

Ireneusz KSIAŻEK,
Ewa PAWELEC,
Adam BACŁAWSKI,
Agnieszka BARTECKA,
Wiesław OLCZAWA,
Tadeusz KULIG,

Badania spektroskopii plazmy realizowane w roku 2016 w ramach projektu EUROfusion

Wstęp

Kontrolowana fuzja termojądrowa jest źródłem energii, którego opanowanie rozwiąże problemy energetyczne ludzkości. Ze względu na wzrastające zapotrzebowanie na energię i wyczerpywanie się zasobów paliw kopalnych (w tym uranu) reakcje termojądrowe będą musiały się stać źródłem energii w bliższej lub dalszej przyszłości. Problem kontrolowania tych reakcji okazał się znacznie bardziej skomplikowany niż początkowo zakładano. Pomimo długoletnich starań nie udało się osiągnąć wydajności procesów produkcji energii na poziomie umożliwiającym wykorzystanie ich do zasilania generatorów elektrowni. Od roku 2012 badania te w Europie koordynowane i prowadzone są w ramach konsorcjum EUROfusion. Postęp w tych pracach jest znaczący i zakłada się, że nowe, budowane obecnie w południowej Francji, urządzenie o nazwie ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) będzie w stanie produkować w reakcjach fuzji dziesięciokrotnie więcej energii niż zostanie zużyte do wytworzenia plazmy¹.

¹ <https://www.euro-fusion.org/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>

Najbardziej zaawansowane są obecnie badania w urządzeniach z magnetycznym utrzymaniem plazmy typu tokamak. Ze względu na konieczność wyindukowania w plazmie bardzo dużego prądu, z urządzeniami tymi związane są pewne specyficzne problemy techniczne. Ponadto z prądem tym związane jest występowanie szeregu specyficznych niestabilności plazmy jak np. zerwanie sznura plazmowego (ang. disruption). Niestabilności te nie występują w rozwiązaniu opartym o odmienną koncepcję topologii pola magnetycznego stosowaną w urządzeniach zwanych stellaratorami.

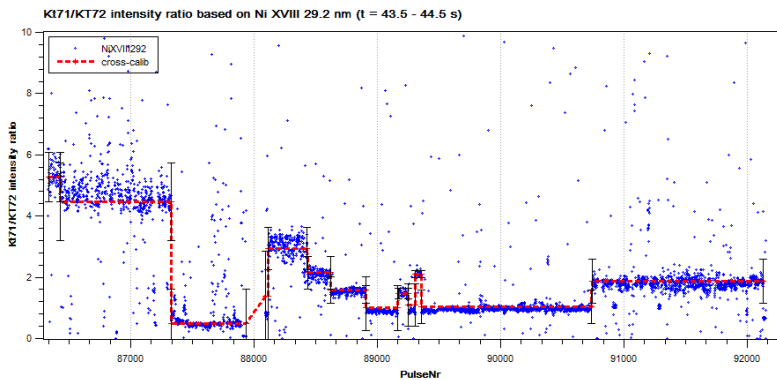
Podstawową reakcją przyszłych reaktorach termojądrowych będzie reakcja pomiędzy izotopami wodoru: deuterem i trytem. Ze względu na fakt, iż tryt jest izotopem radioaktywnym a duża wydajność tej reakcji wiąże się z emisją intensywnego strumienia neutronów, co powoduje powstanie radioaktywności indukowanej różnych elementów konstrukcyjnych urządzenia, większość eksperymentów badawczych przeprowadzana jest w czystym deuterze. Ponadto ze względu na przepisy ochrony radiologicznej większość urządzeń plazmowych nie posiada uprawnień do prowadzenia eksperymentów z wykorzystaniem trytu. Wyjątkiem jest tokamak JET, w którym kolejna kampania pomiarowa z użyciem trytu planowana jest na rok 2018. W roku 2016 prowadzone były eksperymenty i prace związane z przygotowaniem do tej kampanii.

W grudniu 2015 rozpoczął działalność eksperyment stellaratorowy 'Wendelstein 7-X'. Pierwsze eksperymenty wykonywane były w plazmie helowej a na początku roku 2016 przeprowadzono pierwszą kampanię pomiarową z wykorzystaniem wodoru. Wyniki tej pierwszej kampanii pozwoliły potwierdzić precyzję uzyskiwanego pola magnetycznego i możliwości techniczne urządzenia.

