



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ
FIZYKI

dr hab. Agnieszka Korgul, prof. UW
Zakład Fizyki Jądrowej
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Warszawa 06.09.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Maciaka
z tytułem
„Metody wyznaczania równoważnika dawki i widma promieniowania
neutronowego z wykorzystaniem detektorów rekombinacyjnych
i pasywnych z moderatorami wielowarstwowymi”

Rozprawa doktorska powstała na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Piotra Tulika.

Recenzję rozprawy doktorskiej pt. „Metody wyznaczania równoważnika dawki i widma promieniowania neutronowego z wykorzystaniem detektorów rekombinacyjnych i pasywnych z moderatorami wielowarstwowymi” autorstwa Pana mgr inż. Macieja Maciaka opracowałam na podstawie pisma Pana Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej **prof. dr. hab. inż. Gerarda Cybulskiego**. Sprawę proceduje **Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Warszawskiej**. Recenzję rozprawy doktorskiej wykonałam zgodnie z wymogami ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. poz. 1669, z późniejszymi zmianami). Zgodnie z jej treścią rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazywać głęboką wiedzę kandydata w danej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Prace badawcze opisywane w rozprawie dotyczą problematyki związanej z dozymetrią promieniowania neutronowego, które występuje jako część pól i wiązek mieszanych w akceleratorach terapeutycznych, a także na stanowiskach badawczych akceleratorowych i reaktorowych. Wyniki tych badań przynoszą nowe informacje i rozwiązania, które można skutecznie wykorzystać w praktyce dozymetrycznej we wspomnianych wcześniej zastosowaniach.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ
FIZYKI

Pan mgr inż. Maciej Maciak skoncentrował się na badaniach promieniowania mieszanego o nieznanym składzie i widmie energetycznym neutronów proponując nowe metody oraz uzupełniając dotychczas znane, które mają na celu wyznaczenie równoważnika dawki oraz widma promieniowania neutronowego.

Opracowanie obejmuje pięć publikacji, w których doktorant jest pierwszym autorem oraz dwóch prac, gdzie występuje na drugim i trzecim miejscu. Autoreferat na ich temat składa się z pięciu rozdziałów obejmujących opis podstawowych zagadnień związanych z dozymetrią, częścią eksperymentalną opisującą zastosowane techniki oraz wyniki i dobrze zdefiniowane wnioski. Całość rozpoczyna się krótkim streszczeniem oraz rozdziałem *Abstract* napisanym w j. angielskim. Rozdział pierwszy *Wstęp* jest płynnym wprowadzeniem do głównej części pracy i opisuje zastosowanie promieniowania jonizującego w radioterapii fotonowej, elektronowej i hadroterapii. Neutrony są w tym wypadku produktami reakcji wiązki pierwotnej i mają znaczący wkład do wtórnego pola promieniowania mieszanego. Ich zasięg jest wielokrotnie większy w porównaniu np. z ciężkimi jonami, protonami czyli promieniowaniem pierwotnym. Dlatego precyzyjny rozkład dawki jej poszczególnych komponentów jest kluczowy w planowaniu radioterapii.

Pierwsze eksperymenty z neutronami przeprowadzone w latach trzydziestych wskazały, że charakteryzują się one trzykrotnie większą efektywnością zniszczenia zdrowej tkanki myszy w stosunku do promieniowania rentgenowskiego i czterokrotnie większą efektywnością zniszczenia komórek nowotworowych. Odkrycie spowodowało rozwój nowych terapii z wykorzystaniem neutronów jako wiązki pierwotnej jak FNP (ang. *Fast Neutron Therapy*) oraz terapii bimodalnej, w której możemy wyróżnić dwa etapy. Pierwszy polega na podaniu pacjentowi bezpiecznego dla organizmu nośnika nuklidu o wysokim przekroju czynnym na reakcję z neutronami termicznymi, który skoncentruje się w tkance nowotworowej. W kolejnym etapie, tkanka jest napromieniana wiązką neutronów o odpowiednich parametrach fizycznych jak energia, intensywność. Oddziaływanie neutronów z dostarczoną wcześniej nuklidem powoduje reakcję jądrową oraz lokalną depozycję energii powodując zniszczenie jedynie komórek nowotworowych. Przykładowe terapie bimodalne to terapia borowo-neutronowa BNCT (ang. *boron-neutron capture therapy*) czy Gd-BNCT (ang. *gadolinium-neutron capture therapy*). Dlatego Autor opracowania dużo uwagi poświęca na oddziaływanie neutronów z materią definiując poszczególne wielkości stosowane w dozymetrii podkreślając istotę precyzyjnego wyznaczenia równoważnika dawki oraz energetycznego widma promieniowania neutronowego.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ
FIZYKI

