



**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

Dr hab. Wojciech Królas, profesor Instytutu
Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

Kraków, 18.03.2026 r.

**Recenzja osiągnięcia naukowego dr. Marcina Jakubowskiego zatytułowanego
„Wpływ trójwymiarowej struktury pola magnetycznego na transport w plazmie”
w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego**

1. Wstęp

Pan dr Marcin Jakubowski w roku 1999 ukończył studia magisterskie na Uniwersytecie Opolskim. Uzyskał stopień magistra fizyki składając pracę pod tytułem „Badanie plazmy helowej i argonowej domieszkowanej dwutlenkiem węgla”. W latach 2001-2004 był słuchaczem studiów doktoranckich w Forschungszentrum Jülich, Niemcy. W 2004 roku uzyskał stopień doktora nauk fizycznych przyznany przez Ruhr-Universität-Bochum w Bochum na podstawie pracy doktorskiej na temat „Magnetic field topology and heat flux patterns under the influence of the Dynamic Ergodic Divertor of the TEXTOR tokamak”.

W kolejnych latach był zatrudniony na stażu podoktoranckim w Forschungszentrum Jülich, zaś od 2007 roku pracuje naukowo w Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Greifswald, Niemcy. Według dostarczonych informacji Kandydat nie ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora habilitowanego. Jako osiągnięcie, o którym mowa w art. 219 ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668) Kandydat przedstawił jednotematyczny cykl trzynastu publikacji pod tytułem „Wpływ trójwymiarowej struktury pola magnetycznego na transport w plazmie”.

2. Ocena osiągnięć naukowych stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego

Prace składające się na cykl pod tytułem „Wpływ trójwymiarowej struktury pola magnetycznego na transport w plazmie” zostały opublikowane w latach 2004-2021 w większości we współpracy międzynarodowej realizowanej w oparciu o duże urządzenia badawcze.

W urządzeniach typu tokamak i stellerator plazma, w której zachodzi kontrolowana synteza termojądrowa jest utrzymywana i izolowana od ściany komory przy pomocy pola magnetycznego o dwóch składowych: toroidalnej i poloidalnej. Na krawędzi plazmy linie pola magnetycznego odkształcane są przy pomocy dodatkowych pól zakłócających dla stworzenia optymalnych warunków do odprowadzenia z plazmy cząstek alfa oraz nadmiaru ciepła. Kluczowym elementem konstrukcyjnym tokamaka czy stelleratora, którego zadaniem jest usuwanie zanieczyszczeń z plazmy, odprowadzanie ciepła oraz utrzymanie stabilności reakcji fuzyjnej poprzez kontrolę brzegowych obszarów plazmy jest dywertor.

Prace stanowiące osiągnięcie naukowe dotyczą różnych aspektów transportu i odprowadzania ciepła z plazmy w zależności od struktury pola magnetycznego, rodzaju dywertora i wzbudzanych rezonansowych perturbacji pola magnetycznego. Pomiary wykonywane były (1) na tokamaku TEXTOR, który działał w Forschungszentrum Jülich do 2013 roku, (2) tokamaku DIII-D w National Fusion Facility w San Diego, oraz na stelleratorach (3) Large Helical Device w National Institute of Natural Sciences w Japonii i (4) Wendelstein 7-X w Instytucie Fizyki Plazmy w Greifswaldzie. Udział Kandydata w tych pracach polegał na planowaniu i przeprowadzaniu eksperymentów, opracowaniu koncepcji i metodyki analizy danych, przygotowaniu programów i prowadzeniu obliczeń, interpretacji i publikacji wyników.

Jedną z koncepcji, jak zmniejszyć strumienie ciepła do dywertorów, są tak zwane dywertory ergodyczne, gdzie przy pomocy zewnętrznych cewek z prądem oddziałuje się na linie pola magnetycznego przy pomocy niewielkich, rezonansowych pól zakłócających. W pierwszej z prac [Nucl. Fusion 44, 2004, S1] zgłoszonego cyklu Kandydat przedstawił obliczenia struktury pola magnetycznego w eksperymencie TEXTOR-DED – Dynamic Ergodic Divertor - przy pomocy stworzonego przez siebie zespołu kodów numerycznych ATLAS. Na podstawie obliczeń wykazał, że w najbardziej zewnętrznej warstwie plazmy powstają wiązki linii pola, które tworzą kanały transportu plazmy. Pokazał, że struktura rozkładu ciepła na powierzchni dywertora ergodycznego odzwierciedla strukturę linii sił pola magnetycznego przecinających tę powierzchnię.

