

Recenzja rozprawy doktorskiej p. Mgr Władysława Surały pt.

**Badania wiązek elektronowych i promieniowania rentgenowskiego
w układach typu Plasma-Focus**

Recenzowana rozprawa dotyczy tematyki gorącej plazmy i ma charakter eksperymentalny. Wykonana została w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) z wykorzystaniem układu doświadczalnego Plasma-Focus PF-360U oraz we współpracy z Instytutem Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM), gdzie wykorzystano układ Plasma-Focus PF-1000U. Przedmiotem szczegółowych analiz były impulsy promieniowania rentgenowskiego i wiązki szybkich elektronów emitowanych w wyniku wyładowań realizowanych w w/w układach.

Tematyka plazmy stanowi przedmiot badań prowadzonych intensywnie na całym świecie. Świadczy o tym chociażby liczba kilkudziesięciu konferencji organizowanych corocznie na wszystkich kontynentach (zob. <http://ieee-npps.org/directory-of-plasma-conferences/>). Zainteresowanie wynika zarówno ze złożonego charakteru procesów rozwijających się w tym egzotycznym stanie materii, jak i z potencjalnych możliwości wykorzystania plazmy w różnego rodzaju procesach technologicznych, a w szczególności kontroli procesu fuzji termojądrowej dla celów produkcji energii elektrycznej. Recenzowana praca stanowi wkład w badania z zakresu tej tematyki. Dotyczy więc zagadnień aktualnych, zarówno z poznawczego, jak i utylitarnego punktu widzenia.

Rozprawa liczy 85 stron, składa się z sześciu rozdziałów i spisu literatury zawierającego 93 pozycje.

We wprowadzeniu za punkt wyjścia przyjęto warunek „zapłonu” gorącej i gęstej plazmy określany przez kryterium Lawsona lub tzw. „iloczyn potrójny”. Spełnienie tych warunków możliwe jest na kilka sposobów. Autor wymienia tu magnetyczne i inercyjne utrzymanie plazmy oraz układy typu Z-pinch, których przedstawicielem jest układ Plasma Focus (PF), stanowiący przedmiot badań podjętych w tej pracy. Opis takiego układu w realizacji Mathera podany jest w w kolejnej sekcji wprowadzenia. Przedstawiony jest ogólny schemat układu i wymienione jego podstawowe elementy. Przedyskutowane są też procesy inicjowane impulsem wysokonapięciowym i prowadzące ostatecznie do powstania ogniska plazmowego – plasma-focus. Zwrócona jest uwaga na emisję elektronów i jonów w tym procesie oraz fotonów w postaci promieniowania hamowania. Podkreślona jest rola niestabilności w rozwoju procesu powodująca powstawanie różnego rodzaju struktur lokalnych w postaci włókien plazmowych mających istotny wpływ na trajektorie emitowanych cząstek. Wspomina się modele służące do opisu tego typu procesów zwracając uwagę na ich skomplikowany charakter.

Dotychczasowe badania pokazują, że przebieg procesu i w rezultacie uzyskiwane wyniki pomiarów zależą silnie od warunków początkowych dotyczących zarówno szczegółów konstrukcji urządzenia, jego układu geometrycznego i zastosowanych materiałów, jak i

sposobu inicjalizacji wyładowania. Dla układów PF-360U i PF-1000U, brak było szczegółowych analiz dotyczących emisji promieniowania rentgenowskiego i impulsowych wiązek szybkich elektronów, dla warunków pomiarowych stosowanych po modernizacji tych urządzeń.

Stało się to motywacją dla podjęcia dedykowanych badań, co ostatecznie pozwoliło na sformułowanie tezy rozprawy, w której zakłada się, że emisja promieniowania rentgenowskiego zachodzi głównie z tzw. włókien plazmowych oraz mikro-obszarów zwanych „hot-spots”, w pobliżu których następuje też akceleracja elektronów i powstawanie wiązek szybkich elektronów.

Rozdział drugi poświęcony jest opisowi wykorzystywanych układów pomiarowych, tj. PF-360U oraz PF-1000U. Dla obydwu układów podane są informacje dotyczące ich projektowania i lokalizacji oraz wymienione są podstawowe parametry układów. Są też informacje o specyficznych szczegółach ich konstrukcji oraz procedurze ich uruchamiania.

