



UNIWERSYTET
WARSZAWSKI

Wydział Fizyki

**WYDZIAŁ
FIZYKI**

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

Warszawa 07.06.2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Iwony Słoneckiej
z tytułowanej
„Statystyka bayesowska jako narzędzie wspomagające ocenę
narażenia w dozymetrii promieniowania jonizującego”

Rozprawa doktorska powstała na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Daniel Kikoła, prof. PW oraz dr inż. Krzysztofa W. Fornalskiego.

Recenzję rozprawy doktorskiej pt. „Statystyka bayesowska jako narzędzie wspomagające ocenę narażenia w dozymetrii promieniowania jonizującego” autorstwa Pani mgr inż. Iwony Słoneckiej opracowałam na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej prof. dr. hab. inż. Tomasza Wolińskiego. 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.

W swojej rozprawie doktorskiej, Autorka przedstawia metodykę estymacji dawek pochodzącej od promieniowania mieszanego beta i gamma wykorzystując dozymetrię termoluminescencyjną i analizę bayesowską w wersji analitycznej oraz implementacji Monte Carlo. W dalszej części pracy przeprowadza ona estymację dawek od promieniowania mieszanego neutronowego i gamma z wykorzystaniem dozymetrii biologicznej oraz analogicznej analizy bayesowskiej i Monte Carlo. Przewidywania modelowe zostały porównane do wyników eksperymentalnych wykonanych przez Autorkę w reaktorze Maria w Narodowym Centrum Badań Jądrowym.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

**WYDZIAŁ
FIZYKI**

Istotną wartość recenzowanej pracy stanowi jej część interpretacyjna, w której opisane zostało porównanie wyników eksperymentalnych dla promieniowania mieszanego beta/gamma oraz neutronowego/gamma z różnymi podejściami modelowymi zaproponowanymi przez Autorkę. Wyniki przedstawione w rozprawie mają praktyczny charakter i mogą zostać wykorzystane w dozymetrii promieniowania jonizującego oraz przy planowaniu awaryjnym i działaniach interwencyjnych.

Rozprawa napisana jest w języku polskim, zawiera 160 stron tekstu, 65 rysunków i wykresów, 52 tabel oraz bogatą bibliografię zawierającą 155 pozycji. Z samego porównania liczby stron oraz liczby rysunków i tabel wynika, że praca napisana jest zwięzłym i konkretnym językiem naukowym, zaś główne wyniki zaprezentowano w formie licznych wykresów co ułatwia ich interpretację. Rozprawa opatrzona jest krótkim streszczeniem oraz rozdziałem *Abstract* napisanym w j. angielskim. Dodatkowo przedstawiony został cel pracy oraz obecny stan wiedzy. Określenie motywacji prowadzonych badań pozwala wnioskować, iż Doktorantka zna bieżące osiągnięcia we wskazanym obszarze badań oraz potrafi właściwie ocenić praktyczny aspekt poruszanych problemów.

Właściwa część rozprawy podzielona jest na 7 rozdziałów: wstęp opisujący podstawowe zagadnienia związane z dozymetrią promieniowania jonizującego, eksperymentalna poświęcona dozymetrii termoluminescencyjnej, cztery kolejne rozdziały dotyczą analizy badań Autorki proponowanych przez siebie metod, a ostatni podsumowuje otrzymane rezultaty w kontekście zastosowania w praktyce dozymetrycznej przy ocenie narażenia całego ciała.

W pierwszej części rozprawy wprowadzony jest opis teoretyczny badanych zjawisk, gdzie zostały zdefiniowane odpowiednie wielkości dozymetryczne i właściwości promieniowania jonizującego z uwzględnieniem przypadków promieniowania mieszanego oraz mechanizmy oddziaływania promieniowania jonizującego z żywym organizmem. Informacje zawarte w tej części stanowią ciekawy i syntetyczny opis podstaw wielkości dozymetrycznych. Mają odwołanie do podstawowych aktów prawnych, pomyłkowo została jedynie podana referencja do prawa atomowego z 2000 roku zamiast jego odpowiednika z 2019 r.

