

Dr hab. Beata Kozłowska  
Uniwersytet Śląski w Katowicach  
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych  
Instytut Fizyki  
ul. 75 Pułku Piechoty 1A  
41-500 Chorzów

29.12.2023

## RECENZJA

osiągnięcia naukowego: cyklu prac pt. „Zastosowanie detekcji i spektroskopii gamma w medycynie” oraz pozostałego dorobku naukowego i aktywności organizacyjnej i dydaktycznej **dr Aleksandry Wrońskiej** w związku z postępowaniem o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauk fizycznych

Podstawę prawną recenzji oceny dorobku naukowego oraz aktywności organizacyjnej i dydaktycznej Habilitantki stanowi art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo w szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz 1668 ze zm.).

Dokumentacja, którą przedstawiła dr Aleksandra Wrońska obejmuje: Wniosek z dnia 30 czerwca 2023 o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauk fizycznych, Dane Wnioskodawcy, Kopia Dyplomu Doktora, Autoreferat i wykaz osiągnięć (te dokumenty w języku polskim i angielskim), oświadczenia współautorów i kopie publikacji, które wchodzi w skład osiągnięcia naukowego. Dokumenty te stanowią podstawę wykonania oceny osiągnięcia naukowego i pozostałego dorobku naukowego oraz aktywności organizacyjnej i dydaktycznej Habilitantki.

### 1. Sylwetka Habilitantki

Dr Aleksandra Wrońska jest absolwentką Wydziału Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Ukończyła studia magisterskie z fizyki zakończone uzyskaniem tytułu magistra w roku 2000. W latach 2000-2005 dr Aleksandra Wrońska odbywała studia doktoranckie z zakresu fizyki jądrowej z uzyskaniem stopnia naukowego doktora na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ. Pracę doktorską napisaną pod kierunkiem prof. dr hab. Andrzeja Magiery pt. „Near-threshold  $\eta$ -meson production in the  $dd \rightarrow {}^4\text{He}\eta$  reaction“ obroniła w roku 2005. Po doktoracie, w latach 2007-2010, dr Aleksandra Wrońska była zatrudniona jako asystent naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Fizyki Jądrowej Instytutu

Fizyki UJ, a następnie od 2010 roku jako adiunkt w Zakładzie Fizyki Jądrowej/Zakładzie Fizyki Hadronów Instytutu Fizyki UJ.

## 2. Ocena osiągnięcia naukowego Habilitantki

Jako osiągnięci naukowe stanowiące podstawę habilitacji dr Aleksandra Wrońska przedstawiła w swoim Autoreferacie w rozdziale 2 cykl 15 powiązanych tematycznie artykułów naukowych [D1-D15] pod tytułem „Zastosowanie detekcji i spektroskopii gamma w medycynie”. Prace te zostały opublikowane w latach 2015-2022 w renomowanych czasopismach naukowych, m.in. w Acta Physica Polonica B (4 publikacje), w Physica Medica (3), w Radiation Physics and Chemistry (3). W sześciu pracach z cyklu dr Aleksandra Wrońska jest pierwszym autorem, jedna praca [D6] jest samodzielną publikacją Habilitantki, jedna [D10], dwuautorska, jest publikacją przeglądową. Do wniosku Habilitantka dołączyła wymagane ustawowo oświadczenia współautorów, z których można wnioskować, iż udział dr Wrońskiej w powstawianiu publikacji był znaczący. Cykl artykułów podzielony został na trzy części tematyczne powiązane zastosowaną techniką eksperymentalną, spektroskopią gamma, służącą do identyfikacji i analizy gamma-radioaktywnych izotopów w badanych próbach.

