

Ireneusz KSIĄŻEK, Ewa PAWELEC, Adam BACŁAWSKI,
Andrzej BROŚLAWSKI, Tadeusz KULIG, Józef MUSIEŁOK,
Wiesław OLCZAWA, Agnieszka BARTECKA

Badania spektroskopii plazmy realizowane w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Opolskiego, w roku 2015. w ramach projektu EUROfusion

Reakcje fuzji termojądrowej są źródłem energii, dzięki któremu świecą gwiazdy (w tym nasze Słońce) i które zostały użyte na Ziemi do skonstruowania najpotężniejszych ładunków wybuchowych tzw. bomb wodorowych. Opanowanie tych reakcji w sposób kontrolowany dostarczy naszej cywilizacji praktycznie niewyczerpalnych źródeł energii (szacowane zasoby paliwa wystarczą na miliardy lat). Prace nad kontrolowanym przeprowadzaniem tych reakcji trwają od początku lat 1950 tych. Od roku 2014, w Europie badania te koordynowane są poprzez, powołane w tym celu, konsorcjum EUROfusion¹, którego liderem jest Max-Planck Institut für Plasmaphysik (Niemcy). W skład konsorcjum wchodzi dodatkowo 28 ośrodków naukowych: Agenzia nazionale per le nuove tecnologie l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA), Italia; Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Spain; Comenius University, Slovakia; Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), France; Dublin City University (DCU), Ireland; Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland; Ecole Royale Militaire, Koninklijke Militaire School. Laboratoire de Physique des Plasmas, Laboratorium voor Plasmafysica (LPP-ERM-

¹ <https://www.euro-fusion.org/>

KMS)Belgium; Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ), Germany; Institute of Atomic Physics, Romania; Institute of Plasma Physics v. v. i. (IPP.CR). Czech Republic; Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgaria; EUROFUSION CA, 08.07.2014 Consolidated 06.10.2014 3 Instituto Superior Técnico (IST), Portugal; JOŽEF STEFAN INSTITUTE (JSI), Slovenia; Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Germany; Lithuanian Energy Institute, Lithuania; National Center for Scientific Research "Demokritos" (Institute of Nuclear & Radiological Sciences & Technology, Energy & Safety) - (NCSR), Greece; Ruđer Bošković Institute (RBI), Croatia; Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW), Austria; Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM), The Netherlands; Swedish Research Council (VR), Sweden; Technical University of Denmark (DTU), Department of Physics, Denmark; United Kingdom Atomic Energy Authority referred to as the Culham Centre for Fusion Energy (CCFE), United Kingdom; University of Cyprus (FUTURE-CY Laboratory), Cyprus; University of Latvia, Institute of Solid State Physics, Latvia; University of Tartu, Estonia; VTT – TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND, Finland; Wigner Research Centre for Physics (Wigner RCP), Hungary i Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy im. Sylwestra Kaliskiego (IPPiLM).

IPPiLM reprezentuje Polskę w Eurofusion i jest koordynatorem Centrum naukowo-przemysłowego Nowe Technologie Energetyczne (CeNTE). Do którego należy 12 jednostek naukowych z Polski: Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy im. Sylwestra Kaliskiego (IPPiLM), Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego PAN (IFJ PAN), Instytut Chemii Bioorganicznej PAN - Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe (PCSS), Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica (AGH), Akademia Morska w Szczecinie (AM), Politechnika Warszawska (PW), Politechnika Wrocławska (PWt), Uniwersytet Opolski (UO), Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu (UMK), Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie (ZUT), Spółka Wrocławski Park Technologiczny S.A. (WPT).

Konsorcjum EUROfusion jest następcą i kontynuatorem EFDA (European Fusion Development Agreement) i działa w oparciu o uzgodnioną Mapę Drogową Fuzji (Fusion Roadmap to the realization of fusion energy), opracowaną przez EFDA w roku 2012 r.². Ostatecznie ma ona doprowadzić do skonstruowania elektrowni termojądrowych w połowie wieku XXI.