W części poświęconej eksperymentowi w kontekście promieniowania mieszanego beta/gamma, Autorka opisała podstawy dozymetrii termoluminescencyjnej wraz z eksperymentem wykonanym w laboratorium CELOR w Warszawie. Detektory TLD są powszechnie wykorzystywane w rutynowej ocenie dawek u osób narażonych zawodowo na



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

**WYDZIAŁ
FIZYKI**

promieniowanie jonizujące. Autorka poświęciła bardzo dużo uwagi na precyzyjne wyselekcjonowanie odpowiednich detektorów oraz szczególnie każdego z pomiaru. Doktorantka wybrała 150 jednorodnych pastylek, które zostały wykorzystane do dalszych pomiarów. W kolejnym kroku potwierdziła ich liniowość w zakresie dawek będących przedmiotem badań oraz wyznaczyła współczynniki kalibracyjne, które umożliwiają konwersję liczby zliczeń na równoważnik dawki $H_p(d)$. Wszystkie pastylki były przez Doktorantkę napromienione dawkami referencyjnymi $H_p(d)=1\text{mSv}$, a pomiary wykonane w wzorcowych polach promieniowania gamma: ^{137}Cs i ^{60}Co oraz beta: ^{90}Sr i ^{85}Kr . Kolejne kroki eksperymentu zostały bardzo szczegółowo opisane i opatrzone licznymi zdjęciami układu pomiarowego, a rezultaty przedstawione w formie tabel oraz rysunków. Ułatwia to czytelność oraz zrozumienie kolejnych etapów badań. Pewien niedosyt pozostawia czytelność wybranych rysunków czy niezbyt precyzyjne używanie niektórych wartości. Przykładem jest rysunek 4.16, gdzie dyskutowana jest liniowość detektorów. Większość punktów pomiarowych mieści się do 1 mSv dawki referencyjnej i odpowiada liczbie zliczeń podanej na osi rzędnych do 2 000 000, co przy zaproponowanej skali trudno jest ocenić rozrzut punktów eksperymentalnych wokół dopasowanej prostej. Na stronie 47 wspomniana jest średnia energia gamma 1.3 MeV dla ^{60}Co , podczas gdy w dalszej części pracy pojawia się w podobnym kontekście wartość 1,25 MeV (strona 120). Analogiczne wątpliwości co do interpretacji prezentowanych wartości dotyczą energii źródeł $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ oraz ^{85}Kr (strona 49). Dla porządku można rozszerzyć ich opis wskazując czy odpowiadają energii średniej lub maksymalnej energii cząstek beta, a w przypadku źródła kalibracyjnego $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, czy dotyczy obu rozpadów czy pojedynczej składowej. Cenne byłoby także uzupełnienie wartości energii o ich niepewności. Zrozumienie tekstu ułatwia także zdefiniowanie wszystkich oznaczeń występujących na rysunkach czy w tabelach w ich w tytule, niezależnie od informacji podanej w tekście pracy.

Rozdział piąty został poświęcony bayesowskiej ocena dawek od promieniowania beta i gamma w dozymetrii TLD. Doktorantka wykonała serię pomiarów polegających na napromienieniu dozymetrów w polach mieszanych beta/gamma z wykorzystaniem źródeł $^{90}\text{Sr}+^{137}\text{Cs}$, $^{90}\text{Sr}+^{60}\text{Co}$, $^{85}\text{Kr}+^{60}\text{Co}$, $^{85}\text{Kr}+^{137}\text{Cs}$ oraz wykorzystując pojedynczo źródła kalibracyjne. Następnie wykonała symulacje opracowanym przez nią programem obliczeniowym i porównała różne podejścia teoretyczne umożliwiające ocenę dawki z wartościami eksperymentalnymi. Całość została drobiazgowo opisana przystępnym językiem prowadząc czytelnika przez kolejne etapy obliczeń. W przypadku oceny niepewności Autorka używa określenia metody różniczki zupełnej podając wprawdzie maksymalną jej wartość (wzory 5.14, 5.19) zapominając o wyrazie *maksymalna*, ale w dalszej części pracy (wzór 6.11)