Najobszerniej opisana jest część pierwsza dotycząca badań natychmiastowego promieniowania gamma (tzw. *PG – prompt gamma*) w terapii protonowej w celu weryfikacji zasięgu wiązki. Protony o energiach stosowanych w terapii posiadają unikalny profil głębokościowy deponowanej dawki z charakterystycznym maksimum piku Bragga. Pozwala to na oszczędzenie zdrowych tkanek otaczających nowotwór, pod warunkiem precyzyjnego wyznaczenia zasięgu wiązki protonowej. Tematyka ta jest zgłębiana w wielu ośrodkach prowadzących tego typu terapie. Zaproponowane przez różnych badaczy metody kontroli zasięgu wiązki w terapii protonowej w czasie rzeczywistym opierają się na idei rejestracji produktów ubocznych oddziaływania wiązki protonowej z tkankami pacjenta. Dr Aleksandra Wrońska włączając się w tę tematykę skoncentrowała się na pomiarach PG. Detekcja PG napotyka szereg wyzwań technicznych szeroko omówionych w literaturze. Zaproponowane podejścia, ich wady i zalety, a także stan rozwoju projektów Habilitantka przedstawiła w przeglądowych publikacjach [D6, D10]. Pozostałe prace Habilitantki dotyczą analizy i wyników eksperymentów własnych. Eksperymenty przeprowadzone w różnych latach w CCB w Krakowie omówione zostały w pracach: [D1] – pilotażowe pomiary przeprowadzone w CCB przy użyciu wiązki protonowej o energii 70 MeV i fantomu PMMA, [D2] – badanie zmienności w charakterystyce emisji PG w związku ze składem napromieniowanego materiału, kątem oraz

energiją wiązki, wstępne [D3] i finalne [D8] wyniki pomiarów dowodzące, że szerokość spadku dystalnego w profilach PG silnie rośnie z energią wiązki.

W ramach projektu SONATA BIS, który otrzymał finansowanie na lata 2018-23, dr Aleksandra Wrońska wraz ze współpracownikami kontynuowała badania PG, zaproponowawszy budowę układu, który umożliwiłby to w warunkach klinicznych. Zaplanowane zostało użycie scyntylatora nieorganicznego o dużej gęstości i efektywnej liczbie atomowej w celu uzyskania dużej wydajności detekcji gamma oraz systemu akwizycji danych opartego o układy FPGA (*field-programmable gate array*) w celu otrzymania odpowiednio wysokiej przepustowości systemu. Problemy techniczne i ich sposoby rozwiązania zostały udokumentowane w pracach [D4, D9]. Kolejne dwie wymienione publikacje [D5, D7] dotyczą dalszych prac nad nowym systemem SiFi-CC, tj. koncepcji technicznej budowy systemu oraz wyników symulacji i testów laboratoryjnych. Przedstawiona została m.in. charakterystyka pozycyjnej i energetycznej zdolności rozdzielczej detektora w zależności od zdeponowanej energii (2-7 MeV) czy analiza odpowiedzi detektora w warunkach klinicznych – przy realistycznym widmie kwantów gamma i przy uwzględnieniu zależności czasowych między sygnałami. W pracy [D7] przedstawiono szereg ważnych wniosków dotyczących systemu akwizycji zdarzeń.

Rezultaty kolejnych badań dotyczących budowy małoskalowego prototypu modułu detektora były prezentowane na seminariach w różnych instytucjach oraz na konferencjach tematycznych. Obecnie dr Aleksandra Wrońska pracuje przy testach laboratoryjnych i w centrum terapeutycznym pierwszego pełnoskalowego modułu docelowego detektora.

Już ta pierwsza część cyklu prac obejmująca pierwszych dziesięć pozycji świadczy o dużym doświadczeniu Habilitantki w prowadzeniu badań eksperymentalnych oraz w kierowaniu zespołem. Część druga, na którą składają się prace [D11-D13] oraz trzecia [D14-D15] stanowią niejako uzupełnienie cyklu.

