

*Załącznik nr 2 do wniosku Łukasza Świdarskiego o wszczęcie postępowania habilitacyjnego*

**1. Imię i Nazwisko.**

Łukasz Świdarski

**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.**

Stopień magistra fizyki:

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, 2002 r.

Tytuł pracy magisterskiej: „Badanie rozkładu barier na fuzję przy użyciu cyklotronu.”

promotor: dr hab. Ernest Piasecki

Stopień doktora nauk fizycznych:

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, 2005 r.

Tytuł rozprawy doktorskiej: „Badanie rozkładu barier na fuzję w oddziaływaniu jąder Ne i Sn oraz Ne i Ni.”

promotor: dr hab. Ernest Piasecki

**3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.**

- 2016 – Kierownik Zakładu Fizyki Detektorów, Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), Otwock-Świerk
- 2013 – 2014 Kierownik Zakładu Fizyki Detektorów, Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), Otwock-Świerk
- 2012 – Adiunkt w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), Otwock-Świerk
- 2006 – 2011 Adiunkt w Instytucie Problemów Jądrowych (IPJ) im. Andrzeja Sołtana, Otwock-Świerk
- 2002 – 2005 Studia doktoranckie na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

**4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):**

**a) tytuł osiągnięcia naukowego,**

„Rozwój technik detekcyjnych w celu badania relacji pomiędzy nieproporcjonalnością odpowiedzi, energetyczną zdolnością rozdzielczą scyntylatorów oraz czasem zaniku scyntylacji.”

**b) lista publikacji stanowiąca podstawę postępowania habilitacyjnego,**

- [A1] Ł. Świdarski, M. Moszyński, W. Czarnacki, A. Syntfeld-Każuch, M. Gierlik, *Non-proportionality and energy resolution of NaI(Tl) at wide temperature range (-40°C to +23°C)*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 54 No 4 (2007) 1372.

(wkład: 60%, przeprowadzenie pomiarów, opracowanie i analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie publikacji)

- [A2] Ł. Świdorski, M. Moszyński, A. Nassalski, A. Syntfeld-Każuch, T. Szczęśniak, K. Kamada, K. Tsutsumi, Y. Usuki, T. Yanagida, A. Yoshikawa, *Light yield non-proportionality and energy resolution of praseodymium doped LuAG scintillator*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 56 No 3 (2009) 934.

(wkład: 50%, przeprowadzenie pomiarów, opracowanie i analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie publikacji)

- [A3] Ł. Świdorski, M. Moszyński, A. Nassalski, A. Syntfeld-Każuch, T. Szczęśniak, K. Kamada, T. Tsutsumi, Y. Usuki, T. Yanagida, A. Yoshikawa, W. Chewpraditkul, M. Pomorski, *Scintillation properties of praseodymium doped LuAG scintillator compared to cerium doped LuAG, LSO and LaBr<sub>3</sub>*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 56 No 4 (2009) 2499.

(wkład: 40%, przeprowadzenie pomiarów, opracowanie i analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie publikacji)

- [A4] Ł. Świdorski, M. Moszyński, W. Czarnacki, J. Iwanowska, A. Syntfeld-Każuch, T. Szczęśniak, G. Pausch, C. Plettner, K. Roemer, *Measurement of Compton edge position in low-z scintillators*, Radiat. Meas. Vol. 45 (2010) 605.

(wkład: 60%, budowa układu detekcyjnego, przeprowadzenie pomiarów, opracowanie i analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie publikacji)

- [A5] Ł. Świdorski, M. Moszyński, W. Czarnacki, A. Syntfeld-Każuch, T. Szczęśniak, R. Marcinkowski, G. Pausch, C. Plettner, K. Roemer, *Energy resolution of Compton electrons in LaBr<sub>3</sub>:Ce scintillator*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 57 No 3 (2010) 1697.

(wkład: 50%, budowa i optymalizacja układu detekcyjnego, przeprowadzenie pomiarów, opracowanie i analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie publikacji)

- [A6] Ł. Świdorski, R. Marcinkowski, M. Moszyński, W. Czarnacki, M. Szawłowski, T. Szczęśniak, G. Pausch, C. Plettner, K. Roemer, *Electron response of some low-Z scintillators in wide energy range*, J. Instrum. Vol. 7 (2012) P06011.

(wkład: 60%, budowa układu detekcyjnego, przeprowadzenie pomiarów, opracowanie i analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie publikacji)

- [A7] Ł. Świdorski, R. Marcinkowski, M. Szawłowski, M. Moszyński, W. Czarnacki, A. Syntfeld-Każuch, T. Szczęśniak, G. Pausch, C. Plettner, K. Roemer, *Non-proportionality of electron response and energy resolution of Compton electrons in scintillators*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 59 No 1 (2012) 222.

(wkład: 40%, budowa i optymalizacja układu detekcyjnego, przeprowadzenie pomiarów, opracowanie i analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie publikacji)

[A8] Ł. Świdorski, M. Moszyński, W. Czarnacki, M. Szawłowski, T. Szczeńniak, G. Pausch, C. Plettner, K. Roemer, P. Schotanus, *Response of doped alkali iodides measured with gamma-ray absorption and Compton electrons*, *Nucl. Instrum. Meth. A Vol. 705 (2013)* 42.

(wkład: 65%, budowa i optymalizacja układu detekcyjnego, przeprowadzenie pomiarów, opracowanie i analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie publikacji)

[A9] Ł. Świdorski, M. Moszyński, A. Syntfeld-Każuch, M. Szawłowski, T. Szczeńniak, *Measuring the scintillation decay time for different energy depositions in NaI:Tl, LSO:Ce and CeBr<sub>3</sub> scintillators*, *Nucl. Instrum. Meth. A Vol. 749 (2014)* 68.

(wkład: 70%, budowa i optymalizacja układu detekcyjnego, przeprowadzenie pomiarów, opracowanie i analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie publikacji)

**c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.**

**4.1. Wstęp**

Jednym z głównych tematów badawczych, którym zajmuję się w ramach mojej pracy zawodowej, jest rozwijanie technik detekcyjnych pozwalających na charakterystykę podstawowych własności scyntylatorów. Scyntylatory stanowią jedną z grup materiałów, dzięki którym możliwa jest detekcja promieniowania jonizującego. Absorpcja energii niesionej przez cząstkę bądź foton prowadzi do wzbudzenia stanów atomowych w scyntylatorze, a następnie dochodzi do deekscytacji wzbudzonych stanów, między innymi poprzez emisję światła w zakresie widzialnym, ultrafiolecie bądź też podczerwieni. Światło wygenerowane podczas takiego procesu może być zarejestrowane przez fotodetektor charakteryzujący się czułością w zakresie widma emisyjnego danego scyntylatora. W efekcie sygnał wytworzony w fotodetektorze może posłużyć do rejestracji odpowiedzi scyntylatora na promieniowanie, w zasięgu którego tenże się znajduje.

Scyntylatory mogą występować w postaci różnorodnych substancji, które z kolei mogą być używane w różnych stanach skupienia, zarówno w postaci ciał stałych, cieczy, jak i w postaci gazowej. Scyntylatory jako ciała stałe mogą przyjmować postać amorficzną (plastiki, ceramiki, proszki) lub krystaliczną. Wspólną cechą większości scyntylatorów jest możliwość produkowania ich w dużych rozmiarach, do kilkunastu lub nawet kilkudziesięciu centymetrów. Stanowi to znaczną zaletę w stosunku do detektorów półprzewodnikowych, które przeważnie mają rozmiar w granicach pomiędzy ułamkiem milimetra a pojedynczymi centymetrami. W przypadku największych detektorów półprzewodnikowych, takich jak detektory germanowe, wymagają one dodatkowo chłodzenia do niskich temperatur, bliskiej temperatury wrzenia ciekłego azotu (LN<sub>2</sub>).

Możliwość wytwarzania scyntylatorów w postaci dużych elementów powoduje, że są to najbardziej powszechnie używane detektory wysokoenergetycznego promieniowania gamma. Biorąc pod uwagę takie cechy jak wydajność detekcji, koszt wytworzenia i wymagania

techniczne dotyczące użytkowania, są one bezkonkurencyjne dla detekcji kwantów o energii powyżej 100 keV. Nie oznacza to jednak, że nie mogą być stosowane w detekcji cząstek naładowanych, począwszy od elektronów poprzez protony, cząstki alfa po ciężkie jony, a pośrednio również neutrony. Szeroka gama dostępnych materiałów scyntylacyjnych powoduje że odgrywają one ważną rolę w różnych dziedzinach nauki i techniki, takich jak: eksperymenty fizyki wysokich energii (kalorymetry) i fizyki reakcji jądrowych (spektrometry), w medycynie (np. tomografia komputerowa, pozytonowa tomografia emisyjna, rezonans magnetyczny, dozymetria), kontroli ruchu towarów i osób (np. skanery na lotniskach i w portach przeładunkowych) czy też różnych gałęziach przemysłu (np. przemysł wydobywczy).

