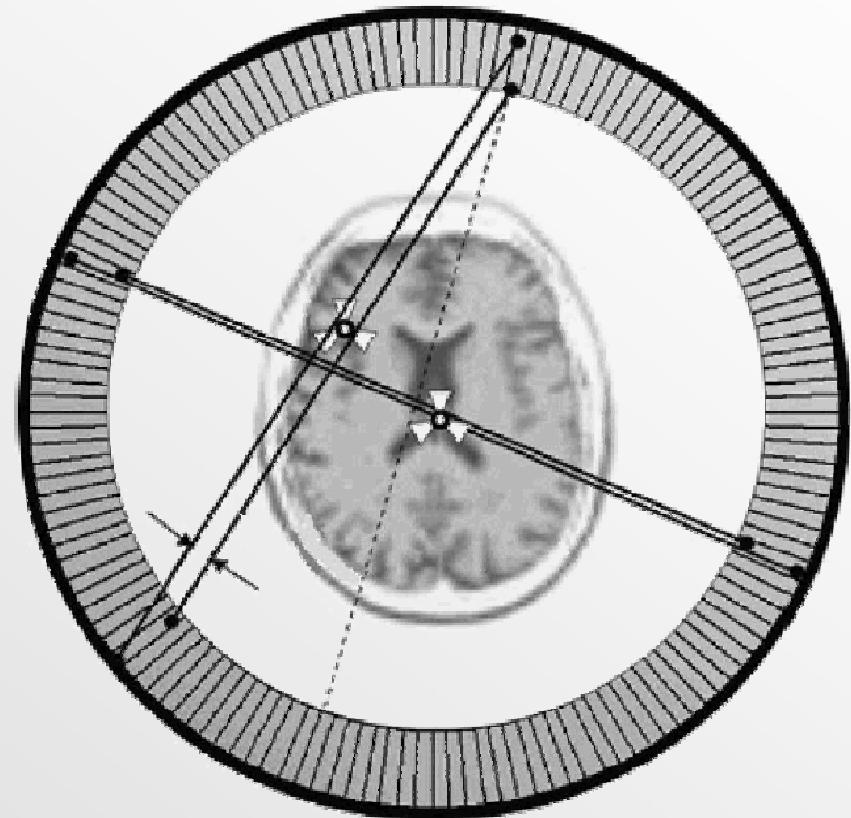
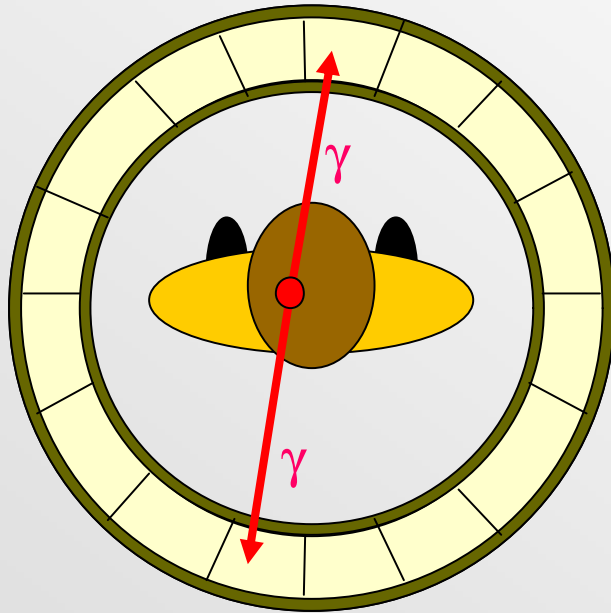
UMK
WFAiS



Tomografia pozytonowa

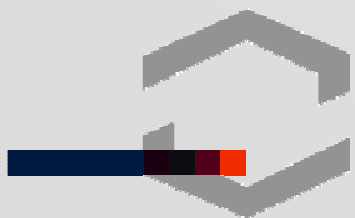
- **PET** (*ang.* Positron Emission Tomography)
- kluczowy element - pierścień złożony z dużej liczby pikseli scyntylicyjnych połączonych w bloki sprzężone z detektorami (fotopowielaczami lub diodami)
- przykłady
 - komercyjny tomograf PET Advance firmy General Electric, zawierający ponad 12000 kryształów BGO o wymiarach $4 \times 8 \times 30 \text{ mm}^3$
 - urządzenie PET/CT Allegro/Gemini firmy Philips, zawierający 18000 kryształów GSO:Ce o wymiarach $4 \times 6 \times 20 \text{ mm}^3$

Tomografia pozytonowa



Rozwój techniki PET

- jedno z najważniejszych usprawnień – tzw. TOF-PET (*ang.* time-of-flight PET), tj. uwzględnienie przy rekonstrukcji obrazu różnicy czasowej między momentami rejestracji jednocześnie wyemitowanych kwantów gamma przez przeciwległe detektory
- scyntylatory o potencjale do wykorzystania w tomografach TOF-PET: $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$, CeBr_3 , ...
- akcja FAST (*ang.* Fast Advanced Scintillator Timing) w ramach współpracy europejskiej COST, mająca na celu osiągnięcie rozdzielczości czasowej < 100 ps

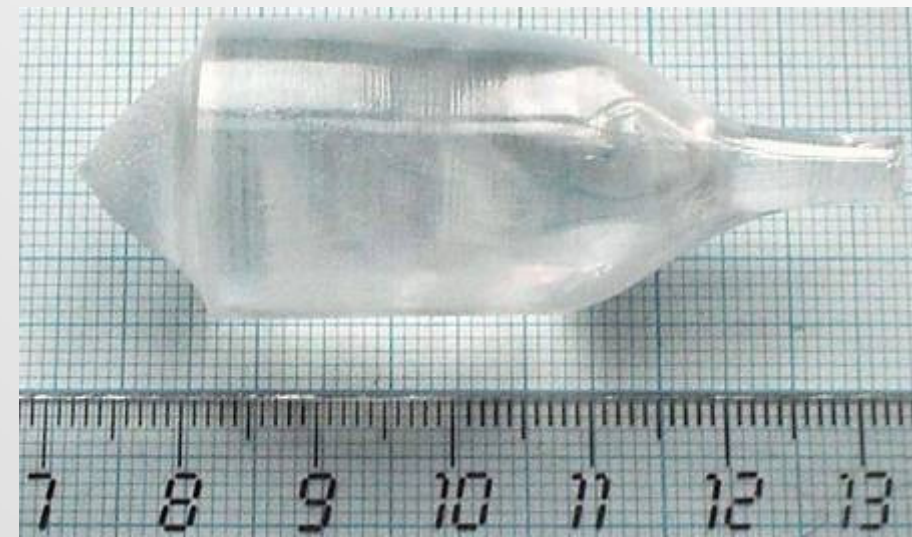
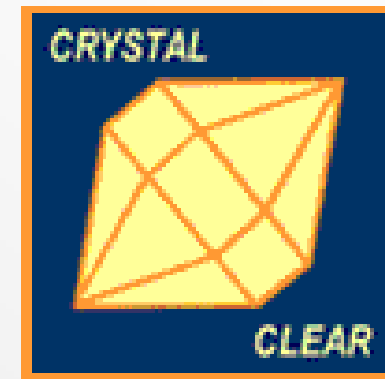
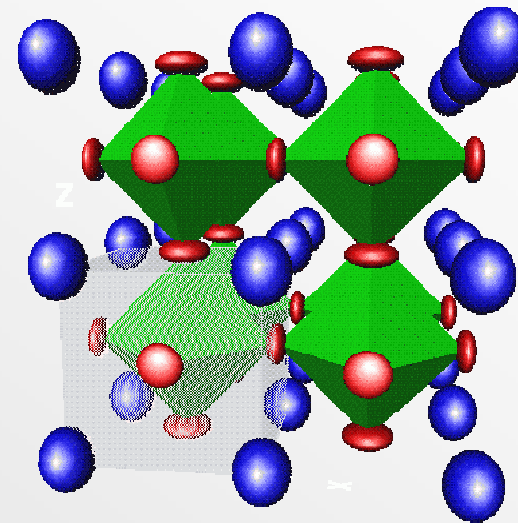


COST
EUROPEAN COOPERATION IN SCIENCE AND TECHNOLOGY

FAST
Fast Advanced Scintillator Timing

LuAlO₃:Ce (LuAP:Ce)

- debiut w 1993 r.
- $\rho = 8.3 \text{ g/cm}^3$
- $Y \sim 12000 \text{ ph/MeV}$
- $R \geq 6.8\%$ (662 keV)
- $\lambda_{max} \sim 370 \text{ nm}$
- $\tau \sim 17 \text{ ns}$
- **trudna hodowla**
(opanowana w ITME)

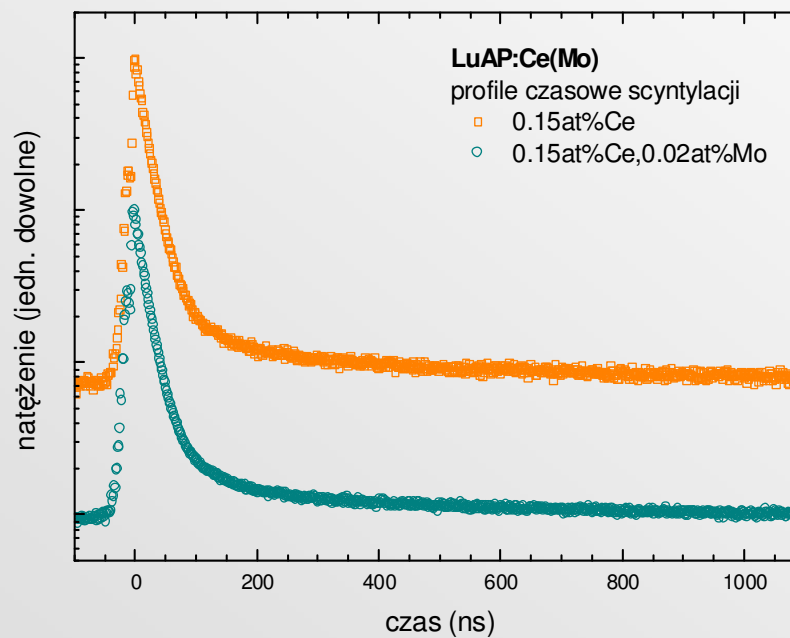
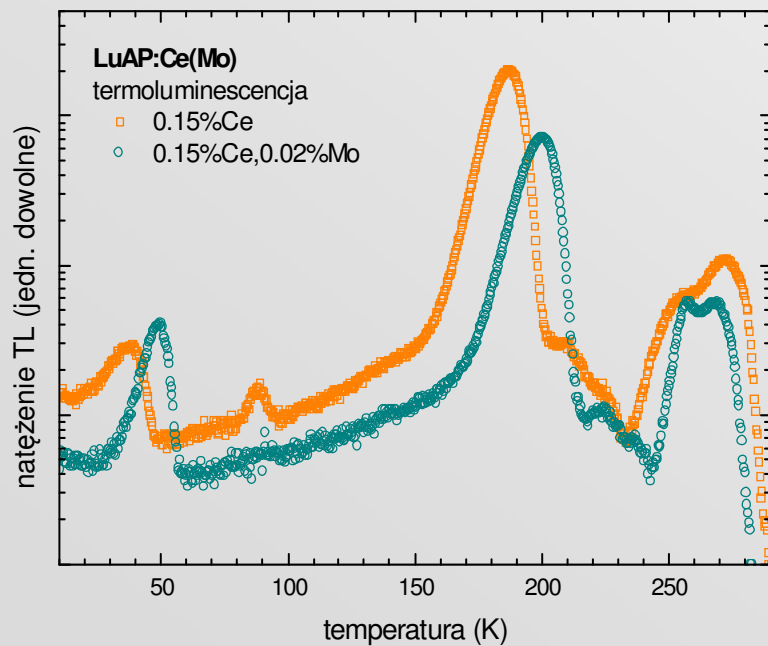
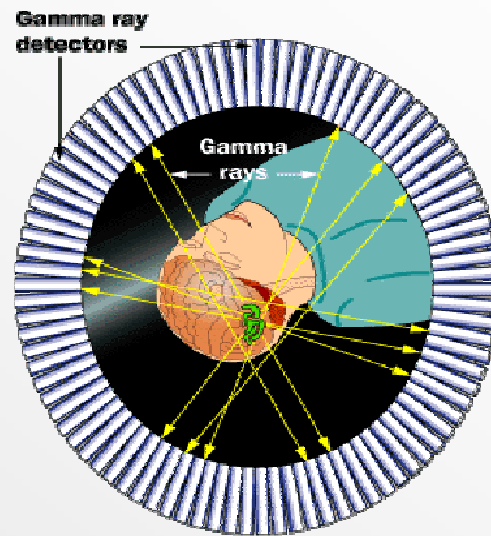
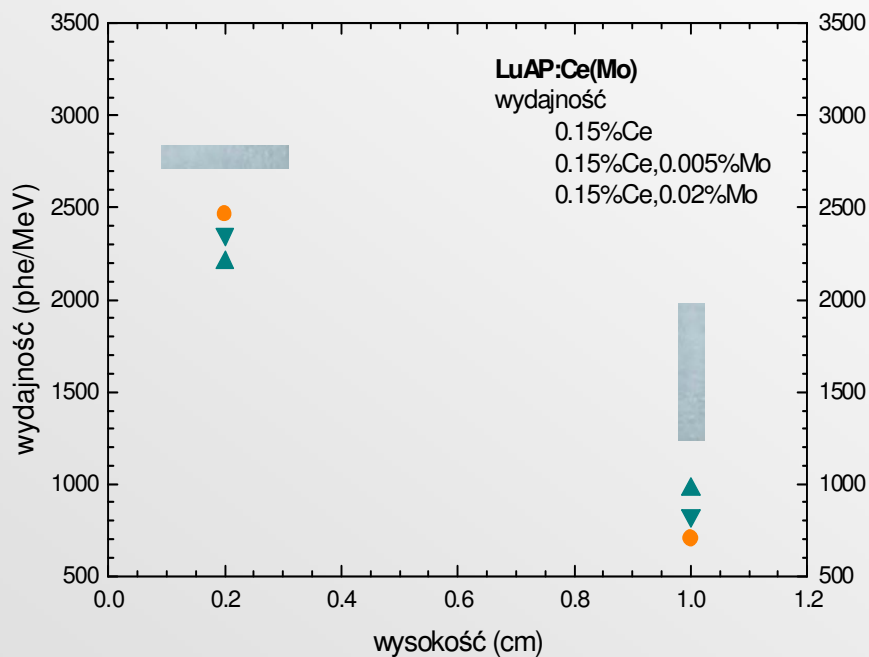


