

prof. dr hab. Konrad Czerski  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Szczeciński  
ul. Wielkopolska 15  
70-451 Szczecin

konrad.czerski@usz.edu.pl

Szczecin, 16.10.2023

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Łukasza Standyło**

zatytułowanej:

*„Badanie mechanizmu wychwytu i termalizacji strumieni jonów i atomów wprowadzanych do plazmy wytwarzanej metodą elektronowego rezonansu cyklotronowego”*

Tematem przedstawionej pracy doktorskiej są zagadnienia związane oddziaływaniem cząstek naładowanych ze słabo sprzężoną plazmą wieloskładnikową, co z jednej strony jest podstawą dla wielu rozwiązań aplikacyjnych takich jak źródła jonów dla nowoczesnych akceleratorów lub dla przyszłych reaktorów termojądrowych, a z drugiej strony stanowią także podstawę dla rozważań teoretycznych fizyki plazmy.

Mgr Łukasz Standyło przeprowadził w ramach swojej pracy doktorskiej szereg eksperymentów na plazmie wytworzonej metodą elektronowego rezonansu cyklotronowego (ang. electron cyclotron resonance – ECR), wykorzystując przy tym zewnętrzną wiązkę jonów sondujących o energiach niższych niż temperatura gazu elektronowego znajdującego się w pułapce magnetycznej. Bezpośrednim celem tych badań była optymalizacja pracy źródeł jonów typu ECR w celu otrzymania wiązek jonów o wysokim stanie ładunkowym i dużej intensywności oraz zrozumieniu efektów z tym związanych. Praca została wykonana na dwóch różnych układach eksperymentalnych. Pierwszy został zbudowany przez autora w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów (ŚLCJ) Uniwersytetu Warszawskiego i obejmował konstrukcję źródła jonów litu wraz z systemem prowadzenia i diagnostyki wiązki oraz pułapki magnetycznej. Drugi system eksperymentalny to układ PHO-ENIX V2 w laboratorium LPSC Uniwersytetu Grenoble, gdzie pomiary zostały wykonane w ramach programu LEBT (ang. Low Energy Beam Transport). W obu przypadkach badano transmisję

wiązki jonów bądź neutralnych atomów przez plazmę wytworzoną w pułapce ECR z różnych zjonizowanych gazów. Eksperymenty te wykonano już około dziesięć lat temu, choć efekty w nich mierzone nie straciły na aktualności i nie są w pełni wytłumaczone do chwili obecnej.

W szczególności chodzi tutaj o redukcję transmisji jonów przez badany obszar plazmy w warunkach podwyższonej mocy mikrofal użytych do podniesienia stanu jonizacji roboczego gazu. Zgodnie z modelami teoretycznymi oczekiwałoby się odwrotnego efektu, wynikającego z mniejszych przekrojów czynnych na reakcję wymiany ładunkowej między jonami sondującą wiązkę i wysoce zjonizowanymi gazami w pułapce magnetycznej.

Praca doktorska mgr Standyło została wykonana pod opieką prof. dr hab. Krzysztofa Ruska, a opiekunem pomocniczym był dr Krzysztof Sudlitz. Liczy ona ogółem 101 stron i obejmuje 6 rozdziałów i 3 dodatki, w których zawarty jest dokładny opis użytych układów eksperymentalnych, przeprowadzonych symulacji numerycznych i innych projektów, w których system badawczy zbudowany przez autora został zastosowany. Praca doktorska jest wykonana bardzo starannie, napisana jasnym i precyzyjnym językiem, a prezentacja otrzymanych wyników i ich dyskusja jest bardzo szczegółowa.

W pierwszych dwóch rozdziałach autor przedstawił motywację wykonanej pracy oraz podstawy fizyki tworzenia plazmy w źródłach typu ECR. Chodzi tutaj przede wszystkim o podstawowe mechanizmy oddziaływania jonów ze zjonizowanym gazem, które mają zasadnicze znaczenie dla obserwowanej transmisji tych pierwszych. Zidentyfikowano tutaj reakcje wymiany ładunkowej (inaczej reakcje przeładowania) jako główny proces absorpcji wiązki jonów, jej termalizacji i neutralizacji. Znamienny jest przy tym wykres 1.2 przedstawiający przekrój czynny na proces  $\text{He}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{He}^0$  w zależności od energii wiązki jonów helu, zmierzony przez różnych autorów i ilustrujący bardzo duże różnice ich wartości w granicach dwóch rzędów wielkości  $10^{-16} - 10^{-15} \text{ cm}^2$ . Stąd argument mgr Standyło, że inne procesy, które mają przekroje czynne rzędu  $10^{-16} \text{ cm}^2$ , mogą być pominięte przy interpretacji wyników eksperymentów, nie jest do końca trafny. Warto zaznaczyć, że przekroje czynne na procesy atomowe mogą zależeć od temperatury i gęstości ośrodka, dla których są mierzone, ze względu na stosunkowo długie czasy relaksacji elektronowej. Ponadto w części tej autor przedstawił podstawowe pojęcia i związki fizyczne dotyczące własności plazmy w pułapkach ECR. Pewnym mankamentem jest tutaj jednak brak opisu najprostszych zaburzeń i fal plazmowych, które mogą mieć znaczenie w interpretacji danych eksperymentalnych.

