

Dr hab. Przemysław Adrich, prof. NCBJ
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Ul. Andrzej Sołtana 7,
05-400 Otwock

Otwock-Świerk, 12 września 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr Katarzyny Rusieckiej pt. „The SiFi-CC detector for beam range monitoring in proton therapy - characterization of components and a prototype detector module”

Niniejszą recenzję sporządziłem w odpowiedzi na pismo prof. dr hab. Jacka Golaka, przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, z dnia 16 czerwca 2023 r. Jak zostałem poinformowany w ww. korespondencji, przy ocenie rozprawy doktorskiej mgr Rusieckiej zastosowanie mają przepisy Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami. („Ustawa”).

Zgodnie z art. 13 Ustawy, rozprawa doktorska powinna:

- stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne,
- wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej,
- wykazywać umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez kandydata,
- w przypadku rozprawy przygotowanej w języku obcym, zawierać streszczenie w języku polskim.

Poniżej ustosunkuję się do tych wymogów.

Przedłożona przez mgr Rusiecką rozprawa ma związek z rozwojem radioterapii hadronowej – jednej z najnowocześniejszych technik leczenia chorób nowotworowych. W radioterapii hadronowej zlokalizowana zmiana nowotworowa niszczona jest poprzez precyzyjne napromienianie wiązką protonów lub ciężkich jonów. Ze względu na unikalny charakter rozkładu dawki deponowanej w ośrodku przez wiązkę hadronów, opisywany tzw. krzywą Bragga z charakterystycznym ostrym maksimum przy końcu zasięgu i stosunkowo niskim poziomem na mniejszych głębokościach, radioterapia hadronowa jest preferowana w przypadku głęboko położonych i/lub nieoperowalnych nowotworów, np. mózgu, gałki ocznej. Dodatkowo, ze względu na wysoką efektywność radiobiologiczną, radioterapia hadronowa może być korzystniejszą alternatywą w stosunku do innych rodzajów terapii w przypadku nowotworów radio lub lekoopornych. Stosowanie wiązek hadronów w praktyce klinicznej niesie, podobnie jak w innych rodzajach radioterapii, ryzyko popełnienia tzw. błędu geograficznego, czyli podania wysokiej dawki poza obszarem tarczowym. Jednakże, w odróżnieniu od innych rodzajów radioterapii, ze względu na fakt koncentracji dawki w obszarze piku Bragga, nawet niewielki błąd geograficzny na poziomie kilku milimetrów, może mieć znacznie poważniejsze konsekwencje związane z uszkodzeniem zdrowych tkanek poza obszarem tarczowym. Potencjalnych źródeł błędu geograficznego w radioterapii jest bardzo wiele, od trudnych do wykrycia uszkodzeń aparatury po niezamierzone błędy ludzkie, przez co ryzyko błędu geograficznego jest praktycznie niemożliwe do całkowitego wyeliminowania. W tej sytuacji niezwykle istotne jest

opracowanie narzędzi służących kontroli głębokości depozycji dawki w czasie rzeczywistym w trakcie sesji napromieniania.

Rozprawa doktorska mgr Rusieckiej została wykonana w ramach projektu budowy systemu detekcyjnego „SiFi-CC” do kontroli w czasie rzeczywistym głębokości depozycji dawki w radioterapii hadronowej, w szczególności wiązkami protonów. W części sprzętowej, system SiFi-CC ma być kamerą komptonowską zoptymalizowaną do obrazowania źródeł promieniowania gamma o energiach rzędu kilku MeV emitowanego w wyniku reakcji rozpraszania nieelastycznego protonów, głównie na jądrach węgla i tlenu obecnego w tkankach. W przypadku detektora obrazującego, działającego w oparciu o mechanizm rozpraszania komptonowskiego, kluczowa jest rekonstrukcja energii końcowej rozproszonego kwantu gamma, energii elektronu komptonowskiego, punktu oddziaływania oraz kierunku rozproszonego kwantu gamma. Dla spełnienia tych ogólnych jak i szeregu bardziej szczegółowych wymagań odnośnie rozdzielczości energetycznej, przestrzennej i czasowej, detektor SiFi-CC ma być zbudowany na bazie włókien wykonanych z nieorganicznego materiału scyntylacyjnego z półprzewodnikowymi detektorami światła – stąd jego nazwa będąca skrótem od ang. Scintillating Fiber and Silicon Photomultiplier-based Compton Camera.

