



Dr hab. Zygmunt Szefliński
Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów
Uniwersytet Warszawski

ul. Pasteura 5A, 02-093 Warszawa
tel: +(48 22) 55 46 211, fax: +(48 22) 6592714
e-mail: szef@fuw.edu.pl
Adres prywatny:
Al. KEN 98 m 178, 02-777 Warszawa
tel. kom. (+48) 607 043 387



.....
Warszawa, dn.27.11.2020 r.

Dr hab. Aneta Malinowska
Sekretarz Naukowy
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Ul. Andrzeja Sołtana
00-400 Otwock

W odpowiedzi na prośbę Pani Profesor przesyłam recenzję pracy mgr Pawła Kowalskiego pt. " Design and optimization of the strip PET scanner based on plastic scintillators "

Najważniejsze osiągnięcie pracy to symulacja GATE odtwarzająca dane empiryczne, uzyskane na Uniwersytecie Jagiellońskim z pomocą prototypu skanera J-PET, a to świadczy o poprawności modelu oddziaływań i analizy pomiarowych wprowadzonych do symulacji. Ten element pracy utwierdza nas w przekonaniu, że rezultaty symulacji poprawnie określają parametry skanera wymagane przez normy NEMA. Symulacje autora określają także konfigurację kolejnych prototypów skanera bez ich budowy i testowania, dochodząc szybciej, niższymi kosztami do wariantu optymalnego. Badania autora wskazują, że budowany na Uniwersytecie Jagiellońskim J-PET osiąga charakterystyki NEMA porównywalne ze skanerami komercyjnymi. Co więcej obliczenia doktoranta wskazują, że niektóre parametry NEMA mogą zostać istotnie poprawione.

Recenzowana rozprawa oparta jest na licznych opublikowanych pracach współpracy J-PET. Należy zauważyć, że mgr Paweł Kowalski jest pierwszym autorem wymienionym poza kolejnością alfabetyczną w pięciu publikacjach opublikowanych w latach 2014-2018. Jest także współautorem 25 publikacji i 6 raportów współpracy J-PET wymienionych w bibliografii.

Praca ta spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę z marca 2003 r. z późniejszymi zmianami z dnia 21 kwietnia 2017 o stopniach naukowych i tytule naukowym, dlatego wnoszę o dopuszczenie magistera Pawła Kowalskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego i publicznej obrony.

Zygmunt Szefliński



Dr hab. Zygmunt Szefliński
Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów
Uniwersytet Warszawski

ul. Pasteura 5A, 02-093 Warszawa
tel: +(48 22) 55 46 211, fax: +(48 22) 6592714
e-mail: szef@fuw.edu.pl
Adres prywatny:
Al. KEN 98 m 178, 02-777 Warszawa
tel. kom. (+48) 607 043 387



Warszawa, dn.27.11.2020 r.

Recenzja pracy mgr Pawła Kowalskiego pt. " Design and optimization of the strip PET scanner based on plastic scintillators "

Od lat siedemdziesiątych XX wieku, dzięki gwałtownym postępom w budowie komputerów i metod rejestracji promieniowania γ , notuje się istotny rozwój radiacyjnych technik diagnostyki medycznej, a pozytonowej tomografii emisyjnej (PET) w szczególności. PET to technika obrazowania medycyny nuklearnej, używająca radioznaczników β^+ dla obserwacji aktywności metabolicznej ciała ludzkiego. Radionuklidy rozpadające się z emisją pozytonu - β^+ znakują farmaceutyk, który zostaje wprowadzony do organizmu, a metabolizm radiofarmaceutyku determinuje miejsce, gdzie następuje rozpad promieniotwórczy. W rezultacie anihilacji pozytonu z elektronem powstają dwa fotony o identycznych energiach (511 keV), wylatujące z miejsca anihilacji niemal dokładnie w przeciwnych kierunkach. Zadaniem skanera PET jest detekcja takich par par kwantów gamma, co ujawnia strukturę przestrzennego rozkładu radiofarmaceutyku. Mierząc odchylenia metabolizmu radiofarmaceutyków od standardów zdrowego organizmu, PET daje wgląd w biologię niektórych procesów chorobowych, a w szczególności procesów nowotworowych.

Rozwój technik detekcji dla potrzeb fizyki jądrowej wywołał przełom w budowie skanerów dla potrzeb medycyny nuklearnej, w tym i skanerów PET. Opracowanie technologii PET w 1975 roku spowodowało gwałtowny rozwój tej metody i zastosowanie jej do standardowej diagnostyki nowotworów. Nowe scyntylatory takie jak BGO, LSO i LYSO oraz postęp w elektronice i technikach informatycznych uczyniły z techniki PET najbardziej wyrafinowaną metodę w diagnostyce nowotworów.