Po obronie pracy doktorskiej, która dotyczyła badań wysokości bariery na fuzję w reakcjach jądrowych, dołączyłem w 2006 r. do zespołu prof. Marka Moszyńskiego w Zakładzie Detektorów i Elektroniki Jądrowej Instytutu Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana w Świerku. Zespół prof. Moszyńskiego zajmował się badaniem detektorów scyntylacyjnych do detekcji promieniowania gamma, neutronów oraz cząstek naładowanych. Badania obejmowały również charakteryzację różnego rodzaju fotodetektorów do odczytu scyntylacji, co dawało możliwość przeprowadzania pomiarów przy pomocy różnorodnych technik eksperymentalnych. Mając możliwość korzystania z doświadczenia pracowników zespołu, rozpocząłem badania scyntylatorów pod kątem relacji pomiędzy ilością emitowanego przez nie światła, czasem zaniku scyntylacji, wydajnością świecenia w funkcji energii absorbowanej przez scyntylatory oraz ich energetyczną zdolnością rozdzielczą.

Energetyczna zdolność rozdzielcza jest jednym z najważniejszych parametrów decydujących o możliwości zastosowania danego scyntylatora w konkretnych pomiarach. Wybrany cykl prac przedstawia opis zbioru technik pomiarowych, które pozwalają na głębszą analizę procesów odpowiedzialnych za determinowanie energetycznej zdolności rozdzielczej scyntylatorów. Prace te obejmują głównie dwa zagadnienia: opracowanie nowych technik pomiarowych pozwalających na powiązanie nieproporcjonalności odpowiedzi scyntylatora z jego energetyczną zdolnością rozdzielczą oraz badania wpływu wolnych składowych scyntylacji na energetyczną zdolność rozdzielczą.

#### **4.2. Nieproporcjonalność a energetyczna zdolność rozdzielcza**

Związek nieproporcjonalności odpowiedzi scyntylatora i jego wewnętrznej zdolności rozdzielczej został na przestrzeni ostatnich kilku dziesięcioleci szeroko udokumentowany. Już w 1956 roku G.G. Kelley wraz ze współpracownikami opublikowali wyniki świadczące, iż energetyczna zdolność rozdzielcza kryształu NaI aktywowanego talem (Tl) jest gorsza niż wartość wynikająca z ilości fotoelektronów rejestrowanych przez fotopowielacz [1]. Autorzy tej publikacji poddawali jednak w wątpliwość fakt, iż nieproporcjonalna odpowiedź NaI:Tl na elektrony o różnych energiach może w sposób znaczący prowadzić do rozmycia obserwowanej energetycznej zdolności rozdzielczej. W tym samym roku D. Engelkemeir wskazywał, iż różnice w wydajności świecenia mogą być źródłem nieliniowej odpowiedzi NaI:Tl na fotony gamma [2], jednakże dyskutując wyniki swoich pomiarów wskazał jedynie na konieczność dalszego badania obserwowanego efektu.

W latach 1960-1962 A. Meyer, R.B. Murray i R. Gwin wykazali związek pomiędzy nieproporcjonalnością odpowiedzi scyntylatorów NaI:Tl i CsI:Tl na fotony gamma, elektrony oraz cząstki naładowane a gęstością jonizacji [3],[4] wywoływaną w scyntylatorze wskutek detekcji wspomnianych kwantów i cząstek.

Do końca lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku powstały pierwsze modele, przy pomocy których autorzy starali się opisać zjawisko nieproporcjonalności oraz skwantyfikować jego wpływ na energetyczną zdolność rozdzielczą dla rejestrowanych przez scyntylator kwantów lub cząstek. P. Iredale wskazywał na wagę elektronów delta, które zostają wygenerowane podczas spowalniania cząstek w materii i same niosą energię, która pozwala im na dalszą jonizację ośrodka [5]. Elektrony delta charakteryzują się ciągłym rozkładem energii, a ich produkcja podlega fluktuacjom statystycznym. J.R. Prescott i G.H. Narayan wskazywali natomiast na złożoność procesu absorpcji kwantów gamma, który może być poprzedzony wielokrotnymi rozproszeniami Comptona, a po zjawisku fotoabsorpcji możemy obserwować kaskadę promieniowania X oraz elektrony Auger [6]. Występowanie tych zjawisk prowadzi do generacji dużej ilości niskoenergetycznych elektronów wtórnych o ciągłym rozkładzie energii. Biorąc pod uwagę fakt, iż wydajność świecenia zależy od energii cząstek jonizujących ośrodek, wtórne elektrony mają wpływ na rozmycie energetycznej zdolności rozdzielczej.

Pomimo wieloletnich badań nad efektem nieproporcjonalności w scyntylatorach, sama geneza występowania tego zjawiska, a w szczególności różnic w jej zależności od energii dla scyntylatorów o różnej budowie krystalicznej bądź domieszkowaniu, nadal nie jest opisana w wystarczająco precyzyjny sposób. Stąd też obserwuje się dużą aktywność w sferze rozwoju modeli teoretycznych, dzięki którym będzie można nie tylko opisać procesy prowadzące do zamiany energii zdeponowanej w scyntylatorze na światło, ale również przewidzieć odpowiedź scyntylatora na absorbowane promieniowanie w zależności od jego składu (zarówno pierwiastków bazowych jak i ewentualnych domieszek), budowy (np. kształtu sieci krystalicznej) oraz postaci (np. stanu skupienia – gazowy, ciekły, lub stały jako np. kryształ lub ceramika) [7]-[10]. Rozwój modeli wymaga jednak ciągłego rozwoju technik detekcyjnych, dzięki którym możliwe jest charakteryzowanie własności scyntylatorów. Zebrane dane doświadczalne są wykorzystywane zatem do walidacji założeń leżących u podstaw wprowadzanych modeli oraz do określenia wartości parametrów służących do ilościowego opisu modelowanych zjawisk.

Nieproporcjonalnością scyntylatora nazywamy wielkość opisującą miarę odchylenia, w funkcji energii, wydajności świecenia od wartości zmierzonej przy arbitralnie ustalonej energii. Innymi słowy, jest to ilość zebranych nośników informacji na jednostkę zaabsorbowanej energii znormalizowana do tak samo zdefiniowanego ilorazu, zmierzonego przy energii referencyjnej (najczęściej 662 keV, równej energii kwantów gamma ze źródła  $^{137}\text{Cs}$ ):

$$NP(E) = \left( \frac{L}{E(\text{keV})} \right) / \left( \frac{L_{662}}{662 \text{ keV}} \right).$$

Idealnie proporcjonalny scyntylator charakteryzowałby się zatem zależnością:

$$NP(E) \equiv 1.$$

Wspomnianymi nośnikami informacji mogą być np.: fotony w przypadku, gdy opisujemy bezpośrednio scyntylatory, fotoelektrony – jeśli odnosimy się do pomiarów fotopowielaczem lub pary elektron-dziura – w pomiarach wykonanych przy pomocy fotodetektorów półprzewodnikowych.

Energetyczna zdolność rozdzielcza scyntylatora jest definiowana jako iloraz zmierzonej szerokości połówkowej zarejestrowanego piku (ang. „full width at half maximum”) oraz położenia piku, niosącego informację o wielkości mierzonego impulsu. Podobnie jak nieproporcjonalność, energetyczna zdolność rozdzielcza jest funkcją energii zdeponowanej w scyntylatorze i może być zapisana jako suma kilku niezależnych składników [11]:

$$(\Delta E/E)^2 = \delta_{int}^2 + \delta_{stat}^2 + \delta_{trans}^2 + \delta_{noise}^2,$$

gdzie:

- $\delta_{noise}$  (składnik szumowy) – opisuje szумы fotodetektora oraz elektroniki (zaniechwalnie mały w przypadku fotopowielaczy, możliwy do zmierzenia w przypadku detektorów półprzewodnikowych),
- $\delta_{trans}$  (składnik transferu światła) – opisuje rozmycie związane z transferem światła do fotodetektora (zaniechwalnie małe w przypadku obecnie stosowanych fotodetektorów przy dobrze wykonanym łączeniu scyntylator-fotodetektor),
- $\delta_{stat}$  (wkład statystyczny) – opisuje rozmycie związane ze statystyką nośników informacji i jest opisane wzorem:

$$- \delta_{stat} = 2.355 \times \sqrt{\frac{1+\varepsilon}{N_{phe}}} \text{ w przypadku fotopowielaczy,}$$

gdzie  $\varepsilon$  oznacza wariancję wzmocnienia fotopowielacza, zaś  $N_{phe}$  oznacza ilość zarejestrowanych fotoelektronów,

$$- \delta_{stat} = 2.355 \times \sqrt{\frac{F}{N_{eh}}} \text{ w przypadku fotodetektorów półprzewodnikowych,}$$

gdzie  $F$  jest czynnikiem opisującym rozmycie wzmocnienia fotodetektora (ang. „excess noise factor”), zaś  $N_{eh}$  oznacza ilość zarejestrowanych par elektron-dziura,

- $\delta_{int}$  (wewnętrzna zdolność rozdzielcza) – opisuje wkład do energetycznej zdolności rozdzielczej związany z własnościami scyntylatora.

