

Prof. dr hab. Urszula Woźnicka  
Instytut Fizyki Jądrowej  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
Polskiej Akademii Nauk  
urszula.woznicka@ifj.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Władysława Surały, pt.:  
"Badanie wiązek elektronowych i promieniowania rentgenowskiego  
w układach Plasma-Focus"

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Władysława Surały została wykonana na zlecenie Rady Naukowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych.

## Wstęp

Rozprawa doktorska została wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. Marka J. Sadowskiego w Narodowym Centrum Badań Jądrowych. Promotorem pomocniczym pracy był dr Jarosław Żebrowski.

Rozprawa dotyczy eksperymentalnego badania impulsów promieniowania rentgenowskiego i strumieni szybkich elektronów emitowanych podczas wysokoprądowych wyładowań w gazach o niskim ciśnieniu, prowadzących do powstawania gorącej plazmy o złożonej strukturze. Jednym z typów urządzeń, w których realizowane są takie eksperymenty to urządzenia Plasma-Focus, dostępne w kilku polskich laboratoriach badawczych. Autor oparł swoje badania o eksperymenty zrealizowane na urządzeniach Plasma-Focus działających w NCBJ w Świerku (PF-360U) oraz IFPiLM w Warszawie (PF-1000U). Eksperymenty prowadzone były przy użyciu deuteru, jako podstawowego gazu roboczego, oraz deuteru domieszkowanego ciężkimi gazami szlachetnymi (argon, krypton, ksenon).

Praca składa się z 6 rozdziałów i liczy sumarycznie 85 stron, łącznie ze spisem literatury obejmującym 93 pozycje.

W Rozdziale 1, stanowiącym wprowadzenie do omawianych zagadnień, Autor przedstawia zwięzły opis zjawisk fizycznych występujących podczas wyładowania wysokoprądowego w układzie Plasma-Focus oraz podsumowanie najważniejszych wg. Autora kierunków i wyników badań przeprowadzonych w różnych laboratoriach na przestrzeni 60 lat. To omówienie wsparte zostało licznymi odwołaniami literaturowymi, świadczącymi o dobrym przygotowaniu Autora do podjęcia realizacji własnych badań. W tym samym rozdziale Autor przedstawia uzasadnienie potrzeby prowadzenia dalszych badań zjawisk zachodzących w wyładowaniach w urządzeniach Plasma-Focus, formułuje główne tezy rozprawy doktorskiej oraz zakres zaplanowanych badań eksperymentalnych.

Rozdział 2 stanowi zwarty opis układów eksperymentalnych Plasma-Focus PF-360U oraz PF-1000U, przy użyciu których Autor przeprowadził badania eksperymentalne.

Rozdział 3 poświęcony jest opisowi stosowanej przez Doktoranta aparatury badawczej wykorzystywanej do zaplanowanych eksperymentów, głównie emisji miękkiego promieniowania X i szybkich elektronów. Są to szybkie sondy scyntylicyjne i kamery rentgenowskie a także spektrometry magnetyczne do pomiarów wiązek elektronowych. Ponieważ stosowanym przez Autora gazem roboczym w układach Plasma-Focus był deuter, dodatkowo został zamieszczony opis kamery typu pinhole wyposażonej w detektory śladowe do pomiarów przyspieszonych jonów deuteru.

Główne rozdziały pracy, stanowiące dorobek Doktoranta – Rozdział 4 i 5 – poświęcone są opisowi przeprowadzonych przez Doktoranta eksperymentów, ich wyników oraz analizie uzyskanych rezultatów. Podsumowanie przeprowadzonych badań i końcowe wnioski zawarte są w rozdziale 6.

## Teza pracy i jej potwierdzenie

Pan mgr Władysław Surafa sformułował następującą tezę swojej rozprawy doktorskiej:

Emisja miękkiego promieniowania X z wyładowań typu PF następuje głównie z obszarów gorącej plazmy przyjmujących formę włókien, które na skutek niestabilności rozpadają się na mikro-obszary o zwiększonej wydajności emisji promieniowania X (tzw. *hot-spots*). Emisję szybkich wiązek elektronowych można tłumaczyć akceleracją elektronów w różnych mikro-obszarach plazmy, np. mikro-diodach plazmowych formujących się w pobliżu ww *hot-spots*.

W celu udowodnienia postawionej tezy Doktorant zaproponował i zrealizował serię badań eksperymentalnych pozwalających na skorelowanie przestrzennych i czasowych zależności występowania mikrostruktur w fazach radialnej kompresji warstwy prądowej i formowania oraz rozpadu gęstej gorącej plazmy. Eksperymenty zostały wykonane na dwóch urządzeniach: PF-360U oraz PF-1000U.