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

**WYDZIAŁ
FIZYKI**

pojawia się sformułowanie *matematyczna postać reguły przenoszenia niepewności* lepiej odpowiadające wyznaczaniu niepewności. Dodatkowo, Doktoranta szacuje niepewność dawki na 17% jej wartości, zgodnie z procedurą przyjętą w CLOR. Jest to rozsądna propozycja, ale chętnie poznałabym jej uzasadnienie. Rysunki 5.3-5.6 zawierające cenne informacje do dalszej analizy. Ale lepiej zrozumieć jego interpretację chciałabym się dowiedzieć w jaki sposób została dobrana szerokość *binu* oraz czy przerwy pomiędzy kolejnymi *binami* była uwzględniona przy dopasowaniu gaussa czy też tylko zaproponowane dla lepszej prezentacji graficznej.

Podsumowując, na podstawie danych przedstawionych w rozdziale piątym Doktorantka wnioskuje, że wersja analityczna metody bayesowskiej i iteracyjna Monte Carlo umożliwiła otrzymanie dawek porównywalnych do wartości otrzymanej metodą klasyczną i referencyjną. Ma to istotny aspekt praktycznym, gdyż opracowane przez Doktorantkę narzędzie wspomagające ocenę dawek pochodzących od promieniowania beta/gamma metodą termoluminescencyjną może być stosowane w przypadku pól mieszanych beta/gamma.

Rozdział szósty poświęcony jest bayesowskiej ocenie dawek od promieniowania mieszanego neutrony/gamma w dozymetrii biologicznej. Doktorantka przedstawiła tu różne alternatywne metody obliczania dawki pochłoniętej: iteracyjna, analityczna, quasi-bayesowska i bayesowska, dla których przygotowała odpowiednie oprogramowanie. Wyniki zostały przez nią porównane z obliczeniami wykonanymi techniką Monte Carlo, do której zaimplementowano podejście bayesowskie. Obliczenia zostały zweryfikowane eksperymentalnie wykorzystując wyniki z pomiaru napromienienia limfocytów krwi obwodowej od dawców w polu promieniowania mieszanego neutrony/gamma. Poprane próbki biologiczne zostały napromienione *in vitro* w kanale H8 reaktora Maria symulując niepożądane napromienienie pracowników podczas standardowego czasu pracy reaktora. Na szczególną uwagę zasługuje duże zaangażowanie Doktorantki we wszystkie etapy eksperymentu radiobiologicznego: prowadzenie hodowli limfocytów, przygotowanie zawiesiny komórek do nakropienia na szkiełka oraz analiza danych pod mikroskopem. Wymaga to zupełnie innych umiejętności od fizyka eksperymentatora niż opracowanie nowych modeli oceniających dawkę. Jest to dowód dużej wszechstronności Autorki pracy. W tej części wkradł się być może mały błąd edytorski na stronie 110 (Tabela 6.4 oraz jego interpretacja), kiedy Autorka wskazuje na rozbieżności wartości pomiędzy B3 i C2 mając zapewne na myśli A3 i C2. W ostatniej części tego rozdziału, Doktorantka skoncentrowała się na uproszczonej metodzie bayesowskiej, gdzie współczynniki krzywych wyrażono w postaci



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

**WYDZIAŁ
FIZYKI**

wartości stałych. Znacząco upraszcza to obliczenia w porównaniu do oryginalnego podejścia, co jest istotne w sytuacjach awaryjnych.

