



## **Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytet Warszawski**

ul. Pasteura 5A, 02-093 Warszawa  
tel: +(48 22) 8222123, fax: +(48 22) 6592714  
e-mail: [slcj@slcj.uw.edu.pl](mailto:slcj@slcj.uw.edu.pl)  
<http://www.slcj.uw.edu.pl>



### **Recenzja rozprawy doktorskiej “Kalibracja energetyczna i synchronizacja czasowa modułarnego scyntylacyjnego systemu detekcyjnego do tomografii TOF-PET” pana mgr Tomasza Bednarskiego**

Pełna i tania diagnostyka jest podstawą sukcesu w walce z chorobami nowotworowymi, walce która jest jednym z podstawowych zadań współczesnej medycyny. Od kilkunastu lat rozwijana jest na świecie metoda diagnostyczna oparta na zjawisku anihilacji pozytonów w tkance dotkniętej chorobą, której towarzyszy emisja dwóch kwantów gamma. Metoda ta wymaga zastosowania radiofarmaceutyków zawierających izotopy emitujące pozytony i skanerów-tomografów rejestrujących emitowane promieniowanie gamma. Metoda, zwana Tomografią PET, jest obecnie uznana za najbardziej efektywną w leczeniu onkologicznym. Także w Polsce powstają w ostatnich latach ośrodki produkujące radiofarmaceutyki, a szpitale wyposażane są w tomografy. Jednak wciąż potrzeby znacznie przewyższają możliwości. Główną przeszkodą są wysokie ceny tomografów, a te z kolei spowodowane są kosztami scyntylatorów – kryształów rejestrujących kwanty gamma. Pomysł pana profesora Pawła Moskala, by do konstrukcji skanerów użyć tanich scyntylatorów plastikowych budzi nadzieję na zmianę tej sytuacji. Recenzowana praca doktorska pana mgr. Tomasza Bednarskiego jest jednym z etapów realizacji tego pomysłu. Jej celem było skonstruowanie i uruchomienie prototypu skanera, w którym drogie kryształy scyntylacyjne zastąpione są tanimi scyntylatorami plastikowymi.

Praca jest więc pracą doświadczalną, której autor miał za zadanie zbudować i uruchomić prototyp skanera a następnie zbadać jego parametry mając na względzie późniejszą budowę pełnowymiarowego urządzenia. Praca napisana jest po polsku, bardzo ładnym językiem, za co składam autorowi wielkie podziękowania. Jest bardzo dobrze zredagowana, tekst nie jest zbyt długi. Całość ma elegancką graficznie formę, z bardzo starannie przygotowanymi rysunkami. Pracę czyta się z przyjemnością - autor bez wątpienia ma duże zdolności dydaktyczne.

Przejdę teraz do omówienia poszczególnych rozdziałów. Wstęp napisany jest bardzo przekonująco, zarysowując kontekst badań i streszczając całą pracę. Rozdział drugi to charakterystyka obecnie działających skanerów PET i ich podstawowe parametry. W trzecim rozdziale doktorant streszcza pomysł (opatentowany, więc streszczenie nie jest przesadnie długie) budowy skanera wykorzystującego plastikowe scyntylatory. Podkreśla w nim główne zalety takich scyntylatorów – krótkie czasy narastania impulsów i niską cenę.

W rozdziale czwartym znajdujemy opis zbudowanego skanera. Ma on inny od komercyjnych urządzeń kształt, scyntylatory plastikowe o długości 30 cm ułożone są w nim w kształcie walca. Zbudowany prototyp nie jest dużym urządzeniem, wewnętrzna średnica walca to również tylko 30 cm. Jednak sama budowa urządzenia to dopiero wstęp do dalszych działań,

związanych z kalibracją energetyczną detektorów, kalibracją elektroniki współpracującej z detektorami oraz synchronizacją czasową wszystkich modułów.

Tak więc nie rozdział czwarty, ale trzy następne to główny rdzeń pracy. W rozdziale piątym doktorant przedstawia proces kalibracji energetycznej układu detekcyjnego – fotopowielaczy plus scyntylator. Do kalibracji użył dwóch źródeł promieniowania gamma –  $^{22}\text{Na}$  i  $^{137}\text{Cs}$ . Wynik to liniowa zależność liczby zarejestrowanych fotoelektronów od energii kwantów gamma przedstawiona na Rys. 5.16 i 5.17. Znajomość tej zależności pozwala na selekcję tych zdarzeń zarejestrowanych przez detektory, które powinny być użyte do tworzenia obrazu tomograficznego.

Wybrane, zarejestrowane zdarzenia muszą być przetworzone przez układ elektroniczny współpracujący z detektorami. Opis takiego układu oraz sposób jego kalibracji przedstawia rozdział szósty. Sądzę, że mgr Bednarski nie brał udziału w projektowaniu układu elektronicznego. Jego zadaniem była kalibracja układu i walka z zakłóceniami. I tym właśnie zagadnieniom poświęcona jest większość paragrafów rozdziału, najobszerniejszego w całej dysertacji. Miarą skrupulatności doktoranta w przeprowadzeniu tych prac jest dla mnie informacja na str 74 o użyciu taśmy przewodzącej do ekranowania cewek znajdujących się w modułach elektroniki odczytu. Doktorant podaje jej ścisłe parametry – firma 3M, specyfikacja 78-8124-4705-6 z roku 1998. Osobiście w walce z szumami używam folii aluminiowej do pakowania kanapek. Może dlatego moje sukcesy nie są tak spektakularne?

