



Otwock-Świerk 8.09.2020 r.

Dr hab. Jacek Rzadkiewicz
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk

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

Praca doktorska mgr inż. Natalii Wendler „Badania plazmy przy użyciu systemu diagnostycznego PHA na stellaratorze Wendelstein 7-X” została wykonana w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy pod kierunkiem promotora dra hab. Romana Zagórskiego oraz pod kierunkiem promotora pomocniczego dr. Moniki Kubkowskiej. Rozprawa doktorska dotyczy badania plazmy wytwarzanej na stellaratorze Wendelstein 7-X przy użyciu systemu diagnostycznego opartego na układzie spektroskopii rentgenowskiej z zastosowaniem analizy amplitudowej danych rejestrowanych przez detektory półprzewodnikowe pracujące w reżimie zliczania kwantów promieniowania rentgenowskiego (*ang. pulse height analysis, PHA*). Rozprawa ma formę opracowania liczącego 144 strony, podzielonego na siedem rozdziałów i spis literatury zawierający odniesienia do 63 pozycji bibliografii. Praca zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim.

Rozdział pierwszy stanowi ogólne wprowadzenie, w którym przedstawiono motywację do badań nad zastosowaniem plazmy wysokotemperaturowej jako bezemisyjnego źródła energii oraz główne kierunki badawcze w tym obszarze. Ponadto w rozdziale przedstawiona została charakterystyka syntezy jądrowej, jak również warunki konieczne do zajścia syntezy termojądrowej w kontekście projektowania nowych źródeł energii. Doktorantka przedstawia zależność tzw. iloczynu potrójnego (iloczyn gęstości i temperatury elektronowej oraz czasu utrzymania plazmy) w funkcji czasu (kolejnych lat rozwoju technologii fuzyjnych) dla wybranych urządzeń fuzyjnych (Rys. 4). Wskazane byłoby przywołanie niniejszego iloczynu dla urządzenia W 7-X, któremu poświęcona jest przedstawiona praca. Rozdział pierwszy kończy się sformułowaniem tezy badawczej o znaczącym wpływie profili temperatury i koncentracji elektronowej na wyznaczaną średnią temperaturę elektronową metodą dopasowania do widma ciągłego w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego oraz przedstawieniem celów badawczych.

W rozdziale drugim omówiono podstawowe różnice pomiędzy eksperymentalnymi reaktorami termojądrowymi typu tokamak i stellarator. Na przykładzie największych i najbardziej zaawansowanych obecnie konstrukcji badawczych reaktorów termojądrowych ITER (budowany obecnie w Cadarache we Francji) oraz W7-X (znajdujący się w Instytucie Maxa Plancka w Greifswaldzie w Niemczech) przedstawiono wady i zalety technologiczne oraz te związane z fizycznymi aspektami utrzymania i kontrolowania plazmy wysokotemperaturowej. W rozdziale przedstawiono również pierwsze wyniki uzyskane na stellaratorze W7-X pracującym w konfiguracji limiterowej i divertorowej. W jednej ze swych konkluzji Doktorantka stwierdza, że "Wyniki uzyskane w trakcie OP1.1. potwierdziły również przydatność W7-X w kontekście przygotowań do eksperymentów na ITER. To z kolei będzie możliwe nie tylko z uwagi na osiągnięte na W7-X rezultaty, ale i ze względu na fakt, że oba urządzenia mają mieć podobne długości wyładowań i wartości strumieni ciepłych deponowanych na komponentach elementów wewnętrznych urządzenia." Pożądane w tym miejscu wydaje się przywołanie wartości liczbowych dotyczących długości

wyładowań i wartości strumieni ciepłych deponowanych na komponentach elementów wewnętrznych obu omawianych urządzeń (W7-X i ITER).