Projekt ITME & IF UMK '2003



- „Badanie warunków wzrostu i własności scyntylacyjnych domieszkowanych kryształów LuAlO_3 (LuAP)” (KBN, 2003-2006)
- opublikowane prace:
 - 1) W. Drozdowski, T. Łukasiewicz, A.J. Wojtowicz, D. Wiśniewski, J. Kisielewski, “Thermoluminescence and Scintillation of Praseodymium Activated $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ and LuAlO_3 Crystals”, *Journal of Crystal Growth* **275** (2005), e709-e714; [27 cytowań](#)
 - 2) A.J. Wojtowicz, W. Drozdowski, D. Wiśniewski, J.L. Lefaucheur, Z. Gałązka, Z. Gou, T. Łukasiewicz, J. Kisielewski, “Scintillation Properties of Selected Oxide Monocrystals Activated with Ce and Pr”, *Optical Materials* **28** (2006), 85-93; [42 cytowania](#)
 - 3) W. Drozdowski, A.J. Wojtowicz, D. Wiśniewski, T. Łukasiewicz, J. Kisielewski, “Scintillation Properties of Pr-Activated LuAlO_3 ”, *Optical Materials* **28** (2006), 102-105; [21 cytowań](#)
 - 4) W. Drozdowski, A.J. Wojtowicz, T. Łukasiewicz, J. Kisielewski, “Scintillation Properties of LuAP and LuYAP Crystals Activated with Cerium and Molybdenum”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A562** (2006), 254-261; [26 cytowań](#)

LuAP:Ce a LuAP:Ce,Mo



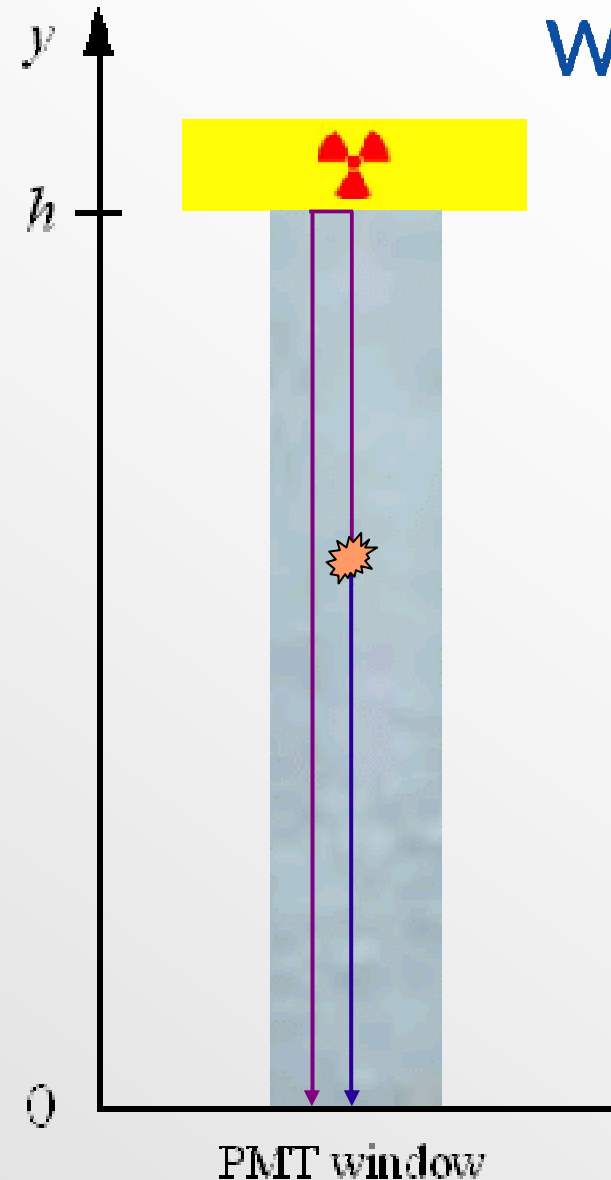
Model „2R” - teoria

- piksel – kryształ prawie liniowy
- promień „w dół” i promień „w górę” – jedyne wnoszące wkład do obserwowanej wydajności scyntylacji

$$dY_{\downarrow} = \frac{1}{2} Y_0 \exp(-\mu y) dy$$

$$dY_{\uparrow} = \frac{1}{2} Y_0 \exp(-\mu(2h - y)) dy$$

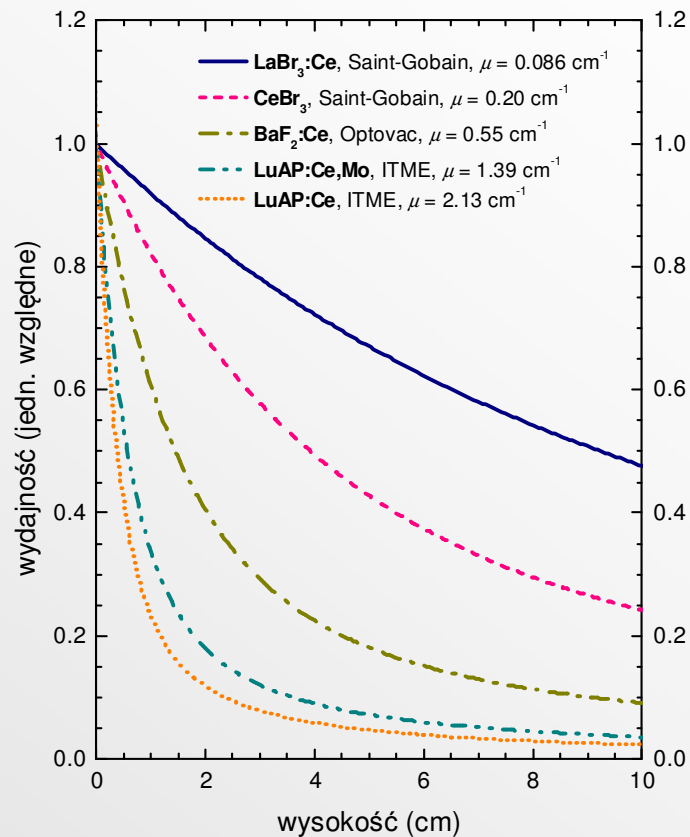
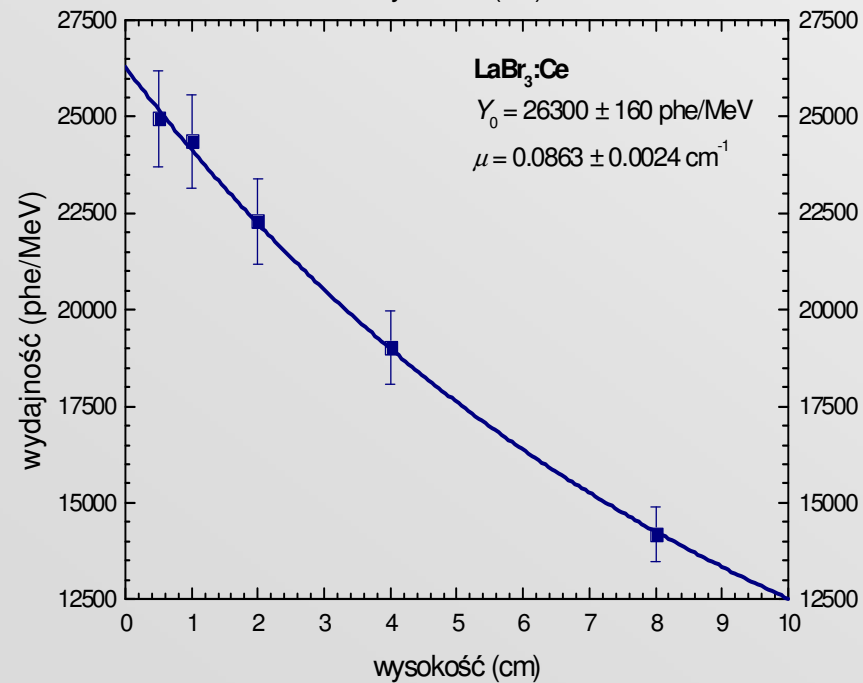
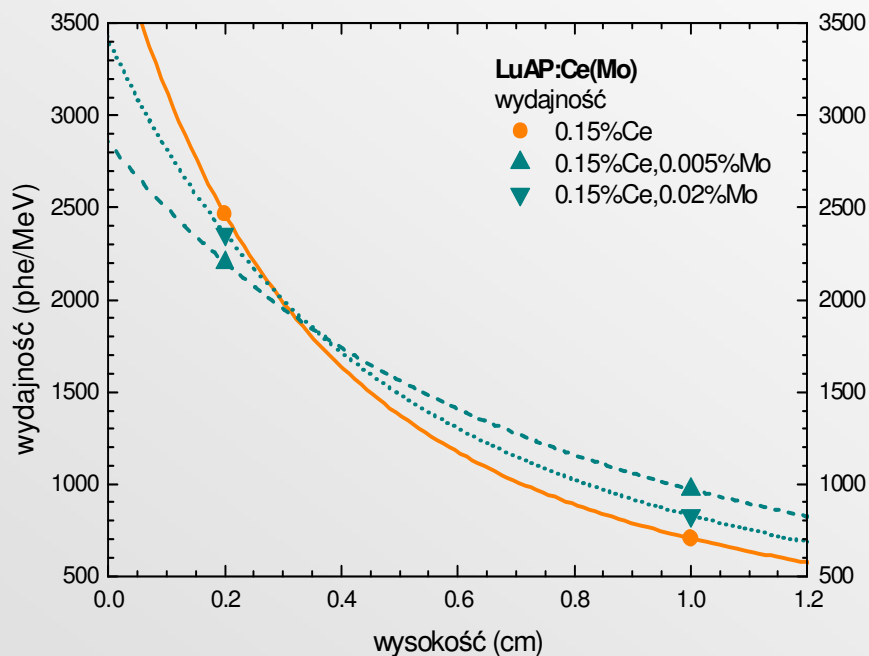
$$Y(h) = Y_0 \frac{1 - e^{-2\mu h}}{2\mu h}$$



