

Kraków, 02.04.2026

dr hab. Agnieszka Kulińska, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
Kraków

RECENZJA

osiągnięć naukowo-badawczych dr Marcina Jakubowskiego w postępowaniu o nadanie stopnia doktora habilitowanego

„Wpływ trójwymiarowej struktury pola magnetycznego na transport w plazmie”

Informacje podstawowe

Dr Marcin Jakubowski jest absolwentem Uniwersytetu Opolskiego, gdzie w 1999 r. otrzymał stopień magistra, a jego praca dotyczyła badania parametrów plazmy helowej i argonowej domieszkowanej dwutlenkiem węgla. Po ukończeniu studiów przez dwa lata pracował jako asystent na Uniwersytecie Opolskim, po czym rozpoczął studia doktoranckie w Forschungszentrum Jülich w Niemczech. Pracę doktorską: *„Magnetic field topology and heat flux patterns under the influence of the Dynamic Ergodic Divertor of the TEXTOR tokamak”* wykonaną pod kierunkiem prof. dr hab. Roberta Wolf, obronił na Ruhr-Universität-Bochum w Bochum w Niemczech w czerwcu 2004 roku. Po obronie pracy doktorskiej odbył 3-letni staż podoktorski w Forschungszentrum Jülich. Od 2007 roku pracuje w Max-Planck-Institut für Plasmaphysik w Greifswald w Niemczech zajmując kolejno stanowiska od badacza (researcher) poprzez prowadzenie grup badawczych po kierowanie projektami (Project Leader) w ramach europejskiego programu realizowanego przez konsorcjum EUROfusion. Obecnie jako Project Leader projektu Work Package Stellarator Activities (WPSTEL).

Cykl trzynastu publikacji

Jako główne osiągnięcie naukowe w postępowaniu habilitacyjnym dr Marcin Jakubowski przedstawił cykl trzynastu publikacji zatytułowany: **„Wpływ trójwymiarowej struktury pola magnetycznego na transport w plazmie”**. Przedstawione wyniki stanowią istotny wkład w badania nad zagadnieniem bezpiecznego dla wyładowania i komory, oddziaływania plazmy ze ścianą reaktora termojądrowego, tak aby nie uszkodzić dywertora i nie wprowadzać zanieczyszczeń do głównego obszaru wyładowania.

Publikacje stanowiące cykl tematyczny, powstały po doktoracie w okresie od 2004 do 2021 roku, prezentują zarówno analizy danych eksperymentalnych jak i numerycznych oraz modelowanie struktury pola magnetycznego wykonane przez habilitanta i skupiają się głównie

wokół czterech urządzeń fuzyjnych: tokamaków TEXTOR-DED (H1-H8) i DIII-D (H9-H11) oraz stellaratorów LHD (H12) i Wendelstein 7-X (H13). Wszystkie znajdują się w czasopismach wysoko punktowanych z listy ministerialnej (może poza H10) w tym dwie w Physical Review Letters (H3, H7). Eksperymenty na tokamakach TEXTOR-DED i DIII-D zostały przeprowadzone wspólnie z zespołami z Forschungszentrum Jülich i General Atomics; te na Large Helical Device (LHD) z National Institute for Fusion Science w Japonii oraz te na stellaratorze W7-X z grupą z Max-Planck-Institut für Plasmaphysik w Greifswald w Niemczech.

