

Recenzja pracy doktorskiej pani mgr Katarzyny Rusieckiej

"The SiFi-CC detector for beam range monitoring in proton therapy - characterization of components and a prototype detector module"

Projekt w ramach którego wykonana została praca doktorska pani mgr Katarzyny Rusieckiej dotyczy metod zmniejszania niepewności przestrzennej w naświetlaniach tkanek nowotworowych w radioterapii protonowej. Do pomiaru rzeczywistego zasięgu wiązki protonowej w ciele pacjenta proponuje się rejestrację kwantów γ o dyskretnych energiach, emitowanych przy deekscytacji wzbudzonych protonami jąder ^{12}C i ^{16}O . Kwanty te emitowane są z zaledwie pikosekundowym opóźnieniem po zajściu reakcji wzbudzenia jądra. Ich energie, rzędu 8 MeV, są wystarczające do opuszczenia ciała pacjenta i kreacji sygnału w odpowiednim detektorze ustawionym w pobliżu naświetlanego obszaru. Identyfikacja miejsca emisji rejestrowanych cząstek γ w czasie rzeczywistym pozwoliłaby na natychmiastowe dostosowywanie energii wiązki protonów i jej orientacji przestrzennej względem ciała pacjenta, tak, aby zarówno zminimalizować prawdopodobieństwo naświetlania zdrowych tkanek, jak i uniknąć niewystarczającej irradycji tkanki rakowej. Istotność proponowanego projektu dla zwiększenia jakości i skuteczności radioterapii hadronowej w leczeniu onkologicznym jest niewątpliwa i znacząca.

W proponowanej metodzie konieczne są: wystarczająco precyzyjny pomiar energii kwantów γ (w celu ich identyfikacji), szybki czas ich pomiaru, możliwość rekonstrukcji ich trajektorii, ciągły pomiar krotności emisji zależnej od aktualnej energii protonu w ciele pacjenta. Praca doktorska pani mgr Rusieckiej dotyczy badań nad prototypem odpowiedniego detektora, który spełniałby wszystkie te wymagania. Do tego celu postanowiono zaadaptować i udoskonalić zasadę działania detektora znanego jako kamera Comptona (ang. Compton Camera), używanego już wcześniej zarówno w obrazowaniu medycznym jak i badaniach podstawowych i zastosowaniach praktycznych. Celem pani Rusieckiej jak i międzynarodowej współpracy naukowej SiFi-CC (Scintillating Fiber and Silicon Photomultiplier-based Compton Camera), w której Ona pracuje, jest opracowanie i budowa takiego detektora. Będzie on służył do kontrolowania naświetlania protonowego w czasie rzeczywistym z użyciem zasady kamery Comptona w jej wersji podstawowej jak i w wersji z tzw. kodowaną maską (ang. Coded Mask). Detektor o nazwie SiFi-CC będzie zbudowany jako struktura składająca się z włókien scyntylacyjnych odczytywanych przy pomocy fotopowielaczy krzemowych.

Dysertacja pani mgr K. Rusieckiej liczy 176 stron, składa się z sześciu rozdziałów, czterech aneksów, spisu literatury oraz bardzo użytecznych dla czytelnika listy symboli i listy skrótów używanych w tekście. Napisana jest po angielsku w bardzo klarowny sposób. Kompozycja pracy jest przejrzysta i adekwatna do opisywanych badań.

We wstępie czytelnik wprowadzony jest w zagadnienia radioterapii onkologicznych. Autorka bliżej prezentuje aspekty fizyczne i biologiczne naświetlań przy pomocy protonów. Wyraźnie przedstawia możliwe, negatywne efekty nieprecyzyjnych naświetlań, wynikające ze skończonych możliwości

doboru najbardziej optymalnych energii i przestrzennych rozkładów wiązki protonowej do aktualnego położenia i objętości tkanek nowotworowych w ciele pacjenta. Na tym tle wyraźnie widać potrzebę i zalety ciągłego i jednoczesnego z naświetlaniem monitorowania rozkładu przestrzennego i wielkości dawki promieniowania dostarczonego do tkanek pacjenta podczas prowadzonej terapii. W tym kontekście Doktorantka przedstawia różne, rozważane sposoby monitorowania zasięgu wiązki w radioterapii protonowej a w szczególności proponowaną przez siebie metodę wykorzystującą kamerę Comptona, zbudowaną z włókien scyntylacyjnych. Metoda ta jest opisana bardziej szczegółowo.