Zależność wydajności od geometrii



UMK
WFAiS

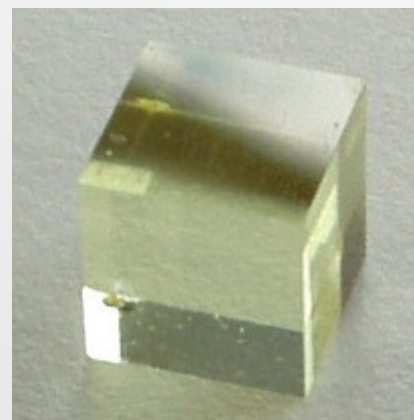
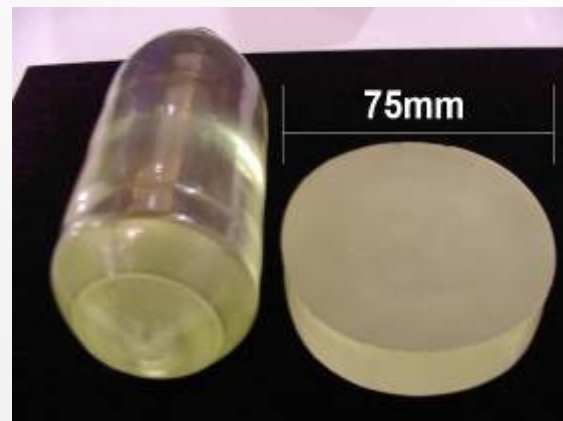


$\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$ (LuAG:Pr)



UMK
WFAiS

- debiut w 2005 r.
- $\rho = 6.7 \text{ g/cm}^3$
- $Y \sim 20000 \text{ ph/MeV}$
- $R \geq 4.6\%$ (662 keV)
- $\lambda_{max} \sim 310 \text{ nm}$
- $\tau \sim 20 \text{ ns}$ (długie składowe!)
- nietrudna hodowla
(Czochralski, μPD)
- korzystne właściwości mechaniczne



Matryce PET



UMK
WFAiS



Fig. 7. Pictures of the 4×4 scintillator matrices to be coupled with the MPPC array. (From left to right: Ce:LYSO, Pr:LuAG, Pr:LuAG (WLS)).

Positron Emission Mammograph (PEM)

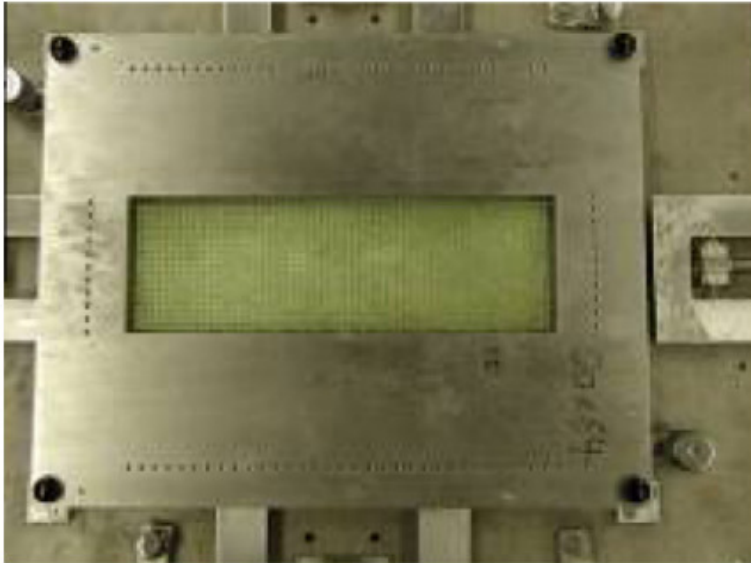


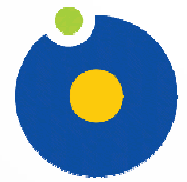
Fig. 2. A fixture for manufacturing Pr:LuAG pixelated array.



Fig. 3. The 20 × 64 Pr:LuAG pixelated array for Pr:LuAG-PEM.



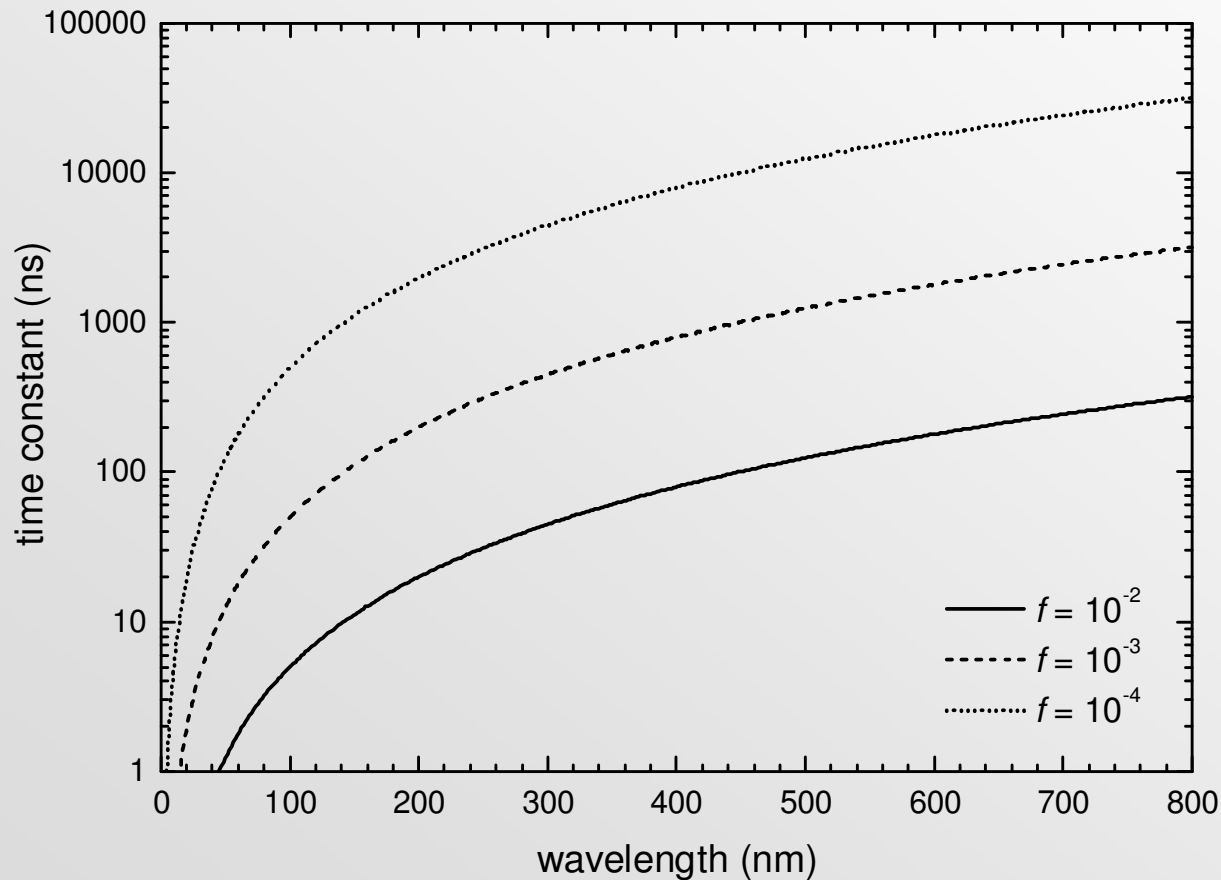
Teoretyczna szybkość emisji *d-f*



UMK
WFAiS

$$\tau = 1.5 \cdot 10^4 \frac{9\lambda^2}{fN(N^2 + 2)^2}$$

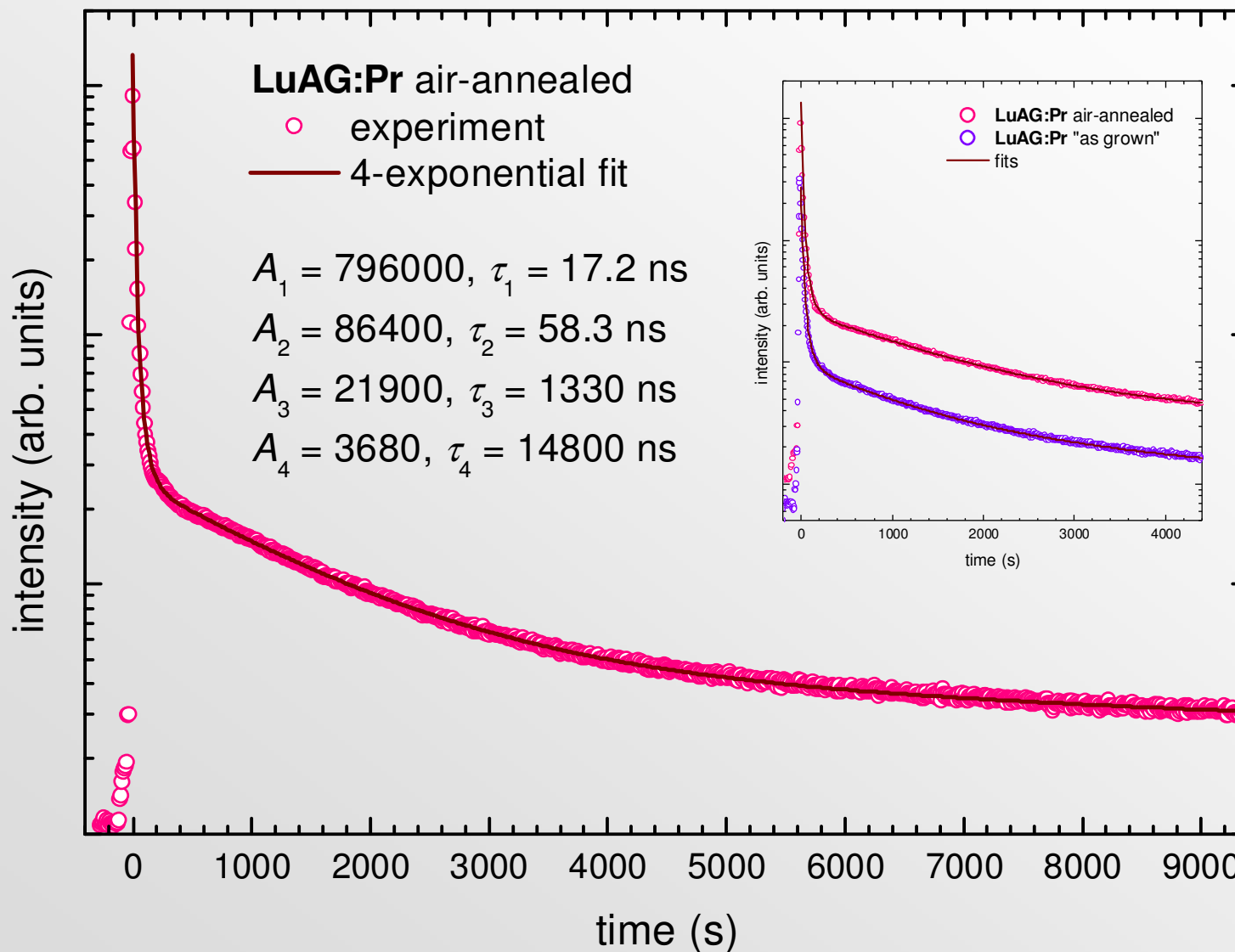
prazeodym – potencjalnie lepszy aktywator od ceru na potrzeby **szybkich scyntylatorów**