W pracach **H1-H8** zaprezentowane zostały wyniki związane z tzw. *dywertorami ergodycznymi*, gdzie przy pomocy zewnętrznych cewek z pędem oddziałuje się na linie sił pola magnetycznego przy pomocy niewielkich, rezonansowych pól zakłócających. Zastosowanie tego rodzaju dywertorów było jednym z pomysłów na zmniejszenie strumieni ciepła do dywertorów. Wpływ topologii pola magnetycznego na obszar ergodyczny i/lub laminarny w układzie TEXTOR-DED, a co za tym idzie jej wpływ na strukturę rozkładu ciepła na powierzchni dywertora, został potwierdzony pomiarami termograficznymi oraz obliczeniami z zastosowaniem kodów numerycznych ATLAS, uzupełnianym i rozbudowanym przez dr Jakubowskiego (**H1, H2, H3**). Kod ATLAS, był powszechnie używany w eksperymentach na tokamaku TEXTOR-DED do wyznaczania struktury pola w obszarach ergodycznym i laminarnym. W pracach **H4** i **H5** wyniki analizy termograficznej przeprowadzonej przez dr Jakubowskiego pokazały, że ciepło transportowane jest przez obszar stochastyczny kanałami, zależnymi z dużym stopniem od położenia wysp magnetycznych. Ponadto dzięki metodzie rozwiniętej w tych pracach pokazano jeden z pierwszych eksperymentalnych wyników potwierdzających obecność obszaru chaotycznego na krawędzi tokamaka. Wpływ warunków panujących w plazmie brzegowej (zwłaszcza kolizyjność cząstek) na transport ciepła w obszarze stochastycznym były głównym tematem pracy **H6**, gdzie przeprowadzona została analiza numeryczna kodem ATLAS zasięgu radialnego w głąb plazmy linii sił pola. Pokazała ona, że transport równoległy ciepła jest bardziej wydajny, gdy cząstki (elektrony) mają większą prędkość termalną. W publikacjach **H3** i **H8** zostały przedstawione wyniki analizy (eksperymentalne i numeryczne) topologii rezonansowych pól zakłócających na transport cząstek i energii cieplnej w plazmie krawędziowej, która pokazała jej duży wpływ na wartości n_e i T_e i ich gradientów. W Autoreferacie brak jest bezpośredniego odnośnika do publikacji **H7**, ale z mojej analizy tekstu przypuszczam, że jest to treść górnych akapitów strony 22 Autoreferatu. Praca H7 odnosi się do zagadnienia wzrostu ergodyzacji linii pola magnetycznego na krawędzi plazmy i tworzenia się bariery transportowej, która skutkuje poprawą współczynnika utrzymania τ_p .

W pracach **H9-H11** wykorzystano głównie dane otrzymane w eksperymentach na tokamaku DIII-D i obliczeniach numerycznych dla nich, do badania wpływu zewnętrznych pól zakłócających na strukturę rozkładu ciepła odkładanego na dywertorze oraz ich wpływie na niestabilności krawędziowe plazmy pierwszego rodzaju (Type-I ELMs). Jak pokazują obliczenia, elementy wewnętrzne ścian tokamaka np. takiego jak ITER byłyby narażone na zniszczenie bez skutecznego mechanizmu eliminującego lub zmniejszającego amplitudę relaksacji bariery transportu w trybie H-mode. Osiągnięcie akceptowalnego obciążenia cieplnego elementów

stykających się z plazmą stanowi jedno z kluczowych wyzwań dla bezpiecznej eksploatacji przyszłych urządzeń termojądrowych (np. ITER czy DEMO). Diagnostyka termograficzna, zainstalowana przez dr Jakubowskiego na tokamaku DIII-D, jako jedna z pierwszych umożliwiła (dzięki częstotliwości odświeżania 13 kHz) pomiary dynamicznych zmian temperatury podczas uderzenia ELM w dywertor. W pracy **H9** istotnym wynikiem analizy tych dynamicznych zmian była obserwacja, że obszar na którym jest odkładane ciepło zależy liniowo od całkowitej energii zdeponowanej podczas jednego zdarzenia E_{dep} . Ponadto badania (w tym obliczenia numeryczne) wpływu rezonansowych pól zakłócających (z ang. *Resonant Magnetic Perturbations* - RMP) na niestabilności ELM, sugerują, że topologia pola magnetycznego na krawędzi plazmy, która powstała przez użycie RMP wpływa na kanały transportu ciepła i cząstek tworzonych przez ELM. Szczegółowa i dogłębna analiza wpływu pola zakłócającego na oddziaływanie niestabilności ELM ze ścianami dywertora wykonana przez dr Jakubowskiego i zaprezentowana w pracy **H9** spotkała się z szerokim zainteresowaniem i uznaniem środowiska o czym świadczy wysoka liczba cytowań (151 na dzień 02/04/2026). W publikacji **H10** habilitant przedstawił przegląd dotychczasowych wyników badań nad krawędzią stochastyczną plazmy. Eksperymenty w pracy **H11** miały na celu zastosowanie RMP w celu redukcji częstości występowania niestabilności typu ELM, a nie ich całkowitej eliminacji, co może być interesujące za względu na możliwość kontroli zanieczyszczeń w plazmie w ITER. Ważnym wnioskiem z analizy przeprowadzonych wyładowań z i bez RMP przedstawionym przez dr Jakubowskiego jest potwierdzenie wpływu RMP na rozkład ciepła podczas ELM przy jednoczesnym pojawianiu się asymetrii toroidalnej obciążenia mocy.