Rozdział drugi zawiera podstawowe informacje o fizyce detektorów scyntylacyjnych. Opisane są różne rodzaje scyntylatorów, techniki odczytu sygnałów oraz zasady budowy detektorów scyntylacyjnych. Autorka omawia modele propagacji światła w scyntylatorze uwzględniające jego kształt, wykończenie powierzchni, sposób opakowania. Doktorantka opisuje prosty model, eksponencjalnego tłumienia światła w scyntylatorze (Exponential Light Attenuation model – ELA) oraz bardziej zaawansowany, gdzie uwzględniona jest możliwość częściowego odbicia światła na końcu włókna (Exponential Light Attenuation model with Light Reflection – ELAR). Pani mgr Rusiecka sprawdza przydatność obu modeli do opisu zjawisk, z którymi będzie się mierzyć przy testowaniu i wyborze najbardziej odpowiedniego materiału na budowany przez siebie detektor SiFi-CC. W celu dokonania jak najpełniejszej charakterystyki badanych scyntylatorów opisuje sposoby pomiaru parametrów takich jak: długość atenuacji światła, ilość zebranego światła, rozdzielczość energetyczna, dokładność pomiaru pozycji, rozdzielczość czasowa detektora. Wprowadzone są odpowiednie estymatory badanych wielkości. Ich rozkłady są zilustrowane przykładowymi wynikami pomiarów i analizy dla jednej z badanych konfiguracji pojedynczego włókna scyntylacyjnego i zastosowanego sensora światła.

Rozdział trzeci przynosi opis badań i wyboru materiału do budowy detektor SiFi-CC spośród różnych scyntylatorów nieorganicznych. Wykorzystano zestaw eksperymentalny umożliwiający precyzyjne pozycjonowanie źródła ^{22}Na , kolinearnie emitującego dwa kwanty γ o energii 511 keV, względem badanego włókna scyntylacyjnego. Zadbano o ciągły pomiar temperatury i kontrolę warunków pracy sensorów światła. Zastosowany system akwizycji danych umożliwiał próbkowanie i zapis przebiegów sygnałów wytworzonych na obu końcach badanego włókna w zastosowanych tam fotopowielaczach krzemowych (SiPM). Analiza sygnałów pozwalała na określenie wartości parametrów służących do charakterystyki badanego detektora scyntylacyjnego.

Przeprowadzono badania czterech różnych materiałów scyntylacyjnych, dostarczonych przez kilku producentów w formie włókien o rozmiarach $1 \times 1 \times 100 \text{ mm}^3$. Badano nie tylko sam materiał scyntylacyjny ale też wpływ zastosowanych metod wykończenia jego powierzchni. Testowano detektor w wielorakich konfiguracjach materiału scyntylacyjnego, z różnymi sensorami światła, sposobami optycznego łączenia włókna scyntylacyjnego z sensorem światła, i dla różnych sposobów i materiałów stosowanych do owijania lub malowania powierzchni scyntylatora. Na podstawie obszernych i długotrwałych testów zebrano charakterystyki poszczególnych konfiguracji i po ich wnikliwej analizie wybrano optymalny zestaw do budowy prototypowego rozpraszacza dla detektora SiFi-CC. Jako materiał scyntylacyjny wybrano LYSO:Ce. Mimo bardzo wielu przeprowadzonych serii pomiarów (ponad 200) i dużej ilości zgromadzonych danych, wyniki ich analizy przedstawiono w sposób przejrzysty i umożliwiający szybkie porównania poszczególnych parametrów dla różnych konfiguracji badanego detektora.