W swojej pracy mgr Rusiecka wykonała dwa etapy wczesnych badań o fundamentalnym znaczeniu dla powodzenia konstrukcji poprawnie działającego systemu SiFi-CC. Pierwszy etap badań skoncentrowany był na podstawowym podzespole przyszłego detektora – włóknie scyntylacyjnym wraz z reflektorem (względnie pokryciem farbą refleksyjną) i sprzężeniem optycznym z fotodetektorem. Na tym etapie opracowano metodykę badania kluczowych z punktu widzenia funkcjonowania detektora własności układu: współczynnika atenuacji światła, wydajności zbierania światła, zdolności rozdzielczych energetycznej, przestrzennej i czasowej. Przeprowadzono skrupulatne i szerokie badanie trzech wybranych materiałów scyntylacyjnych (LuAG, GAGG, LYSO) w różnych wariantach wykończenia powierzchni, z różnymi reflektorami oraz różnymi rodzajami sprzężenia optycznego z fotodetektorem. Na podstawie otrzymanych wyników określono optymalną metodę rekonstrukcji deponowanej energii i punktu oddziaływania oraz określono zdolności rozdzielcze dla każdego z licznych badanych wariantów. To umożliwiło wybór optymalnego materiału, rodzaju wykończenia powierzchni, reflektora oraz sprzęgacza optycznego.

W drugim etapie badań, skonstruowany został prototyp jednego z modułów detektora w małej skali, złożony z 4 warstw po 16 włókien w każdej warstwie. Z kolei wykonano wnikliwe badania funkcjonowania prototypu w dwóch wariantach odczytu światła – indywidualnego dla każdego z włókien (z użyciem fotopowielaczy krzemowych o powierzchni ściśle dopasowanej do powierzchni przekroju poprzecznego włókna) oraz współdzielonego, w którym jeden fotopowielacz o większej powierzchni sprzężony jest z kilkoma włóknami. Badania te ujawniły daleko niezadawalającą pracę pierwszego z wariantów i stały się podstawą dla skonstruowania kolejnego prototypu, którego badanie wykracza poza zakres pracy mgr Rusieckiej.

Rozprawa doktorska ma formę pracy pisemnej liczącej pięć głównych rozdziałów oraz krótki, szósty rozdział przedstawiający plany przyszłego rozwoju i dalszych badań detektora SiFi-CC. Rozprawa przedstawiona jest w języku angielskim i jest opatrzona streszczeniami w językach polskim i angielskim. Ponadto praca zawiera cztery dodatki opisujące kolejno wyprowadzenie jednego z używanych modeli transportu światła w włóknach scyntylacyjnych, kompletny przykład rekonstrukcji widm energii i rozkładu położenia punktu oddziaływania dla danych kalibracyjnych zmierzonych dla wybranego włókna scyntylacyjnego, charakterystyki stosowanych fotodetektorów oraz szczegóły układu przetwarzania sygnałów z fotodetektorów. Dodatkowo rozprawa zawiera spis używanych symboli,

słownik skrótów, informację o grantach, z których finansowano badania. Wykaz literatury liczy 167 pozycji.

