



UNIWERSYTET ŚLĄSKI, Instytut Fizyki
ul. 75 Pułku Piechoty 1, 41-500 Chorzów
Prof. Jan Kisiel tel.: (+48) 32 349 7636,
e-mail: Jan.Kisiel@us.edu.pl

Chorzów, dnia 03.12.2021r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana Majid Kazemi Kozani pt.
Events Pattern Recognition and Image Reconstruction in
Compton Camera for Proton Therapy Monitoring.

Odkrycia fizyków jądrowych od wielu dziesięcioleci są wykorzystywane w diagnostyce i terapii medycznej. Wystarczy tutaj wymienić np. magnetyczny rezonans jądrowy, pozytonową tomografię emisyjną czy wykorzystanie wiązek ciężkich jonów w leczeniu nowotworów. Ostatnie z wymienionych staje się coraz powszechniejsze dzięki rozwojowi technik przyspieszania ciężkich cząstek naładowanych z wykorzystaniem akceleratorów „niewielkich” rozmiarów. Zastosowanie hadronowych wiązek terapeutycznych w radioterapii pozwala na niszczenie maksymalnej liczby komórek nowotworowych przy minimalizacji napromieniowania komórek zdrowych. Niewątpliwą zaletą wiązki protonowej, w porównaniu z wiązkami promieniowania gamma, jest jej zależność głębokościowa: największa wartość dawki w tzw. pikie Bragga pokrywającym się z obszarem występowania komórek nowotworowych, dużo mniejsza przed obszarem napromienienia oraz szybko zanikająca za pikiem Bragga. Nie ulega wątpliwości, że zastosowanie wiązek hadronowych, charakteryzujących się dużą mocą dawki i wysoką energią promieniowania, oraz zaawansowanych algorytmów komputerowych w klinicznych systemach planowania leczenia, pozwoliło na osiągnięcie bardzo dobrych efektów terapeutycznych, przy jednoczesnym znacznym zmniejszeniu dawki promieniowania w zdrowej tkance. Jednakże, aby plan leczenia pacjenta był poprawnie skonstruowany i wykonany potrzebna jest precyzyjna znajomość rozkładu dawki zdeponowanej w trakcie terapii w ciele pacjenta. Monitorowanie rozkładu dawki w trakcie terapii wiązką hadronową nie jest proste, a obiecującym wydaje się wykorzystanie natychmiastowych kwantów gamma (prompt gamma - PG), które są emitowane w czasie krótszym niż ns, w wyniku reakcji jądrowych jonów wiązki z jądrami atomowymi napromieniowanych tkanek pacjenta. Ten trudny temat badawczy został podjęty przez współpracę fizyków z Uniwersytetu Jagiellońskiego i Uniwersytetu w Aachen w Niemczech. Do rekonstrukcji miejsca emisji PG, a tym samym lokalizacji *online* (tzn. w czasie trwania terapii) pikie Bragga został zaproponowany układ składający się z fotopowielaczy krzemowych (Silicon PhotoMultiplier – SiMP) oraz kamery komptonowskiej opartej o włókna scyntylacyjne (scintillating fiber Compton camera – SiFi-CC). Oczywiście, tak skonstruowany detektor rejestruje nie tylko oddziaływania komptonowskie, ale także inne oddziaływania gamma. Odróżnienia przypadków komptonowskich (sygnał) od pozostałych (tło) przy pomocy uczenia maszynowego (machine learning) podjął się Pan Majid Kazemi Kozani w przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej, której promotorem jest Pan prof. Andrzej Magiera z Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Rozprawa doktorska Pana Majid Kazemi Kozani składa się z pięciu rozdziałów, pożytecznego wykazu skrótów, spisów tabel i rysunków oraz wykazu literatury liczącego 88 pozycji. W niespełna trzystronicowym wstępie autor skrótowo przedstawia powody podjęcia takiego tematu rozprawy. Nie mam żadnych wątpliwości, że precyzyjne monitorowanie *online* dawki i zasięgu wiązki hadronowej jest niezwykle ważnym i pilnym zagadnieniem badawczym. W rozdziale drugim, teoretycznym, zawarte zostały zwięzłe opisy podstaw terapii hadronowej i zjawiska Comptona, które jest jednym z mechanizmów oddziaływania promieniowania gamma z materią. W tym rozdziale przedstawiono także narzędzia informatyczne i statystyczne wykorzystane przez autora rozprawy. Są to: (1) pakiet Geant4, który powszechnie i z powodzeniem wykorzystywany jest w fizyce jądrowej i cząstek elementarnych do symulacji oddziaływań, (2) metoda rekonstrukcji obrazu wykorzystująca Maximum Likelihood Expectation Maximization (MLEM), (3) uczenie maszynowe, które coraz powszechniej jest używane nie tylko w fizyce jądrowej. W rozdziale trzecim, *Materials and Methods*, autor omawia schemat rozważanego w rozprawie detektora SiFI-CC, który składa się z dwóch modułów – rozpraszacza (*scatterer*) i absorbera (*absorber*). Geometria detektora i szczegóły rekonstrukcji obrazu są także przedstawione w tym rozdziale. Autor wykorzystuje oprogramowanie dostępne w pakiecie ROOT (zestaw narzędzi do wielowymiarowej analizy danych TMVA), który jest rozwijany w CERN-ie. W obszernym rozdziale czwartym dyskutowana jest optymalizacja geometrii detektora, wraz z trenowaniem różnych modeli uczenia maszynowego pod kątem jak najlepszej identyfikacji przypadków oddziaływania komptonowskiego. Zostały zrekonstruowane obrazy LM-MLEM miejsca krawędzi dystalnej piku Bragga (*the distal Edge of the Bragg peak*) dla wybranych modeli uczenia maszynowego. Aby je uzyskać Pan Majid Kazemi Kozani dopasował wartości parametrów w rozważanych modelach i wybrał najlepszy z nich - BDT (Boosted Decision Tree). W tym modelu udało się uzyskać najlepszy stosunek sygnału do tła. Rozprawę kończy trzystronicowe podsumowanie. Rozprawa liczy 87 stron.

