Prof. Jan Kisiel

Instytut Fizyki im. Augusta Chełkowskiego

Uniwersytet Śląski w Katowicach Chorzów, 03.11.2020

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Pawła Kowalskiego pt.**

**Design and optimization of the strip PET scanner based on plastic scintillators.**

Diagnostyka i terapia medyczna od dziesięcioleci korzystają z odkryć i rozwoju fizyki jądrowej. Do najważniejszych można zaliczyć odkrycie promieniowania rentgenowskiego pod koniec 19. wieku, wynalezienie techniki tomografii komputerowej, magnetycznego rezonansu jądrowego oraz pozytonową tomografię emisyjną w wieku dwudziestym. Obecnie nie wyobrażamy sobie nowoczesnej medycyny bez tych odkryć/wynalazków, chociaż powszechny dostęp do nich jest ograniczony m.in. ze względu na cenę tomografów. Pozytonowa tomografia emisyjna (PET) pozwala na śledzenie procesów metabolicznych, podczas gdy tomografia komputerowa (CT) i magnetyczny rezonans jądrowy (MRI) obrazują położenie i kształty tkanek. Coraz częstsze jest stosowanie technik hybrydowych łączących PET z CT oraz PET z MRI, pozwalających na precyzyjną ocenę stanu zdrowia pacjenta dzięki obrazowaniu procesów życiowych na poziomie komórkowym. Detektory stosowane w PET do rejestracji promieniowania gamma powstającego podczas anihilacji pozytonów powinny się charakteryzować dużą wydajnością detekcji, małym rozmiarem oraz bardzo dobrą czasową i energetyczną zdolnością rozdzielczą. Detektory scyntylacyjne spełniają „w zasadzie” te wymagania i dlatego są wykorzystywane w budowie tomografów PET. Kryształy scyntylacyjne, głównie BGO (Bi4Ge3O12), LSO (Lu2SiO5) i LYSO (kryształy ortokrzemianów domieszkowane jonami Ce3+: (LuY)2SiO5:Ce i (LuGd)2SiO5:Ce) są obecnie powszechnie wykorzystywane w komercyjnych PET-ach i są kilkudziesięciokrotnie droższe niż scyntylatory polimerowe (plastikowe). W recenzowanej rozprawie doktorskiej Pan mgr Paweł Kowalski przedstawił zaawansowane symulacje komputerowe wykonane w ramach realizacji projektu J-PET (Jagiellonian-PET), którego celem jest budowa **taniego** tomografu całego ciała przy użyciu **tanich** scyntylatorów plastikowych, których mniejsza gęstość (co przekłada się na mniejszą wagę tomografu) jest kompensowana dużo lepszą czasową zdolność rozdzielczą w stosunku do scyntylatorów krystalicznych. Należy podkreślić, że projekt J-PET łączy badania stosowane i podstawowe w sposób niespotykany w Polsce. Duża w tym zasługa prof. Pawła Moskala z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, który jest inicjatorem przedsięwzięcia i liderem projektu J-PET, a także promotorem pomocniczym rozprawy.

Rozprawa doktorska Pana mgr P. Kowalskiego składa się z siedmiu rozdziałów, wstępu, podsumowania, trzech dodatków, pożytecznego wykazu skrótów oraz spisu literatury liczącego 116 pozycji. W niespełna dwustronicowym wstępie autor skrótowo przedstawia powody podjęcia takiego tematu rozprawy. W rozdziale pierwszym zawarto zwięzły opis zasady działania pozytonowego tomografu emisyjnego, a w drugim opis J-PET. Kolejny rozdział jest poświęcony metodom symulacji z wykorzystaniem oprogramowania GATE bazującego na pakiecie Geant4, który powszechnie i z powodzeniem wykorzystywany jest w fizyce jądrowej i cząstek elementarnych. W ważnym, moim zdaniem, rozdziale czwartym dyskutowana jest weryfikacja wyników symulacji przez porównanie z wynikami pomiarów testowych z sierpnia 2017 roku wykonanych z prototypem J-PET nazywanym *big barrel*. Ocena parametrów i wydajności detektora J-PET, wykonana wg standardu NEMA obowiązującego dla urządzeń stosowanych do obrazowania medycznego, jest treścią rozdziału piątego. Rozdział szósty zawiera porównanie J-PET z tomografami wiodących producentów, a siódmy uwagi autora o możliwości poprawienia wartości niektórych parametrów J-PET. Rozprawę kończy dwustronicowe podsumowanie. Rozprawa liczy 127 stron.