Profile czasowe scyntylacji

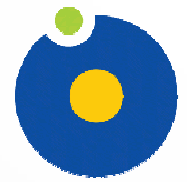


UMK
WFAiS

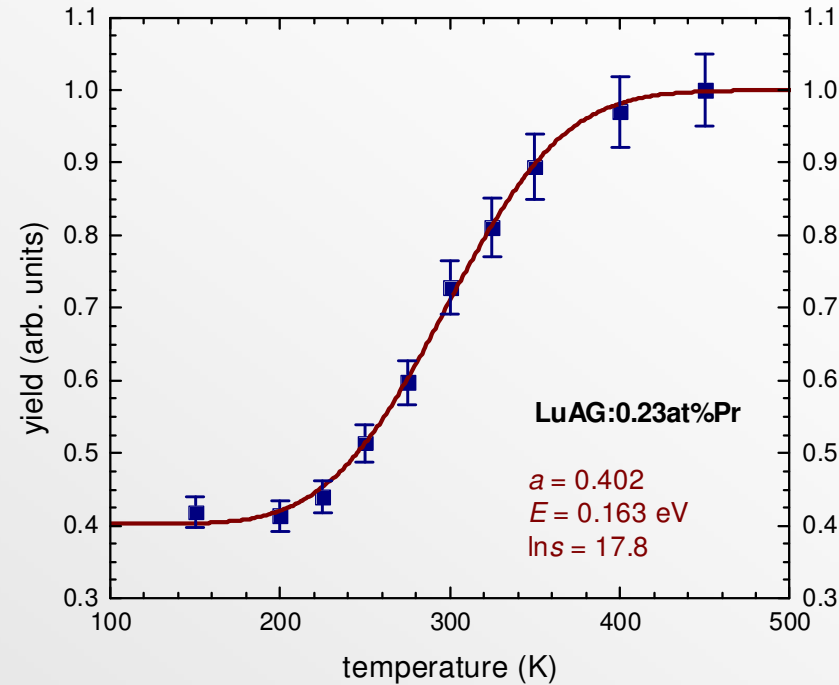
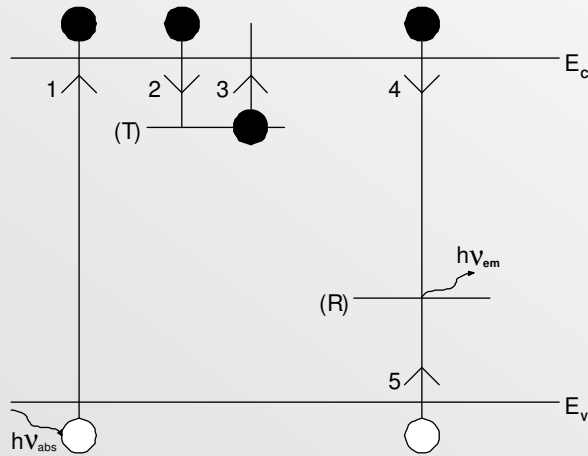


obecność składowej „pułapkowej” (τ_4)!

Wydajność w funkcji temperatury



UMK
WFAiS



$$\frac{1}{\tau} = s \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$$

$$Y = Y_{tf} \left(a + b \left(1 + \frac{\tau}{\tau_{rad} - \tau} \exp\left(-\frac{2.35\tau_{sh}}{\tau}\right) \right) \right)$$

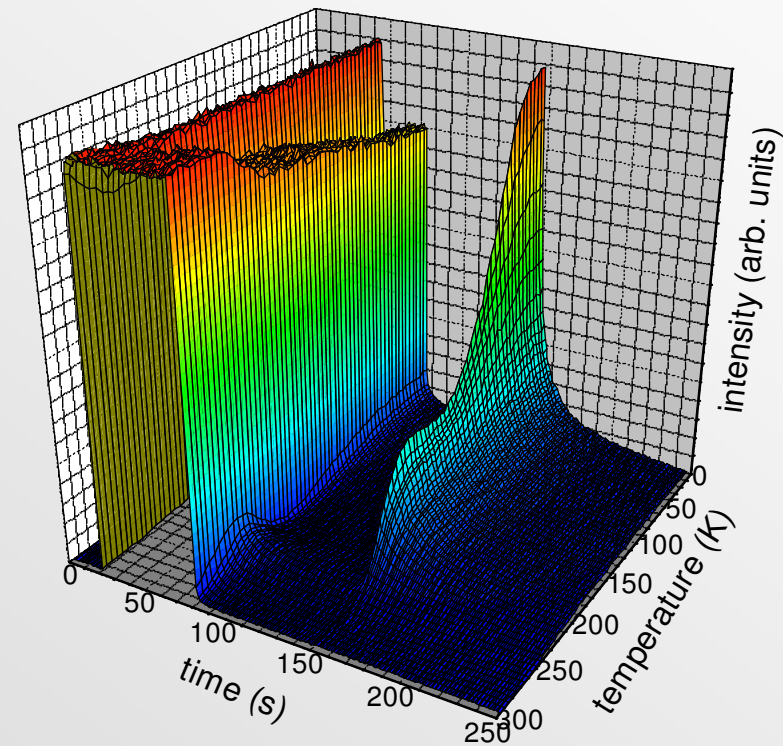
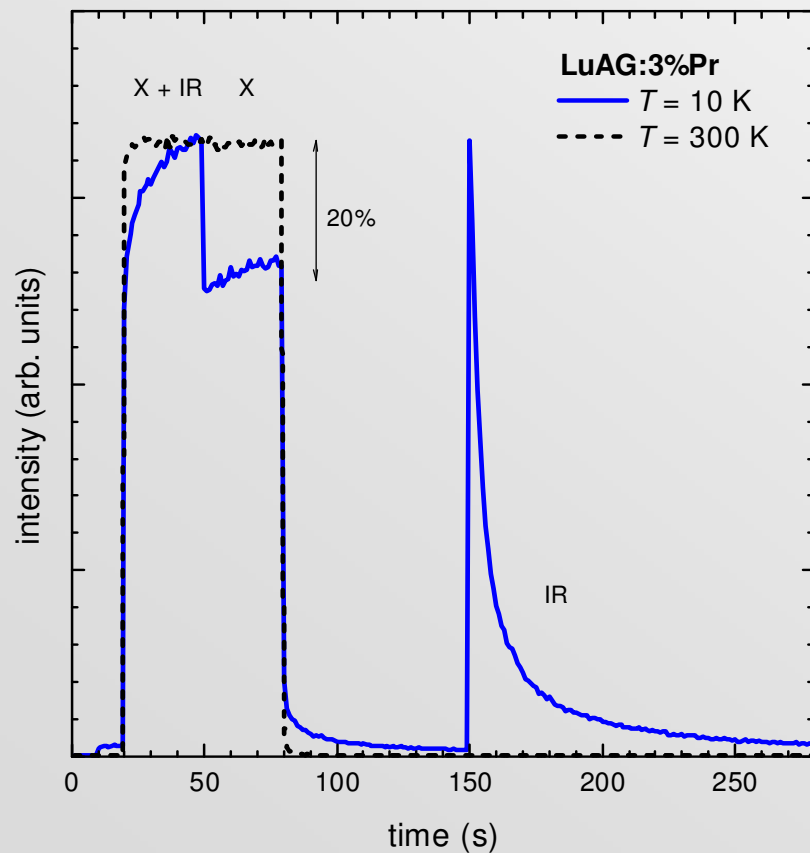
τ – trap lifetime, E – trap depth, s – frequency factor, k_B – the Boltzmann constant, a , b – normalized contributions from direct and trap-mediated recombination routes, τ_r – radiative lifetime of the emitting ion, τ_{sh} – shaping time

A.J. Wojtowicz *et al.*, *J. Lumin.* **79** (1998), 275-291

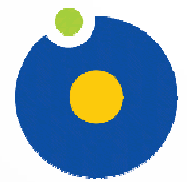
W. Drozdowski *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** (2009), 320-327

Pułapki pod kontrolą

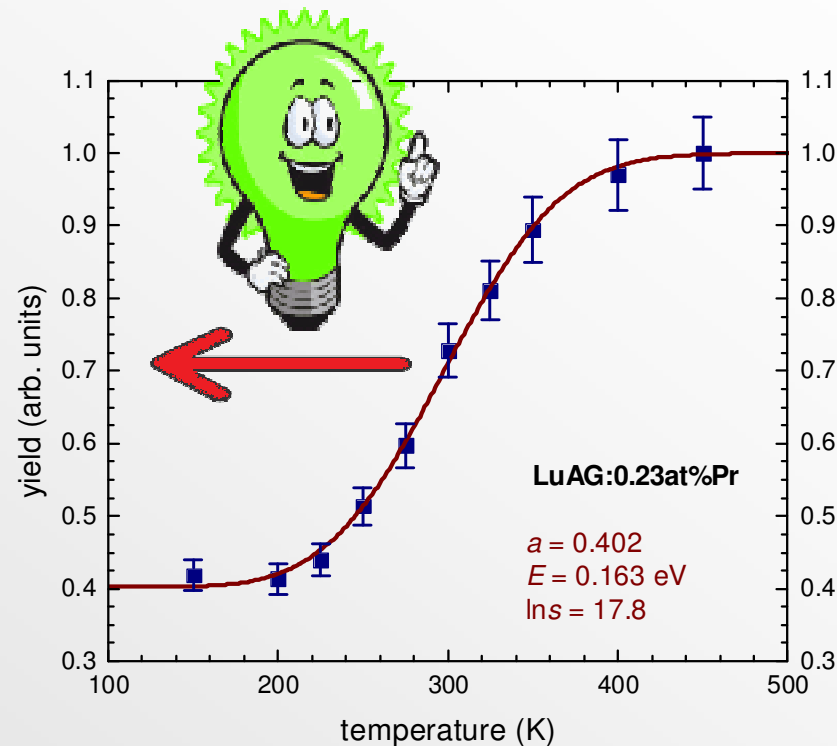
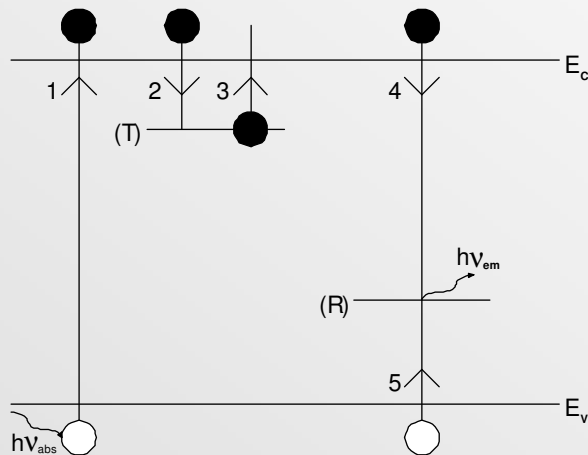
Time (s)	0-10	10-20	20-50	50-80	80-150	150-280
X rays	-	-	+	+	-	-
IR laser	-	+	+	-	-	+



Wydajność w funkcji temperatury



UMK
WFAiS



$$\frac{1}{\tau} = s \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$$

$$Y = Y_{tf} \left(a + b \left(1 + \frac{\tau}{\tau_{rad} - \tau} \exp\left(-\frac{2.35\tau_{sh}}{\tau}\right) \right) \right)$$

τ – trap lifetime, E – trap depth, s – frequency factor, k_B – the Boltzmann constant, a , b – normalized contributions from direct and trap-mediated recombination routes, τ_r – radiative lifetime of the emitting ion, τ_{sh} – shaping time

A.J. Wojtowicz *et al.*, *J. Lumin.* **79** (1998), 275-291

W. Drozdowski *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** (2009), 320-327

Sposoby optymalizacji

- hodowla kryształów mieszanych LuYAG i LuYAP
 - płytsze pułapki => krótszy czas życia => ograniczenie negatywnego wpływu pułapek na efektywność transferu
 - zaobserwowano, że pułapki w kryształach LuAG:Pr i LuAP:Ce są głębsze niż odpowiednio w izostrukturnych kryształach YAG:Pr i YAP:Ce
 - w kryształach mieszanych LuYAG:Pr i LuYAP:Ce głębokość pułapek powinna być niższa niż w kryształach LuAG:Pr i LuAP:Ce w stopniu wystarczającym do zauważalnej poprawy efektywności przekazu energii sieć-jon i w konsekwencji do wzrostu wydajności scyntylacji, natomiast zachowana zostałaby w miarę wysoka gęstość

Sposoby optymalizacji

- koaktywacja kryształów LuAP:Ce i LuAG:Pr molibdenem
 - intencją dodania śladowej ilości jonów molibdenu jest wytworzenie w kryształach bardzo płytkich pułapek elektronowych ($\ll 0.15$ eV) o wysokim przekroju czynnym na wychwyt elektronów, których zadaniem jest konkutowanie o elektrony z pułapkami „własnymi” obecnymi w kryształach LuAP:Ce czy LuAG:Pr w fazie transferu energii sieć-jon
 - krótki czas życia pułapek molibdenowych i niskie prawdopodobieństwo ponownego pułapkowania powinny spowodować otwarcie nowego, szybkiego i wydajnego kanału przekazu energii, zapewniającego szybsze dostarczanie elektronów do jonów Ce^{3+} czy Pr^{3+}

