



**NARODOWE
CENTRUM
BADAŃ
JĄDROWYCH**
ŚWIERK

prof. dr. hab. Mariusz P. Dąbrowski
Kierownik Zakładu Energetyki Jądrowej i Analiz Środowiska
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk
tel. 22 273 14 30

Mariusz.Dabrowski@ncbj.gov.pl

Otwock, 14.04.2026

***Ocena osiągnięcia naukowego pt.
„Wpływ trójwymiarowej struktury pola magnetycznego na transport w plazmie”
przedstawionego do postępowania habilitacyjnego oraz dorobku naukowego,
dydaktycznego i organizacyjnego dr Marcina Jakubowskiego***

I. Ocena osiągnięcia naukowego, o którym mowa w art. 219 ust. 1, pkt. 2 ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018.

Dr Marcin Jakubowski przedstawił jako osiągnięcie naukowe cykl trzynastu (H1-H13) publikacji dotyczących technologii fuzji jądrowej w zastosowaniu do urządzeń aktualnie działających lub mogących być skonstruowanymi w przyszłości. Jak bywa w przypadku prac przy dużych urządzeniach badawczych są to prace wieloautorskie. Szczególną rolę odgrywają prace z zespołem TEXTOR (Tokamak Experiment for Technology Oriented Research – Jülich 1982-2013), do których dr Jakubowski ma największy wkład i jest to uhonorowane w 5 pracach (H1-H4, H6), gdzie dr Jakubowski jest pierwszym autorem. Zresztą jest On pierwszym autorem w 10 spośród 13 przedstawionych prac, a w pozostałych trzech, znajduje się najdalej na 3 miejscu. Świadczy to o wiodącej roli habilitanta w prowadzonych badaniach, co potwierdzają także przedstawione oświadczenia współautorów przedmiotowych publikacji.

Korzystając z przedstawionych w autoreferacie danych, całkowita liczba cytowań (bez autocytowań) przedstawionego cyklu wyniosła 612, chociaż należy wziąć pod uwagę, iż jest to dorobek wieloautorski uzyskany przede wszystkim wraz z zespołem TEXTOR. Tutaj dr M. Jakubowski grał wiodącą rolę. Natomiast patrząc na całkowity dorobek dr M. Jakubowskiego, to jest on znacznie poważniejszy i obejmuje aż 192 publikacje cytowane prawie 6.500 razy z indeksem Hirscha $h=45$ głównie w czasopiśmie specjalistycznym „Nuclear Fusion”. Jednak biorąc pod uwagę liczbę współautorów i pozycję dra M. Jakubowskiego wśród nich, należy uznać Jego wkład do pozostałych prac za mniej znaczący, niż w przypadku prac przedstawionych do habilitacji.

Fuzja jądrowa jest przedmiotem wielu badań w nadziei na tańsze i mniej inwazyjne dla środowiska rozwiązanie problemu energetycznego ludzkości. Od wczesnych lat 60-tych XX wieku otrzymuje znaczne finansowanie ze strony licznych agencji rządowych i międzynarodowych. Chociaż jako fizyk wywodzący się ze środowisk oddziaływań fundamentalnych, a szczególnie teorii grawitacji, mam wciąż spore wątpliwości co do absolutnie sztucznego generowania procesów fuzyjnych

dzięki oddziaływaniu elektromagnetycznemu, a nie tak jak w naturze – oddziaływaniu grawitacyjnemu, to doceniam rolę tych badań jako jednej ze ścieżek odkryć i innowacji mogących przynieść wiele pośrednich korzyści na drodze do ambitnego celu, tak jak w przypadku rozwoju technologii kosmicznych. Bez wątplenia badania prowadzone przez stellarator Wandelstein-7X w Greifswaldzie i oczywiście projekt ITER mają takie znaczenie, chociaż jak uczy nas doświadczenie kilkudziesięciu lat, nie jest to jeszcze „ostatnia prosta” do budowy prawdziwie komercyjnego reaktora fuzyjnego.

