

**Recenzja w sprawie nadania lub odmowy nadania stopnia doktora
w przewodzie doktorskim mgr. Łukasza Standyło,**

Mgr Łukasz Standyło przedstawił rozprawę doktorską pt. „Badanie mechanizmu wychwytu i termalizacji strumieni jonów i atomów wprowadzonych do plazmy wytwarzanej metodą elektronowego rezonansu cyklotronowego”. Rozprawa została przygotowana pod kierunkiem prof. dr hab. Krzysztofa Ruska. Promotorem pomocniczym był dr Krzysztof Sudlitz.

Rozprawa składa się z następujących rozdziałów: Wprowadzenie, Wytwarzanie plamy metodą ECR, Układ eksperymentalny, Pomiar transmisji wiązki jonów przez plazmę ECR, Wychwyty wiązki jonów przez plazmę ECR, Dyskusja i podsumowanie oraz 3 dodatków: Symulacja iniekcji wiązki 1+, Testowy układ ECR w zewnętrznych projektach. Razem 101 stron. Przedstawiona do oceny praca doktorska jest szczegółowym raportem z przeprowadzonych badań doświadczalnych w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów UW oraz LPSC Grenoble na stanowisku PHOENIX V2. Ma ona w dużej mierze charakter techniczny. Budowa unikatowego układu eksperymentalnego wymagała od mgr Standyły dużego wysiłku. Uzyskane wyniki są bardzo ważne. Poszerzają wiedzę o strukturze plazmy ECR i o jej oddziaływaniu z wiązką wprowadzonych do niej jonów. Zjawisko elektronowego rezonansu cyklotronowego (ECR) obecnie stosowane jest do wytwarzania dużych strumieni wysoko naładowanych jonów, które są przyspieszane w akceleratorach wykorzystywanych w badaniach naukowych oraz działalności praktycznej. Mimo szerokiego stosowania źródeł jonów ECR nasza wiedza o procesach zachodzących w plazmie jest niewystarczająca.

Mgr Standyło zaobserwował silne tłumienie wiązki jonów wprowadzonych do plazmy, co stało się inspiracją do podjęcia badań nad tym procesem. Doktorant podjął próbę wyjaśnienia mechanizmu absorpcji wiązki jonów przez plazmę wytwarzaną metodą elektronowego rezonansu cyklotronowego. Badano tłumienie wiązki jonów metali alkalicznych ${}^7\text{Li}^{1+}$ w ŚLCJ UW oraz ${}^{85}\text{Rb}^{+1}$ i ${}^{133}\text{Cs}^{+1}$ w LPSC w Grenoble. Głównym celem pracy było zbadanie oddziaływania wiązki jonów litu z wytworzona plazmą. Wstępne wyniki otrzymane na stanowisku PHOENIX V2W LPSC (w badaniach tych uczestniczył mgr Standyło) zostały potwierdzone w ŚLCJ.

Mgr Standyło zbudował w ŚLCJ układ eksperymentalny bazujący na istniejącej konstrukcji źródła jonów typu ECR. Zaprojektował i zbudował termiczne źródło jonów litu, system wprowadzania wiązki litu w obszar standardowej pułapki magnetycznej o częstotliwości 9,5 GHz, układ ekstrakcji wiązki jonów z pułapki. Diagnostyka wyprowadzonej wiązki prowadzona była za pomocą zaadoptowanego spektrometru mas otrzymanego z Wydziału Fizyki UW. Gazami roboczymi był: He, Ne, Ar, Kr, Xe, N i O.

Absorpcja wiązki jonów w plazmie może być spowodowana poprzez: zderzenia ze swobodnymi elektronami, rozpraszanie kulombowskie na jonach plazmy oraz wychwycie elektronu z atomu lub jonu plazmy (efekt przeładowania). Według wstępnej oceny dominującym czynnikiem absorpcji powinien być efekt przeładowania, którego przekrój

czynny jest wynosi około 10^{-15} cm² i o rząd wielkości jest większy przekroju czynnego na rozpraszanie kulombowskie. Oddziaływanie ze swobodnymi elektronami wnosi niewielki wkład w absorpcje sondującej wiązki jonów. Według tej oceny średnia droga swobodna jonów litu wynosi 30-40 m. W komorze o długości 40 cm absorpcja wiązki jonów litu nie powinna przekraczać 2% czyli powinna być trudna do zaobserwowania.