1. Kalibracja spektrometrów ultrafioletu próżniowego stosowanych w eksperymencie JET

Jednym z głównych czynników wpływających na parametry plazmy wysokotemperaturowej jest obecność w niej zanieczyszczeń, zwłaszcza o dużej liczbie atomowej Z . Jedną z metod identyfikacji pierwiastków zanieczyszczeń i określania ich poziomu jest pasywna spektroskopia emisyjna. Ze względu na wysoki stopień jonizacji znaczna część obserwowanych linii widmowych emitowana jest w zakresie dalekiego ultrafioletu próżniowego. Aby możliwe było określenie ilościowe poziomu zanieczyszczeń konieczna jest kalibracja natężeniowa spektrometru. Ponieważ dla zakresu dalekiego ultrafioletu brak jest standardowych źródeł promieniowania, kalibracja jest zadaniem skomplikowanym i musi być przeprowadzona w sposób pośredni. Kalibracji względnej

dokonywane w oparciu o zmierzone stosunki natężeń wybranych linii widmowych, dla których znane są współczynniki fotoemisji. Ponadto wskazane jest, aby współczynniki te dla wybranych linii widmowych były słabo zależne od temperatury plazmy. Ponieważ spektrometry pracujące w zakresie ekstremalnie dalekiego ultrafioletu pozbawione są jakichkolwiek okien, narażone są na zanieczyszczenia oraz wszelkiego rodzaju promieniowanie, których źródło znajduje się w plazmie. Może to powodować gwałtowne lub stopniowe zmiany w czułości danych systemów. Niekiedy ze względu na specyfikę poszczególnych eksperymentów konieczne jest dostosowanie czułości danego systemu np. poprzez regulację napięć powielających układu MCP (microchannel plate). W związku z powyższym wskazane jest częste kontrolowanie i porównywanie natężeń tej samej linii widmowej mierzonych przez różne spektrometry (rys.1).



Rys. 1. Stosunki natężeń linii Ni XVIII rejestrowanych przez spektrometry KT7/1 i KT7/2 w różnych eksperymentach (impulsach) wykonywanych w tokamaku JET

2. Projektowanie dedykowanego spektrometru miękkiego promieniowania rentgenowskiego o nazwie roboczej „C/O monitor for W7-X”

Spektrometr ‘C/O monitor for W7-X’ jest specjalistycznym urządzeniem, którego jedynym zadaniem będzie stałe monitorowanie poziomu zanieczyszczeń plazmy przez pierwiastki o niskiej liczbie atomowej. Będzie on wyposażony w cztery niezależne systemy pomiarowe przeznaczone do monitorowania poziomu tlenu, azotu, węgla i boru. Będzie to realizowane poprzez pomiar natężeń emisji linii widmowej Lyman- α jonów wodoropodobnych tych pierwiastków. Odpowiednie długości fal to: to dla tlenu – 1.9 nm, dla azotu – 2.5 nm, dla węgla – 3.4 nm i dla boru – 4.8 nm. Są to najpowszechniejsze

zanieczyszczenia plazm fuzyjnych. Obecność poszczególnych zanieczyszczeń ma związek z warunkami eksperymentu i stanem technicznym urządzenia.

Tlen obecny jest stale, ponieważ, podczas zapowietrzenia układu, zostaje on zaadsorbowany na powierzchniach wewnętrznych urządzenia plazmowego. Po rozpoczęciu serii eksperymentów (zwaną kampanią pomiarową) obserwuje się stałe zmniejszanie jego obecności w plazmie.

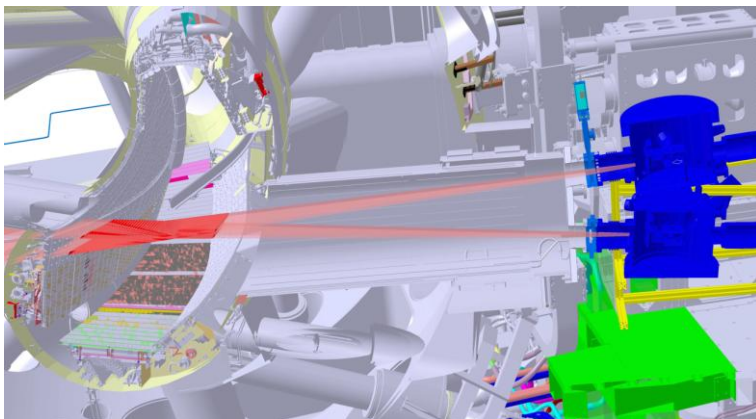
Ze względu na szczególne własności takie jak odporność na wysoką temperaturę oraz sublimację, czyli przechodzenie bezpośrednio ze stanu stałego do gazowego, z pominięciem fazy ciekłej materiałem używanym do wykładania ścian wewnętrznych naczynia plazmowego jest węgiel w formie grafitu lub kompozytów włókien węglowych CFC (carbon fiber composite). Kontrolowanie poziomu zanieczyszczenia plazmy węglem ma związek z badaniem oddziaływaniem plazma-ściana i może być wskaźnikiem niepożądanych oddziaływań plazmy ze ścianą węglową (np. w wyniku wystąpienia niestabilności plazmy).

Pierwiastki domieszek nie tylko zmniejszają wydajność urządzenia fuzyjnego rozrzedzając paliwo, ale także, poprzez emisję promieniowania w liniach widmowych powodują utratę zgromadzonej energii. W związku z tym, aby zmniejszyć te straty stosuje się pokrywanie powierzchni, które mogą oddziaływać z plazmą pierwiastkami o niskiej liczbie atomowej. Powszechnie wykorzystywany w tym celu jest beryl (czyli pierwiastek o liczbie atomowej 4). Ze względu na m.in. toksyczność berylu, w eksperymencie Wendelstein 7-X stosuje się w tym celu bor (czyli 5 pierwiastek układu okresowego). Monitorowanie natężenia linii widmowej boru wskazuje na jakość warstwy ochronnej naniesionej podczas boronizacji a gwałtowne zmiany natężenia tej linii mogą wskazywać na wystąpienie niepożądanego oddziaływania plazmy z powierzchnią elementów pokrytych borem.