Wartość wewnętrznej zdolności rozdzielczej zarejestrowanej podczas pomiarów ze scyntylatorem zależy od kilku czynników, takich jak niejednorodna budowa scyntylatora, samoabsorpcja (ang. „self-absorption”) światła w scyntylatorze, czy też niejednorodności we współczynniku odbicia reflektora, którym otoczony jest scyntylator w celu zmaksymalizowania ilości światła docierającego do fotodetektora. Efekty te mogą prowadzić do wariacji ilości światła rejestrowanego przez fotodetektor w zależności od obszaru powstania scyntylacji. Jednakże w wielu przypadkach doświadczenie, jakim dysponują producenci i użytkownicy scyntylatorów, pozwala na zredukowanie do minimum wpływu tych czynników na wewnętrzną zdolność rozdzielczą. Wówczas fundamentalnym czynnikiem limitującym wewnętrzną zdolność rozdzielczą pozostaje nieproporcjonalność odpowiedzi scyntylatora na zaabsorbowaną energię.

Ponadto, w przypadku niektórych scyntylatorów deekscytujących poprzez kilka składowych świecenia, obserwuje się wpływ obecności długich składowych na wewnętrzną zdolność rozdzielczą. W szczególności, wydłużanie stałej formowania we wzmacniaczu, co odpowiada całkowaniu większej części impulsu świetlnego emitowanego przez scyntylator, skutkuje wyraźną poprawą wewnętrznej zdolności rozdzielczej scyntylatora.

W 1999 r. prof. Moszyński wraz ze swoim zespołem opublikował wyniki pomiarów, gdzie efekt ten został zarejestrowany dla CsI:Tl z odczytem światła za pomocą fotodiody lawinowej (APD – ang. „avalanche photodiode”) w temperaturze pokojowej [12]. W późniejszych latach podobny efekt został zaobserwowany również dla ZnSe:Te [13], CsI:Tl [14] i CsI:Na [15] w temperaturze pokojowej oraz NaI:Tl w temperaturze ciekłego azotu [16].

Z drugiej strony, zaobserwowano również przeciwny wpływ długich składowych scyntylacji dla kryształów LGSO [17]. Kryształy LGSO charakteryzują się względnie krótkim czasem zaniku (65 ns), któremu towarzyszy tzw. poświata (ang – „afterglow”), czyli światło emitowane w znacznie wolniejszym procesie fosforescencji. W wymienionej publikacji wskazano na występowanie korelacji pomiędzy poświatą a zdolnością rozdzielczą scyntylatora. W przypadku kryształów LGSO o większym poziomie „afterglow”, ich wewnętrzna zdolność rozdzielcza była gorsza.

### **4.3. Wpływ długich składowych scyntylacji – NaI:Tl w niskich temperaturach**

Pracując w Zakładzie Detektorów i Elektroniki Jądrowej (obecnie przekształconym w Zakład Fizyki Detektorów) miałem możliwość współpracy z zespołem dr. Wiesława Czarnackiego. Dr Czarnacki kieruje grupą zajmującą się opracowaniem i przygotowaniem zestawów pomiarowych opartych o detektory półprzewodnikowe, przede wszystkim detektory krzemowe. Pierwsze prace eksperymentalne, które przeprowadziłem w zespole prof. Moszyńskiego dotyczyły charakteryzacji odpowiedzi scyntylatora NaI:Tl w szerokim zakresie temperatur (pomiędzy  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+23^{\circ}\text{C}$ ). Do odczytu światła scyntylacyjnego zastosowano przygotowany przez dr. Czarnackiego fotodetektor typu LAAPD (ang. "large area avalanche photodiode" – fotodioda lawinowa o dużej powierzchni) umieszczony w kriostacie wyposażonym w element Peltiera. Dzięki temu cały układ detekcyjny, czyli scyntylator wraz z fotodetektorem, mógł być badany w kontrolowanej, ustabilizowanej temperaturze. Opis procedury pomiarowej oraz uzyskane wyniki przedstawione są w publikacji [A1].

W ramach wykonywanych pomiarów zarejestrowano zmianę ilości emitowanego światła scyntylacyjnego w funkcji temperatury kryształu. Ilość emitowanego światła wzrasta wraz z obniżaniem się temperatury scyntylatora. Wzrost wydajności świecenia związany jest ze wzrostem intensywności długiej składowej zaniku scyntylacji. Efekt ten jest zmanifestowany poprzez obserwację znacznego wzrostu ilości rejestrowanego światła przy długich stałych formowania (ang. „shaping time” lub „peaking time”) we wzmacniaczu spektrometrycznym, co odpowiada całkowaniu dłuższych frakcji impulsu świetlnego. Co ciekawe, stosowanie różnych stałych formowania prowadzi do obserwacji różnych nieproporcjonalności świecenia, co świadczy pośrednio o różnych charakterystykach nieproporcjonalności związanych z poszczególnymi składowymi świecenia. Wydłużanie stałej formowania prowadzi do

zmniejszenia nieproporcjonalności w obszarze niskich energii kwantów gamma, co z kolei wiąże się z poprawą wewnętrzną zdolności rozdzielczej scyntylatora. Występowanie tego efektu zostało potwierdzone również w pomiarach przeprowadzanych na scyntylatorach CsI:Tl [14].

Cykl pomiarów przedstawionych w omawianej publikacji podsumowuje zestawienie wyników, w których optymalna wewnętrzna zdolność rozdzielcza, zmierzona w różnych temperaturach, została uzyskana w przypadku gdy stała formowania sygnału jest dobrana tak, aby scałkowany został cały impuls świetlny.

#### 4.4. Wpływ długich składowych scyntylacji – LuAG:Pr

Dzięki ekspertyzie, jaką dysponuje nasza grupa w dziedzinie technik pomiarowych wykorzystywanych do charakteryzacji własności spektrometrycznych scyntylatorów, nawiązaliśmy w 2007 r. współpracę z zespołem prof. Akiry Yoshikawy (Tohoku University) i dr Kei Kamady (wówczas pracującego w firmie Furukawa K.K.) z Japonii. Zespół ten zajmuje się hodowaniem scyntylatorów ze szczególnym naciskiem na poszukiwanie nowych materiałów scyntylacyjnych. W owym czasie prof. Yoshikawa zaproponował domieszkowanie trójwartościowymi jonami prazeodymu ( $\text{Pr}^{3+}$ ) jako alternatywę domieszkowania scyntylatorów cerem, co w przypadku niektórych kryształów zaowocowało powstaniem nowych materiałów o interesujących własnościach świetlnych. Jednym z pierwszych przykładów był LuAG:Pr ( $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$ ), który charakteryzował się względnie dużą jasnością ( $\sim 15000$  ph/MeV) oraz szybkim zanikiem impulsu scyntylacyjnego ( $\sim 20$  ns).

Otrzymaliśmy od dr Kamady kilka próbek scyntylatora LuAG:Pr w celu wykonania charakterystyki ich odpowiedzi na promieniowanie gamma. Wyniki uzyskanych pomiarów przedstawione zostały w pracach [A2] i [A3]. LuAG:Pr okazał się mieć dość proporcjonalny charakter, odchylenie od proporcjonalności wynosiło zaledwie ok. -2% dla 60 keV i ok. -7% dla 32 keV. Kształt krzywej nieproporcjonalności był podobny do scyntylatorów z grupy tlenków (np. BGO, LSO, LuAP) oraz halogenków metali ziem rzadkich (np. LaBr<sub>3</sub>, LaCl<sub>3</sub>). Ciekawą obserwację niósł za sobą pomiar ilości rejestrowanych fotoelektronów oraz zdolności rozdzielczej mierzonej dla promieniowania gamma przy różnych stałych formowania. Wydłużanie stałej formowania z 3  $\mu\text{s}$  do 12  $\mu\text{s}$  skutkowało wzrostem rejestrowanego światła o ok. 20%. Wynikało to z występowania w LuAG:Pr długich składowych scyntylacji o stałych zaniku rzędu kilku mikrosekund i intensywności sięgającej 75% całego impulsu, podczas gdy szybka składowa o stałej zaniku rzędu kilkudziesięciu nanosekund niosła ze sobą zaledwie ok. 25% ilości światła. Jednakże charakterystyka nieproporcjonalności pozostała identyczna, co było odmienne w stosunku do efektu obserwowanego w jodkach metali alkalicznych (np. NaI:Tl, CsI:Tl, ZnSe:Te). Wzrost ilości rejestrowanego światła nie prowadził również do wyraźnej poprawy energetycznej zdolności rozdzielczej. Wydłużanie stałej formowania we wspomnianym powyżej zakresie skutkowało nieznacznie lepszą zdolnością rozdzielczą (5.0% przy 12  $\mu\text{s}$  w stosunku do 5.2% przy 3  $\mu\text{s}$ ). W efekcie wewnętrzna zdolność rozdzielcza była lepsza przy krótkiej stałej formowania (2.5%) niż przy dłuższej (3.0%). Wyniki tych pomiarów wskazują na inny charakter długiej składowej scyntylacji występującej w LuAG:Pr niż obserwowanych w jodkach metali