Za najważniejszy wynik rozprawy doktorskiej Pana Majid Kazemi Kozani uważam uzyskanie zrekonstruowanych obrazów pików Bragga z wykorzystaniem uczenia maszynowego. Jest to wynik ważny, ponieważ do rekonstrukcji obrazów można wykorzystać tylko zdarzenia z rozpraszaniem Comptona w rozpraszaczu i pierwszym oddziaływaniem rozproszonego kwantu gamma w absorberze. Pozostałe zdarzenia, w szczególności wielokrotne rozpraszanie Comptona w absorberze stanowi bardzo duże tło. Odwołanie się do fizycznych podstaw zjawiska Comptona (m.in. zależności kątowe) pozwoliło na optymalizację zmiennych użytych w uczeniu maszynowym. Następujące zmienne TMVA: energia, korelacja kątowa oraz pozycje oddziaływań w rozpraszaczu i absorberze zostały użyte dla różnych klas przypadków (2-5 cluster hits) dla sygnału i tła. Ich macierze korelacji zostały pokazane na rysunku 4.5 (str.47).

Poniżej zamieszczam dwa pytania/uwagi dotyczące metod analizy danych i wyników przedstawionych w rozprawie doktorskiej Pana Majid Kazemi Kozani.

1. Na str. 27 rozprawy autor pisze „*For image optimization, the system matrix was read and used for the iterations of LM-MLEM. To reduce the cost in CPU time and memory, the sensitivity map was assumed uniform in each pixel for the results presented in this thesis*”. Takie podejście rodzi uzasadnione pytanie o inne niż „obliczeniowe” (CPU i pamięć) podstawy przyjęcia takiego założenia. I o to chciałbym zapytać w trakcie obrony.