W rozdziale trzecim podany jest opis stosowanej aparatury pomiarowej. Wykorzystywano zarówno urządzenia przeznaczone do rutynowych pomiarów, jak i układy dedykowane rejestracji promieniowania elektromagnetycznego oraz cząstek naładowanych. Wśród tej pierwszej kategorii ważną rolę odgrywały układy do pomiaru zmian napięcia pomiędzy elektrodami w czasie wyładowania oraz pomiar pochodnej natężenia prądu dostarczanego z baterii kondensatorów. Do tego ostatniego celu stosowano tzw. pas Rogowskiego.

Do rejestracji twardego promieniowania rentgenowskiego stosowano szybkie sondy scyntylacyjne z plastikowymi scyntylatorami, osłonięte warstwą parafiny oraz kadmu tak, by eliminować rozproszone neutrony. Miękkie promieniowanie rentgenowskie rejestrowano z pomocą kamer typu „pinhole” z filtrami odcinającymi promieniowanie widzialne. W rozprawie podane są szczegóły konstrukcji oraz instalacji takich kamer w celu wyznaczenia charakterystyk integralnych wraz ze strukturą przestrzenną obszaru emisji. W celu wybrania przedziału rejestrowanych energii fotonów stosowano filtry absorpcyjne umieszczone przed diafragmą wejściową kamery.

Do rejestracji w funkcji czasu stosowano układy pomiarowe o złożonej strukturze geometrycznej z możliwościami zadania czasu ekspozycji oraz opóźnienia. Umożliwiało to zarówno rejestrację różnych faz wyładowania, jak i obserwację poszczególnych obszarów rozwijającego się w przestrzeni procesu. W tym celu stosowano również detektory typu „PIN-diode”, które mogły obserwować różne obszary na osi symetrii układu PF-1000U. Szybkie elektrony rejestrowano z pomocą różnego rodzaju spektrometrów magnetycznych, które umożliwiały zarówno rejestrację integralną jak i w funkcji czasu. W spektrometrach tych rejestracja odbywała się w postaci obrazu na filmie, stosowano także detektory Czerenkowa i miniaturowe detektory scyntylacyjne. Jako pomiary uzupełniające rejestrowano także szybkie neutrony pochodzące z reakcji syntezy oraz deuterony, które tej reakcji nie ulegały i emitowane były głównie wzdłuż osi symetrii układu.

Rozdział czwarty prezentuje wyniki wykonanych przez autora badań. Opis emitowanego promieniowania rentgenowskiego podzielono na dwie części: pomiary integralne względem czasu oraz pomiary z rozdzielczością czasową. Przebadano wiele wariantów, zaczynając od pomiarów wyładowań w czystym deuterze a następnie wprowadzając domieszki z gazów szlachetnych., co pozwoliło zbadać wpływ tych domieszek na charakterystyki emitowanego promieniowania.

Pierwszym wynikiem pomiarów w czystym deuterze było zaobserwowanie mikrostruktury kolumny plazmowej w fazie jej największej kompresji. W strukturze tej można było wyróżnić włókna plazmowo-prądowe, które niekiedy podlegały rozerwaniom, co w rezultacie prowadziło do tworzenia się lokalnych, bardzo silnych pól elektrycznych. W polach tych dochodziło do przyspieszania grup elektronów, które z kolei w czasie propagacji w plazmie emitowały intensywnie promieniowania hamowania, co było obserwowane w postaci obszarów zwanych „hot-spots”. W badanych wyładowaniach rejestrowano również emisję neutronów z reakcji syntezy D-D. Stanowiło to dodatkową informację i możliwość analizy korelacji z procesem emisji fotonów. Wprowadzenie iniekcji deuteru wzdłuż osi symetrii układu powodowało bardziej stabilny i symetryczny rozwój wyładowania, czemu towarzyszyła także większa intensywność emisji neutronów.

Kolejną testowaną kombinacją gazów był pomiar, w którym użyto deuteru jako gazu roboczego, ale z domieszką neonu. Spowodowało to zmniejszenie emisji neutronów, ale zaobserwowano wyraźne włókna plazmowe oraz „hot-spots”, a także przemieszczenie kolumny plazmy względem osi elektrod. Dodanie iniekcji deuteru wzdłuż osi symetrii układu poprawiło stabilność kolumny plazmowej, ale zmieniła się jej struktura wewnętrzna.

Dla porównania wykonano także pomiary z komorą wypełnioną czystym neonem. W tym przypadku nie zaobserwowano emisji neutronów, ale bardziej intensywna była emisja promieniowania rentgenowskiego. Zaobserwowano także występowanie włókien plazmowych skręconych spiralnie względem osi wyładowania. Zastosowanie dodatkowej iniekcji neonu wzdłuż osi układu ok. 2 ms przed iniekcją główną prowadziło do jeszcze większej intensywności promieniowania rentgenowskiego. Sprawdzone jeszcze kombinację czystego neonu z iniekcją deuteru. W tym przypadku zaobserwowano formowanie cienkiego sznura plazmowego, ale słabą intensywność promieniowania rentgenowskiego.

