

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

zatytułowanej:

### ***Event Pattern Recognition and Image Reconstruction in Compton Camera for Proton Therapy Monitoring***

autor: **Majid Kazemi Kozani**

promotor: prof. dr hab. Andrzej Magiera

Mgr Majid Kazemi Kozani przedstawił napisaną po angielsku pracę zawierającą pięć rozdziałów poprzedzonych streszczeniem (także w języku angielskim) oraz uzupełnioną spisem literatury. Razem ze spisem literatury rozprawa liczy 87 stron. Rozprawa jest uzupełniona o streszczenie w języku polskim, toteż spełniony jest wymóg ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce<sup>1</sup>, która w Artykule 187 ust. 4 stwierdza: *Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim.*

Rozprawa doktorska zawiera opis badań, przeprowadzonych w ramach współpracy Uniwersytetu Jagiellońskiego z RWTH Aachen (Niemcy) związanej z detektorem SiFi-CC, dotyczących optymalizacji oprogramowania do szybkiej identyfikacji przypadków rejestracji zdarzeń rozproszenia komptonowskiego fotonów emitowanych podczas hadronoterapii. Jest to nietypowe zagadnienie w badaniach z zakresu fizyki jądrowej. Typowo analizuje się raz przeprowadzony pomiar, odpowiednio rozwijając i optymalizując algorytm selekcji danych. Praca doktorska mgr. Kozani dotyczy problemu analizy, która powinna być robiona w trakcie napromienienia, jako że może mieć wpływ na bieżącą optymalizację procesu terapii wiązką protonową. Tego typu terapia jest wykonywana w dedykowanych ośrodkach hadronoterapii, także w Polsce Wobec tego tematykę badawczą przedstawioną w rozprawie należy uznać za bardzo aktualną.

Na początku muszę stwierdzić, że wiele fragmentów pracy czyta się bardzo trudno ze względu na bardzo powszechne używanie akronimów. Są one rozwinięte (strona viii), ale nawet wtedy niektóre z nich nie są oczywiste i wymagają dalszych poszukiwań. Słowniczek z definicjami niektórych pojęć byłby przydatny.

W pierwszym rozdziale rozprawy autor przedstawił wprowadzenie do podjętego zagadnienia badawczego: znaczenia detekcji fotonów natychmiastowych („prompt gamma”) wobec diagnostyki PET opartej na lekkich izotopach produkowanych w reakcjach (p,d), (p,pn) i (p, $\alpha$ )

---

<sup>1</sup> Ustawa z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce, Dz. U. poz. 1668 z późniejszymi zmianami.

na jądrach atomowych stanowiących dominującą część składu tkanek (węgiel, azot, tlen). Lektura tego rozdziału byłaby bardzo przyjemna, ale stwierdzenie „*In this method, the photon's energy falls exponentially as it goes to the deeper organs.*” budzi zdecydowany sprzeciw. Energia fotonów pozostaje stała, to intensywność wiązki fotonów zanika wykładniczo!

Druga rozdział rozprawy zawiera wprowadzenie teoretyczne. Są tu wszelkie potrzebne informacje o podstawach fizycznych wykorzystywanego procesu fizycznego, a także bardzo dydaktycznie opisane metody rekonstrukcji obrazu oraz wybrane algorytmy uczenia maszynowego. Omówienie silnych i słabych stron tych algorytmów jest bardzo przydatne. Uważam, że ten rozdział jest napisany bardzo precyzyjnie i ma walory dydaktyczne.