W technice PET detektory promieniowania ułożone są zwykle w warstwy tworzące pierścien wokół badanego pacjenta, a koincydencyjna rejestracja kwantów anihilacyjnych wyznacza tzw. linię odpowiedzi łączącą punkty detekcji fotonów, na której leży punkt anihilacji elektronu z pozytonem. Standardowe algorytmy rekonstrukcji obrazów, bez informacji o czasie przelotu (TOF), zakładają jednakowe prawdopodobieństwo położenia punktu anihilacji na całej linii, choć uwzględnienie precyzyjnie mierzonej różnicy czasów detekcji fotonów z rozdzielczością 0,5 ns koncentruje prawdopodobieństwo położenia źródła w obszarze o rozmiarze 7,5 cm, co oznacza redukcję lokalizacji położenia źródła niemalże o rząd wielkości względem pełnej średnicy skanera PET. Rekonstrukcja obrazów z uwzględnieniem TOF poprawia więc istotnie stosunek sygnału do szumu i daje obrazy o wyższym kontraście.

W recenzowanej rozprawie autor proponuje nowe podejście do technologii PET. Scyntylatory nieorganiczne, mimo że mają wysoką wydajność rejestracji promieniowania gamma i wysoką wydajność kwantową, są też wystarczająco szybkie, pozwalające osiągać rozdzielczość czasową 540 ps (FWHM), jednakże są drogie, co skutkuje ograniczoną dostępnością skanerów zbudowanych z takich scyntylatorów.

Grupa badawcza z Uniwersytetu Jagiellońskiego J-PET (Jagielloński Pozytonowy Tomograf Emisyjny), której członkiem jest Paweł Kowalski zaproponowała nowatorskie podejście do budowy skanera PET. Proponowany skaner jest budowany z polimerowych scyntylatorów, ponad rząd wielkości tańszych od scyntylatorów nieorganicznych. Detektory plastikowe, nie były dotychczas rozważane jako materiał do budowy skanerów PET ze względu na ich małą wydajność na rejestrację kwantów anihilacyjnych oraz bardzo małe prawdopodobieństwo oddziaływania fotoelektrycznego. Wymienione wady scyntylatorów organicznych są jednakże kompensowane przez istotną poprawę rozdzielczości czasowej i całkowitą zmianę sposobu ułożenia detektorów pozwalającą na zwiększenie pola obrazowania. Detektory promieniowania w klasycznym tomografie PET ułożone są zwykle w warstwy tworzące pierścien wokół badanego pacjenta, podczas gdy proponowany tomograf J-PET składa się z długich pasków scyntylatorów polimerowych tworzących cylindryczne warstwy. Sygnały świetlne wytwarzane w paskach scyntylacyjnych zamieniane są na sygnały elektryczne przez klasyczne fotopowielacze bądź fotopowielacze krzemowe (SiPM) przyłożone na obu końcach pasków.

Autor recenzowanej rozprawy przy użyciu infrastruktury Centrum Informatycznego Świerk (CIŚ) prowadzi symulacje Monte Carlo działania kolejnych prototypów skanera J-PET umożliwiające analizę danych pomiarowych oraz rozwijanie metod analizy sygnałów detektora i rekonstrukcji obrazów. Prowadzone symulacje stanowią kompletny opis rozpoczynający się oddziaływaniem fotonów anihilacyjnych w pasku scyntyлятора, śledzeniem fotonów rozproszonych dla określenia źródeł tła, by określić parametry skanera takie jak rozdzielczość przestrzenna, wydajność, czułość czy jakość rekonstruowanego obrazu. Symulacje autora rozprawy mają na celu określenie jakie elementy detektora mają istotny wpływ na wyniki testów, określenie rozdzielczości przestrzennej i czasowej zgodnie z procedurą zalecaną przez Międzynarodowe Stowarzyszenie Producentów Aparatury Elektrycznej (NEMA).

Rozprawa doktorska Pawła Kowalskiego, napisana w języku angielskim, podzielona jest na osiem rozdziałów. Wstęp wskazuje cel badań, motywację ich podjęcia i definiuje przedmiot rozprawy. W rozdziale I autor przedstawia podstawy pozytonowej tomografii emisyjnej (PET), zwracając uwagę na różnice w oddziaływaniu z materią scyntyлятора nieorganicznego zawierającego pierwiastki o wysokiej liczbie atomowej i scyntyлятора polimerowego. W rozdziale tym autor wprowadza klasyfikację zdarzeń koincydencyjnych generowanych w skanerach PET towarzyszących procesowi anihilacji e^+e^- oraz podstaw rekonstrukcji obrazów uzyskiwanych w skanerach PET.