W rozdziale drugim Pan mgr inż. Maciej Maciak przedstawi dobrze zdefiniowany cel oraz znaczenie prowadzonych badań. Intencją badawczą Autora było stworzenie nowych i uzupełnienie istniejących metod określania równoważnika dawki oraz widma promieniowania neutronowego w polach promieniowania mieszanego o nieznanym składzie i widmie energii neutronów. W trakcie badania opracowano nowe techniki spektrometryczne i dozymetryczne oraz przeprowadzono badania podstawowe dotyczące rekomendacji początkowej jonów w gazie o takim samym współczynniku wzmocnienia, który jest używany w rekombinacyjnych komorach jonizacyjnych. Autor wykorzystał trzy metody pomiarowe w polach, gdzie dawka pochodzi od promieniowania gamma oraz neutronów. Pierwsza z nich, metoda pasywna, wykorzystuje specjalnie stworzony i skonstruowany spektrometr pasywny SWP-1 (prace [B,G]). W tym spektrometrze zastosowano detektory termoluminescencyjne (TLD), rozmieszczone w kilku warstwach wewnątrz kuli wykonanej z materiału, który pełni funkcję moderacji neutronów. W centralnej części kuli umieszczony jest detektor neutronów termicznych lub, w zależności od potrzeb, komora rekombinacyjna, umożliwiającą pozyskanie informacji dotyczących charakterystyki promieniowania w konkretnym punkcie obszaru. Ta metoda stanowi innowacyjne rozszerzenie powszechnie używanej spektrometrii kul Bonnera i znajduje zastosowanie w pomiarach środowiskowych w warunkach, gdzie występują mieszane pola promieniowania jonizującego ($n+\gamma$).

Kolejne dwie procedury są metodami aktywnymi. W pracach [A, F] Pan mgr inż. Maciej Maciak wykorzystuje rekombinacyjną komorę wielokanałową z elektrodami polipropylenowymi, pełniącymi jednocześnie rolę moderatora. Ta technika umożliwia dokonywanie pomiarów bezpośrednio w wiązce promieniowania neutronowego.

W pracach [C,D,E] zastosowano technikę wykorzystującą równoważną tkankę i rekombinacyjną komorę jonizacyjną typu REM-2. Ta metoda jest wykorzystywana do przeprowadzania pomiarów w środowiskach, a pozwala ona uzyskać informacje dotyczące równoważnika dawki w przestrzeni oraz jego składników, takich jak dawka pochłonięta w tkance i wskaźnik jakości promieniowania rekombinacyjny (RIQ), który jest estymatorem współczynnika jakości promieniowania Q. Dodatkowo, metoda dostarcza informacji o rozkładach dawki względem liniowego przekazu energii (L) oraz rozkładach mikrodozymetrycznych. W rozdziale trzecim skrótowo przedstawiono informacje techniczne na temat aparatury i metod, które były fundamentem dla prac przeprowadzonych w ramach tej rozprawy.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ
FIZYKI

Rozdział czwarty recenzowanej dysertacji opisuje istotę i wyniki realizowanych badań.

W pierwszym jego podrozdziale Doktorat opisuje badania wykonane z wykorzystaniem spektrometru SWP-1 (prace [B,G]), dzięki którym możliwe był określenie rozkładu dawek pochodzących od promieniowania gamma (detektor MTS-7) oraz neutronowego (detektor MTS-6). Doktorant stworzył dwie różne wersje geometrycznego modelu spektrometru [B]. Jedna z wersji miała centralnie umieszczoną rekombinacyjną komorę jonizacyjną typu B2(88), a druga wersja nie miała komory i była z centralnym wypełnieniem z materiału odpowiadającego rzeczywistemu moderatorowi. Te modele zostały użyte do określenia, jak detektory reagują na fluencję neutronów w bardzo szerokim zakresie energii od 1 meV do 100 MeV. Wybór energii neutronów do symulacji opierał się na założeniu, że jedna energia na dekadę jest wystarczająca, co obejmowało neutrony termiczne o energii około 25 meV oraz neutrony o maksymalnej energii, która wynikała z dostępnych eksperymentalnych danych dotyczących przekrojów czynnych dla neutronów o energii powyżej 20 MeV. Aby osiągnąć ten cel, użyto modelowania Monte Carlo przy użyciu kodu MCNP5. Dalsze badania przedstawione w pracy [G] umożliwiły uzupełnienie macierzy odpowiedzi użytych detektorów. Dzięki temu, udało się dokładnie określić, jak detektory reagują, oraz zoptymalizować proces dekonwolucji, zachowując spójność między liczbą i szerokością binów w domyślnym widmie, macierzą odpowiedzi oraz wynikowym widmie. Chętnie dowiedziałabym się nieco więcej o tym etapie analizy, m.in. jak dobierana była szerokość binu, aby uzyskać spójność oraz jak wyglądały kolejne etapy modelowania i weryfikacji z eksperymentem.