alkalicznych. Uwzględnienie informacji zawartej w długiej składowej scyntylacji poprzez scałkowanie niesionego przez nią światła nie prowadzi do poprawy proporcjonalności oraz energetycznej zdolności rozdzielczej, ponadto ma wręcz negatywny wpływ na wartość wewnętrznej zdolności rozdzielczej scyntylatora. Podobny efekt zaobserwowany został przez zespół prof. Moszyńskiego w kryształach LGSO:Ce [17], gdzie wskazano na istnienie korelacji pomiędzy pogarszaniem się wewnętrznej zdolności rozdzielczej a wzrostem poziomu poświaty (ang. "afterglow") w tych scyntylatorach. Stąd też można założyć, że długie składowe świecenia w kryształach LuAG:Pr mają charakter podobny do "afterglow".

W publikacji [A3] wskazano również na fakt, iż nie tylko zmiana struktury krystalicznej scyntylatora, ale również sama zmiana aktywatora wprowadzonego do identycznych sieci, prowadzi do zmiany nieproporcjonalności, co koreluje się również z wartościami wewnętrznej zdolności rozdzielczej scyntylatorów. Jako przykłady pokazano różnice charakterystyk nieproporcjonalności i wewnętrznej zdolności rozdzielczej w grupach scyntylatorów  $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ -LuAG:Ce-LSO:Ce oraz LuAG:Pr-LuAG:Ce, gdzie im mniej proporcjonalna odpowiedź na kwanty gamma o różnych energiach, tym gorsza wewnętrzna zdolność rozdzielcza scyntylatora.

#### **4.5. Nieproporcjonalność i energetyczna zdolność rozdzielcza dla elektronów Comptona oraz absorpcji kwantów gamma**

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat, zespół prof. Moszyńskiego współpracował z dr Guntramem Pauschem z firmy Target, Solingen, Niemcy. W 2008 r. dr Pausch zwrócił się do naszej grupy z propozycją zastosowania metody koincydencji komptonowskich (ang. "Compton Coincidence Technique – CCT [18],[19]) w celu charakteryzacji scyntylatorów. W szczególności miał na myśli scyntylatory z grupy plastików, które ze względu na małą gęstość oraz liczbę atomową przeważnie nie absorbują pełnej energii kwantów gamma, dlatego w widmach energetycznych plastików nie można zarejestrować pików pełnej energii (ang. "full energy peaks"). Z tego względu kalibracja energetyczna plastików i pomiar ich energetycznej zdolności rozdzielczej przy pomocy źródeł promieniowania gamma jest utrudniona.

Skonstruowałem zatem układ detekcyjny składający się z testowanego scyntylatora oraz referencyjnego detektora germanowego (HPGe). Układ pomiarowy pozwalał na rejestrację w koincydencji energii elektronów komptonowskich w badanym scyntylatorze oraz energii rozproszonych komptonowsko kwantów gamma, zaabsorbowanych w detektorze referencyjnym HPGe. W pierwszym etapie prac skoncentrowałem się na rejestracji zdarzeń, w których kwanty gamma emitowane ze źródła rozpraszają się w scyntylatorze pod kątem  $180^\circ$  (tzw. rozpraszanie wsteczne – ang. "backscattering"), co pozwoliło na dokładne określenie amplitudy sygnału odpowiadającej położeniu krawędzi Comptona w widmie energetycznym scyntylatora. Wyniki pomiarów opublikowano w publikacji [A4], gdzie wykazano iż położenie krawędzi Comptona względem maksimum obserwowanego w ciągłym widmie komptonowskim zależy od rodzaju testowanego scyntylatora i wiąże się z jego energetyczną zdolnością rozdzielczą.

Następnie postanowiliśmy wykorzystać opisaną technikę eksperymentalną do badania relacji pomiędzy nieproporcjonalnością wydajności świecenia scyntylatorów a ich zdolnością rozdzielczą. W celu sprawdzenia poprawności metody i precyzji pomiaru zmierzaliśmy odpowiedź scyntylatora  $\text{LaBr}_3$  na elektrony komptonowskie w rozpraszaniu wstecznym. Metoda doświadczalna oraz uzyskane rezultaty zostały opisane w publikacji [A5]. Wybór scyntylatora nie był przypadkowy, gdyż  $\text{LaBr}_3$  charakteryzuje się najlepszą spośród scyntylatorów energetyczną zdolnością rozdzielczą. Stanowi on zatem najbardziej czuły instrument do weryfikacji wspomnianej metody pomiarowej. W ramach eksperymentu zmierzono energetyczną zdolność rozdzielczą elektronów odpowiadających krawędzi Comptona dla 6 źródeł promieniotwórczych o energiach pomiędzy 122 keV a 1116 keV. Ponadto, 8 źródeł promieniotwórczych w zakresie energii 32 keV do 1116 keV zostało użytych w celu pomiaru tej samej wielkości poprzez detekcję pików pełnej absorpcji w scyntylatorze  $\text{LaBr}_3$ . Wewnętrzna zdolność rozdzielcza scyntylatora okazała się być niezależna od metody pomiaru, a wartości zmierzone przy pomocy bezpośredniego pomiaru kwantów absorbowanych oraz za pomocą techniki CCT ułożyły się wzdłuż wspólnej krzywej.

Po pozytywnym zweryfikowaniu działania naszego układu detekcyjnego postanowiliśmy rozszerzyć zakres prowadzonych przy jego zastosowaniu badań scyntylatorów. Detektor HPGe charakteryzuje się bardzo dobrą energetyczną zdolnością rozdzielczą, rzędu 1-2 keV w zakresie energii kwantów gamma rejestrowanych podczas rozprożeń komptonowskich. Dzięki temu możliwe jest precyzyjne określenie energii przekazanej elektronowi w scyntylatorze, na poziomie dokładności znacznie przewyższającym jego energetyczną zdolność rozdzielczą. W przypadku, gdy testowany scyntylator oraz detektor referencyjny są wystarczająco duże, a odległość między nimi jest względnie mała (nie większa niż kilkukrotność rozmiaru detektorów), możliwa jest rejestracja rozprożeń komptonowskich zachodzących pod wieloma różnymi kątami podczas jednej sesji pomiarowej. Wysoka energetyczna zdolność rozdzielcza detektora HPGe pozwala na dokładną selekcję zdarzeń zachodzących pod różnymi kątami, stąd też nie jest konieczne stosowanie kolimatorów bądź ustawianie detektorów w dużej odległości między sobą w celu zredukowania kąta bryłowego, pod jakim detektor referencyjny monitoruje badany scyntylator, tak jak było to realizowane przez pomysłodawców tej metody [18]. Warto dodać, że w ostatnich latach grupa naukowców z ośrodka Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) w USA zaprojektowała i skonstruowała układ detekcyjny do szybkiej charakteryzacji scyntylatorów metodą CCT. Układ ten nosi nazwę SLYNCI [20] i składa się z 5 detektorów HPGe, monitorujących badany scyntylator pod wieloma kątami względem kierunku wyznaczonego przez kwanty gamma padające z intensywnego źródła promieniotwórczego (około 1 mCi) na testowaną próbkę. Koszt tego układu detekcyjnego jest szacowany na kilkaset tysięcy USD, tymczasem nasz układ detekcyjny został skonstruowany w oparciu o zaledwie jeden detektor HPGe. Zastosowanie zwartej geometrii pomiarowej oraz różnych źródeł gamma o niewielkiej aktywności (rzędu kilka  $\mu\text{Ci}$ ) pozwoliło nam na uzyskanie wyników o takiej samej precyzji w zbliżonym czasie eksperymentalnym (ok. kilkadziesiąt godzin pomiarów).

Metoda CCT została rozwinięta w podobny sposób przez zespół dr Ugorowskiego z Kansas State University (KSU) [21]. Jednakże grupa ta, poza przedstawieniem dwóch testowych przykładów, nie kontynuowała badań nad scyntylatorami przy użyciu tej metody, w

szczegółności nie szukając korelacji pomiędzy nieproporcjonalnością odpowiedzi a wewnętrzną zdolnością rozdzielczą scyntylatorów. Nasz zespół wykorzystał zbudowany w naszym laboratorium układ detekcyjny w celu charakteryzacji nieproporcjonalności i energetycznej zdolności rozdzielczej kilku scyntylatorów będących przedstawicielami różnych typów materiałów. Wyniki te zostały przedstawione w publikacjach [A6] i [A7].