Występowanie azotu w plazmie fuzyjnej może świadczyć o przecieku w systemie próżniowym. Ostatnio jednakże stosuje się także celowe wprowadzanie domieszki azotu, które ma na celu bądź to wygaszenie wyładowania (np. w wypadku wystąpienia niebezpiecznych niestabilności) bądź też poprawy depozycji materiału ścian, który uległ odparowaniu.

Ponieważ zadaniem spektrometru 'C/O monitor for W7-X' jest monitorowanie natężeń wybranych linii widmowych z jak największą rozdzielczością czasową, jego konstrukcja powinna zapewnić jak najdogodniejszy kąt bryłowy. Dobór optymalnego kąta bryłowego związany jest ze spełnieniem szeregu, niekiedy sprzecznych, wymagań. O ile rozpiętość kąta wzdłuż kierunku głównej osi magnetycznej (który jest powiązany z kierunkiem dyspersji elementu rozszczepiającego widmo elektromagnetyczne) jest zdefiniowana przez przyjętą geometrię Johana o tyle definiowanie kąta bryłowego w kierunku prostopadłym

do poprzedniego (pionowym) jest w znacznym stopniu arbitralne. Z jednej strony wskazane jest zbieranie jak największej ilości emitowanych kwantów z drugiej jednakże, aby możliwa była fizyczna interpretacja otrzymanych danych wskazane jest wydzielenie określonego przekroju plazmy. Ponadto szereg ograniczeń geometrycznych narzuca konstrukcja portu AEK30 a także elementy konstrukcyjne samego konstruktora jak też i innych diagnostyk znajdujące się w pobliżu projektowanego spektrometru. Zdecydowano, że konstrukcja spektrometru zostanie podzielona na dwa odrębne podsystemy umieszczone jeden nad drugim. Rozpiętość kąta bryłowego dla każdego z kanałów pomiarowych w kierunku pionowym będzie zdefiniowana przez kolimator siatkowy i będzie wynosić ok. 1.4° . Zaprojektowano główną flansę stellaratora w taki sposób aby znalazły się w niej dwa wyjścia o średnicy 150 mm definiujące kierunek osi optycznej obu podsystemów. Kąt pod jakim umieszczono te wyjścia zapewnia przecięcie się kierunków obserwacji obu podsystemów w okolicach głównej osi magnetycznej (rys.2).

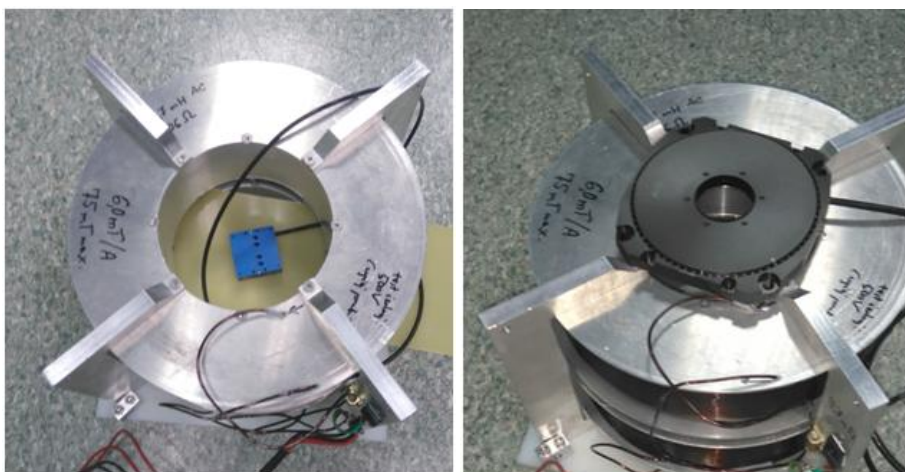


Rys. 2. Rozmieszczenie podspektrometrów systemu pomiarowego ‘C/O monitor for W7-X’ w porcie AEK30 stellaratora Wendelstein 7-X wraz z zaznaczeniem kątów bryłowych tych urządzeń.