Kolejny podrozdział poświęcony jest komorze wielosygnałowej KW-1. Badania zostały opisane w pracach [A, F] i ich celem było ustalenie, jak grubość warstwy pokrywającej elektrody polaryzujące, zawierającej węgiel boru (B_4C) i wyrażana jako gęstość powierzchniowa, wpływa na gęstość strumienia neutronów oraz kształt energetycznego widma neutronów w różnych przestrzeniach międzyelektrodowej w wielosygnałowej komorze. Izotop ^{10}B charakteryzuje się wysokim przekrojem czynnym na wychwytywanie neutronów termicznych, o którym wspomina Doktorant. Do przeprowadzenia pełnej analizy mgr inż. Maciej Maciak wykorzystał kody obliczeniowe MCNPX oraz FLUKA, w których symulacja transportu i oddziaływania promieniowania realizowana jest z wykorzystaniem metody Monte Carlo. W dyskusji Doktorant zwraca uwagę, na złożoność sygnału



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ
FIZYKI

pochodzącego z ośmiu kanałów komory KW-1, który z jednej strony jest zależny od widma energetycznego neutronów oraz posiada składową pochodzącą z jonizacji gazu w objętości czynnej. Z tego powodu należy wprowadzić kilka poprawek uwzględniających m.in. udział jonizacji od promieniowania gamma, zmianę intensywności wiązki podczas pomiaru, spadek wydajności związany z możliwymi zmianami ciśnienia gazu wypełniającego komorę. Techniki ich wyznaczania nie są standardowe i chętnie dowiedziałabym się nieco więcej na ten temat.

Trzeci podrozdział został poświęcony badaniom z wykorzystaniem komory typu REM-2. Ich wyniki opublikowane w pracach [C, D, E], znacząco wzbogaciły naszą wiedzę na temat zastosowania rekombinacyjnej komory jonizacyjnej typu REM-2 w sytuacjach, gdzie występują mieszane pola promieniowania jonizującego, włączając w to składnik neutronowy. Pomysł wykorzystania lokalnego zjawiska rekombinacji jonów, które zachodzi w komorze równoważnej tkanki, aby określić rozkłady dawki pochłoniętej w odniesieniu do L, jest istotnym narzędziem pomiarowym, a dodatkowe wsparcie w postaci symulacji Monte Carlo potwierdza, że lokalna rekombinacja jonów w gazie jest efektywnym źródłem informacji o analizowanym polu promieniowania, nawet w przypadku pól złożonych i słabo określonych.

Na podstawie analizy treści przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej pt. „Metody wyznaczania równoważnika dawki i widma promieniowania neutronowego z wykorzystaniem detektorów rekombinacyjnych i pasywnych z moderatorami wielowarstwowymi” autorstwa Pana mgr inż. Macieja Maciaka stwierdzam, że Doktorant wykazał odpowiedni poziom wiedzy w zakresie problematyki badawczej objętej niniejszą dysertacją, dowiódł, że posiada umiejętność samodzielnego formułowania problemów naukowych oraz organizacji i prowadzenia procesu badawczego w celu efektywnego rozwiązania postawionych problemów. Przedstawiona w pracy analiza wyników i prezentacja końcowych rezultatów badań dowodzi dojrzałości naukowej Autora. Dyskusja oraz wyniki końcowe sformułowane w dysertacji przekonują, iż Doktorant zrealizowała założone cele naukowe.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Maciaka spełnia wymagania ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. poz. 1669, z późniejszymi zmianami). Na tej podstawie wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Macieja Maciak do publicznej obrony przedmiotowej rozprawy doktorskiej.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ
FIZYKI

Jednocześnie wnioskuję o przyznanie wyróżnienia przedłożonej do oceny rozprawie doktorskiej mgr inż. Maciejowi Maciak. Tematyka badawcza doktoratu jest częścią ważnej i szybko rozwijającej się dziedziny związanej z ochroną radiologiczną, dozymetria i detekcją neutronów. Wyniki badań mają ogromne znaczenie dla lepszego zrozumienia i opisu procesów związanych z oceną narażenia w dozymetrii promieniowania jonizującego. Doktorant opracował i przygotował funkcjonalny, wielowarstwowy spektrometr pasywny SWP-1, który umożliwia określenie widma energetycznego neutronów o szerokim zakresie w obszarach występowania promieniowania mieszanego, które występuje w otoczeniu obiektów jądrowych i urządzeń radioterapeutycznych (prace [B,G]). Dodatkowo stworzył model aktywnego spektrometru wiązkowego (komora wielosygnałowa KW-1), który umożliwia określenie widma energetycznego neutronów w wiązkach neutronów o wysokim strumieniu i szerokim zakresie energii, włączając w to wiązki zawierające komponentę gamma (prace [A,F]). Wyniki badań przedstawione w rozprawie znacząco poszerzyły naszą wiedzę na temat zastosowania dużych rekombinacyjnych komór równoważnych tkance typu REM-2 w kontekście obszarów związanych z promieniowaniem neutronowym (prace [B,C,D]).

Potwierdzenie doniosłości wyników i dobrego warsztatu zaprezentowanego w pracy stanowią liczne publikacje z tematyki objętej pracą doktorską, których Doktorant jest pierwszym autorem i współautorem. Stwierdzam zatem, że zarówno tematyka jak i całokształt prac badawczych, wykonanych i przejrzyste przedstawionych przez Pana mgr inż. Macieja Maciaka w rozprawie, zasługuje na wyróżnienie.

Agnieszka Jędrzejak