

Kraków, 29.05.2023

Prof. dr hab. Paweł Olko  
Kierownik Oddziału Zastosowań Fizyki  
Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
Radzikowskiego 152  
31-342 Kraków

## Recenzja

### **osiągnięcia naukowego, dydaktycznego, organizacyjnego i w zakresie popularyzacji nauki dr inż. Krzysztofa Fornalskiego**

**Tytuł osiągnięcia naukowego:** Modelowanie odpowiedzi organizmu na poziomie komórkowym na niskie dawki promieniowania jonizującego

Podstawa do wykonania recenzji: decyzja Rady Naukowej Dyscypliny Politechniki Warszawskiej z dnia 30.03.2023 oraz email prof. dr hab. inż. Tomasza Wolińskiego przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej z dnia 4 kwietnia 2023.

#### **Sylwetka Kandydata**

Pan dr inż. Krzysztof Wojciech Fornalski ukończył studia magisterskie na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej, kierunek fizyka techniczna/fizyka komputerowa w 2007 roku. W latach 2007 - 2012, pod opieką pana prof. Ludwika Dobrzyńskiego, był uczestnikiem studium doktoranckiego w Narodowym Centrum Badań Jądrowych. Stopień doktora nauk fizycznych z wyróżnieniem otrzymał w 2012 roku. Po uzyskaniu stopnia doktora pracował w latach 2012-2013 w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie.

W następnych latach, choć instytucjonalnie był związany z firmami energetycznymi zaangażowanymi w projekt energetyki jądrowej w Polsce, prowadził wykłady z ochrony radiologicznej w Wojskowym Instytucie Higieny i Epidemiologii, fizyki w Wyższej Szkole Bankowej w Warszawie i Biofizyki Radiacyjnej na Wydziale Fizyki PW. W 2022 został zatrudniony na Wydziale Fizyki PW na stanowisku adiunkta. Warto dodać, że w okresie w którym formalnie nie był zatrudniony w jednostce naukowej, nie zaprzestał prowadzenia badań i publikował prace, z których kilka weszło w skład prezentowanego obecnie osiągnięcia naukowego.

#### **Ocena osiągnięcia naukowego**

Jako osiągnięcie naukowe pan dr Fornalski przedstawił cykl dziesięciu zbieżnych tematycznie publikacji, które ukazały się w latach 2014 - 2022, pod tytułem „ Modelowanie odpowiedzi organizmu na poziomie komórkowym na niskie dawki promieniowania jonizującego”. Praca dotyczy ważnej i aktualnej tematyki badawczej, jaką jest ocena działania stosunkowo niskich dawek promieniowania jonizującego na komórki biologiczne, w kontekście wrażliwości organizmu człowieka. Dyskusja na temat potencjalnej szkodliwości niskich dawek promieniowania toczy się już kilkadziesiąt lat, lecz

dalek jest jeszcze do wyciągnięcia jednoznacznych wniosków. Obecny system OR opiera się na założeniu liniowej zależności dawka -efekt, co wprawdzie implikuje addytywność dawek i w związku z tym umożliwia łatwy ich pomiar, ale jednocześnie prowadzi do bardzo ryzykownych uproszczeń np. w postaci pojęcia dawki kolektywnej, sumującej bardzo niskiej dawki z dużej populacji. Tego typu zabiegi prowadzą często do niedopuszczalnych konkluzji np. w postaci przewidywanej liczby zgonów. Dlatego cykl prac pana dr inż. K. Fornalskiego analizującego, przy pomocy rozwiniętego przez niego modelu adaptacyjnego, różne sytuacje ekspozycji (pojedyncza dawka, dawka rozciągnięta w czasie) jest ważnym przyczynkiem do tej dyskusji.