Obecnie zastosowanie niewielkich zewnętrznych pól magnetycznych w tokamakach stało się powszechnym narzędziem do redukcji lub eliminacji ELM. Jednocześnie jednym z kluczowych zagadnień w badaniach nad RMP pojawiło się określenie roli wysp magnetycznych powstających w wyniku oddziaływania RMP z równowagowym polem magnetycznym. W pracy **H12** zostały przedstawione badania nad nieliniową reakcją plazmy na transport wynikającą z efektów stochastycznych w wielkim urządzeniu spiralnym (LHD) z rezonansowym zaburzeniem magnetycznym RMP, m.in wpływ RMP na transport cząstek. Istotnym wynikiem była obserwacja efektu histerezy wnikania pola magnetycznego w plazmę, wynikająca z efektu ekranowania przez plazmę wnikających w nią pól magnetycznych.

Odprowadzanie ciepła i cząstek i kontrola tego procesu jest istotnym zagadnieniem także dla stellaratora Wendelstein W7-X, możliwość zademonstrowania quasi-ciągłej pracy o dużej mocy i wysokiej wydajności, staje się kluczowym elementem w kontekście przyszłych reaktorów fuzyjnych. W pracy **H13** przedstawione zostały najistotniejsze wyniki eksperymentów z zastosowaniem dywertora wyspowego opartego na naturalnych wyspach magnetycznych na granicy plazmy. Wykazano, że skutecznie rozprasza on strumień ciepła i charakteryzuje się korzystnym skalowaniem w zależności od mocy wejściowej oraz zapewnia dobre ekranowanie zanieczyszczeń, pomimo złożonej trójwymiarowej geometrii pola magnetycznego. W eksperymentach została wykorzystana m.in. diagnostyka oparta na szerokokątnych kamerach termowizyjnych, monitorujących temperaturę powierzchni elementów dywertora. Dr Jakubowski w latach 2014-2023 kierował projektem rozwoju i

wdrożenia tej diagnostyki w ramach programu badawczego W7-X, wnosząc istotny wkład w potwierdzenie, że dywertor wyspowy stanowi skuteczne rozwiązanie w trybie pracy steady-state w przyszłych eksperymentach oraz reaktora opartego na stellaratorze.

Niezależnie od różnic topologicznych między koncepcjami dywertorów, muszą one zapewniać tę samą podstawową funkcjonalność: minimalizować strumienie ciepła i cząstek, zapewniać wydajne odprowadzanie cząstek oraz zapewniać skuteczne ekranowanie zanieczyszczeń, usuwać popiół helowy. Przedstawiony przez dr Jakubowskiego w cyklu publikacji jego wkład i zaangażowanie w badania nad tymi zagadnieniami oceniam jako istotny i znaczący dla rozwoju fizyki plazmy i przyszłego wykorzystania syntezy termojądrowej jako źródła energii.

