

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

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Natalii Wendler
„Badania plazmy przy użyciu systemu diagnostycznego PHA na
stellaratorze Wendelstein 7-X”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska „Badania plazmy przy użyciu systemu diagnostycznego PHA na stellaratorze Wendelstein 7-X” mgr inż. Natalii Wendler wykonana pod kierunkiem promotora dr hab. Romana Zagórskiego, prof. NCBJ oraz promotora pomocniczego dr Moniki Kubkowskiej. 144-stronicowa rozprawa, podzielona jest na osiem ponumerowanych rozdziałów, w skład których wchodzi również wprowadzenie, podsumowanie oraz bibliografia licząca 63 pozycje.

Pani mgr inż. Natalia Wendler uczestniczyła w uruchomieniu i przetestowaniu dedykowanego układu diagnostycznego PHA w warunkach działania stellaratora Wendelstein 7-X (W7-X), a także brała udział w obsłudze tego układu diagnostycznego podczas licznych sesji eksperymentalnych przeprowadzonych na stellaratorze W7-X w Greifswaldzie, w Niemczech. Badania na stellaratorze W7-X wpisują się w program wspierający międzynarodowy projekt badawczy ITER ("Droga" po Łacinie), jest to największy na świecie tokamak kolejnej generacji obecnie budowany w Cadarache we Francji.

Celem rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Wendler było potwierdzenie, że profile koncentracji i temperatury elektronowej (n_e i T_e), wpływają na średnią temperaturę elektronową $\langle T_e \rangle$, wyznaczaną z widm miękkiego promieniowania rentgenowskiego (ang.

soft X-ray - SXR), zarejestrowanych przez układ diagnostyczny PHA, zainstalowany na stellaratorze Wendelstein 7-X. Badania te miały wyjaśnić jak bardzo paraboliczny bądź liniowy kształt profili T_e i n_e oraz centralne i brzegowe wartości graniczne, przez które są one zdefiniowane, wpływają na zakres promienia plazmy (r), z którego promieniowanie ma decydujący wpływ na wyznaczaną średnią temperaturę elektronową $\langle T_e \rangle$.

W rozdziale pierwszym autorka rozprawy wprowadza czytelnika w tematykę pracy doktorskiej, następnie przechodzi do opisu syntezy termojądrowej, wymienia najbardziej użyteczne reakcje na produkcję energii w reaktorach termojądrowych, przedstawia warunki konieczne do realizacji syntezy termojądrowej w kontekście stworzenia nowego źródła energii, aby następnie omówić główne kierunki badawcze syntezy termojądrowej. Na końcu rozdziału autorka prezentuje motywację, cele, tezę rozprawy oraz przedstawia swoje publikacje naukowe związane z tematyką rozprawy jak i swoje publikacje naukowe, których wyniki posłużyły przygotowaniu niniejszej rozprawy doktorskiej. Uważam, że umieszczenie motywacji, celów i tezy pracy pod koniec rozdziału pierwszego jest dla mnie nietrafione. Lepiej byłoby przenieść ten podrozdział na początek rozdziału pierwszego lub umieścić motywację, cele i tezę pracy w samym wprowadzeniu.

Rozdział drugi poświęcony jest eksperymentalnym reaktorom termojądrowym. Autorka przedstawia w nim podobieństwa i różnice między dwoma rodzajami reaktorów: tokamakiem oraz stellaratorem. W kolejnym kroku przechodzi do zwięzłego opisu międzynarodowego projektu ITER, konstrukcji reaktora oraz planowanych osiągnięć. Następnie szczegółowo opisuje stellarator W7-X, tj. urządzenie, na którym prowadziła badania przedstawione w recenzowanej rozprawie doktorskiej. W7-X jest aktualnie największym i najbardziej zaawansowanym eksperymentalnym reaktorem termojądrowym typu stellarator na świecie. Głównym celem W7-X jest stabilna i ciągła praca urządzenia, która umożliwi długie (nawet do 30 min) utrzymanie wodorowej i deuterowej plazmy. Niewątpliwe zalety zoptymalizowanego stellaratora, którymi są brak poważnych zaburzeń sznura plazmowego oraz brak konieczności wzbudzania prądu sprawiają, że może być on rozważany w kontekście przyszłych elektrowni termojądrowych. Ponadto, w tym samym rozdziale autorka opisuje kampanie eksperymentalne na W7-X w konfiguracjach limiterowej oraz dywertorowej.