Sposoby optymalizacji

- wygrzewanie
 - względnie prosta metoda poprawy ogólnej jakości kryształów
 - pozytywne wyniki w laboratorium Furukawa Co. Ltd.
 - obecność defektów antywęzłowych i wakansów tlenowych w kryształach LuAG:Pr – pułapki elektronowe
 - odpowiedzialność pułapek elektronowych za 30% spadek wydajności kryształów LuAG:Pr w temperaturze pokojowej
 - piec mufłowy: 1350 K, 48 h, powietrze
 - badania w toku

Projekt ITME & IF UMK '2013



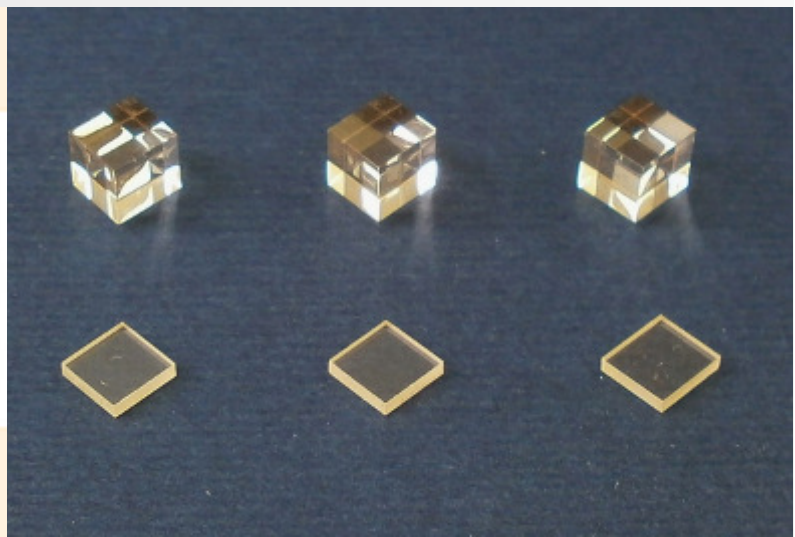
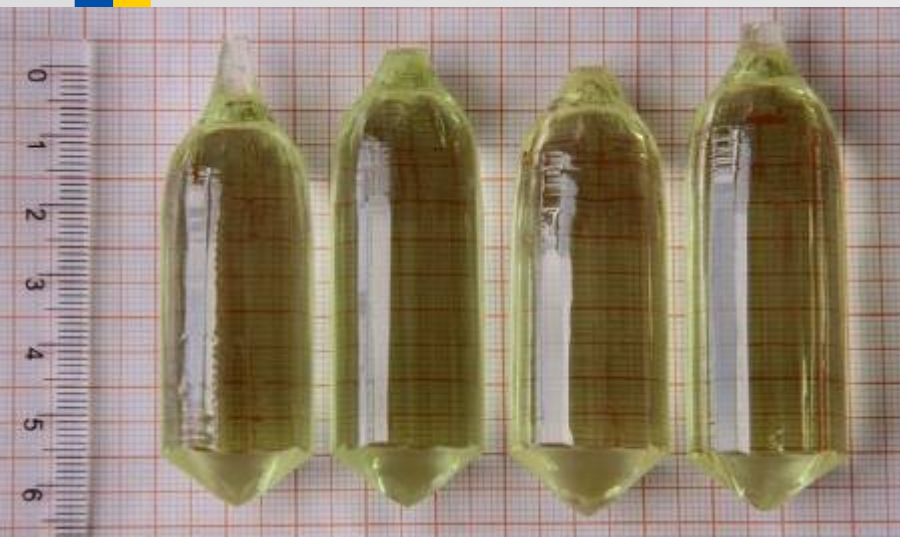
- „Badanie wpływu rozkładu pułapek elektronowych na wydajność transferu energii sieć-jon w kryształach scyntylacyjnych (Lu,Y)AG:Pr(,Mo)” (NCN, 2013-2016)
- zespół badawczy
 - prof. Tadeusz Łukasiewicz (ITME) – główny wykonawca
 - prof. Andrzej J. Wojtowicz (IF UMK) – główny wykonawca
 - mgr inż. Jarosław Kisielewski (ITME) – wykonawca
 - mgr Kamil Brylew (doktorant UMK) – wykonawca
 - mgr Marcin E. Witkowski (doktorant UMK) - wykonawca
 - dr hab. Winicjusz Drozdowski (IF UMK) - kierownik

Badane kryształy



UMK
WFAiIS

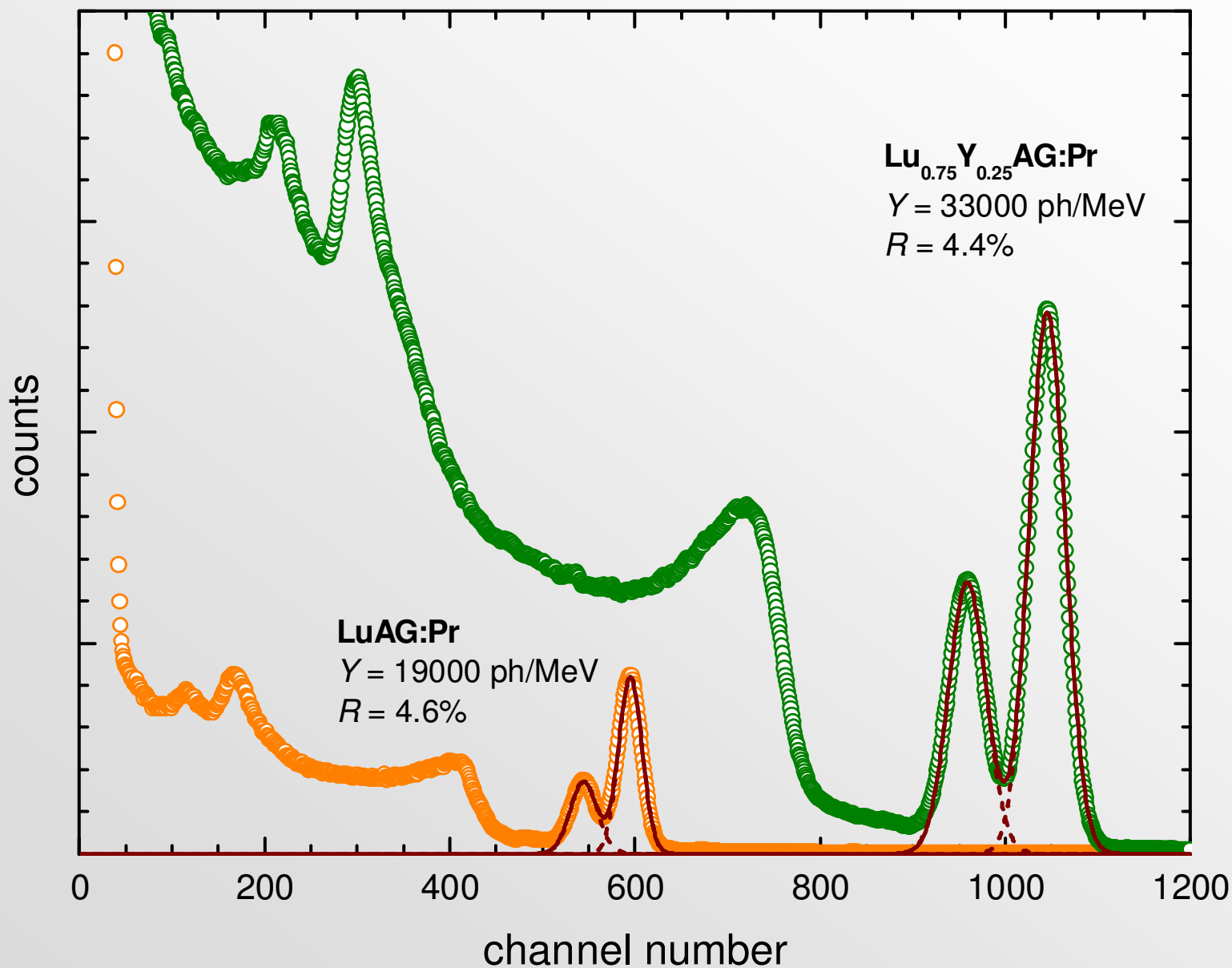
sieć	aktywator (at%)	gęstość (g/cm ³)
$\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LuAG)	Pr^{3+} (0.12)	6.7
$(\text{Lu}_{0.75}\text{Y}_{0.25})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LuYAG)	Pr^{3+} (0.16)	6.2
$(\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LuYAG)	Pr^{3+} (0.17)	5.7
$(\text{Lu}_{0.25}\text{Y}_{0.75})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LuYAG)	Pr^{3+} (0.23)	5.2
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG)	Pr^{3+} (0.17)	4.6
$\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LuAG)	Pr^{3+} (0.12), Mo^{3+} (0.0005)	6.7
$\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LuAG)	Pr^{3+} (0.12), Mo^{3+} (0.0009)	6.7
$\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LuAG)	Pr^{3+} (0.12), Mo^{3+} (0.005)	6.7



LuAG:Pr a $\text{Lu}_{0.75}\text{Y}_{0.25}\text{AG:Pr}$



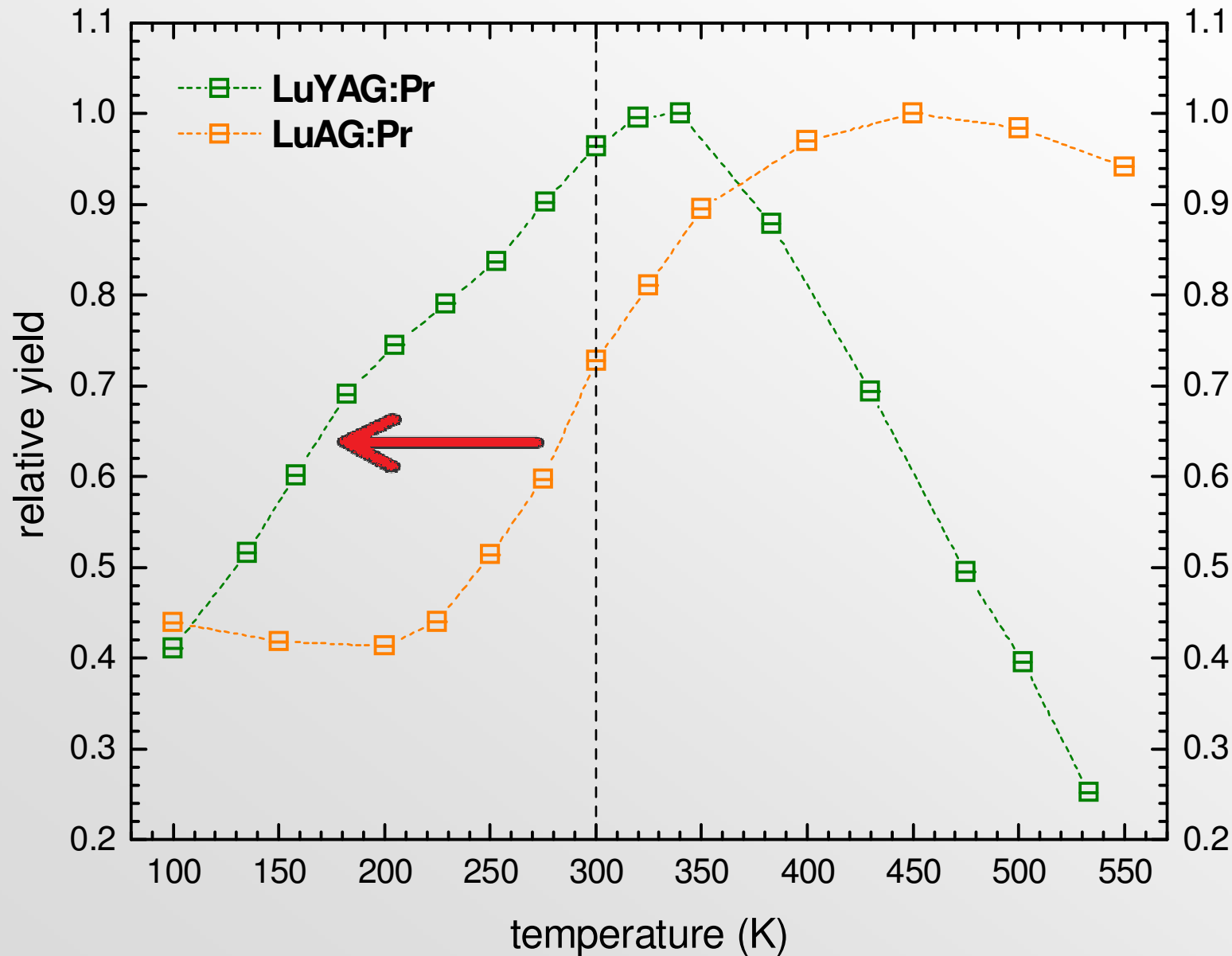
UMK
WFAiIS



Wydajność w funkcji temperatury



UMK
WFAiS



33000 photons per MeV from mixed $(\text{Lu}_{0.75}\text{Y}_{0.25})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$ scintillator crystals