Układ rozprawy, w tym podział na rozdziały, jest dobrze przemyślany. Pracę otwiera rozdział pt. „Introduction”, w którym Autorka przedstawiła, w dość szerokim ujęciu, problematykę radioterapii z naciskiem położonym na radioterapię hadronową, jej podstawy fizyczne, radiobiologiczne oraz rys historyczny i współczesne znaczenie w leczeniu chorób nowotworowych. Druga część rozdziału wstępnego jest już ściśle związana z tematyką pracy i naświetla problem monitorowania głębokości depozycji dawki w czasie rzeczywistym. Znajdujemy tutaj krótki przegląd znanych z literatury koncepcji bazujących na różnych zjawiskach fizycznych, w tym na detekcji natychmiastowego promieniowania gamma wytwarzanego przez wiązkę hadronów propagującą w ośrodku materialnym. Znacznie więcej miejsca poświęcono opisowi koncepcji detektora obrazującego działającego na zasadzie kamery komptonowskiej. Wyjaśniono podstawy fizyczne działania tego typu detektorów jak również omówiono w większych szczegółach prowadzone obecnie, w różnych grupach na świecie, prace badawcze poświęcone rozwojowi tego typu detektorów. W tym miejscu zwrócono uwagę na unikalność koncepcji detektora SiFi-CC, która powinna umożliwić przezwycięzenie niedostatków innych rozwiązań i pozwolić wykrywać zmiany położenia piku Bragga w klinicznie użytecznym zakresie kilku milimetrów.

Drugi rozdział, pt. „Scintillating materials”, wprowadza czytelnika, w zagadnienia związane z wykorzystaniem materiałów scyntylacyjnych do budowy detektorów promieniowania jonizującego. Omówiono tutaj, w pierwszej kolejności, podstawy fizyczne zjawiska scyntylacji w różnych materiałach, fotodetektory stosowane do detekcji światła scyntylacji ze szczególnym naciskiem na nowoczesne fotopowielacze półprzewodnikowe. Zwrócono uwagę na szereg istotnych zagadnień wpływających na wydajności zbierania światła w układzie scyntylator – fotodetektor, takich jak straty światła w wyniku załamania na granicy scyntylatora z otaczającym ośrodkiem, transport światła ze scyntylatora do fotopowielacza, dopasowanie czułości fotopowielacza do widma światła scyntylacji. Omówiono stosowane metody zwiększania wydajności poprzez odpowiednie wykończenie powierzchni scyntylatora, stosowanie pokryć refleksyjnych w postaci farb lub materiałów o wysokim współczynniku odbicia, stosowanie sprzęgaczy optycznych na styku scyntylatora z fotodetektorem w postaci past, żeli optycznych czy też podkładek silikonowych, maksymalizację całkowitej powierzchni czynnej fotodetektorów, itd.

Następnie pokrótce omówiono liczne medyczne zastosowania detektorów scyntylacyjnych. Szczegółowo wyjaśniono i sprecyzowano wymagania, jakie musi spełniać materiał scyntylacyjny na potrzeby detektora monitorującego głębokość depozycji dawki w terapii protonowej, w szczególności kamery komptonowskiej.

W kolejnym, bardzo istotnym dla pracy, podrozdziale opisano dwa modele propagacji światła w włóknie scyntylacyjnym. Poprawny model propagacji światła jest niezbędny, aby na podstawie sygnałów zmierzonych przez fotodetektory umieszczone na obu końcach włókna scyntylacyjnego zrekonstruować pozycję punktu oddziaływania oraz energię zdeponowaną przez promieniowanie w scyntylatorze.

Najprostszy model zakłada wykładniczą atenuację światła w funkcji odległości punktu oddziaływania od fotodetektora. Model ten ma tylko dwa wolne parametry: współczynnik atenuacji i stosunek współczynników opisujących wydajność transmisji przez interfejs optyczny do fotodetektorów umieszczonych na obu końcach włókna scyntylacyjnego. Drugi model jest rozszerzeniem pierwszego poprzez uwzględnienie odbicia części światła na granicy scyntylator-fotodetektor. W tym modelu pojawiają się kolejne dwa wolne parametry opisujące współczynniki odbicia na obu końcach włókna.

Współczynniki transmisji i odbicia mogą być różne ze względu na różnice w jakości połączeń optycznych.

Po wprowadzeniu modeli, Autorka szczegółowo przedstawia metodę dopasowania parametrów swobodnych na podstawie wyników pomiarów kalibracyjnych, jak również omawia zastosowane w dalszej części pracy metody określania ilości zbieranego światła, zdolności rozdzielczych pozycyjnej, energetycznej i czasowej. Na przykładzie pomiarów wykonanych dla jednego wybranego włókna Autorka omawia różnice w wynikach uzyskiwanych przy użyciu obu modeli transportu światła.