W publikacji [A6] zostało opisane zastosowanie metody CCT do pomiaru nieproporcjonalności oraz wewnętrznej zdolności rozdzielczej scyntylatorów o niskiej liczbie atomowej. W szczególności, metoda ta jest użyteczna w przypadku kalibracji energetycznej scyntylatorów organicznych, w przypadku których mała liczba atomowa oraz gęstość uniemożliwia rejestrację pików pełnej energii. Jako przykład posłużyły scyntylator plastikowy BC408 oraz scyntylator ciekły EJ301. Dolna granica energii, dla której możliwa była rejestracja obydwu charakterystyk nieproporcjonalności sięgała ok. 10 keV, co odpowiadało około 20 fotoelektronom emitowanym z katody fotopowielacza podczas każdego zdarzenia niosącego taką energię.

W pracy wykazano również, iż pomiar nieproporcjonalności w przypadku scyntylatorów o słabej energetycznej zdolności rozdzielczej możliwy jest przy zastąpieniu referencyjnego detektora HPGe poprzez scyntylator. Zastosowanie scyntylatora o odpowiedniej energetycznej zdolności rozdzielczej (np.  $\text{LaBr}_3$ ) jako detektora referencyjnego pozwoliło na wykorzystanie w pomiarze metodą CCT źródła wysokoenergetycznych kwantów gamma (4.44 MeV z reakcji  $\alpha+{}^9\text{Be}$  w źródle  ${}^{238}\text{Pu}\text{-Be}$ ). Źródło Pu-Be jest emitorem neutronów prędkich, co naraża detektory HPGe na degradację ich własności poprzez indukowanie zniszczeń radiacyjnych w kryształach germanu. Dzięki zastosowaniu źródła Pu-Be, pomiar nieproporcjonalności oraz wewnętrznej zdolności rozdzielczej można było realizować w zakresie energii do niemal 4 MeV. Ten pomiar potwierdził fakt, iż scyntylatory organiczne charakteryzują się specyficzną odpowiedzią na elektrony, nie prezentując typowego dla innych scyntylatorów nasycenia krzywej nieproporcjonalności powyżej energii około 200-500 keV.

W omawianej powyżej pracy przedstawiono również wyniki pomiarów uzyskane przy pomocy lekkiego scyntylatora nieorganicznego  $\text{CaF}_2\text{:Eu}$ . Ze względu na znacznie większą wydajność świecenia  $\text{CaF}_2\text{:Eu}$ , możliwe było zarejestrowanie krzywej nieproporcjonalności oraz wewnętrznej zdolności rozdzielczej do energii zaledwie 3 keV, co odpowiada zaledwie 10 fotoelektronom emitowanym z katody fotopowielacza. Pomimo znacznej nieproporcjonalności świecenia  $\text{CaF}_2\text{:Eu}$ , scyntylator ten jest nadal bardziej proporcjonalny niż scyntylatory organiczne.

W pracy [A7], oprócz szczegółowego opisu zastosowanej metody analizy pomiarów, przedstawiono wyniki uzyskane dla scyntylatorów  $\text{LaBr}_3$ , LYSO oraz  $\text{CsI:Tl}$ .  $\text{LaBr}_3$  należy do grupy halogenków metali ziem rzadkich i charakteryzuje się prawie proporcjonalną odpowiedzią na energię elektronów zaabsorbowaną w scyntylatorze. LYSO należy do rodziny tlenków, charakteryzujących się przeważnie znacznym obniżeniem wydajności świecenia przy małych energiach deponowanych w scyntylatorze, natomiast  $\text{CsI:Tl}$  należy do grupy jodków metali alkalicznych, w których obserwujemy wzrost wydajności scyntylacji przy małych energiach absorbowanych przez scyntylator (ok. 10-100 keV). W ramach

przeprowadzonych eksperymentów wykazano, iż w przypadku  $\text{LaBr}_3$  i  $\text{LYSO}$  wewnętrzna zdolność rozdzielcza scyntylatorów jest taka sama niezależnie od tego, czy została zmierzona w procesie absorpcji kwantów gamma, czy też wyznaczono ją poprzez pomiar odpowiedzi na elektrony komptonowskie w metodzie CCT. Zaskakująca była obserwacja wewnętrznej zdolności rozdzielczej dla kryształu  $\text{CsI:Tl}$ . Wyniki były takie same w zakresie energii pomiędzy 200 keV a 1 MeV, natomiast w obszarze energii od 50 keV do 200 keV zarejestrowano znaczną rozbieżność pomiędzy wartościami zmierzonymi przy pomocy obu metod. Wewnętrzna zdolność rozdzielcza wyznaczona poprzez całkowitą absorpcję kwantów gamma była wyraźnie lepsza od wartości wyznaczonej dla elektronów komptonowskich. Szczególnie wyraźnie różnicę tą widać przy krótkiej stałej formowania we wzmacniaczu (2  $\mu\text{s}$ ), co odpowiada pomijaniu informacji niesionej w długiej składowej scyntylacji (rzędu kilku mikrosekund).

Różnice w złożoności procesów prowadzących do emisji scyntylacji wskutek fotoabsorpcji w stosunku do pojedynczego rozproszenia komptonowskiego odciskają swoje piętno na charakterystykach nieproporcjonalności mierzonych przy pomocy dwóch wspomnianych metod. Fotoabsorpcja jest często poprzedzona serią kilku rozprożeń Comptona, co prowadzi do produkcji elektronów o energii mniejszej niż absorbowany kwant gamma. Ponadto, w wyniku fotoabsorpcji emitowana jest kaskada niskoenergetycznych elektronów będących produktem wzbudzenia atomu, w którym doszło do fotoabsorpcji. Emitowane są również niskoenergetyczne kwanty X, które prowadzą z kolei do emisji kolejnych niskoenergetycznych elektronów, jak również obserwuje się elektrony Augera o energiach z zakresu energii wiązania elektronów na powłokach atomowych, czyli pomiędzy ułamkiem keV a ok. 100 keV. Wydajność świecenia tych elektronów jest zazwyczaj wyraźnie inna, niż wydajność świecenia elektronu wyprodukowanego podczas rozpraszania komptonowskiego, pomimo iż suma energii zaabsorbowana przez scyntylator w obydwu scenariuszach jest taka sama. Fakt ten prowadzi do rozsunęcia krzywych nieproporcjonalności mierzonych przy pomocy dwóch opisanych metod. W przypadku halogenków metali ziem rzadkich i tlenków (takich jak  $\text{LaBr}_3$  i  $\text{LYSO}$ ) obserwujemy, iż krzywa nieproporcjonalności mierzona przy pomocy fotoabsorpcji przebiega poniżej krzywej zarejestrowanej przy pomocy elektronów komptonowskich. Wynika to z mniejszej wydajności świecenia elektronów produkowanych w procesie fotoabsorpcji w stosunku do pojedynczego elektronu komptonowskiego o większej energii. Odwrotny efekt występuje w przypadku jodków metali alkalicznych (takich jak  $\text{CsI:Tl}$ ), gdzie wydajność świecenia elektronów o energiach z zakresu pomiędzy około 1 keV a 100 keV jest większa niż dla elektronów o wyższej energii. Stąd też odpowiedź scyntylatora mierzona przy pomocy fotoabsorpcji przebiega powyżej krzywej nieproporcjonalności zmierzonej poprzez pojedyncze elektrony komptonowskie.

Wpływ charakteru nieproporcjonalności na wewnętrzną zdolność rozdzielczą trzech kryształów z grupy jodków metali alkalicznych ( $\text{NaI:Tl}$ ,  $\text{CsI:Na}$ ,  $\text{CsI:Tl}$ ) został przedstawiony w publikacji [A8]. Różnice w kształcie krzywych wewnętrznej zdolności rozdzielczej, mierzonych za pomocą absorpcji kwantów gamma lub elektronów komptonowskich, są związane z faktem produkcji kaskady niskoenergetycznych elektronów, które towarzyszą fotoabsorpcji. Warto zwrócić uwagę, iż obserwacja charakterystycznych minimów w krzywych wewnętrznej zdolności rozdzielczej wyznaczanych dla fotoabsorpcji występuje

tylko dla jodków metali alkalicznych, gdzie wydajność świecenia ma tendencję wzrostową wraz z obniżaniem energii elektronów do ok. 10 keV, a następnie maleje dla mniejszych energii [22]. Efekt ten nie występuje zaś dla innych typów scyntylatorów, które charakteryzują się monotonicznym spadkiem wydajności świecenia wraz z obniżaniem energii elektronów. Stąd też wniosek, iż zaabsorbowane kwanty gamma o energiach pomiędzy 20 keV a 200 keV produkują istotną ilość elektronów o energiach z zakresu od około 1 keV do 100 keV.

