

dr hab. Katarzyna Słabkowska, prof. Uniwersytetu  
Katedra Chemii Kwantowej i Spektroskopii Atomowej  
Wydział Chemii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

## Recenzja pracy doktorskiej Pana mgra inż. Tomasza Fornala „Impurity behavior study in Wendelstein 7-X plasmas by the use of the C/O monitor system”

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska „Impurity behavior study in Wendelstein 7-X plasmas by the use of the C/O monitor system” mgra inż. Tomasza Fornala. Rozprawa została wykonana w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM) im. Sylwestra Kaliskiego w Warszawie pod kierunkiem: promotora z IFPiLM - dr hab. Moniki Kubkowskiej i promotora pomocniczego z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Opolskiego – dra Ireneusza Książka. 142-stronicowa praca doktorska została napisana w języku angielskim oraz podzielona jest na cztery ponumerowane rozdziały. Zawiera streszczenie w języku polskim i języku angielskim, motywację i zakres pracy, podsumowanie i perspektywy oraz bibliografię zawierającą 80 pozycji.

Głównym celem rozprawy doktorskiej mgra inż. Tomasza Fornala było zaprojektowanie systemu diagnostycznego monitorowania C/O i zastosowanie podejścia modelowego do przewidywania przyszłych sygnałów w oparciu o zmiany całkowitej zawartości zanieczyszczeń, kształtu profilu promieniowego oraz wahań temperatury elektronów ( $T_e$ ) i gęstości elektronów ( $n_e$ ) w plazmie. Głównymi zadaniami związanymi z realizacją pracy doktorskiej były: (1) zaprojektowanie kluczowych elementów systemu monitorowania C/O dla W7-X; (2) opracowanie kompleksowego kodu do szczegółowego odwzorowania geometrii systemu umożliwiającego symulacje potencjalnych sygnałów z uwzględnieniem geometrii obserwowanej objętości plazmy, parametrów kinetycznych plazmy ( $T_e$ ,  $n_e$ ) oraz przestrzennego rozkładu lekkich zanieczyszczeń plazmy takich jak



węgiel, tlen, azot i bor w stellaratorze Wendelstein 7-X; (3) przeprowadzenie badań jakościowych wpływu temperatury elektronów, gęstości elektronowej i kształtów profili zanieczyszczeń (przy założeniu ich stałego poziomu w plazmie) na intensywność wypromieniowanych fotonów w pozycjach detektorów; (4) wykonanie studium przypadku dla próbki wyładowania plazmowego, w którym zaobserwowano akumulację węgla w centrum plazmy. Uzyskane wyniki miały zostać następnie porównane z przypadkiem jednolitego („płaskiego”) profilu zanieczyszczeń. Takie samo podejście zastosowano także do badania linii tlenu.

W rozdziale pierwszym autor rozprawy opisuje ogólne zagadnienia dotyczące plazmy, proces fuzji termojądrowej oraz jak przeprowadzić fuzję termojądrową w warunkach ziemskich. Omawia warunki zapłonu oraz wymienia najbardziej energetycznie wydajne reakcje syntezy termojądrowej wraz ze związanymi z nimi ograniczeniami, aby następnie wprowadzić czytelnika w tematykę urządzeń umożliwiających przeprowadzenie kontrolowanej reakcji fuzji termojądrowej w środowisku plazmy. Przedstawia tutaj podobieństwa oraz różnice między tokamakami a stellaratorami, ze szczególnym uwzględnieniem stellaratora Wendelstein 7-X. W dalszej części rozdziału doktorant omawia rolę zanieczyszczeń w plazmie stellaratora; elementarne procesy takie jak jonizacja, czy rekombinacja oraz procesy radiacyjne zachodzące w plazmie. W kolejnym kroku autor przedstawia modele równowagi jonizacyjnej: model równowagi termodynamicznej, model równowagi koronowej i model kolizyjno-radiacyjny, a także omawia współczynniki emisyjności fotonów (tzw. PECi) oraz podstawy modelowania transportu zanieczyszczeń.

Zagadnienia zawarte w rozdziale pierwszym przedstawiono w sposób bardzo przejrzysty. Opis pojęć związanych z fuzją termojądrową, tokamakami, stellaratorami oraz modelami równowagi jonizacyjnej jest zwięzły i wyczerpujący. Na podkreślenie zasługuje fakt, że wyjątkowo staranna prezentacja graficzna bardzo ułatwia czytelnikowi zrozumienie treści zawartej w tym rozdziale.

Rozdział drugi dotyczy spektrometru XUV dedykowanego do badania pierwiastków o niskiej liczbie atomowej  $Z$  występujących w plazmie generowanej na stellaratorze Wendelstein 7-X. Autor przedstawia w nim charakterystykę systemu monitorowania C/O wraz ze szczegółowym opisem jego komponentów. Ponadto omawia wymogi jakie powinny spełniać detektory dla właściwej obserwacji H-podobnych jonów B, C, N i O.