Autoreferat został przygotowany starannie i prowadzi czytelnika przez kolejne stopnie zaawansowania proponowanych modeli odpowiedzi komórkowej. Kolejne kroki uszczegóławiające i rozszerzające modele są ze sobą logicznie powiązane i systematycznie tłumaczone. Szczególną uwagę w modelach zaproponowanych przez Kandydata odgrywa funkcja czasu, co we wczesnych modelach radiobiologicznych, takich jak model tarczowy czy model mikrodozymetryczny, nie było często brane pod uwagę. Jednym z ważnych obserwacji odpowiedzi komórek na promieniowanie jest odpowiedź adaptacyjna, w której niewielka ekspozycja na promieniowanie „uodparnia” komórkę na mogącą nastąpić później wysoką dawkę [F02]. Modele adaptacyjne pokazują, że odpowiedź na sumę dawek promieniowania ma charakter podliniowy tzn. wstępna dawka może zmniejszyć ryzyko niepożądanych efektów przy powtórnej ekspozycji. Co ciekawe, prawdopodobieństwo odpowiedzi adaptacyjnej po jednorazowej ekspozycji przyjmuje lokalne maksimum, tzn. dalsze zwiększanie dawki preekspozycyjnej zmniejsza prawdopodobieństwo efektu ochronnego. Podejście to jest interesujące, choć trudno mi się zgodzić z opisem do równania 1 w publikacji [F02], które sugeruje, że przedstawione równanie może być również stosowane dla innych rodzajów promieniowania np. neutronów czy cząstek alfa. Nie ma bowiem powodu, dla którego współczynniki dla promieniowania gamma mogłyby być przeskalowane z użyciem dawek równoważnych, obliczonych przy zastosowaniu administracyjnie wyznaczonych współczynników jakości promieniowania.

Innym przypadkiem rozważanej odpowiedzi adaptacyjnej była długotrwała ekspozycja na niskie moce dawki promieniowania np. podczas pobytu na terenie o podwyższonym naturalnym tle promieniowania lub podczas lotu w przestrzeni kosmicznej. W tym wypadku chroniczne narażenie na promieniowanie powoduje, że odpowiedź adaptacyjna ulega wysyceniu i nie zmienia się dalej w czasie. Przy wartości parametrów właściwych dla limfocytów krwi obwodowej człowieka „optymalna” moc dawki wynosi  $250 \mu\text{Gv/h}$  co daje niebagatelną dawkę  $2.19 \text{ Gy/rok}$ . Są to moce dawek o dwa rzędy wielkości wyższe niż w obszarach o podwyższonym tle na Ziemi i parokrotnie więcej niż spodziewane wartości w czasie lotu na Marsa. Dla danych dotyczących limfocytów ludzkich *in vitro* model dotyczący długotrwałej ekspozycji pokazuje, że zysk z odpowiedzi adaptacyjnej nie jest wtedy wysoki i nie przekracza kilkunastu procent.

Ekspozycja na promieniowanie jonizujące inicjuje długi łańcuch procesów, które w efekcie mogą prowadzić do indukcji nowotworów złośliwych. Artykuły [H04] i [H07] przedstawiają dalsze rozwinięcie modelu, począwszy od ekspozycji do indukcji i rozwoju nowotworu. Zapisane równanie opisujące transformację nowotworową zostało dołączone do poprzednio omawianego modelu odpowiedzi adaptacyjnej. Autor wyprowadził analityczną funkcję prawdopodobieństwa zajścia transformacji nowotworowej i przetestował ją na dostępnych danych klinicznych dotyczących indukcji nowotworów gastrycznych. Proces nowotworzenia jest bardzo skomplikowany i zależy od wielu czynników. Model zawiera jednak aż 13 parametrów (3 parametry wolne) co powoduje, że jego zastosowanie w praktyce może być znacznie ograniczone. Wzrost guza nowotworowego został również opisany przy pomocy modelu zaproponowanego w publikacji [H06], zawierającego zarówno wczesny etap wzrostu nowotworu jak i fazę późniejszą, zależną od charakteru namnażania się komórek. Autor podkreśla