Nie bacząc na te ogólne i nieco osobiste rozważania stwierdzam, iż rozprawa habilitacyjna dra M. Jakubowskiego wpisuje się w jak najbardziej główny nurt badań fuzyjnych odpowiadając na liczne wyzwania związane z dynamiką procesów w reaktorach fuzyjnych a w szczególności, wymogu bezpiecznego odprowadzania ciepła z obszaru plazmy.

Sedno badań dra M. Jakubowskiego ma ścisły związek z powszechnie stosowaną teorią układów dynamicznych a ściślej pojawianiem się tzw. rezonansów w takich układach. Zamknięte, koncentryczne powierzchnie magnetyczne w tokamakach i stellaratorach są charakteryzowane przez tzw. safety factor q (współczynnik bezpieczeństwa), który może przyjmować zarówno wymierne jak i niewymierne wartości. Jak to ma miejsce w układach dynamicznych (np. mgławice protoplanetrane), występowanie wymiernych wartości parametru q (szczególnie dla małych całkowitych modów pól poloidalnych m i toroidalnych n tworzących liczbę wymierną $q=m/n$) powoduje cykliczne (zamknięte pętle) wypełnienie powierzchni magnetycznej liniami sił pola magnetycznego, co nie ma miejsca dla q niewymiernego, przy którym linie sił wypełniają powierzchnie magnetyczne szczelnie. Konfiguracje z wymiernym q są bardzo czułe na działanie nawet niewielkich pól zakłócających. W wyniku tego działania powstają mody rezonansowe implikujące powstanie tzw. wysp magnetycznych istotnie wpływających na transport ciepła i cząstek w plazmie. To dalej powoduje znaczne zmiany podstawowych parametrów plazmy, takich jak temperatura, gęstość, czy też kluczowy dla zastosowań, współczynnik utrzymania energii. Natomiast nie ma problemu przy niewymiernych q , ponieważ wówczas linie sił pola szczelnie wypełniają powierzchnie magnetyczne (obszar ergodyczny).

Szczególnie istotnym obszarem dla odbioru ciepła okazuje się być warstwa krawędziowa plazmy, gdzie wyprodukowany hel (z reakcji $D + T = He + n$), po oddaniu ciepła powinien być szybko usuwany z reaktora w celu zapobieżenia zanieczyszczeniu gorącej plazmy. W tym celu stosuje się dywertory (odchylacze) umożliwiające utworzenie chłodniejszej plazmy blisko ściany reaktora i poprawiające odbiór ciepła. Szczególną rolę odgrywają dywertory ergodyczne spełniające warunek Chirikova, gwarantujący szczelne wypełnienie obszaru przez linie sił.

I tutaj zaczyna się wkład dra Jakubowskiego, który w pracy H1 obliczył pojawiające się struktury pola magnetycznego dla eksperymentu TEXTOR-DED (Dynamic Ergodic Divertor – Dynamiczny Dywertor Ergodyczny) poprzez zastosowanie klasycznych układów hamiltonowskich, gdzie linie sił pola magnetycznego stają się hamiltonowskimi trajektoriami. Metoda polegała na rozbiciu Hamiltonianu na pole równowagowe i pole zakłócające złożone z wielu komponentów rezonansowych. Pole zakłócające generuje powstanie wysp magnetycznych, które nakładają się na siebie. W przestrzeni fazowej pojawiają się obszary: chaotyczny, ergodyczny oraz laminarny, co widać na wykresach stosujących metodę cięć Poincaré'go. Szczególną rolę odgrywają obszary ergodyczne, bowiem tam są maksymalne strumienie ciepła i cząstek. Obszary laminarne od ergodycznych różnią się tym, iż w tych pierwszych długość linii sił pola magnetycznego pomiędzy

dwoma najbliższymi punktami przecięcia z elementami wewnętrznej ściany komory są mniejsze od tzw. długości Kołmogorova a dla ergodycznych jest odwrotnie.