Rozdział trzeci przedstawia opis układu diagnostycznego PHA zainstalowanego na stellaratorze W7-X wykorzystującego analizę amplitudową impulsów rejestrowanych przez rentgenowski system detekcyjny. W rozdziale zaprezentowano pozycję systemu PHA i portu diagnostycznego względem plazmy generowanej przez stellarator W7-X, schemat systemu PHA z trzema kanałami diagnostycznymi dedykowanymi nieco różnym zakresom promieniowania rentgenowskiego oraz liniowe pole obserwacji trzech detektorów SDD dla wybranych ustawień geometrycznych PHA. Omówiono główne komponenty układu diagnostycznego, w tym detektory krzemowe SDD, system szczelin o regulowanej szerokości, zestawy filtrów Be o różnej grubości, oraz układy do cyfrowego przetwarzania danych i źródło kalibracyjne. Przedstawiono również testy laboratoryjne komponentów systemu PHA obejmujące pomiary widm kalibracyjnych wykonane przy użyciu lampy rentgenowskiej zintegrowanej z komponentami systemu PHA. Przeprowadzone analizy, w tym analiza zmian szerokości połówkowej linii FWHM (ang. *full width at half maximum*) w funkcji energii. Analizy te pozwoliły na wybór odpowiedniego typu detektora dla systemu PHA zainstalowanego na stellaratorze W7-X. W rozdziale przedstawiono również najważniejsze konkluzje dotyczące optymalnego przetwarzania analizowanych sygnałów w układzie detekcyjnym. Rozdział ten kończy się informacją o identyfikacji zanieczyszczeń pochodzących z centrum plazmy wraz ze wskazaniem ich stopni jonizacji uzyskanych za pomocą diagnostyki PHA. Proszę o rozwinięcie tej informacji, w szczególności o uzupełnienie opisu metody analizy danych, na podstawie której taka informacja została uzyskana.

Rozdział czwarty omawia w sposób ogólny charakterystykę rentgenowskiego promieniowania ciągłego (promieniowanie bremsstrahlung i rekombinacyjne) i liniowego, które rejestrowane jest przez układ PHA zainstalowany na stellaratorze W7-X. W rozdziale przywołane są wzory na przekrój czynny na promieniowanie typu bremsstrahlung oraz na intensywność tego promieniowania, która obrazuje zależność między temperaturą elektronową plazmy, a nachyleniem widma ciągłego. W rozdziale tym Doktorantka przedstawia możliwości pozyskiwania istotnych informacji na temat parametrów plazmy, w szczególności szacowania średniej temperatury elektronowej, wyznaczenia efektywnego ładunku plazmy (Z_{eff}) czy obserwacji elektronów nadtermicznych w pożądanym warunkach eksperymentalnych. W przedstawionej metodzie analizy danych parametry średniej temperatury elektronowej i efektywnego ładunku plazmy są ze sobą ściśle powiązane. Dlatego też proszę o dodatkowe wyjaśnienia w jaki sposób w opisywanej metodzie wyznaczany był efektywny ładunek plazmy. Ponadto proszę o uściślenie informacji w jaki sposób na podstawie analiz widm rejestrowanych przez diagnostykę PHA można identyfikować elektrony nadtermiczne oraz o wyjaśnienie czy pojawienie się takich elektronów nie powoduje zaburzenia obserwacji pozostałych parametrów plazmy (średniej temperatury elektronowej czy efektywnego ładunku plazmy). W tym kontekście proszę również o ustosunkowanie się do zwrotu "pożądane warunki eksperymentalne".

W rozdziale piątym opisano wyniki badań nad wpływem profili koncentracji i temperatury elektronowej na średnią temperaturę elektronową wyznaczaną na podstawie pomiaru PHA. Rozdział rozpoczyna się od opisu metody wyznaczenia średniej temperatury elektronowej plazmy z widma rejestrowanego przez diagnostykę PHA w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego. W opisie przedstawione jest uzasadnienie możliwości wyznaczenia średniej temperatury elektronowej wyłącznie na podstawie nachylenia prostej dopasowanej do promieniowania ciągłego w mierzonym przez system PHA zakresie