Rozdział II to prezentacja kolejnych prototypów nowatorskiego skanera J-PET, który powstał w oparciu o plastikowe detektory promieniowania na Uniwersytecie Jagiellońskim. J-PET zbudowany jest z koncentrycznych warstw paskowych detektorów polimerowych ułożonych osiowo w formie walca, dzięki czemu można uzyskać znacząco większą długość komory diagnostycznej. Autor pokazuje, że takie rozwiązanie umożliwia zbudowanie skanera całego ciała, co skutkuje redukcją dawki promieniowania dla pacjenta, a również redukcją kosztów budowy skanera. Mimo, że w ramach projektu J-PET zbudowano cztery prototypy o różnych konfiguracjach i parametrach, autor rozprawy koncentruje swoje analizy Monte Carlo (MC) na prototypie zwanym „big barrel”, ze 192 detektorami paskowymi ułożonymi osiowo w trzech warstwach. Wspomina też o rozwiązaniach takich jak modułowy skaner z przesuwnikiem długości fali (wavelength shifter (WLS)), co umożliwi precyzyjne określenie pozycji oddziaływania wzdłuż pasków. Symulacje autora pozwalają określić parametry projektowanego rozwiązania.

Rozdział III to opis symulacji MC z wykorzystaniem oprogramowania GATE, powstałego na platformie Geant4, dedykowanego do symulacji zagadnień medycyny nuklearnej. Oprogramowanie GATE to podstawowe narzędzie wykorzystywane przez doktoranta do rekonstrukcji sygnałów skanera J-PET w systemie akwizycji danych oraz rekonstrukcji obrazu ciała pacjenta. Symulacje pozwoliły na ocenę zgodności urządzenia ze standardami NEMA. W tym rozdziale Paweł Kowalski pokazuje kolejne elementy symulacji – zdefiniowanie geometrii układu detekcyjnego, materiału scyntylatorów i fotopowielaczy. Rezultaty symulacji sygnałów elektrycznych analizowane są z pomocą oprogramowania GOJA dokonującego podziału wygenerowanych zdarzeń koincydencyjnych na koincydencje rzeczywiste, rozproszenia w detektorze, w fantomie i koincydencje przypadkowe. Selekcja zdarzeń to istotny element pozwalający wygenerować parametry skanera niezbędne dla testów wymaganych przez standardy NEMA.

W rozdziale IV można znaleźć porównanie wyników symulacji z danymi uzyskanymi w eksperymencie przeprowadzonym w sierpniu 2017 roku z prototypem skanera ze 192 scyntylatorami polimerowymi „big barrel”. Zarówno w eksperymencie jak i symulacjach, źródła promieniowania (^{18}F lub ^{22}Na) są rozmieszczone w położeniach sugerowanych normą NEMA. Zdarzenia koincydencyjne z symulacji i pomiaru, były analizowane zgodnie ze schematem opisanym w rozdziale III. Należy zauważyć, że porównanie pomiarów z symulacją daje zgodność, nie tylko jakościową ale ilościową, co świadczy o jakości symulacji MC.

Rozdział V prezentuje najważniejsze wyniki rozprawy. NEMA definiuje szeroki zestaw cech skanerów PET, takich jak rozdzielczość przestrzenna, wydajność, czułość, rozproszenia i jakość obrazu. Te charakterystyki pozwalają porównać różne tomografy PET, a ich określenie jest warunkiem dopuszczenia sprzętu do użycia w procedurach diagnostyki medycznej. Dzięki symulacjom autor może porównać różne warianty prototypów i wybrać najlepszy z nich znajdując optymalne parametry scyntylatorów i rozwiązań geometrycznych. Należy zauważyć, że większość wyników prezentowanych w tym rozdziale zostało opublikowanych a pierwszym autorem tych publikacji wymienionych w pozycjach bibliografii [76, 77, 83 i 84] jest doktorant.

Obliczone charakterystyki uzyskane w pomiarach i symulacjach MC służą do porównania wariantu skanera J-PET z komercyjnymi. W rozdziale VI autor porównuje 190 cm J-PET ze skanerem Vereos PRT/CT firmy Philips i rozwijanym prototypem skanera całego ciała EXPLORER PET wykorzystującym komory płytek rezystancyjnych (Resistive Plate Chambers)

stosowanych powszechnie w eksperymentach fizyki wysokich energii. Paweł Kowalski porównuje nie tylko parametry techniczne skanerów, ale również ceny. Porównanie kosztów budowy skanera J-PET (ok. 2mln EUR) wypada atrakcyjnie wobec kosztów skanera całego ciała EXPLORER PET (o. 10 mln EUR).