Projektem Wendelstein 7-X związany jest z występowaniem bardzo specyficznych problemów związanych z polem magnetycznym. Z jednej strony wszystkie urządzenia oraz aparatura badawcza muszą być skonstruowane tak aby nie zaburzać pola magnetycznego w stellaratorze, z drugiej zaś strony powinny działać niezawodnie w obecności pola magnetycznego o znacznej wartości składowej stałej indukcji magnetycznej jak też w przypadku pojawienia się istotnej składowej zmiennej. Jednym z krytycznych pod tym względem systemów są napędy elektromechaniczne. Ponieważ klasyczne napędy elektryczne działają w oparciu o oddziaływania elektromagnetyczne i mogą być

zawodne w polu magnetycznym występującym w hali stellaratora, zdecydowano o zastosowaniu napędów piezoelektrycznych. Działają one w oparciu o odwrotne zjawisko piezoelektryczne. Pomimo, iż odkształcenia piezoelektryczne są niewielkie (rzędu mikronów) zastosowanie odpowiedniego układu odkształczanych elementów wraz z zastosowaniem sterowania sygnałem o częstotliwościach kilohercowych umożliwia konstruowanie napędów umożliwiających znacznie większe przesunięcia (rzędu cm). Aby sprawdzić niewrażliwość tych urządzeń na działanie silnych pól magnetycznych dokonano zakupu napędu liniowego oraz obrotowego i przeprowadzono stosowne testy (rys.3).

Zadanie to jest realizowane we współpracy Uniwersytetu Opolskiego z Max-Planck-Institut für Plasmaphysik w Greifswaldzie (Niemcy) oraz Instytutem Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie.²



Rys.3. Napęd liniowy oraz obrotowy wraz z cewką służącą do wytwarzania pola magnetycznego.

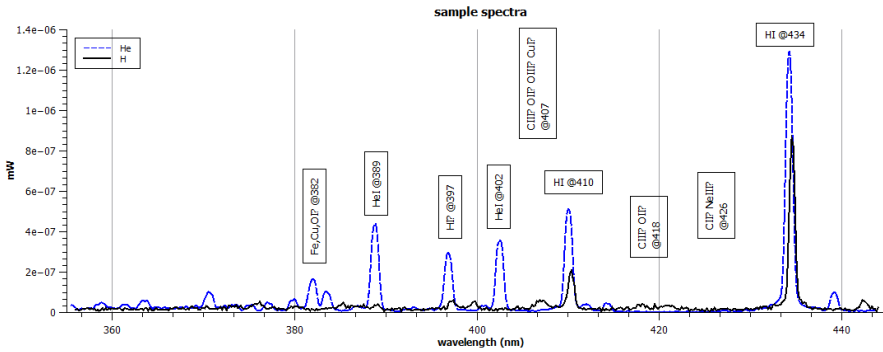
3. Badanie wpływu zanieczyszczeń na plazmy fuzyjne

Zanieczyszczenia plazm wytwarzanych w stellaratorze Wendelstein 7-X

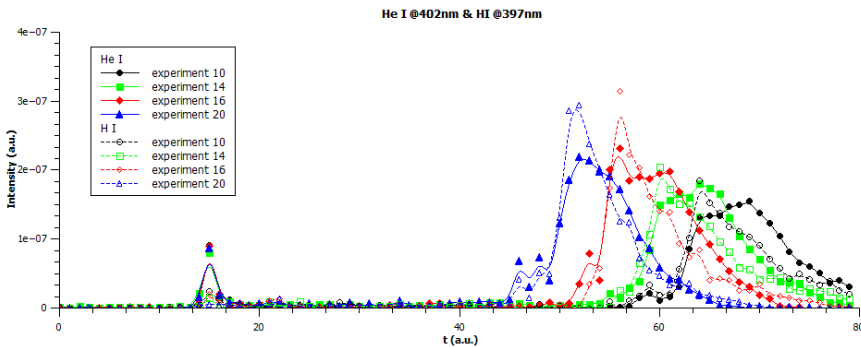
Stellarator Wendelstein 7-X rozpoczął działalność w grudniu 2015 r. i pierwsza kampania pomiarowa prowadzona była do kwietnia 2016. Pierwotnie (do początku lutego 2016) prowadzono eksperymenty jedynie w plazmie

² „Concept of C/O monitor diagnostic for the stellarator W7-X”, I. Książek, T. Fornal, J. Kaczmarczyk, W. Figacz, J. Musielok, M. Kubkowska, R. Burhenn, S. Renard and W7-X team, 29th Symposium on Fusion Technology, Prague, September 5-9.

helowej, a od 3 lutego 2016 prowadzono eksperymenty także z wykorzystaniem plazmy wodorowej. Na zarejestrowanych widmach optycznych zaobserwowano szereg linii widmowych różnych zanieczyszczeń plazmy. Ze względu na niewielką rozdzielczość spektralną oraz ograniczony zakres widmowy nie wszystkie zanieczyszczenia można było zidentyfikować w sposób jednoznaczny (rys. 4).³



Rys.4. Przykład widm zarejestrowanych w plazmie helowej oraz wodorowej



Rys.5. Przykładowe czasowe zmiany natężenia linii atomowych wodoru i helu, uzyskane w eksperymentach z plazmą helową, otrzymane przy różnej konfiguracji pola magnetycznego

³ “Overview of diagnostic performance and results for the first operation phase in Wendelstein 7-X”, M. Krychowiak, et al, Rev. Sci. Instrum. 87 11D304(2016) doi: 10.1063/1.4964376