Rozdziały trzeci i czwarty przedstawiają wyniki przeprowadzonych przez Autorkę badań. Rozdział trzeci pt. „Single-fiber studies” przedstawia badania przeprowadzone na pojedynczych włóknach scyntylacyjnych. Do tych badań wybrano po kilka próbek materiałów scyntylacyjnych różnych producentów. Dodatkowo zbadano wpływ pokrycia powierzchni różnymi materiałami (folia aluminiowa błyszcząca lub matowa, metalizowana folia mylarowa, teflon, czarna folia termokurczliwa, oraz kilka farb refleksyjnych) oraz różne rodzaje połączenia optycznego scyntylatora z fotodetekтором (żel silikonowy, podkładki silikonowe, powietrze). Badania wykonywano z użyciem dedykowanej aparatury wytworzonej w warsztatach uniwersyteckich, stopniowo udoskonalanej. Charakterystyki poszczególnych scyntylatorów zgromadzone w wyniku przeprowadzenia ponad 90 serii pomiarów, zostały poddane szczegółowej analizie porównawczej. Stwierdzono, że najlepszym kandydatem do budowy części aktywnych detektora SiFi-CC są włókna LYSO:Ce z reflektorem z błyszczącej folii aluminiowej oraz podkładkami silikonowymi pomiędzy zakończeniami włókna a fotodetektorami.

Rozdział czwarty przedstawia budowę i badania małoskalowego prototypu modułu detektora SiFi-CC. Moduł ten składał się z 64 włókien LYSO:Ce, każde o wymiarach $1 \times 1 \times 100 \text{ mm}^3$ ułożone w 4 warstwy po 16 włókien w warstwie. Każde włókno z osobna było owinięte błyszczącą folią aluminiową i na obu końcach indywidualnie odczytywane fotopowielaczem krzemowym o wymiarach identycznych jak wymiary poprzeczne włókna. Do odczytu sygnałów z fotopowielaczy wykorzystano komercyjny układ cyfrowej akwizycji danych. Badanie modułu złożonego z wielu identycznych włókien w tej samej geometrii umożliwiło poznanie dokładności stosowanych modeli transportu światła poprzez wyznaczenie rozrzutu dopasowanych dla poszczególnych włókien współczynników atenuacji oraz rozdzielczości energetycznej, pozycyjnej i czasowej. Badania prototypu w wyżej opisanej konfiguracji ujawniły bardzo istotny mankament - znaczne pogorszenie zdolności rozdzielczych energetycznej i pozycyjnej w stosunku do pomiarów wykonywanych z pojedynczymi włóknami. Jest to skutkiem zastosowania fotodetektorów zbierających światło ze znacznie mniejszej powierzchni niż w przypadku badań pojedynczych włókien. W tej sytuacji przeprowadzono dalsze badania prototypu, ale z wykorzystaniem cyfrowych fotopowielaczy krzemowych o powierzchni większej niż całkowita powierzchnia przekroju wszystkich włókien. Badania te wykonano we współpracy z naukowcami z wydziału fizyki uniwersytetu RWTH w Akwizgranie w Niemczech, w tamtejszym laboratorium i z wykorzystaniem tamże opracowanego systemu akwizycji danych. Zastosowane detektory światła składały się z niezależnie odczytywanych submodułów (pikseli) o rozmiarach $2 \times 2 \text{ mm}^2$. Analiza wysokości sygnałów z poszczególnych pikseli umożliwiła identyfikację włókna będącego źródłem światła. Po zmianie fotodetektorów wykonano powtórnie równie szczegółowe badanie prototypu. Tym razem otrzymano wyniki porównywalne z wynikami uzyskanymi w badaniach pojedynczych włókien i jednocześnie w pełni satysfakcjonujące w kontekście budowy detektora SiFi-CC w docelowej konfiguracji.