Następne dwa rozdziały dysertacji są poświęcone dokładnemu omówieniu konstrukcji układu pomiarowego i przeprowadzeniu szeregu eksperymentów przy użyciu wiązki jonów Li o energii 15 keV w ŚLCJ. Pomiary transmisji wiązki przeprowadzono stosując różne gazy robocze (He, Ne, Ar, Kr, Xe oraz O i N) przy różnych ciśnieniach w pułapce ECR i różnych mocach

mikrofal. W sposób bardzo przekonujący pokazano, że transmisja wiązki jonów litu znacznie zmniejsza się przy dużych mocach mikrofal w zależności od użytego gazu i ciśnienia. Przydatna byłaby tutaj analiza porównawcza otrzymanych wyników, definiując przykładowo określony parametr redukcji transmisji wiązki osiągnięty dla różnych gazów w zależności od mocy użytych mikrofal. Pozwoliłoby to być może na poszukanie korelacji otrzymanych wyników eksperymentalnych z własnościami atomowymi użytych gazów (np. energii wiązania elektronów). Jest to prawdopodobnie stosunkowo trudne ze względu na duże niepewności pomiarowe. Z drugiej strony wydają się one trochę zawyżone, gdy przyjmiemy się że błędy pomiarowe widoczne na wykresach 4.6-4.10 odnoszą się do pojedynczego odchylenia standardowego. W rozdziale czwartym przedstawiono także wyniki pomiarów w Grenoble. Użyto tutaj różnych jonów Cs<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup> oraz Li<sup>+</sup>, przy czym ich energia była zmienna i znacznie mniejsza niż w eksperymentach warszawskich (rzędu kilkudziesięciu eV). Ponadto dzięki magnesowi analizującemu umieszczonemu przed wejściem do źródła ECR można było wyeliminować wkład neutralnych atomów w wiązkę sondującej. Niezależnie od tych różnic wykazano również załamanie się transmisji wiązki jonów przy wyższych mocach mikrofal. W eksperymentach w ŚLCJ pokazano ponadto, że składowa neutralna wiązki jonów litu tylko bardzo słabo rośnie ze wzrostem mocy mikrofal w obszarze, gdzie obserwuje się załamanie transmisji jonów pojedynczo naładowanych. Obserwacja ta dodatkowo wyklucza założenie, że reakcje przeładowania mogłyby być odpowiedzialne za obserwowane efekty.

Rozdziały piąty i szósty to próba zrozumienia i interpretacji silnej redukcji transmisji wiązki jonów. Z punktu widzenia eksperymentalnego wykazano, że redukcja ta wiąże się ze zwiększoną liczbą jonów ztermalizowanych w pułapce ECR. Autor wyciąga wniosek, że badany efekt jest wynikiem rozpraszania wiązki jonów na zaburzeniach plazmy, obszarach rzędu długości Debye'a o większej gęstości jonów dodatnich, a nie na pojedynczych jonach, gdyż wówczas efekt ten byłby zbyt słaby. Proces taki był oryginalnie zaproponowany przez R. Gellera, twórcy źródeł jonów ECR. Z drugiej strony, uważam, że proces tworzenia się takich obszarów można traktować jako zwykle oscylacje plazmowe i wówczas mechanizm rozpraszania byłby wynikiem sprzężenia ruchu translacyjnego jonu z oscylacjami plazmowymi. Stąd zwiększenie mocy mikrofal powoduje większą gęstość swobodnych elektronów, co zwiększa energię oscylacji plazmowych i efektywność termalizacji wiązki jonów sondujących. Pozostaje jednak pytanie, czy mechanizmem tym można wytłumaczyć ten sam efekt obserwowany zarówno dla jonów o energii 15 keV jak i kilkudziesięciu eV.

Podsumowując, praca doktorska mgr Standyło charakteryzuje się wysokim poziomem profesjonalizmu. Jest ona wybitnie pracą eksperymentalną, prezentująca nowe efekty obserwowane w plazmie źródeł jonów ECR i stanowi z pewnością podstawę do dalszych badań zarówno eksperymentalnych i teoretycznych, tym bardziej, że jest to konieczne, gdy chcemy

zwiększyć osiągnane prądy jonów i ich stany ładunkowe w przyszłych źródłach jonów. Na szczególne wyróżnienie zasługuje fakt samodzielnej budowy skomplikowanego układu eksperymentalnego w ŚLCJ, co wymagało także specjalnych i rzadkich umiejętności technicznych. Układ ten okazał się bardzo przydatny także w różnych późniejszych projektach badawczych, co zostało opisane w dodatku C dysertacji. Mgr Standyło jest współautorem wielu publikacji naukowych, w tym dwóch poświęconych badaniom źródeł ECR.

Przedłożona praca w pełni spełnia wymagania ustawowe jak i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie nauk fizycznych. Dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie pana mgr Łukasza Standyło do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*Michał Konrad Leski*