Dalsza część pracy (rozdział 7) poświęcona jest bayesowskiej ocenie dawek pochłoniętych od pojedynczego rodzaju promieniowania. Jego celem było zweryfikowanie podejścia opracowanego przez Autorkę, które wykorzystuje aprioryczny rozkład współczynników krzywych do oceny dawki od nieznanego źródła w przypadku braku właściwej krzywej wzorcowej. Obecnie, w takich przypadkach stosowana jest alternatywnie krzywa dla promieniowania X. Doktorantka opracowała metodę dla wysokiego i niskiego LET wykorzystując estymację dawek pochodząca od neutronów rozszczepieniowych oraz promieniowania gamma emitowanego ze źródła ^{60}Co . Rezultat analizy został bardzo precyzyjnie przedstawiony w formie tabel oraz wykresów. Wynika z niego, że w przypadku, gdy dostępne współczynniki krzywych zostaną zapisane w postaci rozkładu i wykorzystane w rozkładzie bayesowskiej to umożliwiają najdokładniejszą spośród przedstawionych metod estymację dawek pochłoniętych. Pewien niedosyt pozostawia jedynie sposób przygotowania histogramów przedstawionych na Rysunku 7.1, 7.2 oraz 7.3. Ciekawe byłoby wyjaśnienie doboru zakresu współczynników (szerokość *binu*) oraz odstępów pomiędzy nimi, które na Rysunku 7.3 nie występują, co jest poprawne zgodnie z zaznaczonym przedziałem zakresu współczynników. Ta forma prezentacji nie była praktykowana we wszystkich analogicznych wykresach przedstawionych w pracy. W przypadku Tabeli 7.7 zaproponowany wniosek, że "rozrzut wyników uzyskanych dla krzywych literaturowych jest duży i różni się w zależności od dawki - rozstęp rośnie z dawką" jest trafnym spostrzeżeniem. Warto jednak podkreślić, że rozrzut rośnie wraz z dawką co do wartości, ale jego wartość procentowa w stosunku do dawki średniej jest największa dla mniejszych Dawek i wynosi nawet 100%, podczas gdy dla największych wartości $D=4$ Gy jest poniżej 50%.

Rozdział ósmy poświęcony jest Bayesowskiej metodzie regresji, w którym Autorka dokonała wyboru prawdopodobnego modelu krzywej dawka-skutek dla neuronów termicznych, promieniowania gamma oraz promieniowania mieszanego: gamma/neutron. Praca zakończona jest rozdziałem podsumowującym najważniejsze aspekty rozprawy doktorskiej oraz opisane zostały plany na przyszłość. Zagadnienia przedstawione przez Doktorantkę mają niezwykle istotny aspekt praktyczny związany z wykorzystywaniem promieniowania jonizującego oraz możliwości wystąpienia różnych sytuacji awaryjnych z nim związanych. Doktorantka opracowała metody oraz narzędzia, które mogą być zastosowane w fizycznej i biologicznej ocenie narażenia w przypadku wystąpienia zdarzenia radiacyjnego.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

**WYDZIAŁ
FIZYKI**

Na podstawie analizy treści przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej pt. „Statystyka bayesowska jako narzędzie wspomagające ocenę narażenia w dozymetrii promieniowania jonizującego” autorstwa mgr inż. Iwony Słoneckiej. Stwierdzam, że Doktorantka wykazała odpowiedni poziom wiedzy w zakresie problematyki badawczej objętej niniejszą dysertacją, dowiodła, 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 Autorki. Dyskusja oraz wyniki końcowe sformułowane w dysertacji przekonują, iż Doktorantka zrealizowała założone cele naukowe.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Iwony Słoneckiej 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 Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Iwony Słoneckiej do publicznej obrony przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie wnioskuję o przyznanie wyróżnienia przedłożonej do oceny rozprawie doktorskiej mgr inż. Iwonie Słoneckiej. Tematyka badawcza doktoratu jest częścią ważnej i szybko rozwijającej się dziedziny związanej z ochroną radiologiczną pracowników. Wyniki badań mają ogromne znaczenie dla lepszego zrozumienia i opisu procesów związanych z oceną narażenia w dozymetrii promieniowania jonizującego. Doktorantka uzyskała w pracy szereg nowych rezultatów, które poszerzyły stan wiedzy w tej dziedzinie oraz opracowała gotowe narzędzia do wykorzystania w przypadku wystąpienia zdarzeń radiacyjnych z różnymi składowymi wiązki mieszanej. Mam nadzieję, że zostaną one udostępnione szerszej grupie zainteresowanych. Potwierdzenie doniósłoci wyników i dobrego warsztatu zaprezentowanego w pracy stanowią liczne publikacje z tematyki objętej pracą dokorską, których Doktorantka jest autorką i współautorką. Stwierdzam zatem, że zarówno tematyka jak i całokształt prac badawczych, wykonanych i przejrzyscie przedstawionych przez Doktorantkę w rozprawie, zasługuje na wyróżnienie.

Agnieszka Jędrzej