Droga prowadząca do optymalnego rozwiązania budowy skanera opisana w rozdziale VII to kolejne przybliżenia poszukujące kompromisu między parametrami technicznymi i kosztami budowy. Iteracyjny proces optymalizacji prowadzi przez wybór scyntylatorów i fotopowielaczy do badań pojedynczych modułów i dalej do konstrukcji kolejnych komór skanera o różnych długościach pasków scyntylatora, ilości pasków i ich rozmieszczenia wokół osi cylindra w kolejnych warstwach. Optymalizacji podlegają też parametry analizy danych pomiarowych i tych uzyskiwanych w symulacjach MC takich jak progi energetyczne i wartości okien czasowych.

Ósmy rozdział to podsumowanie pracy. Bogata i wyczerpująca bibliografia zamyka rozprawę. Praca zawiera też trzy uzupełnienia pokazujące szczegóły badań autora.

Recenzowana rozprawa oparta jest na licznych opublikowanych pracach współpracy J-PET. Należy zauważyć, że mgr Paweł Kowalski jest pierwszym autorem wymienionym poza kolejnością alfabetyczną w pięciu publikacjach opublikowanych w latach 2014-2018. Jest także współautorem 25 publikacji i 6 raportów współpracy J-PET wymienionych w bibliografii. Tak liczny zestaw publikacji to rzadkość wśród autorów rozpraw doktorskich.

Najważniejsze osiągnięcie pracy to zademonstrowanie, że symulacja GATE odtwarza dane empiryczne, a to świadczy o poprawności modelu oddziaływań i analizy danych pomiarowych wprowadzonych do symulacji. Ten element pracy utwierdza nas w przekonaniu, że rezultaty symulacji poprawnie określają parametry skanera wymagane przez normy NEMA. Symulacje mogą także określać konfigurację kolejnych prototypów skanera bez ich budowy i testowania, dochodząc szybciej, niższymi kosztami do wariantu optymalnego. Autor w symulacjach określa czułość prototypów o różnych wariantach geometrycznych, rozdzielczości przestrzenne dla wybranych położań źródeł w komorze skanera i rolę zastosowanych fotopowielaczy. Badania autora wskazują, że budowany na Uniwersytecie Jagiellońskim J-PET osiąga charakterystyki NEMA porównywalne ze skanerami komercyjnymi. Co więcej obliczenia doktoranta wskazują, że niektóre parametry NEMA mogą zostać istotnie poprawione. Autor zapowiada też symulacje z użyciem fantomu antropomorficznego.

Wymienione w recenzji osiągnięcia mgr Pawła Kowalskiego, to zaledwie cząstka tego co dokonał. Jego praca zawiera ogromny ładunek danych nowych interesujących rezultatów, które przyczyniają się do postępu technicznego w metodach diagnostyki radiacyjnej i mogą być przedmiotem zainteresowania firm tworzących systemy diagnostyki radiacyjnej oparte na detekcji promieniowania jonizującego.

Praca jest bardzo starannie zredagowana, znalazłem jednakże drobne usterki które dla porządku wymienię. Na stronie 28 autor pisze, że prędkość światła w scyntylatorze wynosi ok 12,6 cm/s – oczywiście powinno być 12,6 cm/ns. W Tabeli 6.1 na str 80 w opisie parametrów w wierszu 4 jest „Light yield (NaI=100)”c sygnalizuje, że wydajność świetlna scyntylatorów zostanie zaprezentowana w jednostkach względnych, a wartości wydajności świetlnej są prezentowane jako bezwzględna liczba fotonów/MeV. Te usterki redakcyjne, a nie merytoryczne nie zmieniają wysokiej wartości pracy.

Rozprawę należy uznać za dojrzałe dzieło o wysokich wartościach poznawczych i aplikacyjnych, proponujące nowatorskie podejście do zagadnień tworzenia nowych systemów detekcji promieniowania gamma dla potrzeb diagnostyki medycznej. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, które prowadzi bezpośrednio do rozwiązań technicznych oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dziedzinie fizyki, biegłość w zastosowaniu narzędzi informatycznych do rozwiązywania problemów z zakresu fizyki, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i pracy w zespole. Praca ta stanowi samodzielną i wyodrębnioną część pracy zbiorowej, a indywidualny wkład mgr Pawła Kowalskiego, potwierdzony materiałem opublikowanym w czasopiśmie naukowych został zaprezentowany w rozprawie.

Praca ta spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę z marca 2003 r. z późniejszymi zmianami z dnia 21 kwietnia 2017 o stopniach naukowych i tytule naukowym, dlatego wnoszę o dopuszczenie magistra Pawła Kowalskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego i publicznej obrony.

Zygmunt Szefliński