Procesy te były badane przez doktoranta poprzez oddziaływanie wiązki jonów litu o energii 15 keV z plamą wytworzoną metodą ECR. Niezależnie od rodzaju gazu roboczego w każdym przypadku zaobserwowano duży spadek intensywności wiązki sondującej wraz ze wzrostem wprowadzanego promieniowania mikrofalowego. Stwierdzono całkowite tłumienie wiązki sondującej jeśli wprowadzana moc promieniowania mikrofalowego przekraczała 300 W przy ciśnieniu w komorze $2.8 \cdot 10^{-6}$ mbara. Efekt całkowitej absorpcji wiązki ${}^7\text{Li}^{1+}$ nie był wcześniej obserwowany. Oddziaływanie wiązki jednokrotnie naładowanych jonów litu o energii 15 keV z plazmą wytworzoną z różnych gazów roboczych w całym zakresie wprowadzonej mocy jest podobny. Wynik eksperymentu jest odwrotny od przewidywanego. Oznacza to, że głównym mechanizmem oddziaływania wiązki jonów z plazmą nie jest efekt przeładowania a raczej oddziaływania kulombowskiego. Przekrój czynny na rozpraszanie jonów wiązki na pojedynczych jonach plazmy jest mały. To sugeruje, że w plazmie muszą się tworzyć fluktuujące centra składające się z wielu jonów. Sprawdzono absorpcję sondującej wiązki od stopnia jonizacji plazmy. Mierząc natężenie wiązki jonów wyprowadzonej z plazmy określano stopień przeładowania i jej termalizacji. Dla kontroli sprawdzano stopień transmisji przez plazmę neutralnej wiązki atomów litu. Wiązka neutralna wprowadzana do plazmy nie ulegała absorpcji. Uzyskane wyniki wskazują, że w plazmie ECR tworzą się obszary o dużym dodatnim ładunku. Obszary takie mogą powstawać na skutek fluktuacji gęstości gazu roboczego, których częstotliwość plazmowa może być równa częstotliwości wprowadzanego promieniowania mikrofalowego, co skutkuje ich silnym podgrzaniem i jonizacją.

Proszę o wyjaśnienie czy zostały przeprowadzone pomiary składu wiązki wychodzącej ze źródła jonów? Czy wiązka zawierała jony innych pierwiastków oraz czy były obecne jony Li^{+2} ? Czy były eliminowane jony Li^{2+} ? Orientacyjnie przyjmuje się, że prawdopodobieństwo wytworzenia jonów o wyższym ładunku maleje o rząd wielkości przy wzroście krotności ładunku o jeden. Obecność w wiązce sondującej jonów Li^{2+} zwiększa natężenie ich oddziaływania kulombowskiego z fluktuującymi centrami ładunku dodatniego. Uwaga ta nie odnosi się do układu pomiarowego w LPSC Grenoble ponieważ tam wiązka jonów wychodzących ze źródła przechodziła przez obszar pola magnetycznego gdzie odbywała się ich selekcja.

Mgr Standyło posiada doświadczenie w badaniach prowadzonych w zespołach międzynarodowych w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej, Laboratorium w Grenoble oraz w ŚLCJ UW. Mgr Standyło jest współautorem 24 publikacji cytowanych 106 razy, indeks H=8 (wg. bazy SCOPUS). Tylko 4 jego publikacje dotyczą problematyki rozprawy doktorskiej:

1. O. Tarvainen, T. Lamy, J. Angot, T. Thuillier, P. Delahaye, L. Maunoury, J. Choinski, **L. Standyło**, A. Galatà, G. Patti, H Koivisto, Injected 1+ ion beam as a diagnostics tool of charge breeder ECR Ion source plasmas, Plasma Sources Sci. Technol. 24 (2015) 035014,
2. P. Ujic, J.F. Cam, B.M. Retailleau, E. Traykov, **L. Standyło**, EBIS debuncher experimental performance, Nucl.Instrum.Meth. A 918 (2019) 30-36,
3. H. Koivisto, O. Tarvainen, V. Toivanen, J. Komppula, R. Kronholm, T. Lamy, J. Angot, P. Delahaye, L. Maunoury, A. Galata, G. Patti, **L. Standyło**, O. Steczkiewicz, J. Choinski studies with charge breeder and conventional electron cyclotron resonance ion source,