w autoreferacie, że zaproponowanie przez niego krzywej sigmoidalnej, jako podstawy określania ryzyka radiacyjnego skutków stochastycznych, jest ważną alternatywą dla liniowego modelu LNT (Linear Non Threshold) stosowanego w ochronie radiologicznej. Krzywe sigmoidalne mogą reprezentować do pewnego stopnia funkcją progową co oznacza, że odpowiedź danego układu zmienia się po przekroczeniu owego progu. Takie podejście oznaczałoby w ochronie radiologicznej pominięcie niskich dawek, jako nie niosących w sobie ryzyka nowotworzenia. Brzmi to atrakcyjnie, choć taki model jest w zasadzie obecnie niemożliwy do weryfikacji. Nie mogę się też zgodzić ze sformułowaniem użytym w autoreferacie, że obecność krzywych sigmoidalnych dla wysokich dawek promieniowania jest argumentem za tym, że te krzywe będą też opisywały działanie promieniowania przy niskich dawkach. Przy wysokich dawkach mamy do czynienia głównie z efektami letalnymi, natomiast przy niskich interesują nas mutacje, prowadzące do indukcji nowotworów. W proponowanych modelach brakuje mi również jasnego określenia jakie wartości dawki są uważane jako „niskie” i jakiejś dyskusji próbującej odnieść wyniki modelu do wartości granicznych dawek np. 1 mSv/rok dla ogółu ludności czy 20 mSv/rok dla osób zawodowo narażonych. Warto też podkreślić ograniczenie tego typu modelowania - wnioski uzyskane dla jednego rodzaju promieniowania nie mają bezpośredniego zastosowanie do przewidzenia odpowiedzi na inny rodzaj promieniowania np. neutronów czy gęsto jonizujących cząstek naładowanych.

Mimo tych uwag krytycznych bardzo wysoko oceniam przedstawiony do oceny cykl prac, które uważam za autentyczne osiągnięcie naukowe. Stanowią one zwarty cykl publikacji, w którym autor systematycznie pogłębia swój rozumienie i rozwija aparat modelowy opisujący oddziaływanie niskich dawek promieniowania na organizmy żywe. W zdecydowanej większości prac pan dr inż. Fornalski jest pierwszym autorem, co w połączeniu z oświadczeniami współautorów jasno pokazuje jego dominujący wkład w pomysł i wykonanie badań. Publikacje te spowodowały, że Kandydat jest niewątpliwie świetnie rozpoznawalnym na świecie naukowcem w dziedzinie modelowania procesów oddziaływania promieniowania na organizmy żywe. Warto dodać, że za publikację [H08] otrzymał w 2022 roku, nagrodę zespołową II stopnia w dziedzinie higieny radiacyjnej, przyznaną przez Zarząd Główny Polskiego Towarzystwa Badań Radiacyjnych im. Marii Skłodowskiej-Curie w 2022.

Chciałbym jednocześnie podkreślić, że prace składające się na to osiągnięcie naukowe powstały w okresie, gdy Jego źródła utrzymania ulokowane były poza nauką – to co robił jest dla mnie świadectwem autentycznej pasji i zaangażowania.

### **Ocena pozostałego dorobku naukowego**

Jednym z kryteriów oceny dorobku naukowego jest ocena aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej. Wprawdzie pan dr Fornalski nie odbył dłuższego stażu podoktorskiego, ale za to może się pochwalić ogromną aktywnością na terenie Polski: studiował na Politechnice Warszawskiej, otrzymał doktorat w Narodowym Centrum Badań Jądrowych, w 2014 roku otrzymał dwumiesięczne stypendium IAEA na staż naukowo-szkoleniowy w belgijskim ośrodku jądrowym SCK-CEN, prowadził wykłady w Wojskowym Instytucie Higieny i Epidemiologii, w Wyższej Szkole Bankowej w Warszawie oraz na Politechnice Warszawskiej, współpracował z Instytutem Technologii Materiałów Elektronicznych oraz Narodowym Centrum Badań Jądrowych w ramach badań nad aktywnymi osłonami przeciwradiacyjnym. W 2022 roku otrzymał stanowisko adiunkta na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej

Warto dodać, że oprócz cyklu 10 publikacji przedstawionych jako osiągnięcie naukowe jest też autorem ośmiu publikacji recenzowanych (we wszystkich jest pierwszym autorem) z okresu przed doktoratem oraz dodatkowych 20 publikacji z listy JRC, opublikowanych po doktoracie. Jest to imponujący wynik,

mając na uwadze, że w okresie 2013-2022 nie był formalnie zatrudniony w placówce naukowej. Opublikował również 8 rozdziałów w monografiach naukowych oraz kilka prac w materiałach pokonferencyjnych. Warto są też zauważenia liczne publikacje Kandydata w języku polskim, zarówno w postaci artykułów naukowych jak i popularno-naukowych. Nie przynoszą one wprawdzie formalnych „korzyści” w klasyfikacjach Ministerstwa Nauki, lecz umożliwiają rozwój polskiej terminologii i możliwość dotarcia do szerszych kręgów czytelników.