W początkowej fazie działania urządzenia znaczny poziom zanieczyszczeń uwalnianych ze ścian pod wpływem oddziaływania z promieniowaniem plazmy prowadził, po krótkim czasie trwania wyładowania do zanieczyszczenia plazmy i jej kolapsu radiacyjnego. Na rys. 4 widoczne są przebiegi czasowe natężeń wybranej linii helu oraz wodoru. Na początku wyładowania, w momencie inicjacji plazmy, pojawia się niewielki wzrost natężenia tych linii, następnie ich natężenie spada niemal do zera ze względu na zbyt wysoką temperaturę plazmy i niemal pełną jonizację tych pierwiastków. W końcowej fazie wyładowania obserwowany jest ponowny wzrost natężenia tych linii, związany z radiacyjnym wypromieniowaniem energii i spadkiem temperatury plazmy. Na przykładzie przedstawionym na rysunku 5 widać, że przebiegi te mają różny charakter w zależności od zastosowanej konfiguracji pola magnetycznego (w tym przypadku zmienianej przy zastosowaniu tzw. 'trim coils'). Wyniki te mogą posłużyć do optymalizacji pola magnetycznego podczas przygotowania i przeprowadzania kolejnych eksperymentów ⁴.

Badanie zanieczyszczeń plazm wytwarzanych w stellaratorze TJ-II

Stellarator TJ-II jest niewielkim urządzeniem znajdującym się w CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) w Madrycie. Ze względu na znacznie mniejsze rozmiary może on posłużyć do przeprowadzania wstępnych testów koncepcji i urządzeń, zastosowanie których planowane jest w stellaratorze Wendelstein-7X. Podczas pomiarów przeprowadzonych w 2016, w których udział brała dr hab. Ewa Pawelec, badano zachowanie się domieszek wprowadzanych do plazmy stellaratorowej. Stosowano w tym celu dwie metody. Pierwszą było odparowanie, przy zastosowaniu silnego impulsu laserowego, materiału płytki wolframowej. Drugą metodą było wstrzeliwanie kapsułek polimerowych, zawierających zamkniętą wewnątrz domieszkę, przy pomocy urządzenia TESPEL (Tracer-Encapsulated Solid Pellet Injection System). Urządzenie to opracowane zostało w National Institute for Fusion Science w Toki (Japonia) i przetestowane w eksperymencie stellaratorowym LHD (Large Helical Device). Po uzyskaniu zadowalających wyników w testach tego urządzenia w eksperymencie TJ-II ⁵

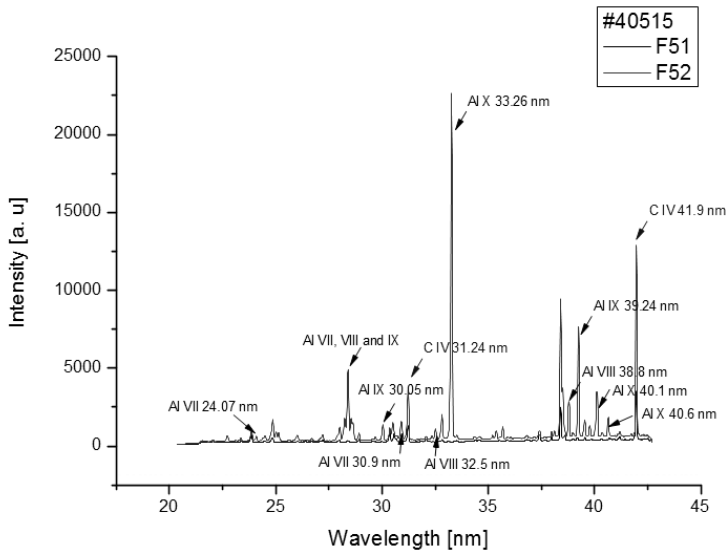
⁴ "Confirmation of the topology of the Wendelstein7-X magnetic field to better than 1:100,000", T. Sunn Pedersen, M. Otte, S. Lazerson, P. Helander, S. Bozhnikov, C. Biedermann, T. Klinger, R.C. Wolf, H.-S. Bosch and The Wendelstein Team, Nature Communications 53 (2016) DOI: 10.1038/ncomms13493.

⁵ „First TESPEL Injection Experiments on TJ-II”, N. Tamura, K.J. McCarthy, N. Panadero, E. Pawelec, H. Hayashi, R. García, J. Hernández, M. Navarro, S. K. Combs, C. Foust, and TJ-II team, 15th Coordinated Working Group Meeting, Greifswald, March 21-23, 2016.

planuje się zamontowanie analogicznego systemu w eksperymencie Wendelstein 7-X, w roku 2018.