Za najważniejszy wynik rozprawy doktorskiej Pana mgr P. Kowalskiego uważam uzyskanie ciekawych wyników z symulacji J-PET wykonanych z wykorzystaniem oprogramowania GATE i uwzględnieniem standardu NEMA. Jest to moim zdaniem niezwykle ważny, a zarazem niezbędny krok w kierunku uczynienia z J-PET urządzenia mogącego w przyszłości konkurować z tomografami dostępnymi na rynku. Starannie zostały przedyskutowane wszystkie rodzaje koincydencji – rzeczywiste, rozproszeniowe w fantomie i detektorze oraz przypadkowe, mające wpływ na jakość obrazowania w technice PET. Pan mgr P. Kowalski uzasadnia metodę selekcji przypadków optymalizowaną w taki sposób aby stosunek koincydencji rzeczywistych do tła, czyli pozostałych koincydencji był jak największy. Interesujące, chociaż potraktowane skrótowo (niecała strona) są rekomendacje autora dotyczące projektowania kolejnych prototypów J-PET.

Poniżej zamieszczam dwa pytania/uwagi dotyczące metod analizy danych i wyników przedstawionych w rozprawie Pana mgr P. Kowalskiego.

1. W symulacjach Monte Carlo autor korzystał z Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE). Uważam, że wybór ten został wystarczająco uzasadniony na początku rozdziału trzeciego (str. 23). W czasie publicznej obrony rozprawy chętnie dowiedziałbym się o porównaniu symulacji Monte Carlo parametrów tomografów PET wykonanych różnymi pakietami. W rozprawie przywołano dwie publikacje (pozycje 65 i 66 w spisie literatury) porównujące GATE/Geant4 z pakietem FLUKA i MCNP6, przy czym dotyczą one protonów i 12C.

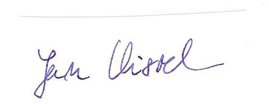
1. W trakcie pomiarów wykonanych w celu weryfikacji symulacji użyto sześciu źródeł punktowych 22Na zamiast sugerowanego, w normie amerykańskiej agencji *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), źródła 18F umieszczanego w kolejnych sześciu pozycjach. Użycie źródła 22Na jest dużo wygodniejsze ze względu na: (1) dużo dłuższy czas połowicznego zaniku niż źródła 18F (ponad 2 lata vs niecałe 2 godziny) oraz (2) łatwiejszą dostępność. Źródło 22Na zostało wykorzystane do weryfikacji poprawności symulacji, tym niemniej nasuwa się pytanie: czy użycie innego źródła niż w standardzie NEMA wpływa na porównanie parametrów J-PET z parametrami tomografów komercyjnych?

Rozprawa doktorska Pana mgr Pawła Kowalskiego jest napisana w języku angielskim. Nie mam większych uwag do strony językowej pracy, ale jednocześnie nie czuję się w pełni kompetentny do oceny pracy pod tym względem. Warto podkreślić wysoki poziom edytorski pracy. Rysunki są czytelne, a wraz z tabelami dobrze uzupełniają tekst. Autor nie ustrzegł się drobnych błędów – „literówek”. Te które zauważyłem wymieniam poniżej:

1. *… palstikowych* *…* zamiast *… plastikowych …*, (str. vii, Streszczenie)
2. *… recontruction …* zamiast *… reconstruction …*, (str. xi, Contents)
3. *… recontruction …* zamiast *… reconstruction …*, (str. 9, tytuł podrozdziału 1.5)
4. *… campaignes …* zamiast *… campaigns …*, (str. 39)
5. *… build …* zamiast *… built …*, (str. 77)
6. *… built …* zamiast *… build …*, (str. 81)
7. *… built …* zamiast *… build …*, (str. 85)
8. *… theses …* zamiast *… these …*, (str. 101)

Podsumowując, uważam że zawarte w rozprawie doktorskiej Pana mgr Pawła Kowalskiego wyniki są oryginalne i ciekawe. Jestem przekonany, że przyczyniły się do postępu prac nad krakowskim J-PET. Uważam, że Pan mgr P. Kowalski opanował metody przeprowadzania zaawansowanych symulacji komputerowych z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania. Należy podkreślić także to, że opracował pakiet GOJA (GATE Output J-PET Analyzer) do selekcji zdarzeń, który jako dane wejściowe ma pliki wyjściowe z pakietu ROOT, który jest podstawowym narzędziem do analizy danych w eksperymentach z fizyki jądrowej i wysokich energii. Korzystanie i rozwijanie oprogramowania to umiejętności cenione w każdym zespole przeprowadzającym eksperymenty fizyczne. Duża liczba publikacji współautorstwa Pana mgr P. Kowalskiego, w tym prace w których jest pierwszym autorem utwierdzają mnie w przekonaniu o Jego dużym wkładzie w osiągnięcia zespołu budującego J-PET.

Na podstawie przedłożonej do recenzji pracy doktorskiej Pana mgr Pawła Kowalskiego pt. „*Design and optimization of the strip PET scanner based on plastic scintillators*” stwierdzam, że rozprawa spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. Jan Kisiel