Dr M. Jakubowski opracowany przez siebie model w oprogramowaniu ATLAS (stworzonym oryginalnie przez S.S. Abdullajewa), zweryfikował eksperymentalnie poprzez pomiary temperatury i strumienia ciepła w tokamaku TEXTOR. W pracy H2 wykonał obliczenia dla wprowadzonych 16 zaburzących obwodów cewek do tokamaka TEXTOR w celu „ergodyzacji” obszarów brzegowych. DED pracował przy stosunkach modów pól poloidalnych do toroidalnych $m/n = 12/4, 6/2, 3/1$. Podobnie w pracy H3 (a także H8) opublikowanej w Physical Review Letters badane były te same rezonanse z naciskiem położonym na uniknięcie zachowań chaotycznych i ergodyzację systemu powierzchni magnetycznych. Szczególną rolę odgrywają tutaj tzw. „palce”, które łączą strefę ergodyczną ze ścianami tokamaka. Podobnie w pracy H7, dla układu TEXTOR-DED (także opublikowanej w Physical Review Letters), badane były zagadnienia związane ze zmianami gęstości i ciśnienia plazmy w zależności od tego, jak jest odprowadzane ciepło. Badania tego typu były kontynuowane w pracy H4 i H5, gdzie koncentrowano się eksperymentalnie na powstawaniu wysp stabilności wokół punktów stałych w obszarze chaotycznym na krawędzi plazmy. Tutaj ważnym osiągnięciem było eksperymentalne potwierdzenie występowania obszaru chaotycznego w obszarze krawędzi tokamaka. Dodatkowym aspektem wykazanim w pracach H4 i H5 było wyjaśnienie mechanizmu wzrostu współczynnika utrzymania plazmy τ_p jako konsekwencji pojawienia się nowych struktur w rozkładzie strumienia ciepła na dywertorze, czyli rozszerzenia obszaru stochastycznego.

Praca H6 była poświęcona eksperymentom sprawdzającym dla transportu ciepła w obszarze stochastycznym plazmy brzegowej TEXTOR-DED jako funkcji kolizyjności plazmy. Jak się okazało, strumienie ciepła transportowane poprzez obszar ergodyczny w warunkach kolizyjnego transportu, przenoszą nawet dwa razy więcej ciepła niż jeśli transport jest bezkolizyjny. Poza tym okazało się, iż transport równoległy jest bardziej wydajny dla elektronów o większej prędkości ruchów termicznych.

Prace H9, H10 i H11 mają szczególne znaczenie dla bezpieczeństwa reaktora ITER, który ma pracować w trybie wysokiego utrzymania energii (tzw. mod H) powodującym duże obciążenie termiczne dywertora, które musi być wyeliminowane. W celu analizy zagrożeń dla ITERa, dr M. Jakubowski badał to zagadnienie na tokamaku DIII-D i wykazał, iż mody krawędziowe można wyeliminować za pomocą rezonansowych pól zakłócających (RMP – Resonant Magnetic Perturbations) z $n=3$ toroidalnym modem zakłócającym. Dr M. Jakubowski w pracy H9 skupił się na badaniu, jak pola zakłócające wpływają na rozkład ciepła transferowanego do dywertora za pomocą diagnostyki termograficznej. Chodzi o zminimalizowanie tzw. ELMu, czyli Zlokalizowanego Modu Krawędziowego (Edge Localized Mode), poprzez włączenie pola zakłócającego. Po wyeliminowaniu ELM, dr M. Jakubowski dokonał analizy strumieni ciepła do dywertora. Pokazał, iż dla małych wartości kolizyjności elektronowej strumień ciepła do dywertora jest nawet większy niż dla sytuacji bez zastosowania RMP. Te wyniki potwierdziły badania przeprowadzone wcześniej na tokamaku TEXTOR-DED. W tej pracy dr M. Jakubowski badał też rozkłady strumienia ciepła za pomocą dwóch systemów termograficznych dla wartości parametru q_{95} (obejmujący 95% strumienia magnetycznego plazmy) w zakresie od 3.5 do 4.4 (typowa wartość dla ITER to $q_{95} = 3$).

Praca H12 poświęcona jest analizie wpływu pól zakłócających na propagację plazmy w japońskim heliotronowym stellaratorze LHD (Large Helical Device). Tutaj pole było wytwarzane przez 10 cewek o modach $m/n = 1/1$ i $m/n = 2/1$. Dr Jakubowski wykonał obliczenia kodem KMAG dla różnych RMP wykazując na przykład zmniejszenie transportu radialnego dla pewnych wartości prądu w cewkach. Mierzył też współczynniki dyfuzji i konwekcji plazmy. Ciekawostką było znalezienie efektu histerezy wnikania pola magnetycznego w plazmę dzięki efektowi ekranowania.