Bardzo dobrze został opisany rozdział z doбором detektora biorąc pod uwagę obserwowany szczególny zakres długości fali - na pograniczu UV i X. Doktorant wskazuje, że w początkowej fazie uruchomienia systemu C/O monitor zastosowana zostanie kamera CCD, jednak w późniejszej fazie, w szczególności dla plazmy deuterowej, rozważany będzie detektor gazowy. Autor wykazuje się dużą wiedzą i znajomością szczegółów technicznych związanych z konfiguracją spektrometru XUV, co świadczy o bardzo dobrej znajomości strony eksperymentalnej przez autora rozprawy doktorskiej.

W rozdziale trzecim doktorant przechodzi do zasadniczej części rozprawy, czyli przedstawienia dedykowanego kodu numerycznego. Dostarcza on wyników w zależności od danych warunków eksperymentalnych oraz daje możliwość porównania wyników eksperymentalnych z założeniami teoretycznymi. Kod ten podzielony jest na trzy główne moduły. Moduł pierwszy „geometria i śledzenie promieni”, który reprezentuje podstawową geometrię systemu i wykonuje obliczenia śledzenia promieni. Moduł drugi „odczyt  $r_{\text{eff}}$ ”, który pozwala na obliczenie efektywnego promienia (przy użyciu kodu VMEC) każdego dyskretnego punktu reprezentującego rozważaną objętość plazmy. Moduł trzeci „emisyjność”, umożliwia on obliczenie emisyjności każdego dyskretnego punktu plazmy reprezentowanego przez wartości  $r_{\text{eff}}$  i całkuje sygnał w obserwowanej objętości przez każdy kanał energetyczny oddzielnie.

Mgr inż. Fornal wyjaśnia, że każdy z tych modułów przeznaczony jest do rozwiązania innego zadania. Ponadto, aby przeprowadzić dokładne badania numeryczne należy powyższe moduły wykorzystać w przedstawionej kolejności. Autor również wspomina, że możliwe jest także samodzielne wykonanie określonych operacji, jeśli zostaną podane odpowiednie dane wejściowe.

Rozdział czwarty dotyczy badania wpływu profili kinetycznych i profili zanieczyszczeń na intensywność mierzonych fotonów za pomocą systemu monitorującego C/O. Na samym wstępie tego rozdziału doktorant przedstawia opis procedury obliczeniowej wykorzystanej do przeprowadzenia symulacji. Głównymi czynnikami brany pod uwagę były parametry kinetyczne ( $n_e$  i  $T_e$ ) oraz rozkłady promieniowego profilu zanieczyszczeń („szczytowe” i „płaskie”). Obliczenia zostały poparte zastosowaniem kodu pySTRAHL, który został wykorzystany do obliczenia transportu promieniowego i emisji zanieczyszczeń w plazmie. Był to punkt wyjścia do określenia danych wejściowych (ułamkowych obfitości) wykorzystywanych przez dedykowany kod monitora C/O do obliczenia emisyjności



promieniowej odpowiednich przejść. Z uzyskanych przez doktoranta wyników można zauważyć, że intensywności wypromieniowanych fotonów rozważanych przejść Lyman- $\alpha$  są bardzo wrażliwe na temperaturę elektronową na jej niskich poziomach ( $T_e < 500$  eV). Ponadto, analiza wyników wykazała, że wszystkie kanały energetyczne systemu monitorowania C/O będą bardzo wrażliwe na  $T_e$ . Ma to kluczowe znaczenie, zwłaszcza na krawędzi plazmy, gdzie  $T_e$  są najniższe, co prowadzi do silniejszej emisji rozważanych linii widmowych. Udowodniono także, że potencjalna akumulacja zanieczyszczeń zachodząca w określonych warunkach plazmy (np. grzanie NBI i silne podsycanie peletami) może prowadzić do zmniejszenia strumienia fotonów na powierzchniach detektorów (o ok. 50%), mimo że całkowita ilość zanieczyszczeń pozostaje stała. Opisane wyniki pozwalają stwierdzić, że system monitorowania C/O będzie odpowiednim narzędziem zdolnym do dostarczania ważnych informacji w czasie rzeczywistym na temat składu lekkich zanieczyszczeń w plazmie W7-X. Co więcej, jest to również obiecujące urządzenie w kontekście przyszłych operacji W7-X i może stać się kluczowe z punktu widzenia operacyjnego i bezpieczeństwa. Należy podkreślić, że wyniki uzyskane przez autora świadczą nie tylko o biegłości w prowadzeniu zaawansowanych obliczeń numerycznych, ale również o wiedzy i intuicji fizycznej.

