

Dziekan Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie  
Prof. dr hab. Ewa Gudowska-Nowak

Recenzja  
rozprawy doktorskiej  
mgra Tomasza Jakuba Pięty

*Badania porównawcze plazmy indukowanej laserem z zastosowaniem optycznej spektroskopii emisyjnej i laserowego rozpraszania Thomsona*

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska magistra Tomasza Jakuba Pięty, *Badania porównawcze plazmy indukowanej laserem z zastosowaniem optycznej spektroskopii emisyjnej i laserowego rozpraszania Thomsona*, została wykonana pod opieką dra hab. Krzysztofa Dzierżęgi, prof. UJ.

Rozprawa napisana jest w języku polskim. Składa się z sześciu rozdziałów oraz jednego dodatku i liczy łącznie 121 stron. Tematyka rozprawy bardzo dobrze wpisuje się w obszar współczesnych badań prowadzonych nad plazmą, a jej metodologia należy do obszaru nowoczesnych technik laserowych. Głównym celem badań doktoranta było wykonanie diagnostyki plazmy indukowanej laserowo w argonie pod ciśnieniem atmosferycznym za pomocą dwóch całkowicie niezależnych od siebie metod. Pierwszą z nich była spektroskopia emisyjna, która posiada już długą tradycję i jest dobrze ugruntowana. Drugą metodą, bardziej zaawansowaną, było rozpraszanie wiązki laserowej na elektronach swobodnych w wyniku zjawiska Thomsona. Ta ostatnia technika jest wolna od szeregu założeń odnośnie stanu diagnozowanej plazmy, którymi obarczona jest spektroskopia emisyjna, takimi jak np. założenie odnośnie istnienia lokalnej równowagi termodynamicznej lub częściowej lokalnej równowagi termodynamicznej. Dzięki porównaniu wyników dostarczonych przez wymienione metody, doktorant odpowiada na pytanie: czy i do jakiego stopnia plazmę indukowaną laserowo w atmosferze argonu można traktować jako plazmę znajdującą się w stanie lokalnej równowagi termodynamicznej? Jednocześnie badania te są kontynuacją badań prowadzonych od 10 lat w Zakładzie Fotoniki IFUJ, które zmierzają do wprowadzenia techniki rozpraszania Thomsona do kanonu metod diagnostycznych plazm indukowanych wiązką laserową.

Ogólnie rzecz ujmując rozprawę można podzielić na dwie części. Rozdziały I-III, składające się na umowną część pierwszą, opisują najważniejsze, z punktu widzenia tematyki rozprawy, zjawiska fizyczne i przedstawiają odpowiednie wzory. Kolejne trzy rozdziały – część druga – dotyczą eksperymentu, w tym analizy otrzymanych wyników. Pierwszy rozdział zawiera podstawowe wiadomości na temat plazmy oraz jej parametrów, elementarnych procesów

zachodzących w plazmie, typowych sposobów jej modelowania i wytwarzania za pomocą impulsów laserowych oraz dyskusję przesłanki występowania stanu LRT w plazmie. Rozdział ten zawiera również skrótowy opis modeli ewolucji plazmy wytworzonej impulsem laserowym. W rozdziale drugim omówiono koncepcje leżące u podstaw optycznej spektroskopii emisyjnej plazmy oraz jak za jej pomocą wyznaczyć: temperaturę, koncentrację swobodnych elektronów i skład chemiczny plazmy. Rozdział trzeci przedstawia teoretyczny opis – w ramach elektrodynamiki klasycznej – oddziaływania promieniowania z naładowaną cząstką. W szczególności w tymże rozdziale znajdują się rozważania na temat rozpraszania światła laserowego na cząstkach plazmy oraz wpływu tej wiązki światła na plazmę. Rozdział czwarty omówia: układ doświadczalny wraz z jego schematem, szczegóły techniczne odnośnie wytwarzania plazmy w przeprowadzonych eksperymentach, obrazowania plazmy oraz światła rozproszonego. Główne wyniki rozprawy zawierają rozdziały V i VI. Rozdział piąty zawiera szczegółowy opis poszczególnych doświadczeń wraz z ich wynikami. W końcu w rozdziale szóstym zostały przedstawione wnioski płynące z przeprowadzonych badań. W dodatku A opisano procedury i program służący do wykonywania odwrotnej transformacji Abela. Rozprawę kończy bibliografia licząca 181 pozycji.