..Jednym z głównych, najbardziej zaawansowanych kierunków tych badań jest wytwarzanie plazmy wysokotemperaturowej i utrzymywanie jej

² <https://www.euro-fusion.org/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>

w zamknięciu magnetycznym (ang. MCF – Magnetic Confinement Fusion). W tym celu stosuje się m.in. urządzenia o nazwie ‘tokamak’ lub ‘stellarator’. Różnią się one sposobem wytwarzania pola magnetycznego umożliwiającego stabilne utrzymanie plazmy. W obu urządzeniach kształt naczynia plazmowego jest zbliżony do torusa, jednakże taki kształt, ze względu na występujący gradient pola magnetycznego, nie zapewnia warunków stabilnych. W tokamaku stabilność zapewnia prąd płynący w plazmie, wygenerowany przy pomocy układu transformatorowego, w którym plazma stanowi uzwojenie wtórne transformatora. Plazma wytwarzana w tokamaku charakteryzuje się symetrią osiową. W stellaratorze pole magnetyczne ma znacznie bardziej skomplikowany kształt – zbliżony do helisy nawiniętej wokół torusa. Ten kształt pola zapewnia stabilność bez konieczności generowania prądu w plazmie. Symetria plazmy nie jest osiowa, a opisana może być odpowiednim zestawem równań opisujących plazmę w trzech wymiarach.

Największym, działającym obecnie, urządzeniem typu tokamak jest JET – Joint European Torus, który znajduje się Culham Science Centre, w Wielkiej Brytanii (w niewielkiej odległości od Oksfordu). Największym urządzeniem typu stellarator jest, uruchomiony w grudniu 2015 r, stellarator ‘Wendelstein 7-X’, znajdujący się w Max-Planck-Institut für Plasmaphysik w Greifswaldzie, w Niemczech (w Meklemburgii Pomorzu-Przednim, ok. 100 km od Szczecina).

Pracownicy Zakładu Spektroskopii Plazmy, Instytutu Fizyki Uniwersytetu Opolskiego biorą udział w obu powyżej wymienionych eksperymentach.

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

W ramach umowy trójstronnej zawartej pomiędzy Uniwersytetem Opolskim, Instytutem Fizyki Plazmy im. Maxa Plancka w Greifswaldzie oraz Instytutem Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy prowadzone są badania nad zbudowaniem specyficznego spektrometru do diagnostyki plazmy zwanym „C/O monitor for W7-X”, który jest systemem diagnostyki zaprojektowanym do ciągłego monitorowania lekkich zanieczyszczeń plazmy wytwarzanej w stellaratorze Wendelstein 7-X. Będzie on spektrometrem miękkiego promieniowania rentgenowskiego umieszczonym w porcie AEK30, w ustalonej pozycji, która wraz z mierzonym zakresem widmowym nie będzie modyfikowana przez cały czas eksploatacji urządzenia Wendelstein 7-X. Będzie dostarczał, z dużą rozdzielczością czasową, informacji o, zmierzonych przez integrację promieniowania plazmy z wybranego obszaru, natężeniach czterech wybranych linii widmowych. Są to linie Lyman- α emitowane przez wodoropodobne

jony boru (4,9 nm), węgla (3,4 nm), azotu (2,5 nm) oraz tlenu (1,9 nm). Spektrometr ten nie będzie stosowany do badania kształtu linii widmowych. Konstrukcja spektrometru będzie podzielona na dwa subspektrometry, które w ramach portu będą umieszczone jeden nad drugim.

Opracowanie spektrometru 'C/O monitor for W7-X' wiąże się z rozwiązaniem szeregu nietypowych problemów technicznych takich jak np. wymóg działania urządzenia w silnym polu magnetycznym przy równoczesnym wymogu niezaburzania pola magnetycznego utrzymującego plazmę, ochrona przed rozproszonym promieniowaniem mikrofalowym, itp.

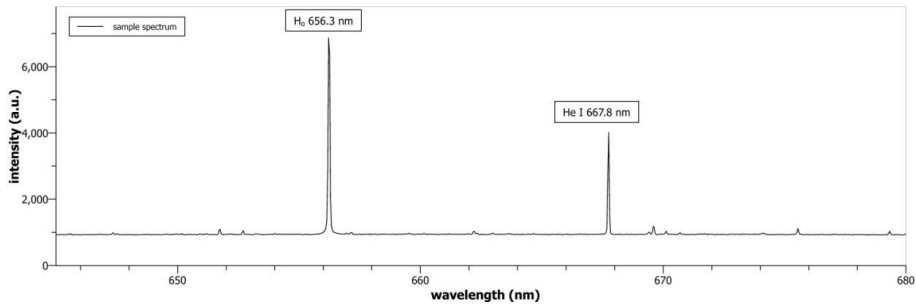
W ramach pracy nad „C/O monitor for W7-X” opracowano projekt koncepcyjny. Został on zaprezentowany w Max-Planck-Institut für Plasmaphysik w Greifswaldzie w dniu 22 lipca 2015 w ramach tzw. 'Conceptual Design Review'. Projekt został wstępnie zaakceptowany i została zdefiniowana lista punktów wymagających uzupełnienia bądź uszczegółowienia.