Rozdział trzeci zawiera zasadniczą część rozprawy, czyli opis układu spektroskopii bezdyspersyjnej z zastosowaniem analizy amplitudowej impulsów z chłodzonego detektora

półprzewodnikowego pracującego w reżymie zliczania kwantów promieniowania rentgenowskiego (metoda PHA, ang. Pulse Height Analysis). System ten został zainstalowany na porcie diagnostycznym W7-X, a jego głównym zadaniem była rejestracja SXR w szerokim zakresie energetycznym, który umożliwi uzyskanie widm pochodzących od lekkich jak i cięższych jonów zanieczyszczeń plazmy. Diagnostyka PHA stanowi część grupy systemów, których zadaniem jest badanie i monitorowanie zanieczyszczeń plazmy pochodzących z jej centrum. Ponadto autorka rozprawy opisuje w tym rozdziale testy laboratoryjne umożliwiające dobór odpowiednich detektorów półprzewodnikowych, które miały umożliwić wydajną i efektywną pracę systemu PHA, a także najważniejsze wnioski z uruchomienia diagnostyki PHA podczas kampanii eksperymentalnej OP1.1.

Rozdział czwarty zawiera opis promieniowania rentgenowskiego w kontekście informacji jakie dostarcza układ diagnostyczny PHA. Mgr inż. Natalia Wendler opisuje tu między innymi lampę rentgenowską, promieniowanie rentgenowskie o charakterze ciągłym i liniowym wraz ze schematem powstawania promieniowania rentgenowskiego charakterystycznego dla wybranych linii z serii widmowej K. Autorka stwierdza, że detekcja promieniowania charakterystycznego, która umożliwi identyfikację zanieczyszczeń plazmy, stanowi jedno z ważniejszych zadań diagnostyki PHA. To sprawia, że możliwa staje się kontrola niepożądanych pierwiastków podczas reakcji syntezy termojądrowej, a w konsekwencji, projektowanie scenariuszy plazmy, generujących niewielką ilość zanieczyszczeń. Ponadto, rejestracja linii charakterystycznych danych pierwiastków w szerokim zakresie energetycznym, daje możliwość czynnego udziału systemu PHA w badaniach nad transportem zanieczyszczeń. Podoba mi się ten zwięzły opis promieniowania rentgenowskiego oraz jego potencjalnego wykorzystania przez układ diagnostyczny PHA.

W rozdziale piątym przedstawiono badania dotyczące wpływu profili koncentracji i temperatury elektronowej na wyznaczaną średnią temperaturę elektronową $\langle T_e \rangle$, w oparciu o widma PHA. Mgr inż. Natalia Wendler przedstawiła szczegółowy opis metody wyznaczenia średniej temperatury elektronowej $\langle T_e \rangle$, przy użyciu danych dostarczanych przez system PHA. Metoda ta bazuje na eksponentialnej zależności opisującej promieniowanie hamowania, którego intensywność definiuje się jako moc wypromieniowaną przez konkretny element z danej objętości plazmy do konkretnego przedziału energetycznego. Autorka zwraca tu słusznie uwagę na bardzo ważną cechę, otóż widmo otrzymane dzięki układowi PHA jest rejestrowane wzdłuż linii patrzenia danego

detektora. Oznacza to, że końcowe spektrum składa się z wielu nałożonych na siebie widm, pochodzących z różnych rejonów plazmy, o różnych wartościach koncentracji i temperatury elektronowej. Następnie autorka rozprawy przedstawia wyniki swoich badań dotyczące wpływu uśrednionego temperaturowo współczynnika Gaunta (G_{ff}) na wyznaczanie $\langle T_e \rangle$. Jako narzędzie do wyznaczania parametru G_{ff} wykorzystano program RayX.exe. Autorce udało się stwierdzić, że w przypadku plazmy wodorowej, jak i helowej parametr G_{ff} zmienia się najmocniej dla energii w zakresie od 1 keV do 5 keV. Co sprawia, że rejon ten jest niewłaściwy dla zastosowania omawianej wyżej metody wyznaczania $\langle T_e \rangle$. Jednakże dla energii powyżej 5 keV jego wartość zaczyna się już stabilizować. Dodatkowo, doktorantka w tym samym rozdziale porównała przebiegi czasowe $\langle T_e \rangle$ otrzymanej w oparciu o widma z PHA z rezultatami uzyskanymi z systemów Thomson Scattering (TS) i Electron Cyclotron Emission (ECE) dla określonych warunków eksperymentalnych. Zaprezentowane wyniki pokazały, że układ PHA, doskonale się sprawdza także podczas wyznaczania przebiegów $\langle T_e \rangle$ w czasie. Natomiast, trendy zmian $\langle T_e \rangle$ są całkowicie zgodne z trendami, które powstają na bazie wyników z układów TS, czy ECE.