Ocenę rozprawy rozpocznę od uwag krytycznych. Drobne błędy w tekście rozprawy:

Terminologia:

- Przy opisie powstawania plazmy bardzo często występującej fraza „generacja plazmy”, tylko sporadycznie „wytwarzanie plazmy”, przedkładałbym tę ostatnią.
- Odnosząc się do formuł matematycznych doktorant używa zwrotu „równania”. Terminu równanie używa się do wyrażen matematycznych zawierających niewiadome. Formuły w rozprawie można było nazwać „wzorami”.
- Na str. 9 czytamy „przy której energia kinetyczna”, czy tutaj autor mówi o jej średniej wartości?
- Uwaga „równanie (I.39) jest spełnione” odnosi się do nierówności.
- Na str. 32 znajdujemy „ $g_i$  to degeneracja stanu”, precyzyjniej „ $g_i$  to stopień degeneracji stanu”.
- Na str. 33 czytamy „rozmiar plazmy”, preferowałbym „promień przekroju obłoku plazmy”.
- W kilku miejscach autor zamiast terminu amplituda mógłby użyć bardziej trafnych nazw i tak na str. 45 nad wzorami (III.10) i (III.11) zamiast „amplituda pola elektrycznego” można było napisać „natężenie pola elektrycznego”, na str. 53 zamiast „różnią się one amplitudą” – „różnią się one współczynnikami”, w podpisie rys. III.8 zamiast „amplitudy funkcji” – „maksimum funkcji”.
- Na str. 49 mamy frazę „masy spoczynkowej” lepszą byłaby „energii spoczynkowej”.
- W podpisie rys. III.4 czytamy „mniejszy od fali rozpraszania”, zaproponowałbym zamianę na „mniejszy od długości fali rozpraszania” lub „mniejszy od długości charakterystycznej dla fali rozpraszania”.
- W podpisie rys. V.25 zamiast „czerwony, przerywany wykres” preferowałbym „czerwona, przerywana linia”.

Błędy drukarskie:

- Wzory: (I.8) i (I.11) konflikt oznaczeń – symbol  $\Lambda$ .

- „Zagubione przecinki” we wzorach (I.17), (II.2).
- Wzór (II.1) zamiast „s” powinno być „x”.
- Wzór (I.29) funkcja podziału oznaczona przez małe „u”.
- Lokalna równowaga termodynamiczna, konflikt skrótów: cLRT (str. 21) vs. czLRT (str. 101).
- Symbol  $\lambda_D$  oznacza długość Debye’a (I.2), a  $r_D$  promień plazmowy Debye’a (V.1) czy są tożsame?
- Na str. 37 pod wzorem (II.17) znajdujemy definicję parametru ekranowania, czy nie jest to odwrotność tego parametru?
- Wzór (III.8) powinien mieć kształt, taki jak przedstawia to jedna z poniższych propozycji:

$$t - \frac{R(1-\bar{R}(r_j-r_{j'}))}{c} = t - \frac{R-R(r_j-r_{j'})}{c}$$

- We wzorze (III.30) o jaki symbol chodzi  $\vartheta$  czy też  $\theta$  oba symbole występują na rys. III.2 i mają tam inne znaczenie.
- We wzorze (III.46) po prawej stronie w dwóch miejscach zamiast  $T_e$  powinno być  $T_e^0$ .
- Na rys. III.12 oś odciętych powinna mieć jednostki s czy ns?
- Czy oznaczenie osi na rys. V.1 jest zgodne z ustalonymi kierunkami osi współrzędnych na bazowym schemacie aparatury pomiarowej, rys. IV.1? Oś pozioma (kolumna (a)) powinna być oznaczona jako oś OY, jeśli przyjąć wcześniejsze ustalenia za wiążące. (Ta sama uwaga dotyczy rys. V.6.) Ponadto, czy w kolumnie (b), zawierającej widma części elektronowej przy opóźnieniach  $\Delta t=2,5 \mu s$  oraz  $10 \mu s$ , skala  $\lambda$  jest poprawnie „przypięta”?
- Na str. 21 mamy „van der Muller”, a powinno być van der Mullen.
- Brak cytowania: skąd pochodzą wartości funkcji podziału  $U(T)$  w TAB. II.1?
- Większość cytowań ma formę wskazującą na prace jednoautorskie, a w rzeczywistości odnoszą się one do prac wieloautorskich.