Badanie wykorzystania źródła wyładowań barierowych do analizy składu mieszaniny helowo-wodorowej

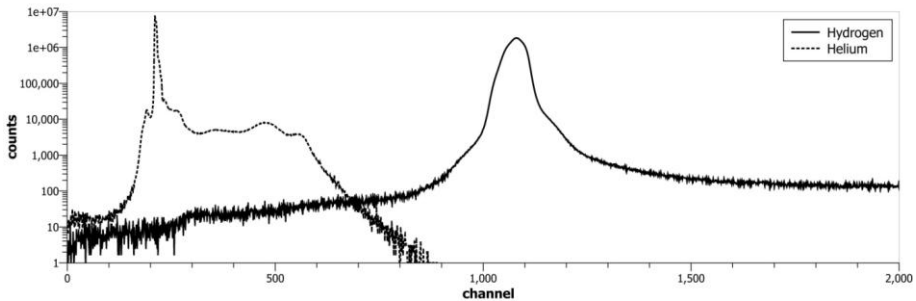
W urządzeniach fuzyjnych, w wyniku reakcji termojądrowych zachodzących pomiędzy jądrami izotopów wodoru, następuje produkcja jąder helu. Produkt ten, jako 'popiół', będzie usuwany z plazmy w części urządzenia plazmowego zwanej dywertorem. Pomiar proporcji helu do wodoru w tych 'gazach wylotowych' dostarczy zarówno informacji o wydajności reakcji fuzyjnych jak i o efektywności usuwania helu z obszaru wyładowania. Ponieważ masa jonu helu jest bardzo bliska masie zjonizowanej cząsteczki deuteru metody diagnostyczne działające w oparciu o spektroskopię masową nie mogą być tu zastosowane. Alternatywną metodą może być analiza spektroskopowa promieniowania emitowanego podczas prowadzenia w atmosferze tych gazów wylotowych, pewnego typu wyładowania. Konieczne jest w tym celu zastosowanie odpowiedniego źródła wzbudzeń. Próby zastosowania w tym celu wyładowania typu Penninga wskazały na szereg niedogodności, takich jak np. znaczne różnice pomiędzy natężeniami linii helowej i wodorowej oraz intensywne widma molekularne utrudniające pomiar natężeń linii atomowych.

W laboratorium spektroskopii plazmy Uniwersytetu Opolskiego przeprowadzono badania mające na celu wykorzystanie w tym celu wyładowań. Przeprowadzono eksperymenty z wyładowaniem z barierą dielektryczną, w niskich ciśnieniach, w czystym helu, wodorze oraz w różnych mieszaninach tych gazów. Badano widma z zakresu optycznego, emitowane z obszaru tego wyładowania. Wykazano, że najwłaściwszymi liniami widmowymi do badania

składu mieszaniny gazów są $H\alpha$ 656.3 nm oraz He I 667.8 nm. Jedną z największych zalet tego typu wyładowania nierównowagowego są porównywalne natężenia obu tych linii widmowych oraz pomijalnie małe natężenia widm molekularnych.



Rysunek 1. Przykładowe widmo zarejestrowane w niskociśnieniowym wyładowaniu barierowym prowadzonym w mieszaninie wodoru i helu.



Rysunek 2. Widma amplitudowe mikrowyładowań w wyładowaniu barierowym prowadzonym w atmosferze czystego wodoru oraz helu.

Równocześnie badano widmo amplitudowe mikrowyładowań powstających w czasie wyładowania barierowego. Badania te wykazały, że widma amplitudowe są bardzo różne dla wyładowań w atmosferze wodoru i helu.

Te wstępne wyniki wskazują na duży potencjał zastosowania wyładowania barierowego do wyznaczania proporcji mieszaniny wodorowo-helowej (np. w 'gazach wylotowych' urządzenia fuzyjnego). Można w tym celu stosować równoległe zarówno metodę analizy widm optycznych jak i analizę widm amplitudowych mikrowyładowań. Wyniki te zostały zaprezentowane podczas konferencji „International Conference on Research and Applications of Plasmas

- PLASMA-2015”, która odbyła się w dniach 7-11 września 2015 w Warszawie ³.