W końcu, w pracy H13, dr M. Jakubowski przedstawił główne wyniki eksperymentów dywertorowych dla stellaratora Wendelstein 7-X dotyczące odprowadzania strumieni ciepła i cząstek bez konieczności generowania prądu plazmowego. Jest to konieczne dla zapewnienia ciągłej pracy reaktorów typu HELIAS (*Helical-Axis Advanced Stellarator*) z dywertorem wyspowym, który stanowi skuteczne narzędzie do kontroli odporowadzania ciepła i cząstek pomimo bardzo złożonej geometrii pola magnetycznego.

Jako podsumowanie pozwolę sobie wyliczyć jakie, według mnie, są **największe osiągnięcia** p. dra M. Jakubowskiego:

1. Zastosowanie metody hamiltonowskiej z polem zakłócającym do badania trajektorii linii pola magnetycznego na powierzchniach magnetycznych.
2. Eksperymentalne potwierdzenie istnienia obszarów chaotycznych na krawędzi tokamaka.
3. Dokładna analiza wpływu pól zakłócających na oddziaływanie niestabilności ELM ze ścianami dywertora.
4. Wykazanie kontrolowanego odprowadzania strumieni ciepła oraz cząstek w stellaratorach typu HELIAS, do których należy Wendelstein 7-X.

Reasumując, po dokonaniu powyższej analizy prac H1-H13, mogę stwierdzić, że dr M. Jakubowski ma przeważający wkład w przedstawionym do oceny osiągnięciu naukowym i wobec tego spełniony jest warunek formalny autorstwa tego osiągnięcia. Opisane osiągnięcie stanowi istotny wkład habilitanta w rozwój teorii fuzji jądrowej, co implikuje, iż może on służyć jako podstawa do nadania stopnia doktora habilitowanego.

Moje uwagi do przedstawionego dorobku naukowego oraz do jego prezentacji są następujące:

1. Rozumiem, iż dr M. Jakubowski przebywa od dłuższego czasu za granicą, ale jakość niektórych sformułowań lub słownictwa w wersji polskojęzycznej autoreferatu powinna być znacznie lepsza. Czasami trudno było mi zrozumieć główną ideę tekstów (urwane zdania, nieodpowiednie deklinacje itp.). Na przykład na str. 18 autoreferatu czytamy: „W pracy [H3] przeprowadziłem kilka eksperymentów, ...” co chyba powinno być: „W pracy [H3] OPISAŁEM kilka przeprowadzonych przeze mnie i zespół eksperymentów...”. Także po polsku piszemy „separatrySa” a nie „separatryca” itd. itp.
2. Na str. 20 autoreferatu mamy zdanie: „Otrzymane wyniki wykazały zgodność z OBSERWACJAMI eksperymentalnymi ...”, które raczej powinno brzmieć „...DANYMI eksperymentalnymi”. Obserwacje dotyczą zjawisk, które nie są generowane sztucznie przez urządzenia skonstruowane przez człowieka i nie są powtarzalne „na życzenie” (np. w astronomii, czy też w ekonomii).

3. W pracy H6, rozdział 3 pojawia się stwierdzenie, iż granica obszarów laminarnego i ergodycznego jest 3-wymiarowa. Zwykle granica obszarów 3-wymiarowych ma granicę 2-wymiarową chyba, że następuje „przeplatanie się” tych obszarów i granica/brzeg ma jakiś efektywny wymiar fraktalny zbliżony do objętościowego. W jakim sensie możemy tutaj mówić o 3-wymiarowej granicy obszarów?
4. W pracy H13 rozważane są wyładowania plazmowe o długości 100 sekund, podczas których można było zaobserwować odprowadzanie ciepła. Na ile ten czas może być wydłużony w świetle przeprowadzonych eksperymentów tak, aby można było myśleć o urealnieniu pracy „w trybie ciągłym” przyszłej przemysłowej elektrowni termojądrowej?

II. Ocena aktywności naukowej, o której mowa w art. 219 ust. 1, pkt. 2 ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018.