Winiacjusz Drozdowski,^{1,*} Kamil Brylew,¹ Andrzej J. Wojtowicz,¹ Jarosław Kisielewski,² Marek Świrkowicz,² Tadeusz Łukasiewicz,² Johan T.M. de Haas,³ and Pieter Dorenbos³

¹*Institute of Physics, Faculty of Physics, Astronomy and Informatics, Nicolaus Copernicus University, Grudziadzka 5, 87-100 Torun, Poland*

²*Institute of Electronic Materials Technology (ITME), Wolczynska 133, 01-919 Warsaw, Poland*

³*Luminescence Materials Research Group, Faculty of Applied Sciences, Delft University of Technology, Mekelweg 15, 2629 JB Delft, The Netherlands*

*wind@fizyka.umk.pl

Abstract: $(\text{Lu}_x\text{Y}_{1-x})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$ ($x = 0.25, 0.50, 0.75$) crystals have been grown by the Czochralski method and their scintillation properties have been examined. Compared to the well-respected LuAG:Pr scintillator, which has so extensively been studied in the recent years, the new mixed LuYAG:Pr crystals display markedly higher light yields, regardless of the value of x . In particular, $(\text{Lu}_{0.75}\text{Y}_{0.25})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.2\%\text{Pr}$ characterized by a yield of 33000 ph/MeV, an energy resolution of 4.4% (at 662 keV), and a density of 6.2 g/cm³, seems to be an ideal candidate to supercede $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.2\%\text{Pr}$ (19000 ph/MeV, 4.6%, 6.7 g/cm³) in various applications. The observed enhancement of light output following the partial substitution of lutetium by yttrium is most probably related to some specific differences in distributions of shallow traps in particular materials.

©2014 Optical Society of America

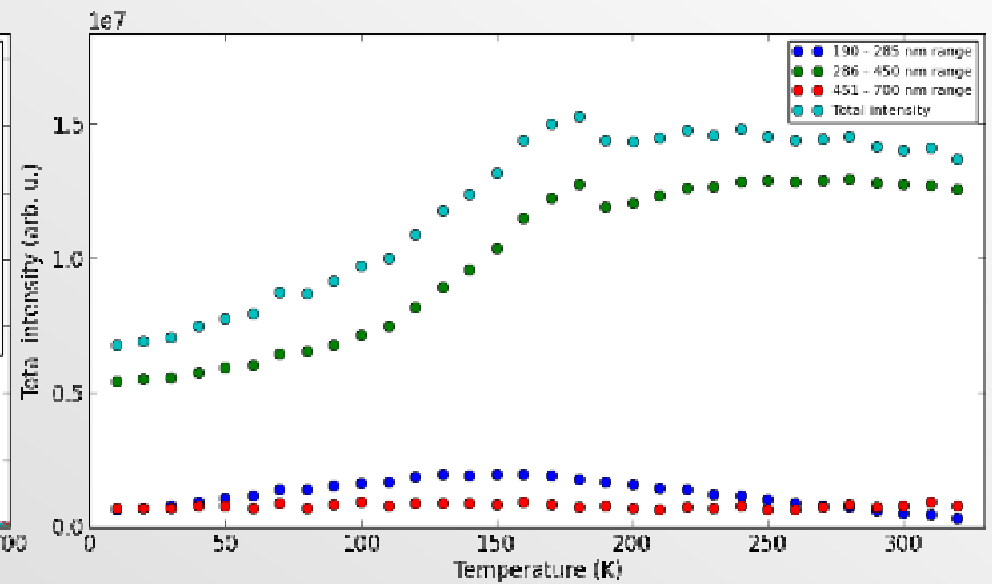
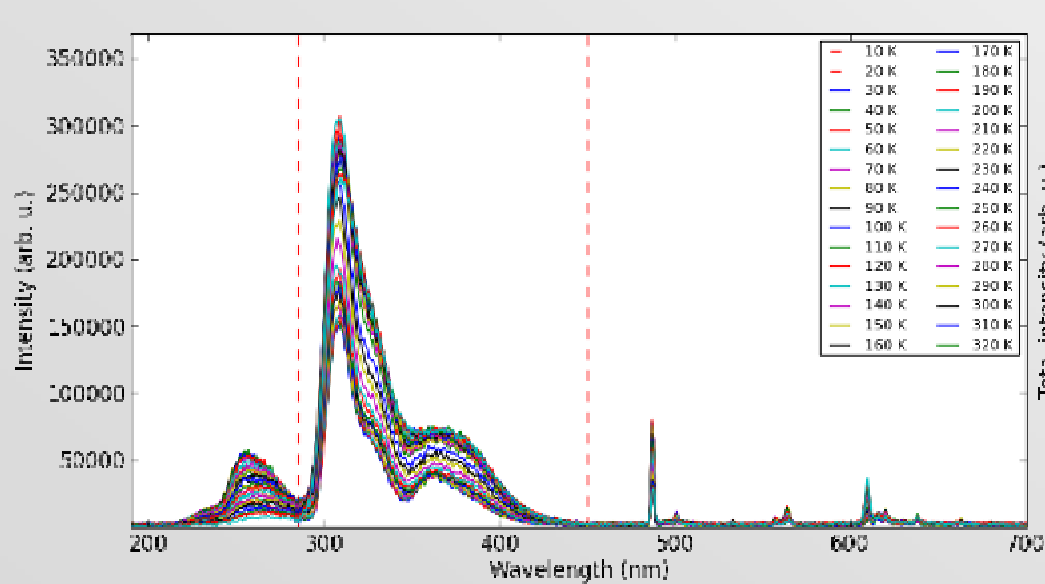
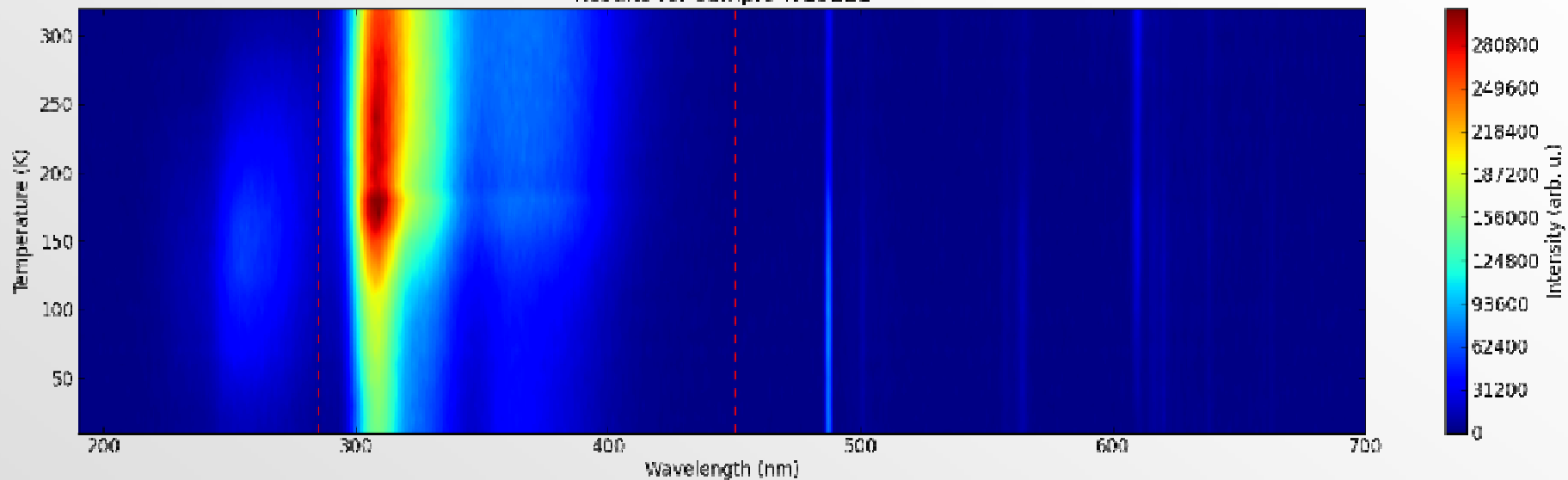
OCIS codes: (160.5690) Rare-earth-doped materials; (250.0040) Detectors; (260.2160) Energy transfer; (290.5930) Scintillation

References and links

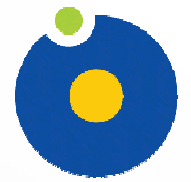
1. M. Nikl, H. Ogino, A. Krasnikov, A. Beitlerova, A. Yoshikawa, and T. Fukuda, "Photo- and radioluminescence of Pr-doped $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ single crystal," *Phys. Status Solidi A* **202**(1), R4–R6 (2005).
2. A. Yoshikawa, T. Yanagida, K. Kamada, Y. Yokota, J. Pejchal, A. Yamaji, Y. Usuki, S. Yamamoto, M. Miyake, K. Kumagai, K. Sasaki, T. R. dos Santos, M. Baba, M. Ito, M. Takeda, N. Ohuchi, and M. Nikl, "Positron emission mammography using Pr:LuAG scintillator – fusion of optical material study and systems engineering," *Opt. Mater.* **32**(10), 1294–1297 (2010).

Radioluminescencija LuYAG:Pr

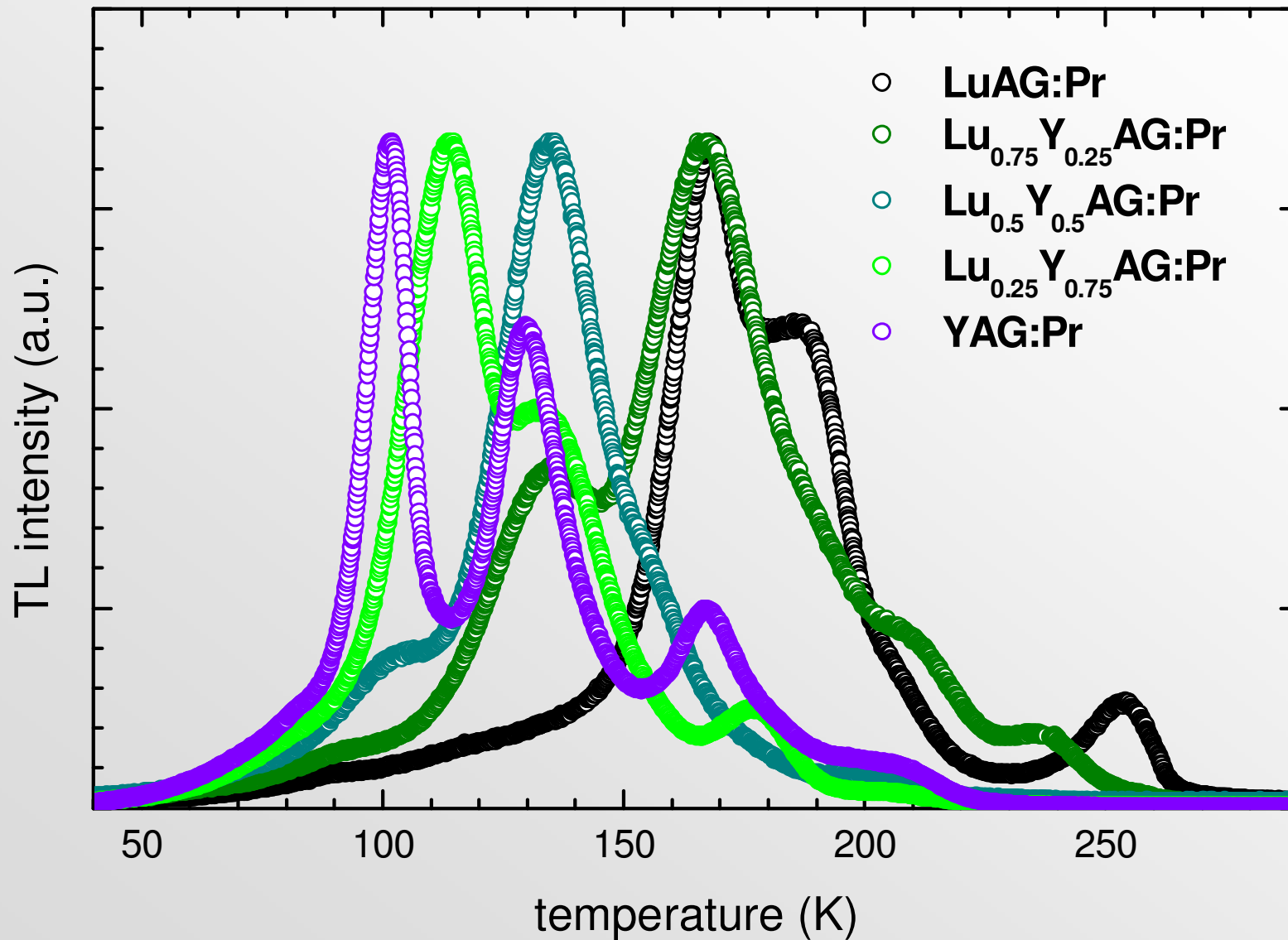
Results for sample W13221



Termoluminescencja



UMK
WFAiS



Quo vadis?