Rozprawa doktorska nie jest wolna od drobnych usterek i błędów redakcyjnych, np. w wielu miejscach po równaniach brakuje przecinków lub kropek. W Tab. 2.1 jest błąd w opisie elementów dyspersyjnych - w pierwszej kolumnie w 6 wierszu powinno być chyba „dispersive element”. W ramach pracy mgr inż. Fornal przeprowadził szeroką analizę wpływu parametrów kinetycznych plazmy na rejestrowane przez diagnostykę sygnały. Ma to znaczenie dla interpretacji wyników, ponieważ nie każdy wzrost intensywności mierzonego sygnału musi świadczyć o wzroście koncentracji zanieczyszczeń w plazmie. Oczywiście największy wpływ na rejestrowane sygnały ma plazma przybrzegowa, jako że H-podobne jony lekkich domieszek występują głównie w temperaturach poniżej 1 keV, co pokazuje chociażby Rys. 3.8 w pracy doktorskiej (uwzględniając transport zanieczyszczeń,  $C^{5+}$  występuje w plazmie poniżej 700 eV). Opisując równanie 33 dobrze byłoby dodać referencję do bazy danych ADAS, skąd brane są wartości współczynników PEC, tym bardziej, że ta pozycja jest w literaturze [42]. Na stronie 85 napisane jest „For plasma located at  $\rho > 1$  the model cannot perform reliable calculations.” - proszę wyjaśnić, dlaczego model nie jest właściwy dla plazmy poza ostatnią zamkniętą powłoką magnetyczną, jaki jest tego powód? Przedstawiając rysunki z kolor-mapami np. Rys.



4.8, 4.17, 4.20 dla różnych elementów dobrze byłoby zachować skalę, aby lepiej zobrazować różnice.

Jednakże, przedstawione powyżej uwagi nie pomniejszają mojej pozytywnej opinii o rozprawie, a w szczególności wysokiej oceny wartości naukowej zaprezentowanych w niej wyników. Przeprowadzona analiza jakościowa pokazała, że system monitorowania lekkich zanieczyszczeń w plazmie W7-X będzie bardziej czuły na zmiany temperatury niż koncentracji elektronowej, niemniej jednak nie zawsze wzrost sygnału związany będzie ze wzrostem ilości zanieczyszczenia w plazmie. Fizyka zachowania się zanieczyszczeń w plazmie, w szczególności w tak skomplikowanym urządzeniu jakim jest stellarator jest bardzo trudna. Niemniej jednak doktorant bardzo dobrze poradził sobie z uwzględnieniem różnych parametrów na wielkości mierzonych sygnałów. W podsumowaniu bardzo obszernie dokonał przeglądu różnych czynników i jawnie wskazał, że podczas interpretacji wyników należy wziąć je pod uwagę. Na uwagę zasługuje fakt, że praca doktorska mgr inż. Fornala została oparta o 4 artykuły opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych, które zostały zebrane w sekcji Motywacja i zakres pracy (Motivation and scope of the work). Chciałabym także podkreślić, że doktorant uczestniczył od samego początku w pracach koncepcyjnych nad diagnostyką, tworzył ją w oprogramowaniu CATIA, brał udział w ustawieniach poszczególnych komponentów i ich testach, a z drugiej strony stworzył narzędzie do symulacji sygnałów uzyskiwanych przez system, aby w momencie uruchomienia mieć podstawy do interpretacji mierzonych sygnałów.

Chciałabym również zauważyć, że uzyskane wyniki mają fundamentalne znaczenie w dziedzinie badań nad kontrolowaną syntezą termojądrową i stanowią istotny wkład w rozumienie fizyki plazmy. Przyczyniają się także do opracowania scenariuszy operacyjnych przyszłych urządzeń fuzyjnych, w celu wytworzenia dodatniego bilansu energetycznego. Modelowanie plazmy stanowi nieodzowny element w projektowaniu przyszłych przemysłowych reaktorów fuzyjnych, które mają zapewnić niewyczerpalne oraz bezpieczne źródło energii dla całej ludzkości.

Problemy do dyskusji na obronie mogą dotyczyć.

1. Czy uwzględniony w układzie kolimator będzie używany podczas pomiaru, tzn. czy jego szerokość będzie zmieniana w zależności od warunków eksperymentu?
2. Dlaczego od razu nie rozważono detektora gazowego i jak zmieni się ewentualna geometria układu, jeśli zastosuje się detektor gazowy?

3. W rozdziale 4.3 doktorant przeprowadza analizę na podstawie eksperymentalnych danych o ilości węgla w plazmie. Rozważania są również przeprowadzone dla tlenu, jednak biorąc pod uwagę dane dla węgla. Jakie są wartości koncentracji zanieczyszczeń w plazmie W7-X obserwowane do tej pory? Czy założone wartości dla tlenu są realne i rzeczywiście mogą mieć miejsce w plazmie W7-X?

Podsumowując, w mojej opinii rozprawa doktorska mgra inż. Tomasza Fornala spełnia warunki określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (z późn. zm.) i w związku z tym, wnoszę o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

  
dr hab. Katarzyna Stabkowska, prof. UMK