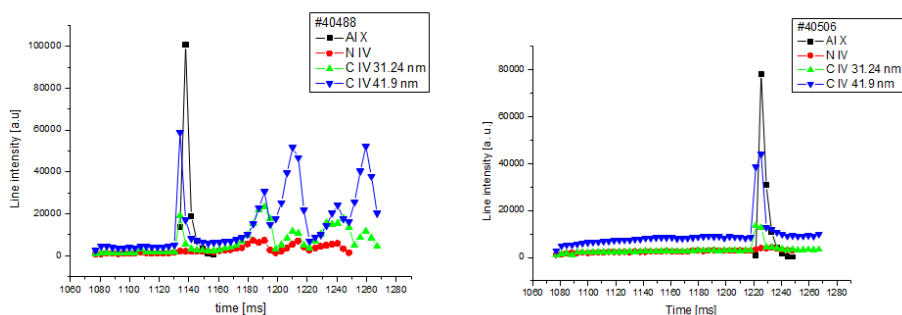
W eksperymencie przeprowadzonym w stellaratorze TJ-II stosowano wstrzeliwanie kapsułek wypełnionych glinem. Obserwacje spektroskopowe wskazujące na występowanie wysokozjonizowanych jonów glinu dowodzą docierania wstrzeliwanych kapsułek do rdzenia wyładowania plazmowego (rys. 6).

Badanie charakterystyk czasowych natężeń linii widmowych, wprowadzanych w ten sposób zanieczyszczeń (rys.7), służyć mogą do badania procesów transportu zanieczyszczeń w plazmie, w zależności od konfiguracji plazmy oraz pola magnetycznego. Procesy te mają krytyczne znaczenie dla plazm stellaratorowych, w których ze względu na dłuższy czas trwania wyładowania może dochodzić do akumulacji zanieczyszczeń⁶.



Rys. 6. Przykładowe widmo glinu zarejestrowane w promieniowaniu plazmy wytwarzanej w stellaratorze TJ-II

⁶ „Electron temperature evolution in the plasma core of the TJ-II stellarator during and after cryogenic and TESPEL pellet injection”, K. J. McCarthy, N. Tamura, I. García-Cortes, E. Pawelec, J. L. Velasco, V. Tribaldos, N. Panadero, J. Hernández Sánchez, E. Blanco, P. Medina, J. M. Fontdecaba and TJ-II team, 43rd EPS Conference on Plasma Physics, Leuven, 4-6 July. 2016.

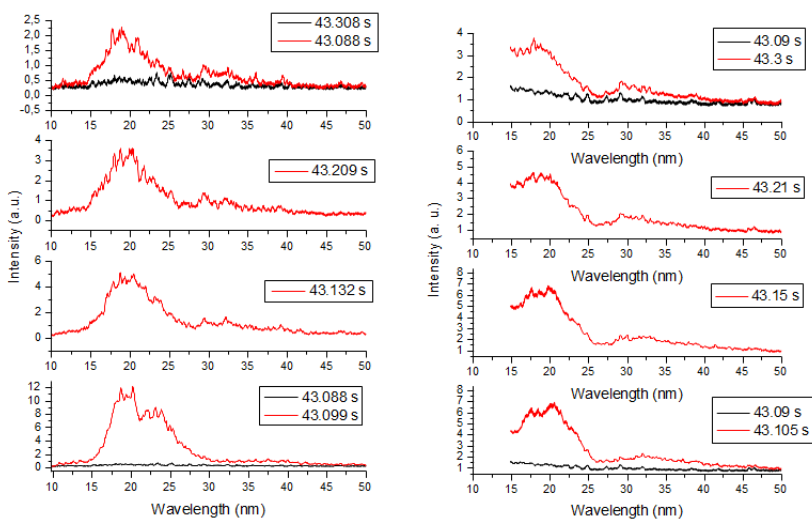


Rys. 7. Przykładowe charakterystyki czasowe natężeń wybranych linii widmowych zanieczyszczeń plazmy wprowadzanych przy pomocy wstrzeliwania kapsułki polimeru.

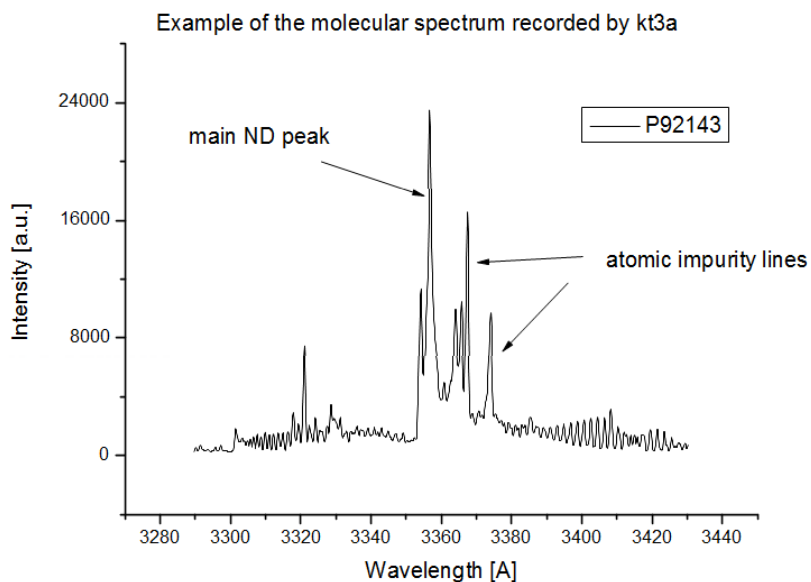
Badanie wpływu zanieczyszczeń na plazmy wytwarzane w tokamaku JET