Kluczowym elementem aktywności naukowej dr M. Jakubowskiego były liczne staże zagraniczne. Pierwszym z nich były studia doktoranckie w Forschungszentrum Jülich w Niemczech (2001-4) zakończone doktoratem obronionym na Ruhr-Universität-Bochum. W Jülich dr M. Jakubowski kontynuował pracę jako postdok (2004-7) aby w końcu przenieść się do MPI w Greifswaldzie. Stamtąd odbył kilkumiesięczne staże w JET (Joint European Torus) w Wielkiej Brytanii; GA (General Atomics) w San Diego, USA; National Institute for Fusion Science w Japonii, Instytucie Fizyki Uniwersytetu Szczecińskiego (jako pracownik Max Planck IPP Greifswald) oraz Uniwersytecie Cagliari we Włoszech.

Zdobyte w trakcie tych staży kontakty, zaowocowały licznymi publikacjami oraz związanymi z nimi aktywnościami (np. opieka nad pracami magisterskimi, doktorskimi itp.), dając podstawę do znacznego poszerzenia kompetencji habilitanta w zakresie fizyki jądrowej. Zaowocowało to także wygłoszeniem kilkunastu referatów zaproszonych na konferencjach naukowych oraz ok. 20 regularnych referatów, bądź plakatów. Natomiast liczba referatów wygłoszonych przez innych współpracowników zespołów projektowych dr M. Jakubowskiego sięga kilkudziesięciu.

Dr Jakubowski był wykonawcą w 4 grantach europejskich związanych ze stellaratorem Wendelstein 7-X, w których pełnił też funkcje kierownika pakietu zadań lub przewodniczącego grupy badawczej.

Pan dr Jakubowski napisał do tej pory 27 recenzji do prestiżowych czasopism z listy A MNiSW, takich jak Physical Review Letters, Nuclear Fusion i Physics of Plasmas, co jest liczbą sporą, ale chyba jednak poniżej przeciętnej dla takiego etapu doświadczenia naukowego.

III. Charakterystyka dorobku dydaktycznego, organizacyjnego i popularyzatorskiego.

Dr M. Jakubowski posiada spory zakres doświadczenia dydaktycznego jak na pracownika instytutów badawczych. Prowadził wykłady na temat fizyki plazmy i syntezy termojądrowej oraz metod uczenia maszynowego w Uniwersytecie Greifswadzkim (Niemcy), Uniwersytecie Cagliari (Włochy) oraz Uniwersytecie Szczecińskim. Był opiekunem 4 doktorantów (2 w Technicznym Uniwersytecie w Monachium i 2 w Uniwersytecie Greifswadzkim), 1 magistranta i 1 licencjata (na Uniwersytecie Szczecińskim).

Dr M. Jakubowski nie zaniedbywał także obowiązków organizacyjnych będąc uczestnikiem komitetów organizacyjnych 4 konferencji naukowych. Jako przykład zaangażowania można podać, iż jest członkiem Rady Naukowej Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM) w Warszawie oraz udziela się jako przedstawiciel Unii Europejskiej z ramienia grupy badającej stellaratory.

Na uwagę zasługuje dorobek popularyzacyjny habilitanta. Napisał On 20 artykułów dla portalu i miesięcznika „Wszystko co najważniejsze” (lata 2014-20), prowadził kanał popularnonaukowy „Piękno nauki” na Twitterze (2010-20) oraz brał udział w rozmowach na kanale „Nauka To Lubię” Tomasza Rożka oraz w programie „Astrofaza” na kanale YouTube.

IV. Konkluzja

Osiągnięcie naukowe p. dr Marcina Jakubowskiego pt. „*Wpływ trójwymiarowej struktury pola magnetycznego na transport w plazmie*” stanowi istotny wkład w rozwój technologii fuzji jądrowej. Stwierdzam, że to osiągnięcie wraz z innymi osiągnięciami naukowymi, w połączeniu z całym dorobkiem dydaktycznym, organizacyjnym i popularyzatorskim spełnia wymogi ustawowe (art. 219 ust. 1, pkt. 2 i 3 ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dn. 20 lipca 2018) stawiane osobom ubiegającym się o stopień naukowy doktora habilitowanego.