Budowa pierwszego modułu prototypowego detektora SiFi-CC oraz przeprowadzone testy i ich wyniki opisane są w rozdziale czwartym. Do testowania wybrano konfigurację z czterema warstwami włókien

scyntylicyjnych. W kaŹdej warstwie było 16 włókien (rozmiar pojedynczego włókna: 1 x 1 x 100 mm³), odizolowanych optycznie i odczytywanych poprzez dedykowane fotopowielacze krzemowe. Aby bardziej dopasować powierzchnię sensora światła do rozmiaru pręta scyntylicyjnego i umożliwić indywidualny odczyt kaŹdego pręta poprzez dwa detektory na jego końcach, zastosowano fotopowielacze krzemowe o mniejszej powierzchni, inne niŹ we wcześniejszych testach materiałów scyntylicyjnych. Rozmiar użytych SiPM (1.36 x 1.36 mm²) narzucił odległości między poszczególnymi elementami scyntylicyjnymi. Skonstruowano nowy układ eksperymentalny pozwalający na testowanie większych struktur zbudowanych z włókien scyntylicyjnych. W miejsce punktowego detektora referencyjnego zastosowano rozciągły, jednometrowy pręt scyntylicyjny o przekroju 3 mm x 3 mm.

Testy przeprowadzone w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego wykazały znaczne pogorszenie charakterystyk badanych włókien scyntylicyjnych w porównaniu do wyników uzyskanych podczas ich indywidualnych testów. Autorka pracy identyfikuje przyczynę tego pogorszenia w użytych do testów prototypu fotopowielaczach, o światłoczułej powierzchni 1 mm², znacznie mniejszej niŹ dla tych używanych we wcześniejszych testach materiałów scyntylicyjnych (9 mm²). Bardzo istotny wpływ powierzchni światłoczułej w używanych sensorach światła został potwierdzony w kolejnych badaniach, tym razem przeprowadzonych na Politechnice w Akwizgranie (RWTH Aachen, Niemcy). Sensory światła zwane cyfrowymi licznikami fotonów (Phillips Digital Photon Counting) o duŹej powierzchni czułej (48 mm x 48 mm) zostały zastosowane do zbiorowego odczytu światła ze wszystkich włókien scyntylicyjnych detektora prototypowego. Znakomicie polepszyło to wydajność rejestracji światła i jakoś działania detektora prototypowego. Wspólny odczyt światła dla wszystkich włókien scyntylicyjnych skomplikował identyfikację pozycji aktywnego włókna w danym zdarzeniu. Oby ją odzyskać wykorzystywano segmentację licznika fotonów i stosowano metodę liczenia „punktu ciężkości” z ilości światła zebranego w poszczególnych segmentach sensora światła. W pomiarach w Akwizgranie zastosowano teŹ inną elektronikę odczytu sygnału oraz inny system akwizycji danych niŹ te używane wcześniej w Krakowie. Zmieniono również sposób kolimacji kwantów γ dla sygnału referencyjnego, identyfikującego miejsce naświeatniania testowanego detektora. Uzyskane rezultaty, znacznie lepsze od tych zmierzonych w Krakowie, potwierdziły zadowalającą rozdzielczość pozycyjną i energetyczną oraz czasową prototypu detektora SiFi-CC.

Opis przebiegu prac eksperymentalnych oraz uzyskane rezultaty podane są w formie podsumowania w rozdziale piątym. Z krótkiego rozdziału nr 6 czytelnik dowiaduje się, Źe zdobyta wiedza i doświadczenie zostały juŹ wykorzystane do budowy pełnoskalowego modułu rozpraszacza dla detektora SiFi-CC. Podany jest krótki opis tego detektora wraz z informacją, Źe odbyły się juŹ jego pierwsze testy, zarówno w konfiguracji podstawowej jak i w wersji z kodowaną maską. Uzyskane dane są obecnie analizowane.

W czterech aneksach zamieszczonych na końcu swojej pracy doktorskiej pani mgr Rusiecka podaje szczegółowy formalizm używanych modeli propagacji światła w scyntylatorze, przykłady pomiarów energii kwantu γ i pozycji jego padania na detektor, charakterystyki używanych do testów detektorów fotonów oraz schematy elektroniki zastosowanej do procesowania sygnałów w poszczególnych seriach testów pojedynczych włókien scyntylicyjnych.