Badania eksperymentalne obejmowały:

1. Pomiar promieniowania rentgenowskiego integralne i przedstawieniem zależności czasowej, począwszy od momentu maksymalnej kompresji. Do pomiarów integralnych Autor stosował klisze rentgenowskie, natomiast do pomiarów miękkiego promieniowania X w funkcji czasu korzystał z kamery typu pinhole wyposażonej w diody krzemowe. Ten zestaw pomiarowy był wykorzystany na PF-1000U. W przypadku urządzenia PF-360U zostały wykonane pomiary twardego promieniowania X w funkcji czasu przy pomocy sondy scyntylicyjnej.
2. Pomiar wiązek elektronowych integralne i z przedstawieniem zależności czasowych wykonane zostały przy zastosowaniu spektrometrów magnetycznych wyposażonych w odpowiednie detektory umożliwiające rejestrację integralną lub w funkcji czasu.

3. Uzupełniające pomiary interferometryczne i jonowe służące do uzyskania dodatkowych informacji o rozmiarach i dynamice plazmy, co pozwalało identyfikować obszary o różnej gęstości plazmy. Autor korzystał z interferometru Macha-Zehndera, a do pomiarów jonowych z detektorów śladowych oraz miniaturowych detektorów scyntylacyjnych.

Analiza wyników pomiarów emisji promieniowania rentgenowskiego wykazała, iż plazma generowana w układach PF (z zastosowaniem gazu roboczego w postaci deuteru oraz deuteru z domieszkami gazów szlachetnych) charakteryzuje się znaczną niejednorodnością przestrzenną w fazie formowania, akceleracji i ściskania radialnego, jak również w fazie maksymalnej kompresji i rozpadu. Dotychczasowe obserwacje mikrostruktur plazmowych w fazie maksymalnej kompresji są nieliczne, co czyni pracę pana Surały bardzo wartościową. Porównanie zarejestrowanych na kliszach integralnych obrazów rentgenowskich z czasowymi przebiegami rejestrowanymi przed detektory PIN w różnych obszarach wyładowania wykazało, że mikrostruktury plazmowe mogą powstawać w różnych chwilach czasu życia plazmy.

Integralne w czasie pomiary wiązek elektronowych miały charakter pomocniczy. Autor skupił się na realizacji dużej serii pomiarowej wiązek elektronowych z rozdzielczością czasową na urządzeniu PF-360U dla plazmy deuterowej i plazmy domieszkowanej gazami szlachetnymi. Otrzymał dzięki temu bogaty materiał doświadczalny pozwalający na statystyczną analizę wpływu domieszek gazowych na generację strumieni elektronów. Widmo elektronów mierzone było w przedziale 60 – 700 keV. Należy jednak podkreślić, że granica 700 keV wynikała z zakresu pomiarowego stosowanego w pracy spektrometru magnetycznego. W przypadku tej serii pomiarowej zestawienie wyników integralnych pomiarów rentgenowskich z czasowymi przebiegami widm elektronowych nie pozwoliło na jednoznaczne przyporządkowanie konkretnych obszarów plazmy do sygnałów od strumieni elektronów.

Autor potwierdził postawioną hipotezę, że emisja miękkiego promieniowania X z wyładowań typu PF następuje głównie z obszarów gorącej plazmy przyjmujących formę włókien, które rozpadają się na mikro-obszary o zwiększonej wydajności emisji promieniowania X. Wykazał również zależność tego zjawiska od składu gazu roboczego.

Analizując wyniki pomiarów wiązek elektronowych rejestrowanych z obserwowanym rozrzutem czasowym Autor tłumaczy je akceleracją elektronów w różnych mikro-obszarach plazmy pojawiających się z dużym rozrzutem w przestrzeni, np. mikro-diodach plazmowych formujących się w pobliżu *hot-spots*.

Wykonane dodatkowo pomiary wiązek deuteronów w układzie PF-360 potwierdziły korelacje mikrostruktur plazmowych z emisją jonów deuteru wzdłuż osi układu.