spektralnym. W kolejnych podrozdziałach zaprezentowano wyniki obliczeń mających na celu analizę zmiany współczynnika Gaunta w zależności od energii rejestrowanych fotonów dla różnych temperatur elektronowych oraz porównano przebiegi czasowe parametru średniej temperatury elektronowej wyznaczonej na podstawie diagnostyki PHA z wynikami otrzymywanymi z systemów diagnostycznych dedykowanych pomiarom profili temperatury i koncentracji elektronowej z plazmy centralnej (diagnostyki *Thomson Scattering* i *Electron Cyclotron Emission*). Analizy stabilności współczynnika Gaunta pokazały, że obszar energii fotonów od 5 do 10 keV można uznać za właściwy do badań zmian średniej temperatury elektronowej. Informacja ta jest jednak niespójna z rysunkiem 45 w pracy, gdzie zakres energetyczny, z którego została oszacowana temperatura elektronowa sięga około 14 keV. Proszę o wyjaśnienie powyższej nieścisłości oraz o przedstawienie informacji dlaczego analiza współczynnika Gaunta zostały ograniczone do zakresu widmowego z górnym limitem 10 keV. Analiza porównawcza przeprowadzona dla wyników eksperymentalnych zebranych podczas wyładowań plazmowych z divertorowej kampanii eksperymentalnej przeprowadzonej na stellaratorze W7-X pokazała, że trendy zmian średnich temperatur elektronowych otrzymywanych z układu PHA są zgodne z tymi otrzymywanymi z diagnostyk dedykowanych pomiarom profili temperatury i koncentracji elektronowej z plazmy centralnej. Proszę o uzupełnienie informacji na temat wyznaczania niepewności pomiarowych średniej temperatury elektronowej uzyskanej na podstawie danych rejestrowanych przez diagnostykę PHA oraz o informację w jakim stopniu prezentowane dane dotyczące temperatury jonowej pochodzące z diagnostyki XICS były wykorzystane w omawianych analizach.

Rozdział szósty poświęcony jest opisowi badań wpływu profili koncentracji i temperatury elektronowej na średnią temperaturę elektronową wyznaczaną na podstawie danych z diagnostyki PHA. Badania oparte są na symulacjach teoretycznych przy użyciu kodu numerycznego *RayX.exe*, który został przygotowany przez innych autorów (bez udziału Doktorantki). W szczególności przedstawione są wzory na emisję promieniowania bremsstrahlung, ciągłego promieniowania rekombinacyjnego oraz promieniowania liniowego. Przedstawiony w pracy wór na emisję ciągłego promieniowania rekombinacyjnego (równanie 39) różni się od analogicznego wzoru 2.2 przedstawionego w pracy S. Jablonski i inni [ref. 63], na którą powołuje się Doktorantka. W związku z tym proszę o wyjaśnienie występujących rozbieżności. Proszę również o podania źródeł danych dotyczących potencjałów jonizacyjnych, energii wzbudzeń i sił oscylatora, z których korzysta kod *RayX.exe*, a które mają bezpośredni wpływ na jakość prowadzonych symulacji. W badaniach założono dwa typy profili koncentracji, jak i temperatury elektronowej, paraboliczne oraz liniowe. W ramach badań rozpatrywano możliwe kombinacje w każdej z dwóch grup bazujących na profilach parabolicznych i liniowych. Łącznie wymagało to przeprowadzenia kilkuset symulacji. Na rysunku 69 Doktorantka przedstawia przykładowe widmo symulacyjne, na podstawie którego wyznacza średnią temperaturę elektronową. Na rysunku w obszarze spektralnym nieco powyżej 4 keV widoczny jest 'skok' intensywności promieniowania ciągłego. Proszę o wyjaśnienie obserwowanej 'nieciągłości'. Celem badań przedstawionych w niniejszym rozdziale było porównanie średnich temperatur elektronowych wyznaczanych w oparciu o metodę dopasowania prostej do promieniowania bremsstrahlung (stanowiących symulację widma ciągłego rejestrowanego przez układ PHA) z temperaturą elektronową plazmy centralnej oraz ze średnią temperaturą elektronową symulowaną dla alternatywnej diagnostyki z profilu zadanego do symulacji. W ten sposób próbowano określić w jakim stopniu różnią się wielkości średniej temperatury elektronowej mierzone przez różne diagnostyki, w zależności od warunków eksperymentalnych. Wykazano, że niezależnie od kształtu profili zadanych do symulacji (liniowych i parabolicznych) różnice pomiędzy wartościami średnich temperatur elektronowych wyznaczanych przez system PHA a wartościami temperatur elektronowych mierzonych w centrum przez diagnostykę *Thomson*