W kolejnych dwóch pracach Kandydat porównał wyliczone struktury pola magnetycznego z pomiarami termograficznymi rozkładów strumienia ciepła na powierzchni dywertora (pomiar promieniowania podczerwonego emitowanego przez dywertor) [Phys. Rev. Lett. 96, 2006, 035004], oraz pokazał wyniki eksperymentów dla różnych parametrów plazmy i rozkładów pól zakłócających [J. Nucl. Mat. 337, 2005, 176]. Potwierdził w ten sposób trafność przewidywań kodu ATLAS, który następnie był powszechnie używany do wyznaczania struktury pola magnetycznego na tokamaku TEXTOR-DED. Eksperymentalna i numeryczna analiza zmian w transporcie energii i ciepła w plazmie krawędziowej pod wpływem rezonansowych pól zakłócających była tematem następnego artykułu [Nucl. Fusion 48, 2008, 024009]. W pracy udało się zidentyfikować dwie poloidalnie sąsiadujące domeny o różnych właściwości transportu plazmy: obszary laminarne oraz obszary ergodyczne.

W pracach [J. Nucl. Mat. 363, 2007, 371 i Phys. of Plasmas 14, 2007, 042502] przedstawiono nową metodę analizy numerycznej danych eksperymentalnych dla zbadania powstawania stabilnych i niestabilnych rozmaitości wokół punktów stałych w chaotycznym obszarze na krawędzi plazmy. Przeprowadzona analiza strumienia ciepła na dywertorze pokazała, że ciepło transportowane jest przez obszar stochastyczny kanałami, które są w dużym stopniu zależne od położenia wysp magnetycznych. Dzięki zaproponowanej metodzie możliwy jest pośredni pomiar minimalnego radialnego zasięgu obszaru chaotycznego w plazmie. W pracy [Plasma Phys. and Contr. Fusion 49, 2007, S109] badano wpływ warunków panujących w plazmie

brzegowej, w tym kolizyjności cząstek, na transport ciepła w obszarze stochastycznym. Pokazano, że podczas zmiany gęstości plazmy rosła częstość zderzeń elektronowych przez co charakter transportu ciepła zmieniał się z bezkolizyjnego na kolizyjny.

W pracach [Nucl. Fusion 49, 2009, 095013, Contrib. to Plasma Phys. 50, 2010, 701 i J. Nucl. Mat. 415, 2011, S901] opisano wpływ pól zakłócających na strukturę rozkładu ciepła odkładanego na dywertorze oraz na niestabilności krawędziowe w tokamaku DIII-D. W tym celu zbudowano i zainstalowano w urządzeniu diagnostykę termograficzną, która mierzyła zmiany temperatury powierzchni dywertora. Przeanalizowano dynamiczne zmiany strumienia ciepła do dywertora podczas różnych trybów pracy i modów wyładowań. Zbadano także wpływ rezonansowych pól zakłócających na niestabilności typu ELM.

W kolejnej pracy [Nucl. Fusion 53, 2013, 113012] opisano wpływ pól zakłócających na transport w stelleratorze Large Helical Device (LHD), zaś w ostatniej pracy zgłoszonego cyklu [Nucl. Fusion 61, 2021, 10600] przedstawiono istotne wyniki eksperymentów dywertorowych przeprowadzonych na stellaratorze W7-X w Instytucie Fizyki Plazmy w Greifswaldzie. Zbadano działanie dywertora wyspowego zastosowanego w W7-X w warunkach plazmy przyłączonej oraz oderwanej. Wykazano, że dywertor oparty na naturalnych wyspach magnetycznych, skutecznie rozprasza strumień ciepła i umożliwia, pomimo złożonej geometrii pola magnetycznego, kontrolowane odprowadzanie cząstek. Osiągnięto stabilne oderwanie plazmy oraz wykazano, że możliwe jest zapewnienie równomiernego rozłożenie strumieni ciepła. Zbadano i potwierdzono skuteczną kontrolę zanieczyszczeń, co ma kluczowe znaczenie dla utrzymania plazmy podczas pracy długoczasowej w przygotowaniu do pracy ciągłej.

Kandydat w przystępny sposób omówił zaprezentowany cykl prac w autoreferacie. Drobne uchybienia formalno-językowe, które zauważyłem, nie mają wpływu na wysoką ocenę prac. Zwróć jedynie uwagę na powtarzające się sformułowanie „linie sił pola magnetycznego”, które tak naprawdę odnosi się do linii pola magnetycznego – składowa magnetyczna siły Lorentza jest do nich prostopadła, oraz „trajektorie linii sił pola magnetycznego”. Określenie "rozkład ciepła na dywertorze" może odnosić się zarówno do energii transportowanej w postaci ciepła przez obszar dywertora jak i do rozkładu temperatury powierzchni dywertora.

Uważam, że przedstawiony cykl trzynastu publikacji, w które Kandydat wniósł wiodący wkład, jest spójny tematycznie i stanowi ważne osiągnięcie naukowe. Zgodnie z przedstawionym autoreferatem habilitant planował, przygotowywał i brał udział w przeprowadzeniu eksperymentów, opracowywał koncepcję i metodologię analizy wyników, tworzył kody numeryczne, dokonywał analiz danych oraz wykonywał obliczenia, proponował interpretację i prezentację wyników oraz brał udział w redakcji manuskryptów. Uznaję zatem, że przedstawiony cykl artykułów stanowi osiągnięcie naukowe Kandydata, które spełnia ustawowe wymogi do uzyskania stopnia doktora habilitowanego.

3. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

Dorobek naukowy dr. Marcina Jakubowskiego spoza omówionego cyklu publikacji jest ogromny. Obejmuje on, licząc od 2004 roku ponad 190 prac, z których przeważająca część, zwłaszcza tych, opublikowanych w ostatnich latach, dotyczy uruchamiania, eksploatacji i pomiarów prowadzonych na stellaratorze Wendelstein 7-X. Kandydat zaangażowany jest w prace przy różnych rodzajach diagnostyk i systemów pomiarowych zastosowanych przy W7-X, w tym

dotyczących kształtowania pola magnetycznego, konfiguracji dywertora, modelowania i symulacji transportu ciepła i kontroli plazmy w urządzeniu. W dorobku znajdują się również prace wykonane w oparciu o eksperymenty na innych urządzeniach, w tym na tokamakach JET, ASDEX i TCV, co świadczy o szerokich zainteresowaniach naukowych Kandydata. Przeważająca część prac opublikowana jest w prestiżowych czasopismach z dziedziny badań syntezy termojądrowej. Łącznie, prace, w których dr M. Jakubowski jest autorem i współautorem składają się na wysokie wskaźniki bibliometryczne, ponad 5 tys. cytowań bez autocytowań oraz indeks Hircha 45. Kandydat do habilitacji jest także autorem rozdziału w monografii naukowej z roku 2005 dotyczącej tokamaka TXTOR-DED.

W ciągu ostatnich dwudziestu lat dr Marcin Jakubowski wielokrotnie prezentował swoje prace na międzynarodowych konferencjach i spotkaniach naukowych w formie wykładów na zaproszenie i wykładów plenarnych.

4. Dorobek organizacyjny, dydaktyczny i popularyzatorski – inne formy aktywności Kandydata

Dr Marcin Jakubowski dużą część swojej aktywności naukowej realizuje w ramach współprac i projektów europejskich. W programie Horyzont 2020, w latach 2014-2020, realizował zadania w pakietach konsorcjum naukowego Eurofusion WPS1 i WPS2 związane z eksperymentami na stellaratorze W7-X. Obecnie, w programie Horyzont Europa (2021-2027) jest kierownikiem (Project Leader) pakietu W7-X. Oznacza to, że zarządza i koordynuje wszystkie działania i programy eksperymentalne na tokamaku W7-X finansowane przez Eurofusion.

Dr Marcin Jakubowski od 2020 roku jest członkiem International Tokamak Physics Activity (ITPA) w grupie tematycznej Scrape Off Layer and Divertor Topical Group. Od 2018 roku zasiada w Rady Naukowej Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy gdzie dodatkowo pełni funkcję przewodniczącego Komisji ds. Programów Naukowych.

Pomimo pracy w instytucie badawczym dr Marcin Jakubowski ma liczne osiągnięcia dydaktyczne, takie jak prowadzenie wykładów dla studentów na Uniwersytecie w Greifswaldzie, Uniwersytecie Cagliari oraz na Uniwersytecie Szczecińskim. Prowadził opiekę merytoryczną nad dwoma pracami doktorskimi realizowanymi na Uniwersytecie w Greifswaldzie oraz nad dwoma pracami doktorskimi realizowanymi na Monachijskim Uniwersytecie Technicznym. Był także promotorem pracy magisterskiej i pracy licencjackiej na Uniwersytecie Szczecińskim.

Równie istotna jest działalność popularyzatorska dra M. Jakubowskiego, na którą składają się cykl wykładów popularyzujących naukę dla portalu i miesięcznika „Wszystko co najważniejsze” oraz opieka redakcyjna na naukową częścią tego portalu, artykuł dla Tygodnika Powszechnego na temat syntezy termojądrowej oraz wykłady popularyzujące program syntezy termojądrowej dla szerokich środowisk uniwersyteckich.

5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionej dokumentacji stwierdzam, że dr Marcin Jakubowski jest znakomitym naukowcem, posiada znaczący dorobek naukowo-badawczy, zarówno w zakresie podstawowego osiągnięcia naukowego w postępowaniu habilitacyjnym, jak i poza nim, który to

stanowi znaczny wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne. Jego dorobek organizacyjny, dydaktyczny i popularyzatorski jest również imponujący.

W mojej ocenie Kandydat spełnia wymogi ustawy do uzyskania stopnia doktora habilitowanego. Wnioskuje o dopuszczenie go do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

A handwritten signature in blue ink, reading "Wojciech Królas". The signature is written in a cursive, flowing style.

dr hab. Wojciech Królas