#### Poważniejsze uwagi:

- Na str. 46 znajdujemy wzór (III.16) opisujący przesunięcie częstości rozproszonej fali elektromagnetycznej na swobodnym elektronie. W akapicie nad tym wzorem autor przedstawia rozumowanie, całkowicie poprawne, prowadzące do otrzymania wzoru (III.16) w oparciu o efekt Dopplera. W tym miejscu można by było przedstawić alternatywne wyprowadzenia tego wzoru stosując zasady zachowania energii i pędu do opisu zderzenia foton-elektron, podobnie jak postępujemy przy analizie efektu Comptona, czy też optycznego chłodzenia atomów, opierając się na nierelatywistycznych wzorach oraz ograniczając się do wyrazów liniowych w  $\hbar$ . W mojej opinii takie dodatkowe uzasadnienie podniosłoby walor dydaktyczny rozprawy. Podobnie korzystniej by było przedstawić wyprowadzenie wzoru (III.17) niż odsyłać czytelnika do literatury. Oba omawiane wzory są dość istotne z punktu widzenia tematyki rozprawy.
- Skrótowy opis zadania, jakie spełnia układ teleskopowy w formowaniu wiązki pompującej dałby pełniejszy obraz kształtowania tej wiązki.

- W opisie rys. V.2 mamy listę parametrów. Czy rzeczywiście dopasowywane były trzy swobodne parametry: parametr rozpraszania  $\alpha$ , koncentracja elektronów  $n_e$  i temperatura  $T_e$ ? Przecież zgodnie z wzorem (III.30)  $\alpha$  jest funkcyjnie zależny od  $n_e$  i  $T_e$ .
- Na str. 84 znajdujemy zwrot „tzw. temperatura normatywna” zabrakło mi krótkiego wyjaśnienia tego terminu.
- Na str. 41 autor napisał “Z tej zależności wynika, że w celu wyznaczenia  $n_e$  niezbędna jest znajomość temperatury kinetycznej elektronów  $T_e$ ” o jakiej zależności jest tutaj mowa?
- Na str. 87 czytamy „Przy czym już na wstępie założono, że na część gaussowską składają się rozszerzenia aparaturowe i dopplerowskie, zaś część lorentzowska zdominowana jest rozszerzeniem Starka.” Co do pierwszej części zdania pełna zgoda, natomiast co do drugiej jego części zabrakło mi odniesienia do wzoru (II.18), a więc do ustalenia wzajemnych relacji między wkładem elektronowym  $w^{nor}$  a wkładem jonowym danym przez parametr asymetrii  $A$ . Jest to tym bardziej niejasne, że nie znajdujemy wartości  $A$  i  $w^{nor}$  w TAB. II.2. Ta sama uwaga odnosi się do zdania (str. 84) „Natomiast w celu wyznaczenia rozszerzenia dla wszystkich przypadków posłużono się pojedynczym profilem, ponieważ dobrze odzwierciedla on szukaną szerokość połówkową”. Czy nie jaśniej by było napisać, że szerokość pojedynczego profilu jest powiązana ze zderzeniową szerokością elektronową  $w^{nor}$ ? Następnie, rys. V.8 i V.9 prezentują dopasowanie do danych eksperymentalnych profili linii złożonych z dwóch nieco przesuniętych funkcji pseudo-Voigtcha (wzór II.20). Wśród zamieszczonej listy parametrów dopasowania nie znajdujemy wartości rozsunęcia składowych funkcji p-V. Jakim efektem fizycznym odpowiada wartość takiego parametru? Czy nie jest on pewną miarą asymetrii profili linii, a więc – zgodnie z teorią Griema – odnosi się on do udziału jonów w formowaniu profilu tej linii?
- Autor podkreśla, że plazma powstała w wyniku przebiccia laserowego (w przeciwieństwie do plazmy towarzyszącej procesowi ablacji laserowej) z natury powstaje w sposób stochastyczny, a rejestrowane widmo jest średnią z widm promieniowania pochodzącego z wielu obłoków plazmowych, często przesuniętych w przestrzeni. Stąd pojawia się pytanie, czy jest możliwa wstępna analiza poszczególnych rejestrogramów cyfrowych, taka która pozwalałaby na automatyczne ich przesunięcie lub choćby odrzucenie przypadków znacząco odbiegających od oczekiwanego położenia obłoków przed obliczaniem średniej?