Część druga dotyczy wkładu naukowego Habilitantki w dziedzinę medycynę nuklearną – produkcję radioizotopów  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  przy użyciu wiązek protonów i elektronów. Ze względu na światowe wyłączenia z eksploatacji reaktorów produkujących metastabilny izotop technetu  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , istnieje konieczność poszukiwania innych metod produkcji radioizotopów – przy użyciu akceleratorów. Zaproponowany przez grupę badawczą dr Wrońskiej projekt miał na celu zbadanie wydajności produkcji  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  przy użyciu tarcz molibdenowych o naturalnym składzie izotopowym. Pilotażowe pomiary przeprowadzono w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie przy wykorzystaniu wiązki protonowej przyspieszonej w cyklotronie AIC-144. Dotyczyły one wyznaczenia wydajności produkcji i przekrojów czynnych interesujących reakcji uśrednionych po energiach protonów 9 – 26 MeV. Przekroje czynne wyznaczono

na podstawie analizy spektralnej promieniowania gamma emitowanego z napromienionej tarczy rejestrowanego za pomocą skalibrowanego energetycznie i wydajnościowo detektora HPGe. Wyniki pomiarów przedstawiono w publikacji [D11]. Dalsze pomiary wykonane były z użyciem tarczy wielowarstwowej, składającej się z wielu folii molibdenowych przekładanych foliami miedzianymi. Energia wiązki była sukcesywnie degradowana od 17 MeV do 2 MeV w kolejnych pokonywanych warstwach tak, że każda folia tarczy została efektywnie napromieniona wiązką protonową o innej energii. Wyniki pomiarów przedstawiono w publikacji [D13] oraz zostały one włączone do bazy danych EXFOR.

Produkcja  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  badana była również przez Habilitantkę w eksperymentach z użyciem wiązek elektronowych, w reakcjach fotojądrowych. Pomiary prowadzone były na akceleratorze liniowym synchrotronu w Narodowym Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS w Krakowie, przy trzech energiach wiązki elektronowej: 60, 100 i 200 MeV. Habilitantka wskazuje, że uzyskane wyniki są pierwszymi tego typu danymi doświadczalnymi na świecie.

Część trzecia cyklu prac dotyczy zastosowania spektroskopii gamma do badań bezpieczeństwa pacjentów oraz obsługi w konwencjonalnej radioterapii, tj. wykorzystującej promieniowanie fotonowe. Pomiary dotyczyły dodatkowych dawek deponowanych w tkankach pacjentów z rozrusznikami serca i prowadzone były we współpracy z Centrum Onkologii w Gliwicach na wiązce 10 lub 20 MV generowanej w akceleratorze liniowym i przy użyciu fantomu humanoidalnego. Widma energetyczne promieniowania gamma rejestrowano przy użyciu detektorów HPGe. Zidentyfikowano 21 radioizotopów pochodzących z 24 reakcji jądrowych, spośród których największą aktywność wykazywał izomer cyny  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ . Badano również aktywność wzbudzoną podczas napromieniania w pokoju terapeutycznym i w pokoju kontrolnym. Zarejestrowane za pomocą detektora HPGe widma energetyczne kwantów gamma emitowanych przez różne obiekty znajdujące się w tych pomieszczeniach wykazały, że w obiektach tych produkowane są następujące radioizotopy:  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{122}\text{Sb}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^7\text{Li}$  oraz  $^{28}\text{Al}$ . Informacje te są cenne w aspekcie minimalizowania dodatkowej dawki dla pacjentów i personelu. Ta tematyka została przedstawiona w publikacjach [D14-D15].

Osiągnięcie habilitacyjne dr Aleksandry Wrońskiej oceniam bardzo wysoko. Wnosi ono znaczący wkład w dziedzinę fizyki medycznej i medycyny nuklearnej. Habilitantka wykazała się dużą wiedzą w zakresie spektroskopii promieniowania gamma, biegłością w planowaniu i prowadzeniu eksperymentów jądrowych oraz zdolnościami organizacyjnymi i kierowniczymi. Prowadzone badania naukowe obejmowały współpracę z ośrodkami z Polski

i zagranicy oraz budowanie własnej grupy badawczej. Zaowocowało to publikacjami zebranymi w cyklu jako podstawa osiągnięcia habilitacyjnego.