Dysertacja dostarcza jasnych i obszernych informacji. Kilka zauwaŹonych literówek i błędów edytorskich nie zmienia pozytywnego wrażenia przy jej czytaniu. Czytając pracę dokorską pani mgr

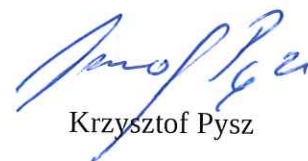
Rusieckiej miałem wątpliwość tylko co do jednego zagadnienia. Wiadomo, że używane fotopowielacze krzemowe (SiPM) mają bardzo wąski zakres poprawnego napięcia pracy i są bardzo czułe na zmiany temperatury. Autorka podaje, że podczas pomiarów mierzono temperaturę w kilku miejscach układu doświadczalnego. Nie jest jasne dla czytelnika, czy podczas długotrwałych pomiarów utrzymywano temperaturę na stabilnym poziomie czy też stosowano jakiś system kompensacji napięć zasilania lub/i progów dyskryminatorów przy zmieniającej się temperaturze? Z tym wiąże się drugie pytanie: czy w pomiarze krakowskim, gdy wiele SiPM było ciasno upakowanych na płytkach drukowanych, wzajemnie oddziałując na siebie, mogło to mieć wpływ na pogorszenie się parametrów testowanego detektora?

Pani mgr K. Rusiecka wykonała bardzo szerokie i żmudne badania eksperymentalne oraz wieloaspektową analizę zgromadzonych, obszernych danych doświadczalnych. Uzyskała bardzo istotne wyniki, niezbędne do kontynuowania prac nad detektorem do ciągłego monitorowania zasięgu wiązki protonów w radioterapii protonowej. Przeprowadzone studia pozwoliły na wybranie najlepszego spośród testowanych, materiału scyntylacyjnego (LYSO:Ce), rozmiaru powierzchni czynnej sensora światła, sposobu zapewnienia kontaktu optycznego między nimi, sposobów polerowania i owijania powierzchni prętów scyntylacyjnych, zakresu stosowalności różnych modeli rozchodzenia się światła w wydłużonym scyntylatorze i wynikających z nich obserwacji. Doktorantka zgromadziła też istotną wiedzę i umiejętności praktyczne, konieczne w dalszych pracach nad budową detektora SiFi-CC.

Praca doktorska pani mgr Katarzyny Rusieckiej jest przykładem solidnie przeprowadzonych, bardzo istotnych badań eksperymentalnych będących znaczącym przyczynkiem do rozwoju ważnego projektu naukowego. Dotyczy on zwiększenia pewności i skuteczności radioterapii hadronowej w leczeniu nowotworów poprzez monitorowanie zasięgu wiązki protonowej, jednocześnie z samym naświetlaniem. Doktorantka wykazała się szeroką wiedzą na temat medycyny nuklearnej, obrazowania medycznego, technik i narzędzi stosowanych przy budowie i stosowaniu detektorów scyntylacyjnych, metod analizy i porównywania danych doświadczalnych. Wyniki pracy pani mgr Rusieckiej zostały opublikowane w 10 recenzowanych artykułach naukowych (w 3 jest pierwszym autorem lub autorem korespondencyjnym). Pani Rusiecka prezentowała je też na 10 międzynarodowych konferencjach naukowych (5 prezentacji ustnych i 5 plakatów).

Moja ocena recenzowanej pracy doktorskiej pani mgr Katarzyny Rusieckiej jest bardzo wysoka. Jej zawartości merytoryczna stanowi oryginalny i istotny wkład w rozwój technik obrazowania medycznego wykorzystujących materiały scyntylacyjne, oraz samej radioterapii protonowej. Stwierdzam też, że recenzowana dysertacja spełnia formalne wymagania stawiane pracom doktorskim w dziedzinie nauk fizycznych. Pozwala mi to z całym przekonaniem wnioskować o dopuszczenie pani mgr Katarzyny Rusieckiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę wysoką wartość naukową projektu budowy detektora SiFi-CC, jego wagę dla rozwoju radioterapii hadronowej, także tej rodzimej, szerokość i jakość przeprowadzonych badań oraz znaczący już dorobek naukowy Doktorantki wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej pani mgr K. Rusieckiej.



Krzysztof Pysz