Scattering pozostają zbliżone w obu badanych grupach. W przypadku wyników symulacji bazujących na profilach liniowych różnice te są większe o ok. 10% niż w przypadku profili parabolicznych. Podobne tendencje zmian zaobserwowano w analizach porównawczych, w których wartości temperatur elektronowych mierzonych w centrum przez diagnostykę *Thomson Scattering* zastąpiono odpowiednimi średnimi z pomiarów dla całego profilu plazmowego. Powyższe porównania uzupełniono analizami górnej granicy promienia plazmy, która wraz z początkową granicą wynikającą z pola obserwacji detektora definiuje obszar promienia plazmy, z którego promieniowanie ma decydujący wpływ na badany parametr plazmy. Analizy te przeprowadzono w funkcji temperatury elektronowej w plazmie centralnej. Wykazano, że dla wyższych temperatur plazmy centralnej rośnie górna granica promienia plazmy, która definiuje obszar promieniowania determinujący wartość średniej temperatury elektronowej uzyskiwanej z diagnostyki PHA. Porównanie średnich temperatur elektronowych wyznaczonych na podstawie widm rejestrowanych przez diagnostykę PHA z wartościami uzyskanymi z pomiarów diagnostyki *Thomson Scattering* dla dwóch wybranych wyładowań W7-X pokazało rozbieżności w zakresie 8-46% (wyładowanie #20180807.016) oraz 2-32% (wyładowanie #20180807.013). Rozbieżności te rosną wraz ze wzrostem temperatury elektronowej występującej w centrum plazmy (wartość $T_{e0 TS}$). Wydaje się, że przedstawiona konkluzja, że otrzymane rezultaty pokrywają się jakościowo z wynikami uzyskanymi w symulacjach wymaga przywołania odpowiednich symulacji przedstawionych w pracy. W pracy dodatkowo, analizowano wpływ wartości centralnej temperatury elektronowej na górną granicę promienia plazmy, która jest istotna w kontekście wyznaczania średniej temperatury elektronowej z diagnostyki PHA. Konkluzja dotycząca silnej zależności pomiędzy centralną temperaturą elektronową, a parametrem górnego promienia plazmy, który definiuje obszar promienia plazmy, z którego promieniowanie ma decydujący wpływ na badany parametr plazmy wydaje się być prawdziwa jedynie dla wyników uzyskanych z symulacji. Analogiczny trend uzyskany na podstawie danych otrzymanych z diagnostyki *Thomson Scattering* wydaje się wskazywać na znacznie słabszą zależność. Doktorantka stwierdza w konkluzji, że obserwowana różnica może wynikać z przyjętego modelu. W związku z tym zasadne wydaje się pytanie w jaki sposób zastosowany model można będzie w przyszłości udoskonalić aby z obu diagnostyk otrzymywać bardziej konsystentny obraz plazmy centralnej.

W rozdziale siódmym w podsumowaniu opisany jest wkład Doktorantki w poszczególne zadania badawcze opisane w rozprawie doktorskiej. Podkreślony jest wkład autorki w testy laboratoryjne komponentów układu PHA w tym testowanie pracy detektorów i kalibrację energetyczną układu. Satisfakcjonujący wydaje się wkład pracy Doktorantki w uruchomienie i przetestowanie układu diagnostycznego PHA w warunkach pracy stellaratora W 7-X. Również nie budzi zastrzeżeń udział Doktorantki w zadaniach badawczych związanych z opracowaniem autorskiego programu w środowisku MATLAB wykorzystywanego do wyznaczania średniej temperatury elektronowej z widm rejestrowanych przez diagnostykę PHA oraz porównania przebiegów czasowych parametru średniej temperatury elektronowej z trendami zmian centralnej temperatury elektronowej na podstawie danych z innych diagnostyk. Pewnym mankamentem pracy jest zbyt ogólne potwierdzenie głównej tezy naukowej przedstawionej w pracy o tym, że wyznaczana średnia temperatura elektronowa determinowana jest zarówno kształtem profili jak i wartościami granicznymi koncentracji i temperatury elektronowej. Wydaje się, że jakość pracy zyskałaby, gdyby konkluzje zawierały przynajmniej wstępne oszacowania współczynników korygujących, umożliwiających bezpośrednie porównanie średniej temperatury elektronowej do temperatury centralnej, dającej w ten sposób dodatkowe źródło informacji o kluczowych parametrach plazmy W7-X.