Rozdział piąty, pt. „Summary and conclusions”, zgodnie z tytułem stanowi zwięzłe podsumowanie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników. Jako najważniejsze Autorka wymienia szeroko zakrojone badanie wielu kombinacji materiałów scyntylacyjnych, pokryć i interfejsów optycznych, które pozwoliły znaleźć optymalną konfigurację włókna scyntylacyjnego dla

przyszłego detektora SiFi-CC. Równie cenne było zbadanie prototypu złożonego z większej liczby włókien ułożonych w kilka warstw. Badania, układu zbliżonego do docelowej konfiguracji przyszłego detektora, ujawniły kluczową rolę fotodetektora, którego powierzchnia czynna powinna być znacząco większa od powierzchni pola poprzecznego włókna. Jak pokazały badania, przetworniki o powierzchni identycznej z przekrojem włókna, mimo zalety polegającej na jednoznacznej identyfikacji włókna, nie pozwalają osiągnąć wymaganych zdolności rozdzielczych energetycznej i pozycyjnej. Jest to związane ze stratą istotnej części światła scyntylacji padającego pod dużymi kątami.

Ostatni, dwustronicowy, rozdział szósty, pt. „Outlook” zawiera informację o dalszych, będących w toku, pracach nad rozwojem pełnoskalowego prototypu detektora SiFi-CC. Wyniki osiągnięte przez mgr Rusiecką stały się podstawą budowy pierwszego z modułów przyszłego detektora – aktywnego rozpraszacza, w którym docierające do detektora promieniowanie gamma ulega rozpraszaniu Comptona. Moduł ten został zbudowany z 55 włókien LYSO:Ce o rozmiarach $1.94 \times 1.94 \times 100 \text{ mm}^3$ zaaranżowanych w siedem warstw. W momencie, w którym Autorka kończyła przygotowywanie swojej rozprawy zakończyły się pierwsze badania modułu wykonane w centrum terapii jonami HIT w Heidelbergu w Niemczech i trwało opracowywanie ich wyników.

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr Katarzyny Rusieckiej wykonana jest bardzo starannie i stoi na wysokim poziomie, zarówno co do formy jak i treści. Język jest bardzo klarowny, ilustracje właściwie dobrane i pomocne. Mgr Rusiecka jest obdarzona talentem jasnej i zrozumiałej prezentacji złożonych zagadnień. Natknąłem się na nieliczne potknięcia edytorskie i korektorskie, które jednak w żaden sposób nie umniejszają przyjemności czerpanej z lektury (np. wydaje się, że w tekście brakuje odniesienia do rys. 1.5; w tabeli 2.1 brakuje jednostki współczynnika atenuacji; w referencji nr 134 brakuje roku wydania; pomyłka w opisie widm w tekście na s. 120 gdzie jest „LOF1 and LOF2” a powinno być „LOF1 and LOF3”; pomyłka w opisie wielkości występujących we wzorze 3.1; błędne odniesienie do rys. 2.18 u dołu strony 51 gdzie zapewne chodziło o rys. 2.19 lub 2.20). Spis literatury jest bogaty i właściwie dobrany.

Doktorantka swoje badania prowadziła w ramach międzynarodowej współpracy pomiędzy Uniwersytetem Jagiellońskim w Krakowie, Uniwersytetem RWTH w Akwizgranie w Niemczech i Uniwersytetem w Lubce w Niemczech. Pokazuje to dobre przygotowanie do pracy zespołowej. Często jednak w takich przypadkach mogą pojawić się wątpliwości, co do wkładu poszczególnych członków zespołu. Tutaj jednak ten problem nie występuje – w tekście rozprawy każdorazowo wyraźnie zaznaczony jest wkład innych osób. Ponadto wyniki przeprowadzonych badań pojedynczych włókien scyntylacyjnych omówione w rozdziale 3. rozprawy Autorka uprzednio przedstawiła w obszernym artykule opublikowanym w recenzowanym czasopiśmie Journal of Instrumentation, którego jest pierwszą i zarazem korespondencyjną autorką. Warto wspomnieć, że praca ta opublikowana pod koniec roku 2021, była już dwukrotnie cytowana, co świadczy o zainteresowaniu środowiska naukowego badaniami mgr Rusieckiej.