W rozdziale szóstym mgr inż. Natalia Wendler przebadala wpływ profili koncentracji i temperatury elektronowej na wyznaczaną średnią temperaturę elektronową $\langle T_e \rangle$, za pomocą wykonanych przez siebie symulacji. Zastosowała do tego celu wspomniany wyżej program RayX.exe. Program ten generuje widma SXR, jakich należy oczekiwać z diagnostyki PHA, w którą jest wyposażony stellarator W7-X. W swoich obliczeniach autorka uwzględniła trzy mechanizmy emisji SXR, najbardziej wpływające na zebrane widmo, tj. emisję promieniowania free-free (Bremsstrahlung, w ramach promieniowania ciągłego), emisję promieniowania free-bound (promieniowanie rekombinacyjne w ramach promieniowania ciągłego) oraz emisję promieniowania bound-bound (promieniowanie charakterystyczne). Badane przypadki podzielono na dwie grupy. Pierwsza z nich zakładała paraboliczne profile koncentracji i temperatury elektronowej definiujące eksperyment. Natomiast druga grupa zakładała liniowy charakter profili koncentracji i temperatury elektronowej. W analizie związanej z odstępstwem $\langle T_e \rangle$ od T_{e0} (centralna, maksymalna temperatura elektronowa) autorka stwierdziła, że niezależnie od kształtu zadanych profili liniowych, czy też parabolicznych, tendencje zmian, a więc i analiza jakościowa danego zjawiska pozostaje taka sama dla obu grup. Odróżnia je jedynie stopień odstępstwa, wynoszący około 10 punktów procentowych. W kolejnym etapie przeprowadzonych badań mgr inż. Natalia Wendler porównała wyniki uzyskane z symulacji

z wynikami eksperymentalnymi. Otrzymane rezultaty z symulacji są zgodne z wynikami eksperymentalnymi, pokazując ponownie silny związek między wzrostem T_{e0} , a wyznaczaną $\langle T_e \rangle$. Co więcej w rozdziale szóstym, przebadano także wpływ wartości temperatury centralnej T_{e0} na górną granicę promienia plazmy (r), która jest ważna z punktu widzenia wyznaczania temperatury z widma PHA. Uzyskane wyniki świadczą o silnej zależności między centralną temperaturą elektronową, a parametrem r , który razem z parametrem r_0 będzie definiować zakres, z którego promieniowanie będzie miało kluczowy wpływ na wyznaczaną średnią temperaturę elektronową. Rozdział ten przeczytałam z wielką przyjemnością, uważam, że został napisany spójnie, a zebranie i przeanalizowanie uzyskanych wyników z tak dużej ilości symulacji uważam za pomocne i wartościowe.

Rozprawa nie jest wolna od drobnych usterek i błędów redakcyjnych. W wielu miejscach, po równaniach brakuje przecinków lub kropek. Na stronie 15, opisując cykle zachodzące w gwiazdach, doktorantka napisała: „Pierwszy z nich, charakterystyczny dla gwiazd średnich rozmiarów, w których temperatura w ich wnętrzu wynosi od kilku do kilkunastu stopni Kelwina, nosi nazwę cyklu protonowo – protonowego Bethego (pp) [2]”. Do opisu wdał się błąd, powinno być „...od kilku do kilkunastu milionów stopni Kelwina...”. Brak cytowania rysunku 2. Na stronie 38 powinno być „Strumień ciepła, który będzie kierowany na niektóre fragmenty divertora może maksymalnie osiągać wartość 20 MW/m²”, a nie 20MWm². Ponadto rysunek 4 prezentujący iloczyn potrójny w funkcji czasu uzyskany dla różnych urządzeń fuzyjnych, kończy się na roku 2005, warto byłoby pokazać aktualniejsze dane w przedstawionej mi do recenzji pracy doktorskiej (z 2020 roku). W rozdziale 2.3.2 porównując dwa wyładowania, przed i po boronizacji W7-X, dobrze byłoby zastosować tę samą skalę, co lepiej prezentowałoby różnice. W rozdziale 3.1 dedykowanym testom laboratoryjnym systemu PHA, napisane jest „...najważniejszym elementem całego układu jest flansa z detektorami przeznaczona do zbierania widm z zakresu miękkiego promieniowania rentgenowskiego.” Jest to niezręczne stwierdzenie, jako że to detektory są tym istotnym elementem układu, a nie flansa, na której są zamontowane. Rysunek 39 schematycznie przedstawia komponenty promieniowania obserwowanego przez diagnostykę PHA wraz z informacjami jakie może ono dostarczyć po głębszej analizie. W opisie samego systemu wspomniane było wcześniej, że analiza widma PHA może również dostarczyć wiedzy na temat średniego efektywnego ładunku plazmy, niestety zabrakło tej informacji na rysunku 39. W którym miejscu znalazłby się ten parametr