Wszystkie przedstawione powyżej badania wykonano z pomocą układu PF-1000U. Dla potwierdzenia zaobserwowanych prawidłowości wykonano także podobne pomiary z PF-360U. W przypadku wyładowań w czystym deuterze zaobserwowano, podobnie jak w PF-1000U, włókna plazmowe ale też znacznie bardziej intensywne „hot-spots”, które układały się wzdłuż kierunków włókien plazmowych. Co więcej, na obrazach rejestracji integralnej widoczne były one w postaci wydzielonych punktów. Wskazuje to na niewielkie ich przemieszczanie się w czasie trwania całego procesu.

Efekt taki spowodowany mógł być istnieniem niestabilności magnetohydrodynamicznych, które doprowadziły do rozpadu włókien plazmowych na kilka części. W konsekwencji mogło to powodować rozdzielanie ładunków i powstanie bardzo silnych pól elektrycznych mogących przyspieszać elektrony. Te z kolei w rezultacie hamowania w gęstej plazmie emitowały promieniowanie rentgenowskie. Silne pola elektryczne mogły także przyspieszać jony w kierunku przeciwnym powodując emisję mikro-wiązek szybkich jonów. Widać z tego niezwykle istotną rolę „hot-spots” w mechanizmach emisji promieniowania zarówno elektromagnetycznego, jak i korpuskularnego.

W celu bardziej szczegółowej analizy wprowadzono do deuteru domieszki cięższych gazów szlachetnych: argonu, kryptonu i ksenonu. Spowodowało to oczekiwane zmniejszenie emisji neutronów i pojawienie się większej liczby obszarów „hot-spots” i to nie tylko na osi symetrii wyładowania. Efekt ten zwiększał się ze wzrostem liczby atomowej domieszkowanego gazu. Niektóre obszary zlewały się symulując w ten sposób

włókna plazmowe. Ten rozrzut obszarów „hot-spots” sugeruje istnienie różnych form włókien plazmowych np. w kształcie kielicha lub spisali.

Wszystkie powyższe analizy dotyczyły integralnych pomiarów promieniowania. Równocześnie prowadzone były też pomiary w funkcji czasu. Zestawienie wyników obu pomiarów umożliwiło przyporządkowanie obrazom integralnym rozkładów czasowych zarejestrowanych z pomocą kamer „pin-hole” i detektorów obserwujących różne obszary kolumny plazmowej. W rezultacie pozwoliło to na określenie momentów, w których pojawiała się intensywna emisja i której rezultat widoczny był w pomiarach integralnych. Okazało się wtedy, że obszary „hot-spots” pojawiają się na różnych etapach rozwoju procesu, zarówno w czasie kompresji plazmy jak i w fazie jej rozpadu, a rozrzut czasowy sięga nawet 800 ns. Miejsce i czas ich pojawienia się skorelowany jest z obserwacją obszarów „hot-spots”, rejestrowanych w promieniowaniu elektromagnetycznym.

Podobne analizy przeprowadzono dla wiązek emitowanych szybkich elektronów. Tu także obrazy pomiarów integralnych analizowane były wspólnie z rozkładami czasowymi impulsów rejestrowanych z pomocą spektrometrów magnetycznych, liczników scyntylacyjnych i detektorów Czerenkowa. Zaprezentowano oddzielnie wyniki uzyskane dla wyładowań w czystym deuterze, a także dla przypadków domieszkowania gazami szlachetnymi o dużych liczbach atomowych. Zaobserwowano, że rozrzut czasowy mikro-wiązek elektronowych był coraz większy dla domieszkowania coraz cięższymi gazami. Dodatkowo wykonano także pomiary z pomocą interferometru laserowego i kamer jonowych.

Rozdział piąty poświęcony jest analizie uzyskanych rezultatów eksperymentalnych. Są tu zebrane i usystematyzowane wyniki wszystkich wykonanych pomiarów. Autor analizuje zaobserwowane prawidłowości, które pokazują, że uzyskane wyniki dowodzą słuszności tezy postawionej na początku rozprawy. Podsumowanie wyników analiz zebrane w punktach zawiera rozdział szósty. Wnioskiem końcowym jest zwrócenie uwagi na potrzebę kontynuacji przedstawionych w rozprawie badań, ale z wykorzystaniem bardziej precyzyjnej aparatury pomiarowej. Autor widzi też potrzebę wykonania obliczeń teoretycznych w postaci 3-wymiarowego modelowania rozwoju procesu, co jest jednak zadaniem trudnym i czasochłonnym.