Ponadto, potwierdzeniem stawianej tezy jest obserwacja korelacji pomiędzy stopniem nieproporcjonalności badanych scyntylatorów a ich wewnętrzną zdolnością rozdzielczą. Scyntylator NaI:TI, którego odpowiedź w najmniejszym stopniu odbiega od proporcjonalności, charakteryzuje się najlepszą wewnętrzną zdolnością rozdzielczą spośród badanych kryształów, podczas gdy CsI:TI, o najbardziej zmiennej nieproporcjonalności, wykazuje najgorszą wewnętrzną zdolność rozdzielczą.

#### **4.6. Separacja krzywych nieproporcjonalności dla scyntylatorów o wieloeksponencjalnym zaniku scyntylacji**

Pomimo, że jodki metali alkalicznych są jednymi z najstarszych znanych scyntylatorów, to nadal słabo opisanym zjawiskiem jest nieproporcjonalność odpowiedzi dla kryształów emitujących światło w postaci kilku składowych scyntylacji o różnych czasach zaniku. Występowanie więcej niż jednej składowej zaniku scyntylacji wskazuje na istnienie różnych procesów prowadzących do emisji światła w danym scyntylatorze. Jeśli różnice w czasach zaniku są wystarczająco duże, można badać odpowiedź scyntylatora na promieniowanie poprzez całkowanie mniejszej lub większej części całego impulsu. W przypadku stosowania do odczytu impulsów świetlnych elektroniki analogowej, pomiary takie można realizować poprzez dobór odpowiedniej stałej formowania we wzmacniaczu spektrometrycznym. Fakt, iż kształt nieproporcjonalności, jak również wewnętrzna zdolność rozdzielcza zależą od stałej formowania we wzmacniaczu został potwierdzony doświadczalnie dla kilku typów scyntylatorów (np. ZnSe:Te [13], CsI:TI [14], CsI:Na [15]). Stąd też powstało ciekawe pytanie: czy istnieje zależność pomiędzy czasem zaniku światła a energią zaabsorbowaną przez scyntylator? Zagadnienie to jest szczególnie interesujące w przypadku kryształów o wieloeksponencjalnym zaniku scyntylacji.

W celu uzyskania odpowiedzi na przedstawione powyżej pytanie, skonstruowałem układ detekcyjny służący do rejestracji impulsów scyntylacyjnych w funkcji energii zarejestrowanej w detektorze. Opis układu detekcyjnego wraz z analizą danych został opublikowany w pracy [A9]. Bezpośrednim bodźcem do rozpoczęcia prac w tym kierunku była publikacja zespołu z LBNL, który starał się zmierzyć czas zaniku scyntylacji kryształu NaI:TI wykorzystując fotopowielacz jako detektor światła wraz z przedwzmacniaczem sygnału [23]. Metoda ta wymagała jednak dekonwolucji impulsów formowanych przez wolny przedwzmacniacz ładunkowy, co skutkowało dużą niedokładnością pomiaru. Wykorzystałem zatem sygnał bezpośrednio z anody fotopowielacza w celu rejestracji zaniku scyntylacji przy pomocy oscyloskopu, do wyzwalania którego zastosowałem sygnał z dynody fotopowielacza po odpowiednim uformowaniu przy pomocy elektroniki analogowej. Rejestrowanie sygnału z

dynody pozwalało na selekcję zdarzeń odpowiadających absorpcji określonej energii w scyntylatorze. W ten sposób możliwa był rejestracja impulsów niosących energię od około 10 keV (wskutek rozproszenia Comptona) do pełnej energii kwantów gamma emitowanych przez źródło promieniowania użyte w danym pomiarze.

Obserwacje dokonane podczas pomiarów ze scyntylatorami o jednej składowej zaniku światła wskazują na bardzo słabą zależność tej wielkości od energii zaabsorbowanej przez kryształ, objawiającą się nieznacznym (około 10-20%) wydłużeniem czasu zaniku, bądź też na brak zależności w funkcji energii. Jednakże w przypadku NaI:Tl, który charakteryzuje się dwiema składowymi zaniku scyntylacji o długościach odpowiednio 225 ns oraz około 1.0  $\mu$ s, zaobserwowano skrócenie szybkiej składowej scyntylacji o około 11% dla małych energii deponowanych w kryształach. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż dzięki rejestracji impulsów złożonych z dwóch składowych, możliwe było odseparowanie nieproporcjonalności odpowiedzi szybkiej i wolnej składowej scyntylacji, co jest wynikiem unikalnym na skalę światową. Rejestracja czasów zaniku oraz amplitud scyntylacji opisywanych eksponencjalnym zanikiem pozwala na wyznaczenie intensywności, jakie niosą poszczególne składowe, a wyznaczone intensywności są proporcjonalne do ilości światła niesionego przez dane składowe.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że szybka składowa, niosąca ponad 90% światła emitowanego przez kryształ NaI:Tl, charakteryzuje się takim samym kształtem nieproporcjonalności, jaki obserwujemy dla innych domieszkowanych jodków metali alkalicznych. Natomiast wolna składowa scyntylacji pokazuje przeciwny trend w funkcji energii zdeponowanej w kryształach, charakterystyczny dla scyntylatorów z grupy tlenków oraz halogenków metali ziem rzadkich. Kształt obydwu zależności tłumaczy też fakt zmniejszania się nieproporcjonalności podczas zwiększania stałej formowania we wzmacniaczu. Całkowanie większej części impulsu zwiększa udział wolnej składowej w stosunku do szybkiej składowej zaniku. Ponieważ obie składowe wykazują przeciwną zależność wydajności świecenia w funkcji energii, to przetwarzanie ich wspólnie skutkuje zmniejszeniem nieproporcjonalności odpowiedzi scyntylatora.

Dzięki pomiarom intensywności szybkiej i wolnej składowej scyntylacji, możliwe było również wyznaczenie proporcji pomiędzy obydwoma składowymi w funkcji energii zaabsorbowanej przez scyntylator. Powyżej energii 100 keV proporcje te są ustalone, około 90% światła emitowane jest w szybkiej składowej, zaś 10% scyntylacji przypada na wolną składową. Poniżej energii 100 keV, udział wolnej składowej spada, osiągając poziom zaledwie 3% przy energii około 10 keV.

Bardzo podobny efekt zaobserwowano w badaniach nad kryształami CsI:Tl [24]. CsI:Tl ma znacznie wolniejszą odpowiedź (główna składowa około 1  $\mu$ s) od NaI:Tl (główna składowa około 0.22  $\mu$ s), ale również w przypadku CsI:Tl udział szybkiej składowej w całkowitym impulsie rośnie dla małych energii zdeponowanych w kryształach, głównie kosztem najdłuższej składowej. Co ciekawe, wyniki przedstawione w obydwu pracach zostały otrzymane przy pomocy różnych technik eksperymentalnych. W przypadku kryształów CsI:Tl, opisanych w publikacji [24], impulsy świetlne były zarejestrowane metodą Thomasa-Bollingera (pomiar koincydencyjny tzw. „metodą pojedynczego fotonu”), zaś wyniki dla NaI:Tl [A9] zostały

uzyskane poprzez rejestrację impulsów przy pomocy oscyloskopu cyfrowego bramkowanego pod kątem wyboru energii zdeponowanej w kryształach.

#### 4.7. Podsumowanie

Opisane w poprzednich rozdziałach techniki pomiarowe, których rozwojem zajmowałem się na przestrzeni ostatnich kilku lat, pozwalają na znaczące rozszerzenie zakresu danych eksperymentalnych, które mogą posłużyć do pełniejszego opisu zjawiska świecenia scyntylatorów.

Badania zmian nieproporcjonalności poprzez dobieranie odpowiedniej stałej formowania sygnału są źródłem informacji na temat wpływu długich składowych świecenia na energetyczną zdolność rozdzielczą scyntylatorów. Uwzględnianie długich składowych w procesie przetwarzania sygnału może mieć różny wpływ na własności spektroskopowe scyntylatorów. Ten fakt świadczy o różnych źródłach procesów, które stoją za generowaniem scyntylacji o różnych czasach zaników.

Porównanie nieproporcjonalności scyntylatorów oraz ich wewnętrznej zdolności rozdzielczej mierzonej przy pomocy elektronów komptonowskich oraz absorpcji kwantów gamma zostały rozwinięte przeze mnie na skalę unikatową w środowisku zajmującym się charakteryzacją scyntylatorów. Szczególnie ciekawym zagadnieniem jest obserwacja różnic w wewnętrznej zdolności rozdzielczej zmierzonej obiema wspomnianymi metodami dla scyntylatorów z grupy jodków metali alkalicznych.