Rozdział trzeci pozostawia z kolei pewien znaczący niedosyt. Oto lista uwag:

1. Przedstawienie detektora SiFi-CC jest bardzo pobieżne, na przykład Rysunek 3-1 nie wnosi żadnych informacji o ułożeniu włókien scyntylacyjnych.
2. W skądinąd dobrze napisanym podrozdziale o 3.2.1 (A Simple Compton Camera) można by wyjaśnić czytelnikom pochodzenie promieniowania gamma o energii 4,44 MeV jako rozpad stanu wzbudzonego jądra  $^{12}\text{C}$ , a nie odsyłać do artykułu.
3. Na osi pionowej Rysunku 3-3 jest czynnik  $10^{-30}$  mnożący wartości przekroju czynnego na rozproszenie Comptona. Wtedy jednostką na osi powinien być  $\text{m}^2/\text{sr}$ , a nie  $\text{b}/\text{sr}$ .
4. Parametryzacja energetycznej zdolności rozdzielczej pojedynczego detektora LuAG(Ce) jest przedstawiona na Rysunku 3-4 w takiej skali, że istotny dla detektora SiFi-CC obszar wysokich energii jest skompresowany w sposób utrudniający odczyt wartości, a mało istotny obszar energii poniżej 100 keV dominuje zakres dynamiczny skali pionowej. Czy nie można było użyć skali logarytmicznej, jeśli autor chciał przedstawić wyniki także dla niskich energii?
5. Wspomniane na stronie 28 rozmycie gaussowskie z 4 mm jest skomentowane, że jest prawie takie same jak wartość średnia z cytowanego artykułu [56]<sup>2</sup>. W tym miejscu widziałbym szerszy komentarz, bo wspomniana praca podaje rozdzielczości od 0,5 mm (na krańcach) do 6,5 mm (w środku) dla  $E_\gamma=511$  keV, oraz poprawę rozdzielczości o czynnik  $\sim 2,5$  dla  $E_\gamma=4,4$  MeV.
6. Domyślałem się, że Rysunek 3-5 przedstawia wyniki symulacji programem GEANT, ale nie jest to sprecyzowane w podpisie tego rysunku.

Tym niemniej, Autor rozprawy w dalszej części tego Rozdziału sprawnie przedstawił szereg ważnych aspektów stosowanych metod uczenia maszynowego. Bardzo precyzyjnie omówił sprawę doboru symulowanych zdarzeń do uczenia maszynowego (Rysunek 3-6). Pomimo stosowania wyłącznie danych z symulacji, Autor zdaje sobie sprawę, że symulacje nie zawsze są doskonale (strona 36). Podzielam taką ostrożność Autora.

Kluczowy dla rozprawy jest Rozdział 4, gdzie Autor zawarł wyniki przeprowadzonych badań. Konkluzje dotyczące optymalizacji geometrii detektora są klarownie przedstawione, a podsumowanie zawarte w podrozdziale 4.1.4. Następna część tego Rozdziału porusza sprawę wyników procedur uczenia maszynowego. Tu ponownie mam szereg uwag:

1. Wolałbym, aby zmienne definiowane w podrozdziale 4.2.1 były przedstawione w postaci wzorów z wyjaśnieniami oznaczeń niż długich opisów słownych.
2. Testy zbieżności metody MLP, przedstawione na Rysunku 4-7 dla różnych klas zdarzeń, pokazują zbliżony kształt. Jednak jest to osiągnięte poprzez niespójny dobór

---

<sup>2</sup> [56] to A. Wrońska et al., *Characterization of components of a scintillation-fiber-based Compton camera*, Acta Physica Polonica B51, 17 (2020).