## Ocena pracy

Praca doktorska mgr. Władysława Surały stanowi wartościowy opis kompleksowego, jednolitego merytorycznie eksperymentu fizycznego wykonanego na dwóch układach typu Plasma-Focus. Pomiary zostały wykonane na zmodernizowanych w ostatnich latach układach PF-360 i PF-1000U. Modernizacja układu PF-360 polegała głównie na usprawnieniu systemu zasilania prądowego, co spowodowało stabilną pracę układu i niewątpliwie pomogło Doktorantowi w zrealizowaniu tak dobrych serii pomiarowych. Układ PF-1000U został wyposażony w system dynamicznej iniekcji gazu roboczego pozwalający na uzyskanie odmiennych warunków gazowych (ciśnienie i rodzaj gazu) w różnych częściach komory eksperymentalnej, co zostało wykorzystane w pracy Doktoranta.

Napisane przez Doktoranta wprowadzenie w zagadnienia wytwarzania i utrzymania gorącej plazmy, opis zjawisk fizycznych, a także rzeczowe uzasadnienie potrzeby dalszych badań zjawisk obserwowanych w urządzeniach Plasma-Focus świadczą o jego dużej wiedzy, zrozumieniu i gruntownym przygotowaniu merytorycznym. Metodyka badań, wybór, zaplanowanie, realizacja i analiza eksperymentów fizycznych zostały przygotowane i przeprowadzone w sposób przemyślany, racjonalny i niebudzący zastrzeżeń merytorycznych.

Praca jest bardzo dobrze i zwięźle napisana, zredagowana czytelnie i starannie, choć przy końcowej redakcji pracy prawdopodobnie Autor zbyt zawierzył słownikom komputerowym, które nie rozróżniają odmian polskich rzeczowników. Praca jest dobrym przykładem, że można napisać opracowanie naukowe z fizyki poprawnie po polsku, nie zaśmiecając jej pseudo-naukowym żargonem.

Moje uwagi dotyczą generalnie strony redakcyjnej:

1. Sądzę, że szereg zdjęć, rysunków pochodzi z innych prac. Wszystkie te, które nie są dziełem Autora, jak również te, które Autor dysertacji opublikował wcześniej w innych pracach, powinny mieć odnośniki literaturowe.
2. Rys. 3.8. – przedstawia zestawienie kadrów rentgenowskich w funkcji czasu. Ostatnie dwa kadry przedstawiają obrazy sygnowane tym samym czasem (240 ns). Czy to błąd redakcyjny?
3. Rys. 3.9. – jeśli zdjęcie jest wzięte z pracy [56], wydanej w 2002 roku, to nie mogło być zrobione na PF-1000U, bo modernizacja tego układu była parę lat później.
4. Rozdz. 4.1.1. – podane równanie jest niewątpliwie znane, ale tym bardziej powinno być opatrzone dobrym, książkowym odnośnikiem literaturowym.
5. Umieszczenie w spisie literatury poz. 89 i 90 jest niewłaściwe. Pozycje te są dokumentacją dorobku naukowego Doktoranta (referat, poster na konferencji). Pozycja [90] to najprawdopodobniej publikacja [92].

## Podsumowanie

Przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską uważam za samodzielny i wartościowy dorobek naukowy pana mgr. Władysława Surały, stanowiący oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Cel pracy został osiągnięty, a całość rozprawy jest konsekwentną realizacją postawionych we wstępie tez.

Uważam, że wyniki badań uzyskane przez pana mgr Władysława Surałę na zmodernizowanych polskich urządzeniach Plasma-Focus PF-360U oraz PF-1000U mają bardzo dużą wartość i przedstawiają szerokie możliwości dalszych prac badawczych, które mogą być realizowane w polskich laboratoriach badawczych. Zgromadzony i przeanalizowany obszerny materiał eksperymentalny może stanowić wartościową bazę danych do kolejnych prac eksperymentalnych, teoretycznych i modelowych w zakresie fizyki gorącej plazmy i formowania mikro-obszarów o zwiększonej wydajności emisji promieniowania X, a także w celu pełnego wyjaśnienia emisji szybkich wiązek elektronowych. Przemawia za tym przedstawiona przez Autora dyskusja obserwowanych zjawisk i wnioski końcowe pracy.

Biorąc powyższe pod uwagę, **stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej** pana mgr Władysława Surały podkreślając wkład tej pracy w rozwój badań gorącej plazmy, które mogą być kontynuowane i rozwijane w naszych rodzimych laboratoriach na wysokim poziomie naukowym.

**Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim** w dziedzinie nauk fizycznych, dyscyplinie fizyka, zgodnie ze znowelizowaną ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami, por. Dz. U. z 2011 r. Nr 84, poz. 455, Nr 112, poz. 654, z 2012 r. poz. 1544) i wnoszę do Rady Naukowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych o dopuszczenie Doktoranta, pana mgr. Władysława Surałę, do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.

Kraków, 24.10.2016