Pomiar nieproporcjonalności odseparowanych składowych scyntylacji jest całkowicie nową techniką pomiarową, która daje wgląd w niebadane dotąd własności scyntylacyjne. Fakt, iż dwie składowe scyntylacji mają różne, a wręcz przeciwne charakterystyki nieproporcjonalności, tłumaczy obserwowane korelacje pomiędzy zastosowaną stałą formowania impulsu a nieproporcjonalnością odpowiedzi dla scyntylatorów z grupy jodków metali alkalicznych.

Obserwacje wymienionych zjawisk mają szczególne znaczenie dla tzw. „inżynierii scyntylatorowej” (ang. „scintillator engineering”), ponieważ mogą być pomocne w opisie mechanizmów, które są odpowiedzialne za różnice w kształtach nieproporcjonalności różnego typu. Dane uzyskane przy pomocy przedstawionych powyżej nowatorskich metod mogą być wykorzystane do walidacji modeli teoretycznych, które są rozwijane w celu stworzenia kompletnego opisu procesów prowadzących do scyntylacji. Posiadając kompletny opis wpływu składu scyntylatora na proces emisji światła, łącznie z domieszkami oraz jego strukturą krystaliczną, możliwe będzie modyfikowanie proporcji pomiędzy intensywnością różnych składowych scyntylacji. W ten sposób odpowiedź scyntylatora na zaabsorbowaną energię będzie mogła być sprowadzona do zależności bliskiej proporcjonalności. W efekcie możliwe będzie uzyskanie scyntylatorów o optymalnej energetycznej zdolności rozdzielczej.

#### 4.8. Literatura

- [1] G.G. Kelley, P.R. Bell, R.C. Davis, N.H. Lazar, *Intrinsic scintillator resolution*, IRE Trans. Nucl. Sci. Vol. 3 (1956) 57.
- [2] D. Engelkemeir, *Nonlinear response of NaI(Tl) to photons*, Rev. Sci. Instrum. Vol. 27 (1956) 589.
- [3] A. Meyer, R.B. Murray, *Scintillation response of activated ionic crystals to charged particles*, IRE Trans. Nucl. Sci. Vol. 7 (1960) 22.
- [4] R. Gwin, R.B. Murray, *Studies of the scintillation response of CsI(Tl)*, IRE Trans. Nucl. Sci. Vol. 9 (1962) 28.
- [5] P. Iredale, *The effect of non-proportional response of NaI(Tl) crystals to electrons upon the resolution for  $\gamma$ -rays*, Nucl. Instrum. Meth. Vol. 11 (1961) 340.
- [6] J.R. Prescott, G.H. Narayan, *Electron responses and intrinsic line-widths in NaI(Tl)*, Nucl. Instrum. Meth. Vol. 75 (1969) 51.
- [7] G. Bizarri, N.J. Cherepy, W.S. Choong, G. Hull, W.W. Moses, S.A. Payne, J. Singh, J.D. Valentine, *Progress in studying scintillator proportionality: phenomenological model*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 56 (2009) 2313.
- [8] S.A. Payne, N.J. Cherepy, G. Hull, J.D. Valentine, W.W. Moses, W.S. Choong, *Nonproportionality of scintillator detectors: theory and experiment*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 56 (2009) 2506.
- [9] Q. Li, J.Q. Grim, R.T. Williams, G.A. Bizarri, W.W. Moses, *The role of hole mobility in scintillator proportionality*, Nucl. Instrum. Meth. A Vol. 652 (2011) 288.
- [10] W.W. Moses, G.A. Bizarri, R.T. Williams, S.A. Payne, A.N. Vasiliev, J. Singh, Q. Li, J.Q. Grim, W.S. Choong, *The origins of scintillator non-proportionality*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 59 (2012) 2038.
- [11] M. Moszyński, A. Nassalski, A. Syntfeld-Każuch, Ł. Świdorski, *Energy resolution of scintillation detectors - new observations*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 55 No 3 (2008) 1062.
- [12] M. Moszyński, M. Kapusta, J. Zalipska, M. Balcerzyk, D. Wolski, M. Szawlowski W. Klamra, *Low energy  $\gamma$ -rays scintillation detection with large area avalanche photodiodes*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 46 (1999) 880.
- [13] M. Balcerzyk, W. Klamra, M. Moszyński, M. Kapusta, M. Szawlowski, *Energy resolution and light yield non-proportionality studied by large area avalanche photodiodes and photomultipliers*, Nucl. Instrum. Meth. A Vol. 482 (2002) 720.
- [14] A. Syntfeld-Każuch, Ł. Świdorski, W. Czarnacki, M. Gierlik, W. Klamra, M. Moszyński, P. Schotanus, *Non-proportionality and energy resolution of CsI(Tl)*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 54 No 5 (2007) 1836.
- [15] A. Syntfeld-Każuch, P. Sibczyński, M. Moszyński, A.V. Gektin, W. Czarnacki, M. Grodzicka, J. Iwanowska, M. Szawlowski, T. Szcześniak, Ł. Świdorski, *Energy resolution of CsI(Na) scintillators*, Radiat. Meas. Vol. 45 (2010) 377.



- [16] M. Moszyński, W. Czarnacki, W. Klamra, M. Szawlowski, P. Schotanus, M. Kapusta, *Intrinsic energy resolution of pure NaI studied with large area avalanche photodiodes at liquid nitrogen temperatures*, Nucl. Instrum. Meth. A Vol. 505 (2003) 63.
- [17] M. Moszyński, A. Nassalski, W. Czarnacki, A. Syntfeld-Każuch, D. Wolski, T. Batsch, T. Usui, S. Shimizu, N. Shimura, K. Kurashige, K. Kurata, H. Ishibashi, *Energy resolution of LGSO scintillators*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 54 No 3 (2007) 725.
- [18] J.D. Valentine, B.D. Rooney, *Design of a Compton spectrometer experiment for studying scintillator non-linearity and intrinsic energy resolution*, Nucl. Instrum. Meth. A Vol. 353 (1994) 37.
- [19] B.D. Rooney, J.D. Valentine, *Benchmarking the Compton coincidence technique for measuring electron response non-proportionality in inorganic scintillators*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 43 (1996) 1271.
- [20] W.S. Choong, K.M. Vetter, W.W. Moses, G. Hull, S.A. Payne, N.J. Cherepy, J.D. Valentine, *Design of a facility for measuring scintillator non-proportionality*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 55 (2008) 1753.
- [21] P.B. Ugorowski, M.J. Harrison, D.S. McGregor, *Design and performance of a Compton-coincidence system for measuring non-proportionality of new scintillators*, Nucl. Instrum. Meth. A Vol. 615 (2010) 182.
- [22] I.V. Khodyuk, J. de Haas, P. Dorenbos, *Non-proportional response between 0.1-100 keV energy by means of highly monochromatic synchrotron X-rays*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 57 (2010) 1175.
- [23] W.S. Choong, G. Bizarri, N.J. Cherepy, G. Hull, W.W. Moses, S.A. Payne, *Measuring the dependence of the decay curve on the electron energy deposit in NaI(Tl)*, Nucl. Instrum. Meth. A Vol. 646 (2011) 95.
- [24] A. Syntfeld-Każuch, M. Moszyński, Ł. Świdorski, W. Klamra, A. Nassalski, *Light pulse shape dependence on  $\gamma$ -ray energy in CsI(Tl)*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 55 No 3 (2008) 1246.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.**

### **5.1 Fizyka reakcji jądrowych**

W trakcie studiów doktoranckich brałem udział w kilku eksperymentach poświęconych pomiarom rozkładów wysokości barier na fuzję. Eksperymenty te były przeprowadzone przez grupę dr hab. Ernesta Piaseckiego na cyklotronie w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów (ŚLCJ) UW. Mój udział polegał na przygotowaniu detektorów oraz elektroniki do rejestracji sygnałów, organizacji stanowiska pomiarowego oraz analizie danych i porównaniu wyników z obliczeniami modelowymi. Opis eksperymentów wraz z uzyskanymi wynikami stanowiły materiał, który został wykorzystany przez mnie w pracy magisterskiej, a następnie rozprawie doktorskiej. Ponadto, wyniki zostały przedstawione w serii publikacji [B1]-[B5].

Już po obronie rozprawy doktorskiej i rozpoczęciu pracy w Instytucie Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana w Świerku, w podobnym zakresie wziąłem udział w kolejnych

eksperymentach na ten sam temat, z których jeden został przeprowadzony na akceleratorze typu "tandem" na Uniwersytecie w Jyväskylä (Finlandia). Wyniki tych eksperymentów zostały opublikowane w pracach [B16], [B38], [B57].