Uważam, że przedstawiony cykl trzynastu publikacji, w których habilitant miał znaczny udział jest ważnym osiągnięciem. Zgodnie z załączonym Autoreferatem oraz oświadczeniami habilitanta i współautorów, w dziesięciu jest pierwszym i/lub korespondencyjnym autorem. W prawie wszystkich wymienionych publikacjach brał udział w planowaniu, przygotowaniu i przeprowadzeniu eksperymentów, opracowaniu koncepcji i metodologii badań i analizy danych, obliczeniach numerycznych z wykorzystaniem różnych kodów, w tym stworzonych przez siebie, modelowaniu i opracowaniu graficznym wyników, tworzeniu ilustracji oraz tworzeniem i redakcją manuskryptów.

Inne osiągnięcia

Dr Jakubowski wykazuje się imponującym dorobkiem naukowym i publikacyjnym, a także organizacyjnym i popularyzatorskim. Znaczącym osiągnięciem jest autorstwo lub współautorstwo w pozostałych 192 publikacjach zawartych w przedstawionym *Wykazie osiągnięć naukowych* (w tym jako drugi lub trzeci autor w 32 pracach). Pokażna jest również liczba wystąpień konferencyjnych ustnych i posterów – 34, w tym 14 na zaproszenie oraz liczba współautorstwa w około 100 prezentacjach przedstawianych przez innych współautorów. Dr Jakubowski działa aktywnie jako członek komitetu programowego trzech międzynarodowych konferencji (w tym dla jednej jest wiceprzewodniczącym komitetu), oraz jako wykonawca i/lub kierownik grup, projektów i pakietów badawczych realizowanych w ramach konkursów krajowych lub zagranicznych oraz europejskich programach międzynarodowych (m.in. Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA), Horizon 2020 i Horizon Europe realizowane przez konsorcjum EUROfusion). Warte podkreślenia jest kierowanie przez dr Jakubowskiego w ostatnich kilku latach dwoma projektami finansowanymi przez EUROfusion. Ponadto habilitant jest aktywnym recenzentem w pięciu prestiżowych czasopismach z listy JCR, był oceniającym wnioski w programach Departament of Energy w latach 2018-2022 oraz tzw. guest editorem w czasopiśmie Plasma Physics and Controlled Fusion.

Aktywność naukowa, dydaktyczna i popularyzatorska

Doktor Jakubowski wykazuje istotną aktywność naukową w wielu uczelniach, instytucjach naukowych w kraju i na świecie. Odbił staże m.in. w: Uniwersytecie Szczecińskim;

JET, Culham, Wielka Brytania; General Atomics, San Diego, USA; National Institute for Fusion Science, Tokio, Japonia, gdzie wykonywał zarówno obowiązki dydaktyczne jak i prowadził badania. Jest promotorem pracy licencjackiej i magisterskiej oraz sprawował opiekę merytoryczną nad czterema pracami doktorskimi. Należy podkreślić zaangażowanie dr Jakubowskiego w popularyzację nauki, a przede wszystkim przybliżanie studentom, młodym badaczom i ogółowi społeczeństwa zagadnień syntezy termojądrowej. Wymienię tylko takie działania jak publikacja cyklu artykułów dla portalu i miesięcznika „Wszystko co najważniejsze” i opieka redakcyjna tegoż portalu, wywiady i udział w rozmowach popularyzujących naukę emitowanych w radiu, telewizji i Internecie np. *Nauka to Lubię*, *Piękno Nauki* i wiele innych. Za swoje działania i osiągnięcia naukowe został wyróżniony przez Uniwersytet Opolski jako Ambasador Uniwersytetu Opolskiego.

Wnioski końcowe

Dr Jakubowski jest w pełni samodzielnym i bardzo aktywnym fizykiem o bogatym dorobku naukowym. Przedstawione osiągnięcia stanowią znaczący wkład do rozwoju nauk fizycznych, a szczególnie do badań nad kontrolowaną syntezą termojądrową.

Podsumowując stwierdzam, że osiągnięcia naukowe Dr Marcina Jakubowskiego spełniają wymogi stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego, zgodnie z Ustawą *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r. i wnoszę o **dopuszczenie go do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego.**