Rozprawę kończy spis literatury zawierający 93 pozycje. W ośmiu z nich współautorem jest W. Surala, przy czym w czterech jest pierwszym autorem wbrew porządkowi alfabetycznemu.

Oceniając treść rozprawy należy zwrócić uwagę na kilka aspektów:

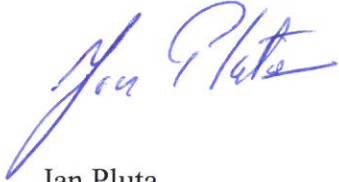
1. Została tu wykonana ogromna praca eksperymentalna. Autor tylko krótko wspomina o sprawach przygotowania aparatury, ale ze względu na wielką różnorodność stosowanych technik pomiarowych, musiała to być praca zarówno zaawansowana technicznie (mechanika, techniki próżniowe, elektronika, informatyka itd.), jak i złożona w realizacji. Wymagała wiedzy i umiejętności eksperymentalnych oraz zwyczajnie - poświęcenia wielkiej ilości czasu aby znaleźć się w punkcie startowym, czyli móc rozpocząć wykonywanie pomiarów.
2. Samo wykonanie pomiarów, to także ogrom pracy i koniecznego zaangażowania. Pomiary wykonane były w Świerku oraz w IFPiLM (Warszawa-Bemowo) z pomocą aparatury, która choć w zasadzie podobna, to przecież każdy układ posiadał swe specyficzne cechy. To współpraca z zespołami ludzi, to rozwiązywanie wielu

problemów i jak zwykle, zwalczanie wielu „kamieni podwodnych”, o czym następnie nie wspomina się lub wzmiankuje kilkoma zdaniami w treści pracy.

3. Uzyskane wyniki stanowią bazę informacyjną dla przyszłych eksperymentów, które będą wykonywane z pomocą dwóch unikalnych, zarówno Polsce jak i na świecie, układów pomiarowych. Praca miała jasno sformułowany cel – uzyskanie danych i poznanie mechanizmów emisji impulsów promieniowania rentgenowskiego oraz impulsowych wiązek szybkich elektronów. Stanowiło to podstawę do sformułowania tezy rozprawy, którą następnie potwierdziły uzyskane wyniki.
4. Zdaniem recenzenta, informacje podane w powyższych trzech punktach mogą stanowić podstawę do wyróżnienia rozprawy za wielki wkład w rozwój konkretnej dziedziny badawczej, jaką jest fizyka gorącej plazmy, badana z pomocą układów Plasma-Focus.
5. Rozprawa, zawiera jednak prawie wyłącznie wnioski o charakterze jakościowym. Bardzo wiele jest sformułowań typu: „pochodzą zapewne”-str.43, „sugerują, że”-str.47, „został prawdopodobnie”-str.55, „można wytłumaczyć”-str.60, „mogły pochodzić”-str.-64, „zdawała się korelować”-str.77, itd. Chciałoby się widzieć uzupełnienie tych sformułowań wnioskami ilościowymi.
6. Rozprawa zawiera wiele tzw. literówek. Odnosi się wrażenie, że tekst nie został przeczytany przed wydrukowaniem. Można też zauważyć nieściśle sformułowania (np. nieprawidłowo podane rozmiary elektrod, str. 18) i nieprecyzyjnie wykonane rysunki (np. kształt komory na Rys. 3.6). Potknięcia te nie mają wpływu na merytoryczną zawartość rozprawy ale lepiej do nich nie dopuszczać.

Uwagi te nie zmieniają jednak zdecydowanie pozytywnej oceny rozprawy. Jak już wspomniano, autor sam zauważa potrzebę kontynuacji badań z użyciem doskonalszej aparatury oraz uzupełnienia ich obliczeniami teoretycznymi. Recenzent jest dokładnie tego samego zdania, zaś zauważone niedoskonałości redakcyjne niech będą nauką użyteczną w dalszej działalności naukowej autora.

Podsumowując. Praca zawiera wyniki badań doświadczalnych dotyczących istotnych i aktualnych zagadnień naukowych. Uzyskane wyniki stanowią cenny materiał do kontynuowania dalszych badań. Uważam, że **praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**



Jan Pluta