### 3. Ocena pozostałego dorobku naukowego Habilitantki

Oprócz 15-tu prac wybranych w ramach osiągnięcia naukowego dr Aleksandra Wrońska jest autorką lub współautorką 90 publikacji w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym (dane na 23 czerwca, liczba publikacji w Web of Science Core Collection: 105). Łączna liczba cytowań to 2062, h-index: 26). Należy zwrócić uwagę na bardzo wysoką liczbę cytowań i wysoki h-index. Wyniki prac badawczych Habilitantki były przez nią ponadto prezentowane na licznych konferencjach krajowych i zagranicznych oraz na wykładach na zaproszenie instytucji naukowych.

Szeroki zakres tematów publikacji, w których Habilitantka jest współautorką jest odzwierciedleniem jej aktywności naukowej. Dr Aleksandra Wrońska była i jest związana od wielu lat z grupą badawczą Instytutu Fizyki Jądrowej Centrum Badawczego Jülich (Forschungszentrum Jülich FZJ), a następnie od 2013 roku z Centrum Cyklotronowym Bronowice (CCB) w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Wybrane publikacje nie objęte w cyklu prac podlegającym ocenie zostały podzielone na następujące obszary tematyczne, zebrane w rozdziale 3 Autoreferatu: Produkcja i oddziaływania mezonów (prace [3.1-1 do 3.1-10]), Stany związane mezon-jądro (prace [3.2-1 do 3.2-15]), Symetrie fundamentalne i ich łamanie (prace [3.3-1 do 3.3-7]), Fizyka akceleratorowa (prace [3.4-1 do 3.4-9]), Dynamika układów kilkunukleonowych (prace [3.5-1 do 3.5-6]), Rozwój detektorów (prace [3.6-1 do 3.6-7]). W powyższych tematach Habilitantka przedstawiła 53 publikacje. Stanowią one znaczący wkład w badania eksperymentalne fizyki jądrowej i cząstek elementarnych i świadczą o różnorodnych zainteresowaniach Autorki.

Już w trakcie eksperymentów do doktoratu Habilitantka zainteresowała się tzw. jądrami mezonowymi. Eksperymenty prowadzone były przy użyciu układu detekcyjnego ANKE na synchrotronie COSY w FZJ (publikacje m.in. w Physics Letters, Physical Review). Po uruchomieniu w FZJ detektora WASA, dr Wrońska zaangażowała się w badania prowadzone przez grupę WASA-at-COSY, które skupiały się na produkcji mezonu  $\eta$  np. w reakcji  $dp \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ , lub jego rozpadu  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$  lub  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ . Publikacje na ten temat pojawiły się w Physical Review Letters czy Physics Letters. Reakcje produkcji mezonów posłużyły również do badania (nie)zachowania podstawowych symetrii w fizyce cząstek (siedem publikacji wieloautorskich 2003-2018).

Od roku 2015 dr Wrońska zaangażowana jest w badania dotyczące bezpośredniego pomiaru elektrycznego momentu dipolowego (EDM) lekkich hadronów: protonów i deuteronów, poprzez poszukiwanie efektów wpływu EDM na dynamikę spinów tych cząstek krążących w postaci spolaryzowanej wiązki w synchrotronie COSY w FZJ (9 wieloautorskich publikacji). Dr Wrońska współpracowała ponadto z grupą badawczą Few Body Experiment Group wspierając ją w badaniach dynamiki układów kilku nukleonów, uczestnicząc w pomiarach, czy pomagając w przygotowaniu wniosku badawczego dla eksperymentu w FZJ. Badania te dotyczą istnienia tzw. siły trójciałowej (3NF) działającej w oddziaływaniu dwuciałowym NN w układach kilkunukleonowych (sześć publikacji wieloautorskich).