Kalibracja spektrometrów ultrafioletu próżniowego stosowanych w eksperymencie JET

Kalibracja natężeniowa spektrometru jest zadaniem bardzo ważnym, ponieważ pozwala na wyznaczenie wartości bezwzględnych natężeń linii widmowych, a następnie w oparciu o te natężenia (oraz informacje o rozkładzie temperatury) na określenie koncentracji zanieczyszczeń. Ponieważ nie istnieją wzorcowe źródła natężenia działające w zakresie dalekiego ultrafioletu kalibracja spektrometrów działających w tym zakresie musi być przeprowadzona w sposób pośredni. Kalibracja względna może być określona w oparciu o stosunki natężeń wybranych linii widmowych, o znanych, dobrze określonych i słabo zależnych od temperatury stosunkach natężeń. Bezwzględną kalibrację można uzyskać w oparciu o stosunek natężeń linii emitowanych z tego samego poziomu wzbudzonego, z których jedna emitowana jest w zakresie VUV a druga w zakresie widzialnym (tzw. metoda ‘branching ratio’) i jest mierzona przez skalibrowany spektrometr (w zakresie widzialnym wzorcowe źródła natężenia są powszechnie dostępne). Możliwe jest też pośrednie skalibrowanie spektrometru VUV poprzez porównanie natężeń mierzonych przez dany spektrometr z natężeniami rejestrowanymi przy pomocy innego spektrometru, uprzednio już skalibrowanego. Zakresy pomiarowe tych spektrometrów muszą się, co najmniej częściowo pokrywać.

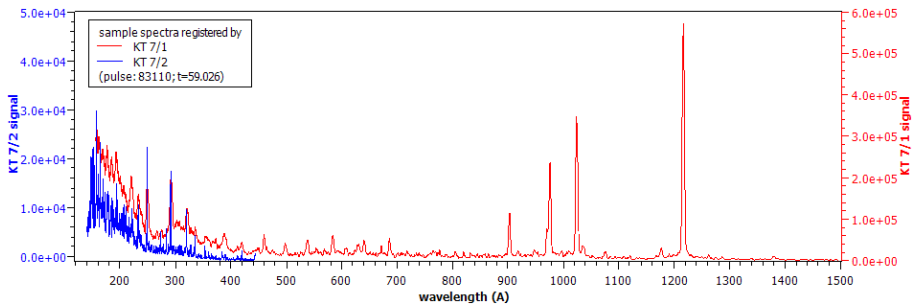
Prowadzono prace nad kalibracją spektrometrów ultrafioletu próżniowego (VUV) oznaczonych, jako KT7/1 i KT7/2. Spektrometry te charakteryzuje szereg podobieństw – zamocowane są w tym samym porcie i rejestrują promieniowanie emitowane z (niemal) tego samego obszaru plazmy. Nie są one jednakże identyczne – KT7/1 ma mniejszą rozdzielczość spektralną (połączoną z większym zakresem spektralnym) i oba spektrometry mogą działać z różną i niezależnie ustawianą rozdzielczością czasową.

Istnieje możliwość pośredniej kalibracji KT7/1 poprzez KT7/2 na podstawie porównania natężenia tej samej linii widmowej mierzonej w tym samym czasie przez oba spektrometry.

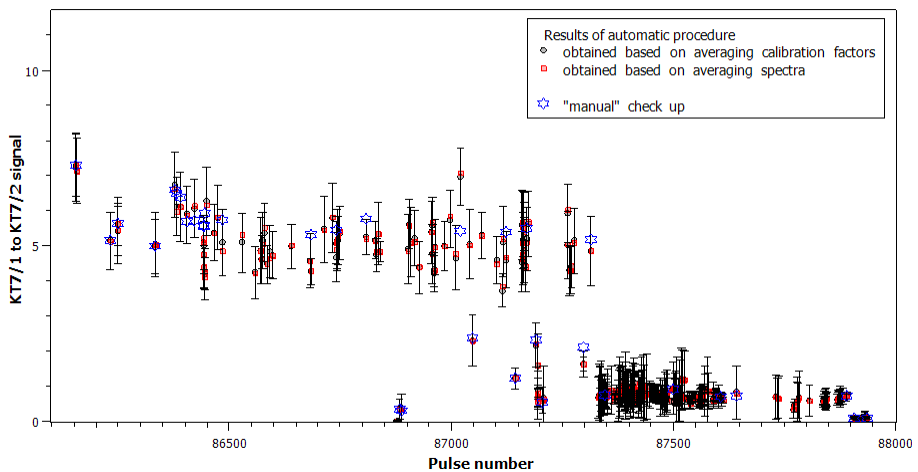
³ I. Książek, A. Brosławski, H. Janus, E. Pawelec: *Applicability of the dielectric barrier discharge for helium ash measurements in the divertor region*, poster P5.04, International Conference on Research and Applications of Plasmas - PLASMA-2015”, 7-11 września 2015, Warszawa

Aby uzyskany wynik był rzetelny:

- mierzona linia widmowa powinna być dobrze separowana, zwłaszcza w widmie rejestrowanym przez KT7/1, który ma niższą rozdzielczość widmową;
- rejestrowane promieniowanie powinno być emitowane z tej samej objętości plazmy w związku z tym najważniejsze są linie wysokozjonizowanych pierwiastków o dużej liczbie atomowej, które emitowane są z centralnych warstw plazmy;
- ze względu na różną rozdzielczość czasową do porównania należy użyć natężeń uśrednionych w określonym przedziale czasu – parametry plazmy w tym czasie powinny być stałe;



Rysunek 3. Przykłady widm rejestrowanych przez KT7/1 oraz KT7/2



Rysunek 4. Przykład: wartości współczynnika względnej kalibracji KT7/1 względem KT7/2 wyznaczonego w oparciu o natężenie linii Ni XVIII 291.99 nm.

Duże natężenie linii widmowych emitowanych przez ciężkie pierwiastki związane jest dużą koncentracją tych zanieczyszczeń, co z kolei jest często wynikiem z niestabilności plazmy i niekontrolowanego oddziaływania plazma-ściana. Podczas takich zdarzeń następują bardzo gwałtowne zmiany parametrów plazmy. W związku z tym odpowiedni dobór danych pomiarowych, które mogą być zastosowane do kalibracji nie jest zadaniem łatwym. Zostało opracowane odpowiednie oprogramowanie (w IDL) służące do selekcji, analizy i kontroli adekwatnych danych zawartych w plikach JPF (JET Pulse Files). Odrębne oprogramowanie zostało opracowane do wyboru odpowiednich danych w ramach danego impulsu, obliczenia wartości średnich natężenia i wyznaczenia współczynnika względnej kalibracji. Stosując te programy komputerowe dokonano przeglądu danych z kampanii pomiarowych po zmianie ściany tokamaka na 'ITER-like wall' (ILW) i określono, na podstawie natężeń szeregu linii widmowych, współczynniki kalibracji względnej pomiędzy KT7/1 a KT7/2.

Procedura kalibracji wykazała, że współczynnik względnej kalibracji pomiędzy KT7/1 a KT7/2 zmienia się w czasie. Związane to jest ze zmianą parametrów geometrycznych portu jak też ze zmianami ustawień samych spektrometrów (np. wartości wysokich napięć stosowanych w układach wzmacniających detektorów). Prace te skutkowały modyfikacją procedur analizujących dane i wprowadzeniem nowych funkcji służących do wyznaczenia wartości bezwzględnych natężeń linii widmowych, rejestrowanych w systemie plików PPF (Pulse Processed File). Dane zapisane w plikach PPF są wykorzystywane przez naukowców w analizie eksperymentów JET. W ramach tego zadania ściśle współpracowano z JET-CCFE – Culham, Wlk. Brytania⁴.

Zespół badawczy

Zespół badawczy Eurofusion na Uniwersytecie Opolskiego pracował w roku 2015 pod kierunkiem dr Ireneusza Książka w składzie: prof. dr hab. Józef Musielok, dr hab. Ewa Pawelec, dr hab. Adam Baćłowski, mgr Andrzej Brosławski, mgr inż. Tadeusz Kulig. Część badań realizowana była przy współpracy dr hab. Wiesława Olchawy i dr Agnieszki Barteckiej. Działania administracyjne z ramienia Instytutu Fizyki Unowersytetu Opolskiego prowadziła dr Katarzyna Książek.

⁴ F. Romanelli, on behalf of JET Contributors, *Overview of the JET results*, Nucl. Fusion **55** (2015), doi:10.1088/0029-5515/55/10/104001

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w roku: 2015 przyznanych na realizację projektu międzynarodowego współfinansowanego oraz z funduszy Komisji Europejskiej w ramach Eurofusion z programu Horyzont 2020.

PLASMA SPECTROSCOPY RESEARCH REALISED IN 2015, IN INSTITUTE OF PHYSICS,
OPOLE UNIVERSITY, WITHIN THE EUROFUSION FRAMEWORK

Summary

Within the EUROfusion framework, in 2015, in Opole University three different tasks were realized. The conceptual design of a dedicated spectrometer 'C/O monitor for Wendelstein 7-X' were elaborated and presented for Conceptual Design Review in IPP Greifswald.

The concept of applicability of barrier discharge for determining the of helium to hydrogen ratio in a exhaust gas of the divertor region was tested. The preliminary results obtained based on the optical spectra as well as pulse-height spectra of the microdischarges are very promising.

The relative calibration of the VUV spectrometers (KT7/1 and KT7/2) working at the JET experiment were performed. For this purpose the appropriate computer code were created. The determined cross-calibration factor were applied in the analysis data procedures.