2. Nie mogę zgodzić się ze stwierdzeniem, że liczba przypadków typu oddziaływanie Comptona z więcej niż jednym klastrem w rozpraszaczu (scatterer) jest dużo mniejsza niż takich z jednym klastrem w rozpraszaczu. Na rysunku 3-7 (str.33) można zauważyć, że liczba przypadków typu scat 2 + abs 1 jest większa niż scat 1 + abs 4, a liczba przypadków typu scat 2 + abs 2 jest tylko niewiele mniejsza niż przypadków scat 1 + abs 4 (skala pionowa na tym rysunku jest logarytmiczna). Przypadki komptonowskie z więcej niż jednym klastrem w rozpraszaczu nie były uwzględniane w dalszych rozważaniach, co uważam za nieuzasadnione uproszczenie. Będę oczekiwał ustosunkowania się doktoranta do tego zastrzeżenia.

Rozprawa doktorska Pana Majid Kazemi Kozani jest napisana w języku angielskim. W trakcie czytania odniosłem wrażenie, że autor mógł się bardziej przyłożyć do korekty językowej, np. z wykorzystaniem dostępnego oprogramowania. Być może pewna niestaranność w redagowaniu rozprawy wynikała z presji czasu, której czasem doświadczają doktoranci. Jednocześnie pragnę zaznaczyć, że nie czuję się w pełni kompetentny do oceny pracy pod względem językowym. Poziom edytorski pracy jest zadowalający. Niektóre rysunki są zbyt małe (np. rysunki 4-18 na str. 72 czy 4-19, str. 73) co powoduje, że są niezbyt czytelne. Tabele dobrze uzupełniają tekst. Rozprawa nie zawiera streszczenia w języku polskim. Spis literatury jest obszerny - 88 pozycji. Niestety nie są podane DOI (*Digital Object Identifier*) co jest obecnie bardzo dobrą praktyką w publikacjach naukowych. Poniżej zamieszczam listę zauważonych „grubszych” błędów:

1. ... *a full description about ...* zamiast ... *a full description of ...*, (str. 3, Introduction)
2. ... *introduction about ...* zamiast ... *introduction to...*, (str. 4)
3. ... *depending the ...* zamiast ... *depending on the ...*, (str. 5)
4. ... *is lost ...* zamiast ... *are lost ...*, (str. 9)
5. ... *the the edges of the segmented image...* zamiast ... *the edges of the segmented image...*, (str. 11)
6. ... *the the edges of the segmented image...* zamiast ... *the edges of the segmented image...*, (str. 26)
7. ... *presented on Figure 3-1.* zamiast ... *presented in Figure 3-1.* (str.39)
8. ... *are evaluated.* zamiast ... *is evaluated.* (str.39)
9. ... *in the fist part ...* zamiast ... *in the first part ...* (str.39)
10. ... *results of...is presented.* zamiast ... *results of...are presented.* (str.39)
11. ... *results () refers to...* zamiast ... *results () refer to...* (str.39)
12. ... *the number of neurons presented in each layer ...* chyba powinno być ... *the number of neurons present in each layer ...* (str. 52)
13. ... *the energy sum ... were corrected ...* zamiast ... *the energy sum ... was corrected ...* (str.68)
14. ... *only on of combination of...* zamiast ... *only one combination of ...* (str.68)
15. ... *convergence criterion are as follows.* zamiast ... *convergence criteria are as follows.* (str.71)
16. ... *leading to locating the distal edge...* zamiast ... *leading to locate thee distal edge ...* (str.79).
17. Referencja [56] na str. 85 jest niepoprawna. Chodzi o publikację w Acta Phys. Pol. **B51**, a nie **B15**.

Podsumowując, uważam że zawarte w rozprawie doktorskiej Pana Majid Kazemi Kozani wyniki są oryginalne i ciekawe. Jestem przekonany, że przyczyniły się do postępu

prac nad projektem SiFi-CC, który realizują fizycy z Krakowa i Aachen. Uważam, że Pan Majid Kazemi Kozani opanował wybrane metody analizy danych wykorzystujące metody uczenia maszynowego, a jest to umiejętność przydatna nie tylko w fizyce.

Na podstawie przedłożonej do recenzji pracy doktorskiej Pana Majid Kazemi Kozani pt. „*Events Pattern Recognition and Image Reconstruction in Compton Camera for Proton Therapy*” stwierdzam, że rozprawa spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. Jan Kisiel