Mimo, że praca przygotowana jest dość starannie zawiera pewne uchybienia redakcyjne. Poniżej przedstawiam niektóre z nich. Wielokrotnie używane w pracy pojęcie "spektroskopia bezdyspersyjna" powinno być zastąpione pojęciem "spektroskopii bezdyspersyjnej". W rozdziale 1 (str. 16) fragment: „Energia wiązania jądra (EW) ilustruje prace, jaką należy wykonać, aby rozłożyć jądro na pojedyncze elementy (...)” powinien brzmieć: "Energia wiązania jądra (EW) odpowiada pracy, jaką należy wykonać, aby rozłożyć jądro na pojedyncze elementy (...) ". Na stronie 19 fragment: „(...) w kontekście realizacji syntezy termojądrowej w warunkach ziemskich” powinien brzmieć „(...) w kontekście realizacji syntezy termojądrowej w warunkach laboratoryjnych”. W podrozdziale 2.2.1 „Konstrukcja ITERa” przy podawaniu najważniejszych parametrów ITERa brakuje bezpośrednich odwołań do referencji zewnętrznych. Wielokrotnie używane w pracy pojęcie „linii patrzenia” powinno być zastąpione innym bardziej adekwatnym określeniem np. „liniowe pola obserwacji”. W tabeli 2 (str. 54) błędnie zapisano stały 37% poziom transmisji dla całego zakresu mierzonych widm rentgenowskich (transmisja promieniowania rentgenowskiego zmienia się wraz z energią fotonów) oraz błędnie określono górny limit rejestrowanego zakresu energii dla drugiego kanału diagnostycznego jako 196 keV. Wielokrotnie używane w pracy określenie „ilość” w stosunku do rzeczy policzalnych np. „ilość zliczeń, ilość fotonów” powinno być zastąpione określeniem „liczba” adekwatnym do rzeczy policzalnych. W podrozdziale 4.2. fragment „różnica między poziomami” (strona 74) powinien brzmieć „różnica energetyczna między poziomami” lub „różnica między energiami poziomów”. Wielokrotnie używane w pracy określenie „PRZYPADEKI” powinno brzmieć „PRZYPADEK”. Na rysunku 4 brakuje opisu prostej oznaczonej kolorem czerwonym. Na rysunku 22 brakuje opisu krzywej niebieskiej oraz informacji czy widma zostały skorygowane funkcją odpowiedzi detektora. Na rysunku 35 oszeregowanych z notacją wykładniczą byłaby bardziej czytelna. Na rysunku 36 znajduje się niewyjaśnione określenie „false peak” oraz niewprowadzony symbol (?). Na rysunkach 48-55 przedstawiona jest ewolucja czasowa niektórych parametrów czasowych, które nie zostały w pracy opisane (np. gas (H2)). Bibliografia przedstawiona w ostatnim rozdziale powinna być przygotowana bardziej starannie. W wielu odwołaniach brakuje numerów stron przywoływanych prac, niektóre pozycje kończą się kropką inne nie, zamiennie używany jest początkowy znak cudzozyłowu („) lub (“).

Powyższe uwagi nie mają zasadniczego wpływu na raczej pozytywną ocenę pracy doktorskiej. Recenzowana rozprawa stanowi autorski wkład Doktorantki w rozwój diagnostyki PHA na stellaratorze W7-X. Aktywny udział w kampaniach eksperymentalnych oraz duży wkład pracy w uruchomieniu, przetestowaniu i obsłudze układu diagnostycznego PHA w warunkach pracy stellaratora W 7-X dowodzi dobrego przygotowania eksperymentalnego Doktorantki. Doktorantka wykazała się również umiejętnością opracowania dużych zbiorów danych, co potwierdza dobrą znajomość metod numerycznych i metod analizy danych. Wyniki prac, które stanowią część niniejszej rozprawy doktorskiej zostały opublikowane w trzech recenzowanych czasopismach naukowych, w których Doktorantka jest pierwszym autorem w kolejności niealfabetycznej. Praca zawiera elementy nowości i spełnia wymagania zarówno zwyczajowe, jak i formalne stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Natalii Wendler do dalszych etapów postępowania doktorskiego.