- wydajność scyntylacji zależy od czynników β , S i Q uwzględniających wkład trzech faz procesu scyntylacji (konwersja, transfer, luminescencja), jak również od szerokości przerwy energii E_g

$$Y = \frac{\beta S Q}{2.3 E_g}$$

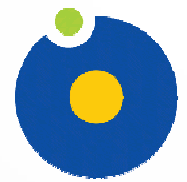
- najbardziej wydajne spośród znanych scyntylatorów osiągnęły już swoje limity teoretyczne, czyli nie ma perspektyw na dalsze podniesienie ich wydajności
 - np. dla $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ o $E_g = 5.9$ eV przy założeniu jednostkowych β , S i Q powyższy wzór przewiduje $Y = 74000$ ph/MeV, co jest zgodne z doświadczeniem

Quo vadis?

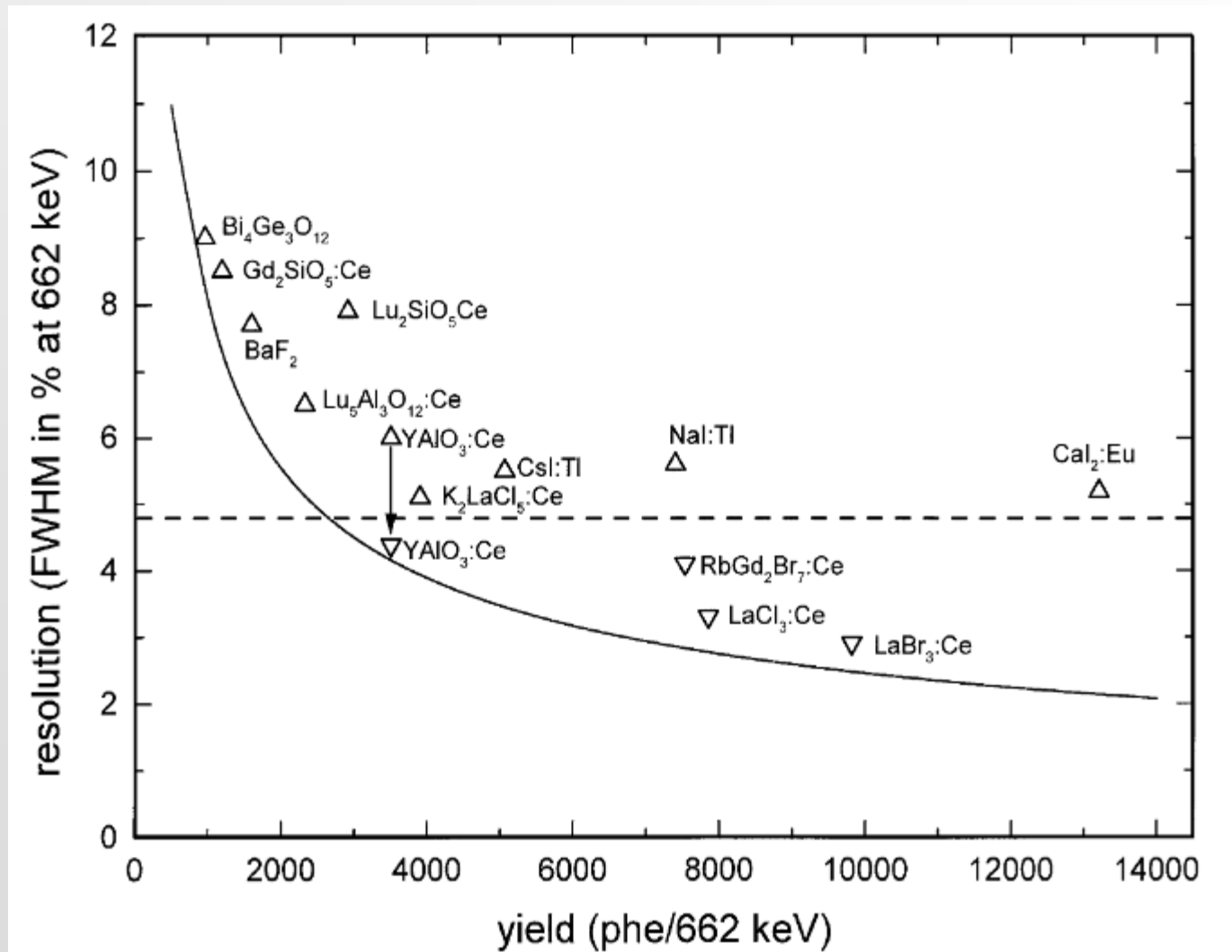
- materiały o węższej przerwie mogą oferować wyższą wydajność, ale zbyt mała szerokość przerwy przekreśla możliwość wykorzystania szybkiej emisji *d-f* jonów Ce^{3+} (a tym bardziej Pr^{3+}), stąd uznając rekordową wydajność za priorytet poszukiwań trzeba liczyć się z tym, że ewentualny nowoodkryty scyntylator nie będzie szybki
- nastawienie wyłącznie na maksymalizację wydajności nie dostarczy kolejnych scyntylatorów uniwersalnych (tj. szybkich i wydajnych) typu $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ czy $\text{LuI}_3:\text{Ce}$, niemniej może pozwolić na pokonanie ich pod względem zdolności rozdzielczej, która jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka z liczby fotoelektronów wyemitowanych przez fotokatodę fotopowielacza

$$R = 2.35 \sqrt{\frac{1 + v}{n_{phe}}}$$

Quo vadis?



UMK
WFAiS



LuI₃:Ce

- $\rho = 5.6 \text{ g/cm}^3$
- $Y \leq 115000 \text{ ph/MeV}$
- $R \geq 3.3\%$ (662 keV)
- $\lambda_{max} \sim 520 \text{ nm}$
- $\tau \leq 30 \text{ ns}$
- higroskopijność
- trudna hodowla



SrI₂:Eu

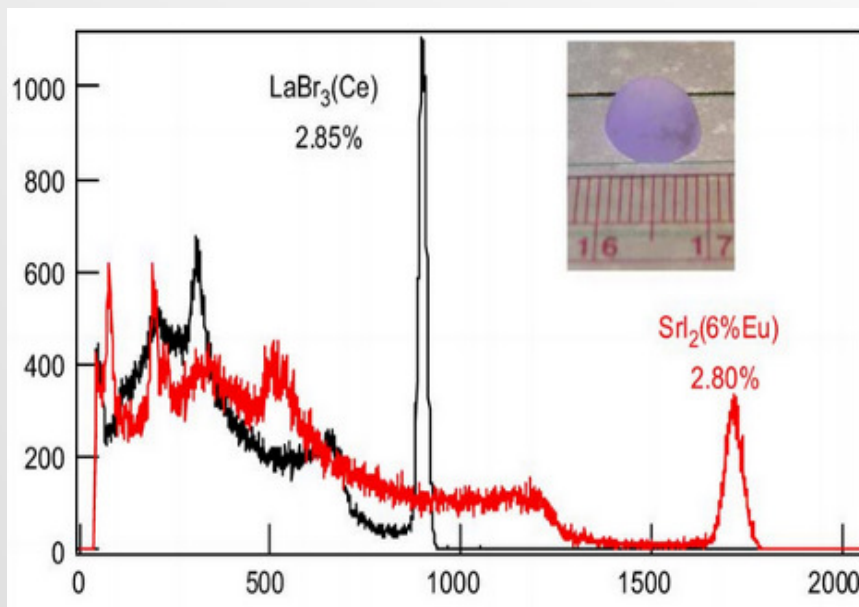


UMK
WFAiS

- $\rho = 4.6 \text{ g/cm}^3$
- $Y \leq 120000 \text{ ph/MeV}$
- $R \geq 2.8\%$ (662 keV)



- $\lambda_{max} \sim 430 \text{ nm}$
- $\tau \sim 1200 \text{ ns}$
- higroskopijność
- trudna hodowla



GAGG:Ce



UMK
WFAiIS

- $\rho = 6.6 \text{ g/cm}^3$
- $Y \leq 65000 \text{ ph/MeV}$
- $R \sim 6\%$ (662 keV)
- $\lambda_{max} \sim 520 \text{ nm}$ (Ce³⁺ d-f)
- $\tau \sim 50 \text{ ns}$