Rozprawa mgra Pięty charakteryzuje się solidnie wykonanymi badaniami zmierzającymi do rozwiązania dobrze określonego problemu fizycznego. Warto podkreślić, że pomiary przeprowadzone przez doktoranta zostały wykonane za pomocą dwóch niezależnych metod – spektroskopii emisyjnej oraz thomsonowskiego rozpraszania wiązki laserowej. W dzisiejszych czasach standardem staje się badanie określonego zjawiska za pomocą różnych metod doświadczalnych, oceniana rozprawa bardzo dobrze wpisuje się ten trend. Na pewno cenne umiejętności nabył doktorant w związku z koniecznością zestawienia od podstaw i uruchomienia odpowiedniej aparatury w nowej siedzibie laboratorium. Plazma powstająca w wyniku przebiccia laserowego w argonie dynamicznie ewoluuje i w związku z tym ani nie jest stacjonarna ani jednorodna. Jest trudnym obiektem badawczym i wymaga zastosowania bardzo zaawansowanych technik pomiarowych, w szczególności szybkiego i

zsynchronizowanego rejestrowania widm optycznych oraz starannego opracowania wyników. Mgr Pięta bardzo dobrze poradził sobie z tym zadaniem, wykazując się odpowiednimi umiejętnościami i wiedzą. W szczególności bardzo cenne są jego wyniki pozwalające ocenić kwazi-jednorodność oraz kwazi-stacjonarność plazmy argonowej indukowanej wiązką laserową. Zaslugują na wyróżnienie również wyniki dotyczące zaburzania plazmy impulsem próbkującym. Doktorant przeprowadził procedurę uwalniającą wartość zmierzonej temperatury elektronowej od wpływu podgrzewania jej przez impuls próbkujący. Podobnie jak inni badacze, doktorant zaobserwował, że oddziaływanie wiązki próbkującej z plazmą ma znaczący wpływ na temperaturę elektronową oraz znikomy wpływ na koncentrację elektronów. W rozprawie znajdujemy również odpowiedź na pytanie na jakich etapach ewolucji plazmy można wiarygodnie przyjąć, że spełnione są warunki lokalnej równowagi termodynamicznej. Ponadto bardzo dużą zaletą rozprawy od strony dydaktycznej jest jej pierwsza część, która m. in. zawiera wszystkie niezbędne wiadomości potrzebne do zrozumienia zjawiska Thompsona oraz różnych efektów pożądaných i niepożądaných związanych z zastosowaniem metody opartej na tym zjawisku do przeprowadzenia diagnostyki plazmy. Większość tej wiedzy została przedstawiona, z konieczności w sposób skrótowy, ale bardzo jasno posługując się licznymi przejrzystymi i estetycznymi schematami oraz wykresami.

Reasumując, w swojej rozprawie doktorskiej mgr Pięta przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazał umiejętności praktyczne potrzebne do przeprowadzania zaawansowanych doświadczeń w zakresie fizyki oraz ogólną wiedzę teoretyczną, a także zdolność do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Jego rozprawa spełnia więc warunki nakładane przez ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz wymagania zwyczajowe w dyscyplinie nauki fizyczne, dlatego wnoszę o dopuszczenie doktoranta do publicznej obrony.

*W. Oldhawa*