JET (Joint European Torus) jest największym obecnie działającym urządzeniem typu tokamak. Znajduje się on Culham Centre for Fusion Energy w Culham (Oxfordshire, Wlk. Brytania). Jako jedyne tego typu urządzenie (zapewne do czasu wybudowania jego następcy o nazwie ITER) posiada możliwości techniczne i prawne prowadzenia eksperymentów z wykorzystaniem reakcji deuter-tryt. Ze względu, iż w przyszłym reaktorze komercyjnym planowane jest wykorzystanie ściany wolframowej dokonano modyfikacji konstrukcji tokamaku JET wprowadzając w obszarze dywertora płytki wolframowe (tzw. ITER-like wall). W roku 2016, w celu badanie procesów związanych z obecnością zanieczyszczenia plazmy wolframem, przeprowadzono szereg eksperymentów związanych z celowym wprowadzaniem domieszki wolframowej. Realizowane to było poprzez odparowanie materiału z płytki wolframowej przy użyciu silnego impulsu laserowego. Ze względu na obfitość zarówno stanów jonizacyjnych wolframu występujących w plazmie, jak i też wielość linii widmowych każdego z tych stanów jonizacyjnych, a także rozdzielczość spektralną spektrometrów dostępnych w eksperymencie JET, obecność wolframu w plazmie identyfikowana jest przez dwa szerokie pasma (składające się z wielu, nakładających się linii widmowych) występujące w okolicy 20 nm oraz 30 nm (rys.8). Pojawienie się w plazmie tych licznych emiterów powoduje wzrost ilości energii wypromieniowanej z plazmy, która jest rejestrowana przez system bolometrów.

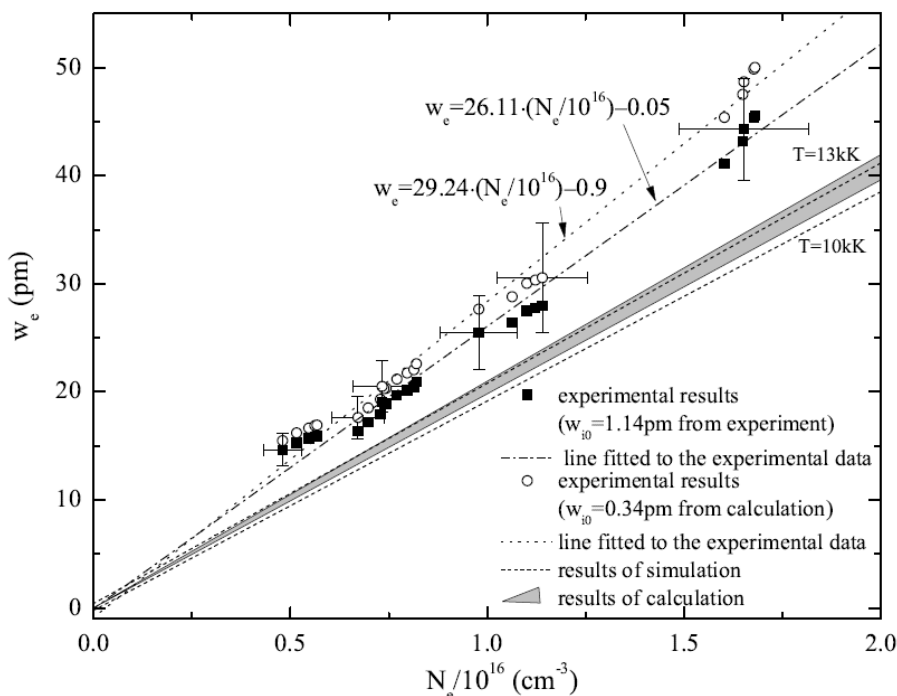
Ze względu na występowanie w naczyniu plazmowym zanieczyszczeń bądź domieszek azotu istotnym problemem może być tworzenie się w zewnętrznych, chłodnych warstwach molekuł związków azotu i wodoru.



Rys. 8. Widma dalekiego ultrafioletu zarejestrowane w wyładowaniu JET o numerze 92286, przez spektrometr KT2 (z lewej) oraz KT7/1 (z prawej). Laserowe odparowanie wolframu miało miejsce w momencie czasu 43.090 s.



Rys. 9. Przykładowe widmo molekuly NH, zarejestrowanie podczas impulsu 92143



Rys. 10. Zestawienie wielkości poszerzenia danej linii, powstającego na skutek zderzeń z elektronami w plazmie, otrzymanych w wyniku symulacji, teorii Griema oraz danych eksperymentalnych.

Szczególnie istotny problem ten może być podczas eksperymentów, w których wykorzystuje się tryt – radioaktywny izotop wodoru. Powstające molekuly mogą mieć istotny wpływ na usuwanie i separowanie tego izotopu w gazach wylotowych jak też i na gromadzenie się go w naczyniu plazmowym. Obecność tych molekuł może być badana zarówno jakościowo jak i ilościowo poprzez obserwacje widm molekularnych, występujących w zakresie bliskiego ultrafioletu. Ten zakres rejestrowany obserwowany jest przez spektrometr KT3A, obserwując obszar dywertorowy (rys.9).