Jeszcze w trakcie studiów doktoranckich brałem udział w eksperymencie dotyczącym rozszczepienia dynamicznego będącego następstwem reakcji Sn+Ni oraz Au+Au. Pomiary zostały przeprowadzone przy pomocy układu detekcyjnego CHIMERA umieszczonego przy cyklotronie w Laboratori Nazionale del Sud INFN w Catanii (Włochy). Mój udział w badaniach ograniczał się do skromnego udziału w sesjach pomiarowych, zaś wyniki uzyskane w tym eksperymencie ukazywały się zarówno przed obroną mojej pracy doktorskiej [B8]-[B11], jaki i w latach następnych [B19]-[B24], [B46]-[B47].

W okresie przygotowań do eksperymentów na cyklotronie ŚLCJ UW uczestniczyłem również w testach monolitycznych teleskopów półprzewodnikowych typu "E- $\Delta$ E". Detektory te były badane pod kątem przydatności do pomiaru energii i liczby atomowej ciężkich jonów występujących jako produkty reakcji nieelastycznego rozpraszania. Za konstrukcję detektorów odpowiadał dr hab. Andrzej Kordyasz, a wyniki testów zostały przedstawione w publikacjach [B6]-[B7]. Moja rola polegała na pomocy w przygotowaniu stanowiska pomiarowego (tarcza do rozpraszania wiązki, detektor do monitorowania energii wiązki poprzez pomiar jonów rozproszonych elastycznie) oraz na udziale w sesjach pomiarowych na wiązce dostarczonej przez cyklotron.

## 5.2 Detekcja neutronów

Po objęciu stanowiska adiunkta w Zakładzie Elektroniki Jądrowej IPJ zająłem się badaniem własności ciekłych scyntylatorów do detekcji neutronów. W obliczu narastającego kryzysu podaży helu-3, objawiającego się gwałtownym wzrostem ceny tego izotopu, ciekłe scyntylatory przyciągnęły na nowo uwagę społeczności naukowej jako tania i efektywna alternatywa dla liczników helowych. Szczególne miejsce wśród testowanych detektorów zajęły scyntylatory domieszkowane borem-10. Ciekłe scyntylatory są czułe na neutrony prędkie (poprzez rozpraszanie elastyczne) ze względu na dużą zawartość wodoru. Wzbogacenie ich izotopem B-10 podnosi ich wydajność detekcji poprzez detekcję neutronów powolnych. Problemem jest jednak dyskryminacja sygnałów indukowanych przez neutrony od sygnałów generowanych przez promieniowanie gamma. Zagadnienia związane z optymalizacją działania ciekłych scyntylatorów pod kątem dyskryminacji pomiędzy promieniowaniem neutronowym i gamma zostały opisane w publikacjach [B25], [B42]-[B44], [B52], [B62].

Duża aktywność naszego zespołu na forum naukowym poskutkowała nawiązaniem kontaktów z ośrodkami zajmującymi się produkcją nowych scyntylatorów proponowanych do detekcji neutronów jako alternatywa dla liczników opartych o He-3. Dzięki współpracy z prof. Nikolai'em Galunovem z Instytutu Materiałów Scyntylacyjnych Ukraińskiej Akademii Nauk mieliśmy okazję zbadać odpowiedź na neutrony scyntylatorów kompozytowych. Detektory te powstają w formie drobnych kryształów stilbenu lub p-terfenylu związanych w matrycy z przezroczystej żywicy [B53], [C2]. Przełomem na rynku scyntylatorów stały się plastiki ze

zdolnością do rozróżniania promieniowania neutronowego od gamma. Pierwsze próbki takich scyntylatorów otrzymaliśmy do testów dzięki współpracy z zespołem prof. Natalii Zaitsevej z Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL, USA) oraz z grupą prof. Alexa Gektina z Instytutu ISMA w Charkowie (Ukraina) [C3]. Formuła opracowana przez zespół z LLNL została opatentowana i jest obecnie wykorzystywana do produkcji komercyjnie dostępnych scyntylatorów. Wyniki testów pierwszych próbek opublikowaliśmy dzięki współpracy z firmą Scionix (Holandia), która oferuje je pod nazwami EJ299-33 i EJ299-34 [B61].

W tym samym okresie zostaliśmy zaproszeni do współpracy z firmą Tokuyama z Japonii, która rozwijała metodę produkcji kryształów  $\text{LiCaAlF}_6$  (LiCAF) domieszkowanych cerem lub europem. W przypadku detektorów tego typu detekcja neutronów odbywa się wskutek ich wychwytu przez jądra Li-6, które współtworzą strukturę krystaliczną wspomnianego scyntylatora. Otrzymane od naszych partnerów próbki zostały scharakteryzowane ze względu na odpowiedź na promieniowanie gamma oraz neutrony termiczne [B54].

Wyniki przedstawione w publikacjach [B53]-[B54], [B61], [C2] stanowiły podstawę rozprawy doktorskiej dr Joanny Iwanowskiej-Hanke. Praca została obroniona w kwietniu 2016 r. W przypadku tej pracy doktorskiej pełniłem rolę promotora pomocniczego.

### 5.3 Badanie własności scyntylatorów

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat główna działalność zespołu prof. Moszyńskiego była związana z badaniami podstawowych własności scyntylatorów. Jako członek tego zespołu brałem udział w licznych pomiarach, analizie danych oraz dyskusjach wyników dotyczących ilości rejestrowanego światła [B17], zdolności rozdzielczej [B30], [B67], czy kształtem impulsów świetlnych [B31]. We współpracy z moimi koleżankami i kolegami zajmowałem się również badaniem zależności pomiędzy nieproporcjonalnością a energetyczną zdolnością rozdzielczą w scyntylatorach takich jak: CsI:Tl [B18], [B60], CsI i CsI-CsBr [B28], BGO [B29], NaI [B35], LSO:Ce:Ca [B40], CsI:Na [B45], LFS-3 [B55],  $\text{CdWO}_4$  i  $\text{ZnWO}_4$  w temperaturze ciekłego azotu [B58], GAGG:Ce [B59], [B64] oraz Xe w postaci wysokospężonego gazu [B63].

W latach 2006-2010 kilkakrotnie gościliśmy w naszym Zakładzie prof. Weeraponga Chewpraditkula z King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) w Bangkoku (Tajlandia). W ramach współpracy z KMUTT przeprowadziliśmy testy własności spektrometrycznych dla promieniowania gamma następujących scyntylatorów: CsI:Na i CsI:CO<sub>3</sub> [B27], LuAG:Ce, YAG:Ce i LYSO:Ce [B34], [B39] oraz LaCl<sub>3</sub>:Ce [C1].

Dużą część stanowiły też badania samych fotodetektorów wykorzystywanych do odczytu światła ze scyntylacji w spektrometrii gamma. Wśród badanych przeze mnie detektorów znajdowały się fotopowielacze [B26], [B51], krzemowe PIN-diody i fotodiody lawinowe (APD) [B26], [B32]-[B33], krzemowe detektory dryfowe (SDD) [B33], [B41] oraz wielopikselowe liczniki fotonów (MPPC) [B50].

Oddzielne zagadnienie stanowił problem optymalizacji działania detektorów pod kątem uzyskania możliwie najlepszej czasowej zdolności rozdzielczej [B36]-[B37], [B48]-[B49].

#### **5.4 Neutronowa analiza aktywacyjna**

W kilku ubiegłych latach uczestniczyłem również w pracach zespołu dr. Michała Gierlika, który zajmował się zastosowaniem neutronowej analizy aktywacyjnej (NAA) w celu detekcji substancji niebezpiecznych, m. in. materiałów wybuchowych. Opublikowane wyniki dotyczyły wyboru optymalnego scyntylatora o dużej wydajności detekcji dla wysokoenergetycznych (ok. kilku MeV) kwantów gamma oraz dobrej energetycznej zdolności rozdzielczej [B56]. Następnie zaproponowano wykorzystanie aktywnej osłony anty-komptonowskiej w celu redukcji niepożądanego tła gamma [B65]. Zastosowanie osłony anty-komptonowskiej zaowocowało zwiększeniem czułości układu detekcyjnego. Zebrane wyniki zostały następnie wykorzystane do optymalizacji algorytmów analizy danych stosowanych w celu identyfikacji potencjalnie niebezpiecznych materiałów [B66].

#### **5.5 Diagnostyka plazmy w reakcjach fuzji termojądrowej**

W ciągu minionych trzech lat uczestniczyłem w pracach przygotowawczych oraz częściowo w realizacji projektu związanego z budową detektorów do diagnostyki plazmy w urządzeniach typu TOKAMAK. Prace obejmowały wybór scyntylatorów i fotodetektorów do monitora wysokoenergetycznego promieniowania gamma, tzw. "Gamma Camera", wybór scyntylatora i fotopowielacza w celu konstrukcji spektrometru promieniowania gamma, oraz projekt detektorów do monitorowania cząstek alfa uciekających z obszaru plazmy. Część z tych prac została przedstawiona podczas Pierwszej Konferencji EPS we Frascati (Włochy) w kwietniu 2015 r. [K20], a następnie opublikowana w Proceedings of Science [C4].