Ostatni temat przedstawiony w powyższym cyklu dotyczy projektowania, testów i produkcji różnych typów detektorów. Dr Wrońska była zaangażowana w prace projektowe kryształów scyntylacyjnych  $PbWO_4$  oraz badanie ich charakterystyki, w projektowanie, testy i produkcję detektorów słomkowych, czy w prace grupy opracowującej projekty detektorów Czerenkowa dla eksperymentu PANDA. Doświadczenia zdobyte w tej działalności na pewno bardzo pomogły jej w całokształcie pracy badawczej.

Podsumowując omówioną tu część działalności naukowej Habilitantki uważam, że dorobek naukowy dr Aleksandry Wrońskiej jest znaczny i stanowią go wartościowe publikacje naukowe.

#### 4. Ocena dorobku dydaktycznego i organizacyjnego Habilitantki

W swojej dokumentacji Habilitantka w końcowym rozdziale 4 przedstawia ośrodki naukowe, z którymi była związana podczas różnych badań naukowych, zarówno przed otrzymaniem tytułu doktora jak i po. Są to ośrodki głównie w Niemczech, jeden w Holandii oraz trzy z Polski: Centrum Cyklotronowe Bronowice CCB Kraków, SOLARIS Kraków oraz Centrum Onkologii w Gliwicach.

Dr Aleksandra Wrońska była wykonawcą lub kierownikiem w 6-ciu krajowych grantach, w tym w dwóch jako kierownik.

Brała udział w 21 konferencjach naukowych prezentując wyniki badań w wystąpieniach ustnych. Była również czterokrotnie zaproszona w celu wygłoszenia seminarium w instytucjach zewnętrznych, w Polsce na Uniwersytecie Warszawskim i w IFJ w Krakowie oraz w DKFZ w Heidelbergu w Niemczech i w INFN we Włoszech.

Jest autorką recenzji 19 artykułów dla różnych czasopism naukowych z dziedziny fizyki, fizyki medycznej, fizyki ciała stałego oraz recenzowała projekty będąc członkiem panelu ekspertów Chorwackiej Fundacji Nauki.

W ramach działalności organizacyjnej na rzecz społeczności naukowej i rozwoju instytucji macierzystej dr Wrońska wskazała współorganizowanie lub organizowanie sześciu różnych spotkań i konferencji odbywających się w Krakowie, w tym uczestniczyła w organizacji 45 Zjazdu Fizyków Polskich w Krakowie, przygotowując i prowadząc sesję pt. „Kobiety w fizyce”.

W ramach działalności dydaktycznej, głównie na kierunku Fizyka i Astronomia UJ, poza prowadzonymi zajęciami dla studentów (2 wykłady, ćwiczenia rachunkowe i laboratoryjne, seminaria), oraz indywidualną opieką nad studentami (6 prac licencjackich, 10 prac magisterskich, promotor pomocniczy w jednym zakończonym przewodzie doktorskim) wyróżniłabym udział w projekcie „Wiedza i kompetencje z fizyki, chemii i informatyki na potrzeby gospodarki – WIKING” (2009-13) i opracowanie skryptu oraz autorskiego kursu „Zajęcia wyrównawcze z matematyki” prowadzonego metodą warsztatową.

## 5. Podsumowanie

Podsumowując, w oparciu przedstawiony mi do recenzji „Autoreferat i Wykaz Osiągnięć” dr Aleksandry Wrońskiej, zawierający cykl 15 publikacji pt. „Zastosowanie detekcji i spektroskopii gamma w medycynie”, opis pozostałego dorobku naukowego oraz opis aktywności dydaktycznej i organizacyjnej, stwierdzam, że zarówno osiągnięcie naukowe jak i cały dorobek naukowy Kandydatki spełniają wszystkie wymagania stawiane habilitacji. Dr Aleksandra Wrońska posiada duże doświadczenie i wiedzę umożliwiającą jej samodzielne prowadzenie badań naukowych. Cały dorobek naukowy dr Aleksandry Wrońskiej oceniam bardzo wysoko i wnoszę o dopuszczenie Kandydatki do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

*B. Wronowska*