Oceniana rozprawa jest napisana bardzo rzetelnie. Autorka z wielką wnikliwością omawia wszystkie aspekty badań mające wpływ na uzyskane wyniki, nie ukrywa też napotykaných trudności i niepowodzeń. Z kolei sama praca badawcza została wykonana wręcz wzorcowo. Na wstępie Doktorantka opracowała metodykę i przyrządy badawcze, zaś analizując wymagania przyszłego detektora dokonała racjonalnej selekcji potencjalnych rozwiązań układu scyntylator-reflektor-sprzęgacz. Tak przygotowana, przystąpiła do badań empirycznych podzielonych na dwa etapy mające na celu kolejno i) znalezienie optymalnej konfiguracji podstawowego elementu przyszłego detektora oraz ii) zbadanie zachowania prototypu modułu detektora składającego się z wielu włókien w geometrii zbliżonej do docelowej. Swoje badania mgr Rusiecka prowadziła z wielką dbałością o kontrolę jakości

i powtarzalność wyników. W rezultacie nie tylko skutecznie rozwiązała postawiony przed nią problem badawczy, ale jednocześnie stworzyła bardzo cenną bazę danych własności detektorów promieniowania gamma w postaci nieorganicznych włókien scyntylacyjnych. Nie mam wątpliwości, że zebrany przez nią materiał znajdzie wielorakie zastosowania tak w badaniach podstawowych jak i stosowanych. Ogrom i systematyczność przeprowadzonych prac badawczych budzi szacunek. Niemniejszy szacunek budzi sposób ich udokumentowania i przedstawienia. W tym miejscu warto wspomnieć, że oprócz wymienionego powyżej artykułu, mgr Rusiecka prezentowała swoje wyniki w formie referatów wygłoszonych podczas czterech zagranicznych konferencji naukowych oraz w formie plakatów podczas trzech konferencji w kraju, o czym dowiedziałem się od promotor pomocniczej dr Aleksandry Wrońskiej. Ponadto mgr Rusiecka jest współautorką sześciu innych prac ujętych w spisie literatury i opublikowanych w czasopiśmie naukowych o zasięgu międzynarodowym.

Oceniając rozprawę doktorską mgr Rusieckiej nie mogę uchylić się od wypunktowania kilku jej słabszych stron. Nie robię tego jednak dla umniejszenia wartości pracy, którą oceniam bardzo wysoko, ale raczej by dać Autorce kilka wskazówek, być może pomocnych na drodze jej dalszego rozwoju naukowego.

Tytuł drugiego rozdziału pracy uważam za niezbyt trafny gdyż sugeruje on, że rozdział będzie poświęcony omówieniu materiałów scyntylacyjnych, choć w istocie nacisk położony jest na zagadnienia istotne z punktu widzenia budowy detektorów promieniowania gamma.

W pracy są opisane i zastosowane tylko dwa najprostsze modele propagacji światła w scyntylatorze. Modele te są wystarczające z punktu widzenia ostatecznego celu, który ma wymiar praktyczny i jest nim zbudowanie klinicznie użytecznego systemu detekcyjnego SiFi-CC. W tym sensie, zrozumiałe jest ograniczenie do modeli najprostszych a jednocześnie dających zadowalające wyniki. Jednak czytelnika będącego fizykiem pozostawia to z poczuciem niedosytu. Tym większym, że Autorka ma świadomość i wiedzę o złożoności procesu transmisji światła w scyntylatorze, aczkolwiek nie dzieli się nią z czytelnikiem, poza lakoniczną wzmianką u dołu s. 33 „[...] for the small and elongated scintillators, a number of factors, such as geometrical effects, surface roughness, wrapping, or coating, influence the propagation of scintillating light”. Wielka szkoda, że wymienione czynniki nie zostały szerzej przedyskutowane. Ponadto, cytując pracę J. Lan et al., pt. „Universal Formula for Light Attenuation of Scintillator Detector”, Nucl. Phys. Rev. 36 (2019) 01, Autorka ma świadomość istnienia w literaturze innych modeli propagacji światła, opracowanych w szczególności dla scyntylatorów w postaci prostopadłościanów o wysokości znacznie większej niż długości boków podstawy, a zatem mających wiele cech wspólnych z włóknami scyntylacyjnym. W szczególności modelu z dwoma współczynnikami atenuacji „krótkim” i „długim” oraz modelu biorącego pod uwagę różne drogi optyczne światła emitowanego pod różnymi kątami względem osi włókna z uwzględnieniem poprawki na wielkość kąta bryłowego.