Rev. Sci. Instrum. 85(2014) 02B917,

4. T. Lamy, J. Angot, T. Thuillier, P. Delahaye, L. Maunoury, J. Choinski, **L. Standyło**, A. Galatà, G. Patti, H. Koivisto, O. Tarvainen, Ionization efficiency studies with charge breeder and conventional electron cyclotron resonance ion source, Proceedings of ECRIS-2014, Nizhny Novgorod, Russia

W rozprawie jest cytowana tylko pierwsza z nich w pozycji [39] choć nie łatwo to stwierdzić ponieważ podany jest tylko pierwszy współautor oraz brak tytułu publikacji.

Rozprawa ma szereg usterek natury redakcyjnej. Wykaz cytowanych prac (Bibliografia) sporządzony bez wykorzystania jednolitego schematu. Lista współautorów ograniczana jest do 1-2 osób. W pozycji [39] brak jest nawet samego doktoranta oraz tytułu pracy. Podstawowe dane: rok publikacji, numer tomu oraz strony podawane są w dowolnej kolejności. W spisie publikacji zamieszczonym w rozprawie doktorskiej powinni być wymieniani wszyscy współautorzy danej pracy lub nazwa kolaboracji. Cytowane publikacje lub strony internetowe powinny bezpośrednio dotyczyć omawianego zagadnienia a nie mieć ogólnego informacyjnego charakteru danej jednostki. Przykładem są strony internetowe: LPSC, GANIL czy ŚLCJ pozycje literatury [14, 15, 17].

Zawiera szereg sformułowań używanych w żargonie naukowym. Są one zrozumiałe w ramach wąskiej dziedziny badań ale nie powinny być używane w publikacjach naukowych np. „Elektrony są podgrzewane w sposób stochastyczny [30], a plazma jest zapalana gdy elektrony zderzają się z cząstkami neutralnymi i jonizują je. Rozpalenie płamy przebiega lawinowo....” Strona 30 wiersz szósty od dołu {umowny zapis str. 30₆}.

Wiele sformułowań różni się od stosowanych w języku polskim. Np. „3.1 Budowa stanowiska pomiarowego” str. 35³. Napisałbym – Zbudowane stanowisko pomiarowe. Podpis rys.3.1 ...”Pomiar prądu wiązki był umieszczony przed i za spektrometrem masowym”. „Elementy elektrostatyczne, magnetyczne oraz układy pomiarowe podłączone były do specjalnie złożonych szaf zasilających i skompletowanych do nich zasilaczy prądowych i napięciowych” – str. 36¹³.

„Oprócz impulsowania wiązki litowej w pomiarach użyto impulsowania wprowadzonej mocy mikrofalowej. Impulsowanie wiązki polegało na podaniu impulsu kluczającego na cylinder Wehnelta” – str. 64¹².

Zbędny jest skrącanie zapisu Li^{+1} do „+1” na rys. 3.3 i 3.4 tym bardziej, że obecne tam były prawdopodobnie również jony Li^{2+} .

Nie są konsekwentnie przestrzegane zasady interpunkcji przy zapisie wzorów (np. wzór 1.1) Brak odwołania do rys. 1.3 oraz jego wyjaśnienia (co oznaczają obszary RF[W]I, II, III?).

Rozprawę doktorską mgr Łukasza Standyło oceniam wysoko. Zawiera wartościowe wyniki dla fizyki plazmy. Dużo czasu poświęcił na zbudowanie unikatowego stanowiska badawczego. Rozprawa ma aspekt praktyczny związany z wytwarzaniem jonów w źródłach ECR. Mam nadzieję, że będzie kontynuował tę ważną tematykę badań.

Rozprawa doktorska mgr. Łukasza Standyło spełnia wymagania przewidziane przez obowiązującą ustawę. Stawiam wniosek o dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauki przyrodnicze w dyscyplinie fizyka.

M. Budzyński