Nowatorska metoda prof. Moskala wykorzystania scyntylatorów plastikowych do budowy skanera opiera się na precyzyjnym pomiarze czasów rejestracji impulsów. Tak więc całe urządzenie – detektory plus elektronika odczytu musi być bardzo dokładnie wykalibrowane czasowo. Każdy moduł detekcyjny złożony ze scyntylatora i dwóch fotopowielaczy musi być zestrojony czasowo a następnie wszystkie moduły wraz z elektroniką, kablami etc. muszą być zsynchronizowane. Doktorant wykorzystał do tych procesów wspomniane już wyżej źródło promieniowania gamma ( $^{22}\text{Na}$ ), ale też promieniowanie kosmiczne. Ta druga metoda jest o tyle interesująca, że pozwala na kalibrację urządzenia podczas badań tomograficznych pacjentów. Kalibracja czasowa opisana jest w rozdziale siódmym.

Głównym parametrem tomografu jest przestrzenna zdolność rozdzielcza. Ona zapewnia dobrą jakość obrazu, pozwalającą na wyróżnienie drobnych nawet zmian nowotworowych. W rozdziale ósmym mgr Bednarski bada zdolność rozdzielczą modułów detekcyjnych, ponownie wykorzystując źródło  $^{22}\text{Na}$  promieniowana gamma. Uzyskana zdolność rozdzielcza na podstawie różnicy czasów impulsów rejestrowanych przez przeciwległe fotopowielacze wyniosła 13.5 mm. Nie jest to wynik konkurencyjny dla produkowanych obecnie tomografów. Jednak doktorant słusznie zauważa, że mamy do czynienia z prototypem. W następnych konstrukcjach parametr ten może być poprawiony.

Konstrukcja tomografu pozwala na wykorzystanie jeszcze jednej metody do wyznaczenia miejsca rejestracji kwantu gamma. Mianowicie można to zrobić w oparciu o intensywność światła zarejestrowaną przez przeciwległe fotopowielacze. Światło jest bowiem pochłaniane w scyntylatorze. Metoda ta daje jednak gorszy wynik od poprzedniej. Uzyskana bowiem rozdzielczość to 25 mm.

W rozdziale dziewiątym przechodzi mgr Bednarski do rekonstrukcji punktu anihilacji elektronu z pozytonem w ciele pacjenta. Można tego dokonać badając różnice czasowe impulsów pochodzących od kwantów gamma zarejestrowanych w przeciwległych modułach detekcyjnych. Widać tu wyraźnie rolę synchronizacji modułów, poprawiającą wielokrotnie precyzję wyznaczenia punktu anihilacji. W ostatnim paragrafie tego rozdziału doktorant

pokazuje ogromne znaczenie iteracyjnej metody rekonstrukcji obrazu w uzyskaniu jak najlepszego końcowego wyniku.

Rozdział dziesiąty poświęcony jest porównaniom parametrów zbudowanego prototypu z parametrami komercyjnie dostępnych tomografów. Jeśli chodzi o rozdzielczość czasową, prototyp góruje nad urządzeniami komercyjnymi. Jednak rozdzielczość przestrzenna, bez zastosowania iteracyjnej metody rekonstrukcji obrazu, jest znacząco gorsza.

Mimo to, rezultaty pracy należy uznać za duży sukces. Mgr Bednarski udowodnił, że możliwe jest zbudowanie tomografu PET opartego na scyntylatorach plastikowych. Kalibrując i uruchamiając urządzenie przetarł drogę do dalszych prac, wcielających ten nowatorski pomysł w życie. Wykonane prace opisał bardzo przejrzyście w rozprawie doktorskiej.

Żaden utwór nie jest doskonały. Również w recenzowanej pracy doktorskiej można się dopatrzeć różnego rodzaju niedoróbek. Choć jest ich mało nie będę ich wymieniał, nie są bowiem znaczące. Podam tylko jeden przykład – na Rys. 7.2 każdemu detektorowi odpowiadają podobno cztery punkty doświadczalne. Ze względu na przyjętą skalę nie sposób ich jednak odróżnić.

Osobiście w realizacji całego tego przedsięwzięcia zabrakło mi tzw. „wisienki na torcie” – eksperymentu wykorzystującego zbudowany prototyp do zbadania małego zwierzęcia (myszy?). Taki obraz tomograficzny pokazany na ostatnich stronach pracy doktorskiej przemawiałby do czytelnika (i recenzenta!) bardziej niż wiele z wykresów w niej zamieszczonych.

Zapoznając się ze skomplikowanymi i czasochłonnymi metodami kalibracji zbudowanego prototypu zabrakło mi w rozdziale dziesiątym informacji, jak takie metody wyglądają w przypadku tomografów komercyjnych. Czy są one prostsze, czy też może jeszcze bardziej skomplikowane? Czy pod tym względem nowatorskie rozwiązania zastosowane w prototypie górują nad obecnie stosowanymi?

Podsumowując, mgr Tomasz Bednarski uzyskał bardzo wartościowe wyniki budując i uruchamiając prototyp urządzenia medycznego opartego na działaniu detektorów wykorzystywanych w doświadczalnej fizyce jądrowej. Oprócz wiedzy z fizyki wykazał się wiedzą z dziedziny elektroniki i informatyki. Jestem przekonany, że jego praca doktorska spełnia warunki określone w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz.U. z 2014 r. poz. 1852 i Dz.U. z 2015 r. poz. 249) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Prof. dr hab. Krzysztof Rusek

Warszawa, 20.06.2016