Brał udział w kilkunastu konferencjach krajowych i kilkunastu o zasięgu międzynarodowym. Na 12 konferencjach międzynarodowych wygłaszał referaty ustne, w tym trzykrotnie były to wykłady na zaproszenie. Był uczestnikiem i prelegentem podczas licznych seminariów naukowych i debat publicznych. Warto dodać, że jako ekspert w zakresie ochrony przed promieniowaniem uczestniczył w spotkaniach w mieszkańcami gmin, w których planuje się budowę elektrowni jądrowych. Był aktywnym recenzentem (około 30 recenzji) dla kilkunastu czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym.

Kandydat w latach 2013-2014 był wykonawcą w projekcie badawczym NCBiR pt. "Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej" W przedstawionym autoreferacie brak jest informacji o kierowaniu projektami naukowymi lub o wystąpieniach o takie projekty.

Uważam, że pozostały dorobek naukowy pana dr Krzysztofa Fornalskiego, biorąc pod uwagę jego drogę życiową i zatrudnienie w firmach związanych z budową polskiej elektrowni jądrowej EJ, jest na bardzo dobrym poziomie. Uważam to za bardzo ważne, że osoba o tych kwalifikacjach trafia do firmy zajmującej się budową EJ– prawdopodobnie najważniejszego projektu cywilizacyjnego współczesnej Polski.

#### **Ocena dorobku dydaktycznego, organizacyjnego i popularyzującego naukę.**

Pan dr Fornalski, mimo, że przez większość czasu po doktoracie nie był zatrudniony na uczelni, bardzo aktywnie uczestniczył w procesie edukacyjnym. Był promotorem lub promotorem pomocniczym 15 prac magisterskich i inżynierskich oraz promotorem pomocniczym trzech prac doktorskich (jedna w NCBJ, dwie na Wydziale Fizyki UW). Przez okres trzech ostatnich lat prowadził zajęcia dydaktyczne na Politechnice Warszawskiej w wymiarze 30 godzin na semestr i w Wyższej szkole Bankowości w wymiarze 50 godzin na semestr. Prowadził też wykłady i kursy specjalistyczne dotyczące ochrony radiologicznej. W latach 2015-2016 brał udział w unijnym projekcie ENTRAP III, który dotyczy kształcenia w obszarze ochrony radiologicznej. Pełnił rolę eksperta podczas wizyt polskich samorządowców z Pomorza oraz pracowników Polskiej Grupy Energetycznej w kilku elektrowniach jądrowych w Europie i Japonii. Współorganizował warsztaty IAEA pt. „National workshop on the design aspects of radiation protection monitoring system for a nuclear power plant” (Warszawa, 14–18.2019). Współpracował również z IAEA w sprawie szkoleń specjalistycznych dla pracowników Polskiej Grupy Energetycznej. Wielokrotnie udzielał też wywiadów dla różnego typu mediów.

W podsumowaniu chciałbym wysoko ocenić dorobek dydaktyczny, organizacyjny i w zakresie popularyzacji nauki pana dr. inż. Krzysztofa Fornalskiego. Brał aktywny udział w bardzo różnorodnych działaniach obejmujących wykłady, szkolenia, spotkania z lokalną społecznością, wykłady popularyzujące zagadnienia energetyki jądrowej, kontakty z instytucjami międzynarodowymi.

### **Wniosek końcowy**

Z prawdziwą przyjemnością przychodzi mi podsumować wniosek habilitacyjny pana dr inż. Krzysztofa Fornalskiego. Jego osiągnięcie naukowe w postaci cyklu 10 publikacji stanowi znaczący wkład w dziedzinę nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauk fizycznych. Kandydat jest dojrzałym, w pełni samodzielnym pracownikiem naukowym, cenionym specjalistą, dobrze rozpoznawalnym na arenie krajowej i międzynarodowej. Kandydat znakomicie połączył działalność naukową na wysokim poziomie, z rozwiniętą pracą organizacyjną, dydaktyczną i popularyzatorską.

Stwierdzam, że przedstawione do recenzji osiągnięcie naukowe, jak i pozostały dorobek naukowy, odpowiadają wymaganiom określonym w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20.07.2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i spełniają wszelkie warunki stawiane przez ustawę do uzyskania stopnia naukowego doktora habilitowanego. Niniejszym wnioskuje do Komisji o dalsze procedowanie przewodu habilitacyjnego pana dr inż. Krzysztofa Fornalskiego.



Prof. dr hab. Paweł Olko