na schemacie? W rozdziale 6.3, na stronie 106 autorka popełniła błąd pisząc „...dopasowania prostej do promienia bremsstrahlung opisanej w...”, powinno być promieniowania Bremsstrahlung. Ewolucję czasową średniej temperatury elektronowej wyznaczonej z widm PHA wraz z temperaturą centralną wyznaczoną przez system TS przedstawiają rysunki 48-55, zawierają one słupki błędów. Jednakże, doktorantka nie napisała w jaki sposób zostały wyznaczone te błędy. Na rysunkach 70-94 brakuje jednostek. Ponadto, przegląd literaturowy jest zbyt mało obszerny, uważam iż dobrze byłaby widziana bogatsza bibliografia.

Jednakże, przedstawione powyżej zastrzeżenia nie pomniejszają mojej pozytywnej opinii o rozprawie. Autorka rozprawy uczestniczyła w testach laboratoryjnych układu PHA analizując detektory służące między innymi do badania plazmy. Brała udział w kalibracji energetycznej układu PHA podczas testów laboratoryjnych diagnostyki, jak i kampanii eksperymentalnej OP1.1. Uczestniczyła w uruchomieniu i przetestowaniu dedykowanego układu diagnostycznego PHA w warunkach działania stellaratora W7-X, a także brała udział w obsłudze tego układu podczas sesji eksperymentalnych. Opracowała kod numeryczny, w środowisku MATLAB, służący do wyznaczania średniej temperatury elektronowej $\langle T_e \rangle$ z widm rejestrowanych przez układ PHA. Dodatkowo przebadła wpływ temperaturowo uśrednionego współczynnika Gaunta na wyznaczaną $\langle T_e \rangle$ i określiła zakres energetyczny widma, w jakim współczynnik G_{ff} przyjmuje porównywalne wartości liczbowe i w związku z tym jest polecany do dalszej analizy, aby wyznaczyć $\langle T_e \rangle$, w ramach metody opisanej w rozprawie doktorskiej. Mgr inż. Natalia Wendler wykonała ponadto ponad 800 symulacji numerycznych, w oparciu o wcześniej zdefiniowane kombinacje profili n_e i T_e , umożliwiające wyprodukowanie widm SXR. W kolejnym kroku sporządziła na ich podstawie trójwymiarowe powierzchnie przedstawiające odstępstwo średniej temperatury elektronowej $\langle T_e \rangle$ liczonej (wyznaczonej) z widma zasymulowanego od centralnej temperatury elektronowej T_{e0} zadanej (wyznaczonej) do symulacji. Co więcej, określiła zależności zmiany górnej granicy promienia plazmy, która razem z dolną granicą, wyznaczać będzie zakres promienia, o decydującym wpływie promieniowania na ustaloną $\langle T_e \rangle$. Porównała także wyniki bazujące na symulacjach numerycznych z wynikami eksperymentalnymi i potwierdziła ich zgodność. Należy zauważyć, że wyniki uzyskane przez autorkę świadczą o dużej aktywności naukowej oraz o biegłości w prowadzeniu obliczeń numerycznych.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że wyniki badań, w których brała udział mgr inż. Natalia Wendler, przedstawione zostały w siedmiu wieloautorskich publikacjach z listy

filadelfijskiej. Ponadto, część z nich prezentowana była także na konferencjach międzynarodowych. Chciałabym również zwrócić uwagę, że uzyskane wyniki, pionierskie w swoim charakterze, mają fundamentalne znaczenie w dziedzinie badań nad kontrolowaną fuzją termojądrową i stanowią znaczący wkład w rozumienie fizyki plazmy. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że globalne zapotrzebowanie na energię cały czas się zwiększa, a więc potrzeba nowych źródeł energii nigdy nie była bardziej nagła. Dlatego też wiedza uzyskana w wyniku szeroko zakrojonych międzynarodowych badań nad rozwojem przyszłych urządzeń fuzyjnych jest kluczowa, aby zapewnić bezpieczne źródło energii dla całej ludzkości.

Problemy do dyskusji na obronie mogą dotyczyć charakterystyki napisanego przez kandydatkę oprogramowania oraz programu RayX.exe.

Podsumowując, w mojej opinii rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Wendler spełnia warunki określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 roku (z późn. zm.) i w związku z tym, wnoszę o dopuszczenie kandydatki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.


dr hab. Katarzyna Stabkowska, prof. UMK