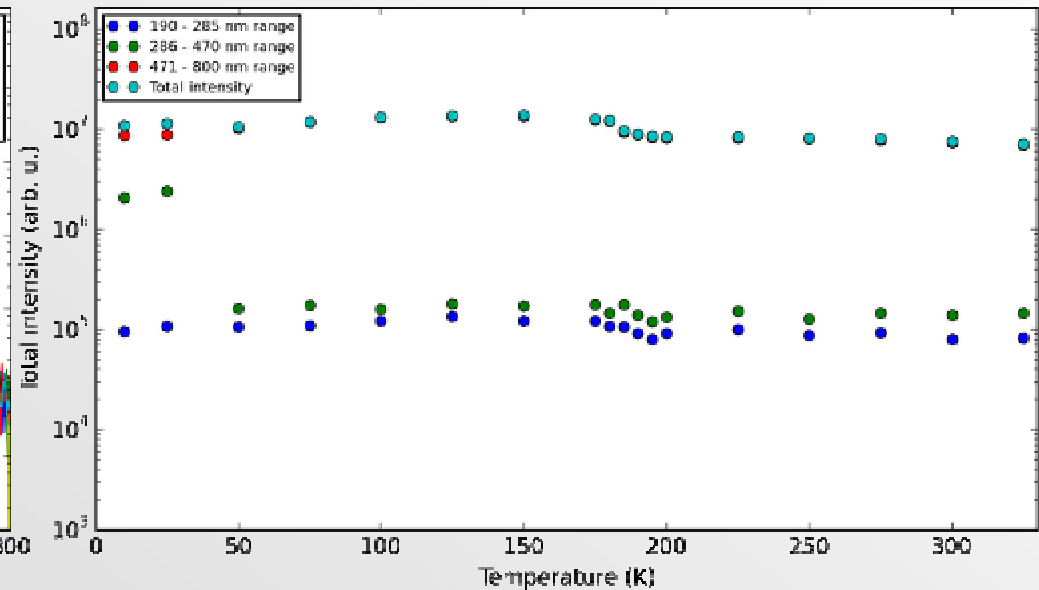
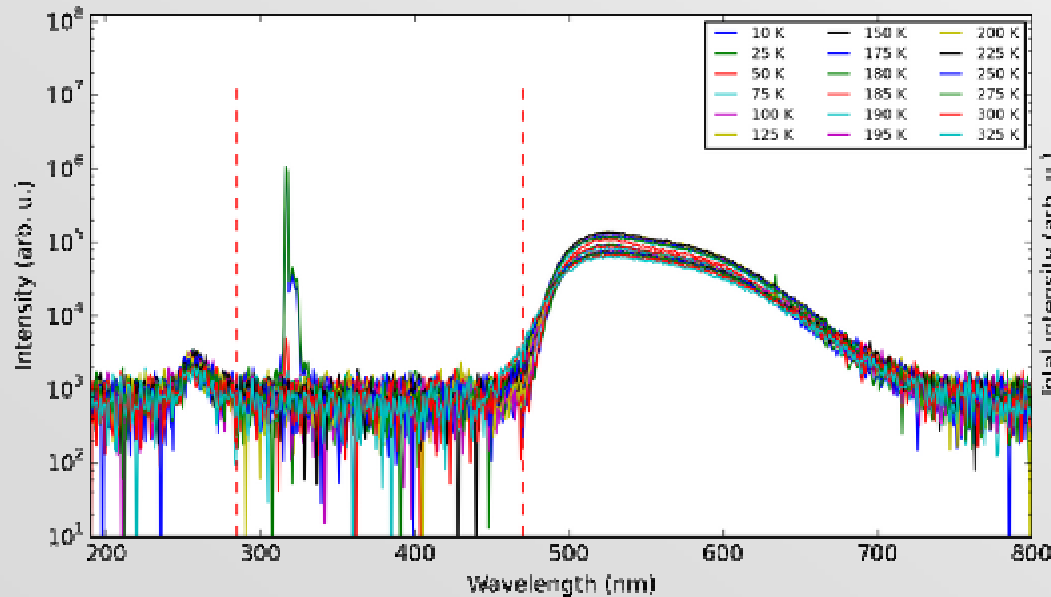
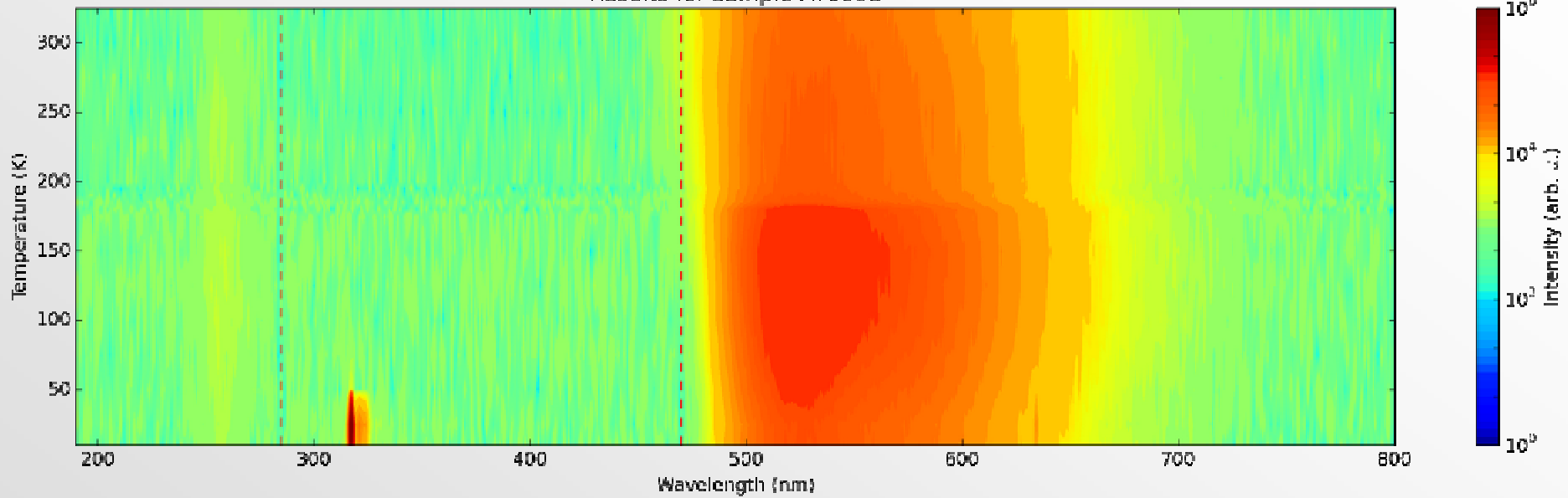
- korzystne właściwości mechaniczne
- trudna hodowla

K. Kamada *et al.*, *Cryst. Growth Des.* **11** (2011), 4484-4490

K. Kamada *et al.*, *J. Cryst. Growth* **352** (2012), 88-90

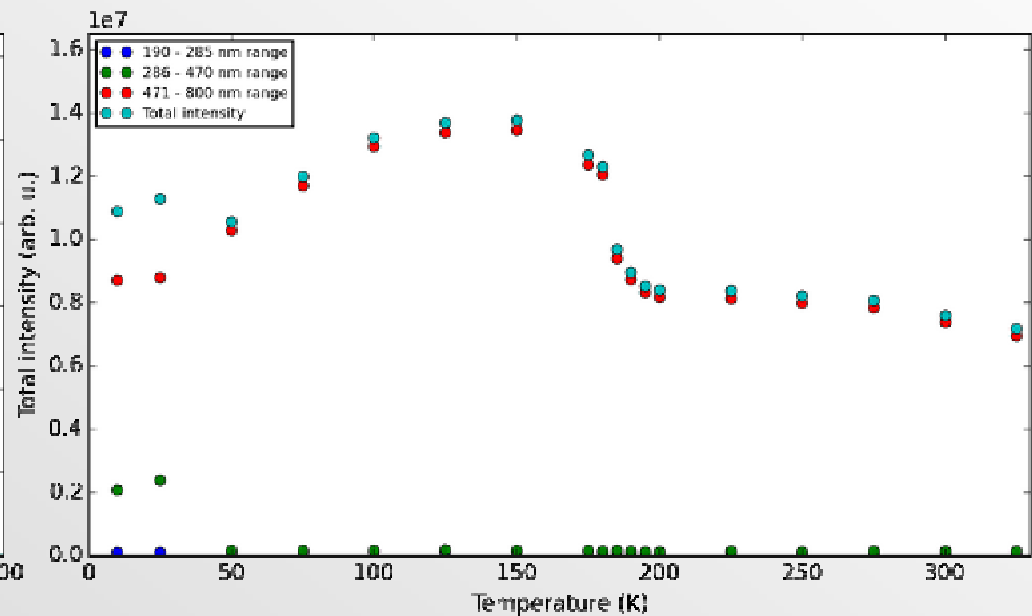
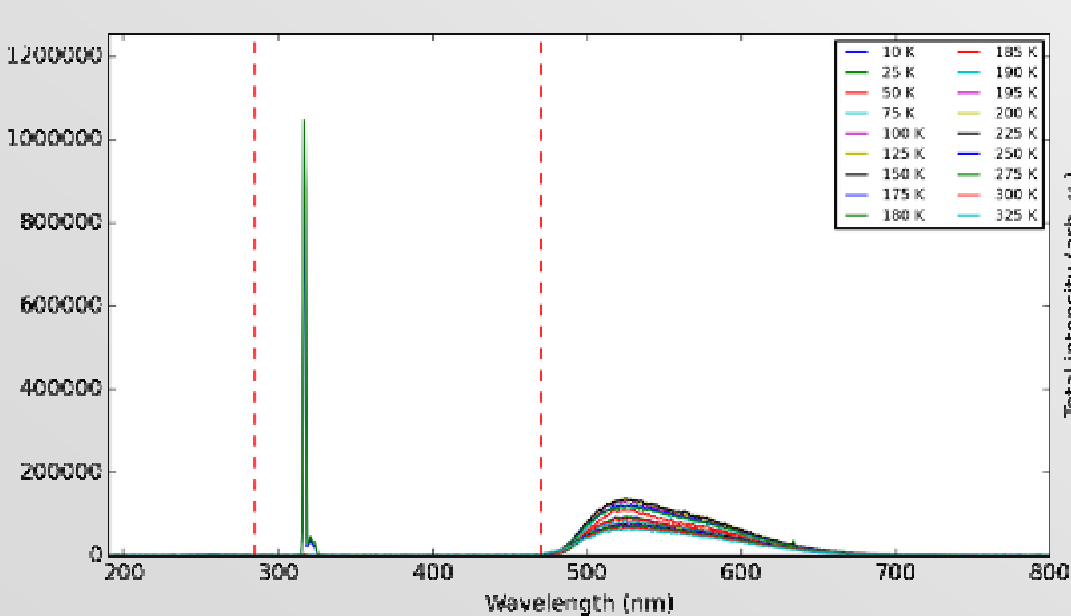
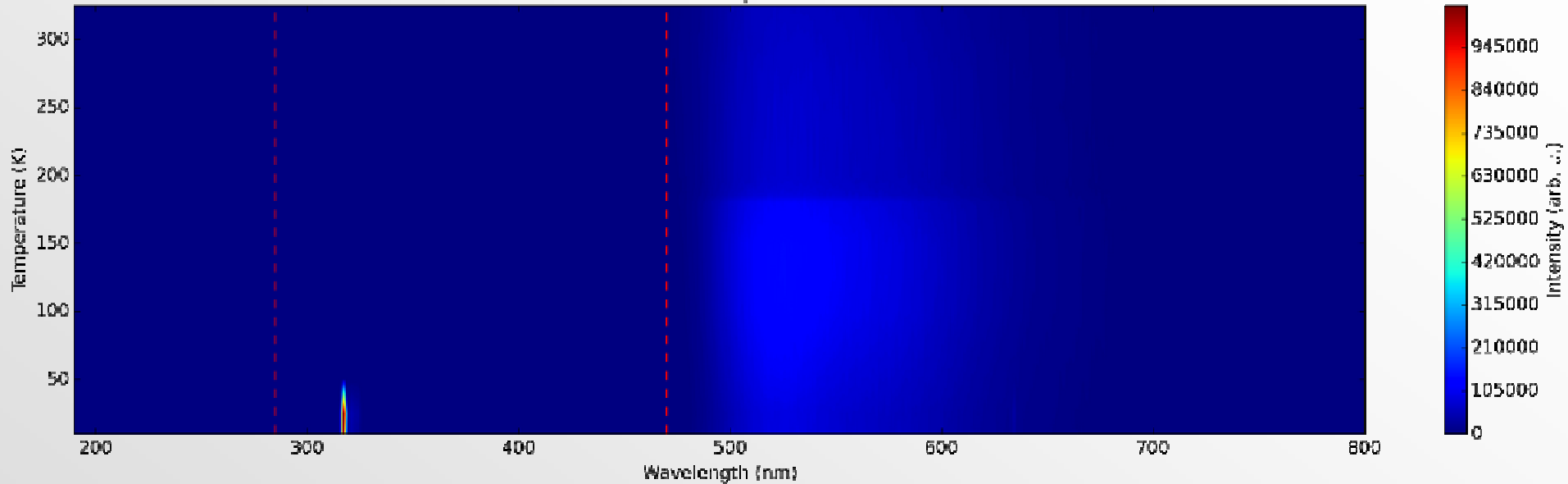
Radioluminescencija GAGG:Ce

Results for sample AY0003



Radioluminescencja GAGG:Ce

Results for sample AY0003



Podsumowanie

- mimo bliskości pewnych limitów teoretycznych nie należy oczekiwać spadku zainteresowania tematyką - wprost przeciwnie, zwiększone zapotrzebowanie na scyntylatory motywuje do dalszych poszukiwań nowych materiałów i doskonalenia tych znanych
- dzięki lepszemu zrozumieniu procesów fizycznych zachodzących w scyntylatorze istnieje realna szansa na poprawę wybranych parametrów znanych materiałów, m.in. przez świadomą modyfikację składu - wiele nadziei można tu wiązać z wieloskładnikowymi kryształami tlenkowymi

Podsumowanie

- szanse na odkrycie materiału aktywowanego jonami RE^{3+} o bardzo wysokiej wydajności scyntylacji ($Y \gg 100000$ ph/MeV), a jednocześnie dużej szybkości ($\tau \ll 20$ ns), są raczej znikome
- poprawa zdolności rozdzielczej jest możliwa (cel: $R \sim 2\%$ przy 662 keV)
- wiele innych właściwości scyntylatorów można również poprawić
- nie należy oczekiwać spadku zainteresowania tematyką - wprost przeciwnie, zwiększone zapotrzebowanie na scyntylatory motywuje do dalszych poszukiwań nowych materiałów i doskonalenia tych znanych