Wyznaczanie stałych atomowych przydatnych w diagnostyce plazmy

Podczas prowadzenia badań plazmowych istotne jest posiadanie odpowiednich narzędzi diagnostycznych pozwalających określać parametry wyładowania. Do jednych z najprostszych, niedrogich i efektywnych metod należą metody spektroskopowe czyli badanie widma promieniowania elektromagnetycznego emitowanego z plazmy. Badania ilościowe związane z pomiarem

natężeń linii widmowych napotykać szereg trudności związanych chociażby ze wspomnianym już uprzednio problemem kalibracji natężeniowej spektrometrów. Innym parametrem ilościowym pozwalającym na określenie parametrów plazmy jest kształt linii widmowej, który ulega poszerzeniu na skutek oddziaływań emitującego atomu (lub jonu) z otoczeniem plazmowym. Aby można było stosować tę metodę konieczne jest określenie parametrów poszerzeniowych danej linii widmowej. Jedną z nader przydatnych metod stosowanych w tym celu jest metoda numerycznych symulacji komputerowych.

W ramach prowadzonych badań określono parametry poszerzeniowe linii azotu neutralnego związanej z przejściem $\text{N I } 3p \ ^2S_{1/2}^o - 3d \ ^2P_{1/2}$. Uzyskane wyniki wykazują dobrą zgodność z wynikami eksperymentalnymi a ponadto wydają się być znacznie lepsze od powszechnie stosowanych, opracowanych na podstawie teorii Griema (rys.10)⁷.

4. Podsumowanie

Opracowanie kontrolowanej fuzji jądrowej jest jednym z głównych zadań nowoczesnej nauki i inżynierii XXI w. Według przyjętej, w ramach EFDA tzw. ‘mapy drogowej’ komercyjna produkcja energii elektrycznej ma być dostępna w połowie tego stulecia. Wyniki uzyskane w ramach tego projektu są małą cegiełką w tym wielkim zadaniu, nie mogą jednakże być pomijane bądź lekceważone.

Jednym z głównych problemów technologii fuzji termojądrowej, jakie pozostają do rozwiązania jest problem określania i kontrolowania poziomu zanieczyszczeń plazmy. Problem ten jest głównym wątkiem realizowanych tu działań.

W wyniku opisanych tu zrealizowanych prac wprowadzono szereg udoskonaleń w metodach badania zanieczyszczeń plazmy. Niektóre z tych działań są jedynie fazą początkową i wskazaniem problemu wraz z prawdopodobną drogą rozwiązania go, w związku z tym badania te powinny być kontynuowane w latach następnych.

⁷ “Computer simulation and experimental studies of the $\text{N I } 3p \ ^2S_{1/2}^o - 3d \ ^2P_{1/2}$ spectral line Stark broadening”, W Olchawa, A Bartecka and A Baćłowski, 23rd International Conference on Spectral Line Shapes, Toruń, June 19-24, 2016.

5. Zespół badawczy

Zespół badawczy Eurofusion na Uniwersytecie Opolskiego pracował w roku 2016 pod kierunkiem dr Ireneusza Książką w składzie: prof. dr hab. Józef Musielok, dr hab. Ewa Pawelec, dr hab. Adam Baćłowski, mgr Andrzej Brosławski, mgr inż. Tadeusz Kulig, dr hab. Wiesława Olchawy i dr Agnieszki Barteckiej. Działania administracyjne z ramienia Instytutu Fizyki Uniwersytetu Opolskiego prowadziła dr Katarzyna Książek.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w roku: 2016 przyznanych na realizację projektu międzynarodowego współfinansowanego oraz z funduszy Komisji Europejskiej w ramach Eurofusion z programu Horyzont 2020.

PLASMA SPECTROSCOPY RESEARCH REALIZED BY PLASMA SPECTROSCOPY GROUP UO IN 2016 WITHIN THE EUROFUSION PROJECT

Summary

EUROfusion project is the program aimed at harnessing the power of the nuclear fusion and creating thermonuclear power plant at half of 21st century. Scientists from plasma spectroscopy group of Opole University are involved in several aspects of this research. In 2016 they were involved in research program of tokamak JET (Joint European Torus) in Culham (Oxfordshire, UK) as well as in stellarator experiment Wendelstein 7-X in Greifswald (Meklemburg-Vorpommern, Germany). In JET they were improving plasma diagnostics by improving the calibration of VUV spectrometers and study of molecular spectra emitted from scrap-of layers of the plasma. In Wendelstein 7-X program the main topic was study of the impurities of the stellarator plasma including construction of a new spectrometer 'C/O monitor for W7-X'. Moreover the works associated with development of diagnostic methods based on study of the Stark-broadening of spectral lines were conducted.

This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium and has received funding from the Euratom research and training programme 2014-2018 under grant agreement No 633053. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.