- osi poziomych i pionowych, różnych na każdym z rysunków. Bez problemu można by wszystkie te wykresy umieścić na wspólnym diagramie, odpowiednio dobierając osie.
3. Na stronie 54 jest kilka słów („*While it leads to an increase in computation time.*”), które pewnie powinny być połączone ze zdaniem tekstu rozprawy?
  4. Każdy z czterech diagramów na Rysunkach 4-6, 4-8 i 4-10 ma różne zakresy osi poziomej i pionowej, co nie ułatwia porównywania wyników.
  5. Użycie funkcji wagowej zdefiniowanej równaniem 4.2 wymaga uzasadnienia dokonanego wyboru. Można przecież skonstruować wiele funkcji o zbliżonej charakterystyce.
  6. Ważna konkluzja o przewadze modelu Boosted Decision Tree BDT (Tabela 4.10) nad innymi rozważanymi podejściami wynika z lepszej zdolności separującej, ale jest to różnica, jak pisze Autor, tylko 2%. Nasuwa się naturalne pytanie, czy taka kilkuprocentowa różnica jest efektem stabilnym?
  7. W podrozdziale 4.3.3 użyto sformułowania typu „*photons may interact only a few times*” i „*events escape... after a few interactions*”. Rozumiem, że Autor miał na myśli wtórne fotony po kolejnych rozproszeniach. Większa precyzja sformułowań byłaby tu wskazana.
  8. Wyjaśnienie znaczenia „*Shrinkage parameter*” na stronie 66 byłoby wskazane.
  9. Liniowa korelacja między pierwotną energią i zebrana sumą energii jest dobrze udokumentowana na rysunku 4-15. Autor pozostawił jednak bez komentarza istnienie zbioru punktów leżących na osi poziomej (zerowa energia pierwotna).
  10. Poważne zastrzeżenia budzi zawartość Tabeli 4.14, a mianowicie wyznaczenie zmiennych Recall i Purity. O ile parametr Efficiency jest wyznaczony zgodnie z jego definicją podana na początku podrozdziału 4.3.1, to tam wprowadzone definicje trzech wspomnianych parametrów wymagają znajomości czterech liczb. Tymczasem w kwestionowanej Tabeli 4.14 są wymienione tylko dwie! To czyni wyniki umieszczone w tabeli niezrozumiałymi.
  11. Kryterium zbieżności pixel-wise (podrozdział 4.3.6) powinno być wytłumaczone, a nie tylko zastosowane.

Pomimo tylu zgłoszonych uwag do tego Rozdziału, należy zauważyć ważny osiągnięty rezultat przeprowadzonych badań: rozkład emitowanych pierwotnych fotonów odtwarzający geometrię zasięgu wiązki oraz wyznaczenie dokładności tej metody. To cenny wynik pozwalający na lepsze zrozumienie metody oraz interpretację wyników pomiarowych.

Ostatni Rozdział zawiera podsumowanie uzyskanych wyników, podkreślając otrzymaną rozdzielczość pozycyjną 3,5 mm (FWHM).

Podsumowując, rozprawa doktorska wywiera wrażenie pisanej pod naciskiem czasu: początkowa część jest bez wątpienia bardziej precyzyjna i głębiej przemyślana (za wyjątkiem kwestionowanego sformułowania w Rozdziale 1, które nie powinno tam być!) niż końcowe rozdziały, gdzie szczegółowe i dobrze wyjaśnione fragmenty przeplatają się z kwestionowanymi lub niedostatecznie wyjaśnionymi aspektami analizy. Przykładem tego jest niespójność Tabeli 4.14 z wcześniej wprowadzonymi definicjami. Tym niemniej, w pracy jest jasno postawiony ważny problem fizyczny o znaczeniu aplikacyjnym, który został zbadany i znaleziono rozwiązanie wybierając procedurę o optymalnych parametrach (aczkolwiek konkurencyjne nie są znacząco gorsze). Wyznaczono rozdzielczość pozycyjną, jaka może dostarczać rozwijany detektor SIFi-CC obserwujący zasięg wiązki protonów podczas hadronoterapii.

Pod względem wyniku naukowego i przy zgłoszonych w recenzji zastrzeżeniach i uwagach krytycznych, potwierdzam, że praca jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego.,

**Stwierdzam, że rozprawa przedstawiona przez mgr. Majid Kazemi Kozani jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego, spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania, a tym samym stawiam wniosek o dopuszczenie pana magistra Majid Kazemi Kozani do dalszych etapów postępowania doktorskiego.**