Niezrozumiały jest brak omówienia zjawisk całkowitego i częściowego wewnętrznego odbicia. A łatwo pokazać, że uwzględniając poprawkę na kąt bryłowy i zakładając izotropową emisję światła scyntylacji w materiałach o współczynniku załamania światła, $n \approx 1.8$, znacznie ponad połowa światła emitowana będzie poniżej kąta granicznego. W konsekwencji światło to będzie ulegać ogromnej liczbie częściowych odbić i załamania. Po pierwsze bardzo znacząco wydłuży to drogę optyczną światła odbitego, a po drugie wpłynie na wysokie straty światła załamanego, nawet w przypadku zastosowania bardzo wydajnego reflektora. W tym kontekście wydaje się, że model z dwoma niezależnymi współczynnikami atenuacji, z których „krótki” opisuje transport światła emitowanego w kącie poniżej kąta granicznego, a „długi” pozostałe światło emitowane w kącie powyżej kąta granicznego, czyli składową, która ulega wyłącznie całkowitemu wewnętrznemu odbiciu, mogłyby dać dobre wyniki, nie

wprowadzając zbyt dużych komplikacji praktycznych. Uważam, że brak wzmianki i zbadania jakości tego modelu w przypadku rozważanych włókien stanowi niewykorzystaną szansę. Ufam jednak, że Autorka dysponując tak dobrym warsztatem badawczym, nie zaniecha tego zagadnienia w przyszłości.

W badaniach, tak pojedynczych włókien jak i prototypu modułu detektora, posłużono się emiterym β^+ w postaci źródła ^{22}Na . Jest to oczywiście bardzo korzystne w przypadku badań prowadzonych w pracy, gdyż umożliwia jednoznaczny pomiar zdolności rozdzielczej energetycznej (emisja monoenergetycznego promieniowania gamma o energii 511 keV z anihilacji β^+), przestrzennej i czasowej (możliwość użycia aktywnego kolimatora poprzez pomiar koincydencyjny obu emitowanych kwantów gamma). Natychmiast jednak nasuwa się pytanie jak sprawdzą się badane włókna scyntylacyjne w przypadku promieniowania gamma o energii powyżej 4 MeV, które przecież ma mierzyć docelowy detektor? Czy fakt, że tutaj będziemy mieć do czynienia z elektronami odrzutu o energiach znacznie przekraczających 3 MeV nie wpłynie negatywnie na funkcjonowanie modułu detektora? Problem ten wykracza nieco poza obszar pracy mgr Rusieckiej, jest jednak kluczowy w perspektywie powodzenia całego projektu detektora SiFi-CC. Tym bardziej szkoda, że nie został omówiony choćby skrótowo.

Jak wspomniałem powyżej krytyczne uwagi nie zmieniają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy mgr Rusieckiej. Podsumowując, uważam, że mgr Rusiecka posiada w bardzo wysokim stopniu umiejętności samodzielnej pracy naukowej. **Przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wszystkie kryteria stawiane w Ustawie**, tzn. stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego (który dodatkowo ma niebagatelne znaczenie praktyczne), wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w dyscyplinie naukowej jak i jej umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (we wszystkich jej aspektach). Spełniony jest też wymóg opatrzenia rozprawy streszczeniem w języku polskim.

W uznaniu bardzo wysokiej jakości i rzetelności, **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr Katarzyny Rusieckiej.**

Podpisany podpisem osobistym:

Przemysław Wojciech Adrich

2023-09-15 21:43:31+0200

Podpisany z użyciem eDO App.