

Dr hab. Ewa Pawelec
Instytut Fizyki
Uniwersytet Opolski
ul. Oleska 48
45-052 Opole

Opole, 26.06.2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Franciszka Sobczuka
pt. „Dwukolorowe rozpraszanie światła laserowego w diagnostyce plazmy
generowanej laserowo”**

Rozprawa doktorska magistra Franciszka Sobczuka pod tytułem „Dwukolorowe rozpraszanie światła laserowego w diagnostyce plazmy generowanej laserowo” została przygotowana pod kierunkiem promotora dr. hab. Krzysztofa Dzierżęgi, prof. UJ, w ramach studiów doktoranckich na wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, w Instytucie Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego.

Rozprawa została napisana w języku polskim. Składa się z dwóch krótkich rozdziałów na początku i końcu – wprowadzenia na temat plazmy generowanej laserowo oraz podsumowania oraz z dwóch obszernych – części teoretycznej i eksperymentalnej pracy. W wielu pracach doktorskich część teoretyczna jest wprowadzeniem streszczającym stan wiedzy w dziedzinie, a dopiero w części dalszej pojawiają się własne dokonania doktoranta, ale w tym przypadku obliczenia i symulacje pokazane w części teoretycznej również są w sporej części efektem pracy doktoranta, któremu potrzebne były one do planowania i analizy części eksperymentalnej.

Plazma generowana laserowo jest bardzo ważnym tematem naukowo-technologicznym, stosowanym bardzo szeroko – od laserowej fuzji jądrowej do testowania składu muzealnych dzieł sztuki. Diagnostyka takiej plazmy jest możliwa za pomocą różnych metod, ale stosowanie metod spektroskopii laserowej jest tu bardzo rozsądne z powodu lokalności i dużej rozdzielczości czasowej tej metody spektroskopii. Wbrew komentarzowi doktoranta ze strony 7 rozprawy, problematyczność optycznej spektroskopii emisyjnej nie polega na przyjmowaniu określonych założeń na temat równowagi termodynamicznej plazmy – w każdym razie, jak sama praca pokazuje, nie jest ich mniej niż założeń, które trzeba przyjąć podczas analizy światła laserowego rozproszonego na plazmie. Dwie główne przewagi rozproseniowej spektroskopii laserowej to jej lokalność (sygnał pochodzi z rejonu przecięcia wiązki próbkującej oraz kierunku obserwacji światła rozproszonego) oraz fakt, że relatywnie łatwo z jej wyników otrzymać temperaturę i gęstość elektronów, podczas kiedy ze spektroskopii emisyjnej wprost otrzymuje się przecałowane po kącie obserwacji gęstości wzbudzonych cząstek ciężkich i ewentualnie temperaturę wzbudzeniową, czyli zupełnie inne parametry, często mniej interesujące dla diagnostyki plazmy. Dlatego więc diagnostyka polegająca na analizie promieniowania laserowego rozproszonego na plazmie jest szeroko stosowana dla różnych źródeł plazmy (np. plazmy fuzyjnej uwięzionej w polu magnetycznym czy też plazmy przyspieszanej w silnikach jonowych).

Część teoretyczna pracy doktoranta podzielona jest na dwie części – analiza rozpraszania Rayleigha, czyli rozpraszania na cząstkach neutralnych (atomach i molekułach) oraz rozpraszania Thomsona – na cząstkach naładowanych (elektronach, jonach i jonach molekularnych). W obu tych działach doktorant prezentuje obliczone przez siebie współczynniki dla określonych gazów roboczych oraz symulowane widma, czyli rozkłady gęstości spektralnej rozproszonego na gazie promieniowania. Doktorant porównuje między sobą wyniki obliczeń wykonanych z wykorzystaniem różnych przybliżeń i analiz teoretycznych wziętych z literatury, rozważając zależności od temperatur (elektronowej oraz wzbudzeniowej), a także gęstości składników plazmy. Wiele ze współczynników opisujących zależności spektralne światła rozproszonego jest zależne od długości fali tego światła, więc porównując widma rozpraszania dla wiązek laserowych wyraźnie różniących się długością fali otrzymujemy znacznie więcej informacji niż dla wiązki pojedynczej, ewentualnie pozbywając się niektórych trudnych do zmierzenia współczynników aparaturowych. Ten fakt spowodował w ostatniej dekadzie pojawienie się nowatorskich eksperymentów z „dwukolorową” diagnostyką laserową, w które wpisuje się recenzowana praca doktorska.

W części eksperymentalnej doktorant relacjonuje doświadczenia z dwukolorowego rozpraszania laserowego przeprowadzone przez niego w laboratorium Zakładu Fotoniki UJ. O ile oczywiście analiza części elektronowej widma Thomsona jest działaniem dość standardowym, to doktorant prowadzi ją z dużą starannością i bardzo precyzyjnie, uwzględniając różne mechanizmy wpływające na kształt piku elektronowego. Bardzo ciekawa jest analiza całkowitego natężenia światła rozproszonego, pozwalająca na „wyciągnięcie” z tej metody znacznie więcej informacji – także o obsadzeniu stanów atomowych (choć metoda oczywiście wymaga pewnych założeń co do stanu równowagi plazmy). Imponujące precyzją i pracowitością przygotowania są zwłaszcza wyniki z drugiego eksperymentu wykonanego w atmosferze azotu, gdzie doktorant dla rozwiązania problemu niskiego natężenia światła rozproszonego (zbyt niskiego, by uzyskać sensowny stosunek sygnału do szumu po przepuszczeniu tego światła przez spektrometr wysokiej rozdzielczości, czyli etalon Fabry’ego-Perota) buduje i kalibruje optyczny wzmacniacz parametryczny.

Ogólnie, praca robi bardzo dobre wrażenie ugruntowaną podbudową teoretyczną i obliczeniową, precyzyjnie zdefiniowanym problemem do rozwiązania i staranną analizą wyników. Doktorant uwzględnia, a czasami wyklucza, wiele źródeł potencjalnego błędu systematycznego. Uwzględnia wpływ wiązki próbkującej na stan badanej plazmy, do analizy danych stosuje różne przybliżenia i teoretyczne podejścia, dyskutując ich wpływ na otrzymywane krzywe fitujące widmo. Z racji rozbudowanej podbudowy teoretycznej praca ma też duży walor dydaktyczny, dając możliwość śledzenia założeń i przybliżeń używanych przez autora podczas analizy sygnałów. Praca stanowi również dokument wysokich umiejętności eksperymentalnych doktoranta, zwłaszcza biorąc pod uwagę konieczność synchronizacji wielu wiązek laserowych o różnych długościach fali z krótkożyłowym badanym źródłem plazmy oraz analizę sygnałów wymagających bardzo starannej kalibracji, a także budowę i zastosowanie optycznego wzmacniacza parametrycznego. Dało to możliwość wykonania bardzo kompleksowej diagnostyki plazmy za pomocą jednego układu pomiarowego.

Praca jest bardzo ładna edytorsko, ale doktorant nie ustrzegł się pewnej liczby błędów. Bardzo częstym niestety błędem edytorskim, który i tu się trafia, jest stosowanie na wykresach krzywych różniących się jedynie kolorem oraz opis tych krzywych w legendzie w taki sposób, że zrozumienie

wymaga dobrej umiejętności rozpoznania kolorów. Jest to rzecz, która jest coraz częstsza w czasach druku kolorowego, ale należałoby pamiętać o tym, że nie wszyscy czytelnicy kolory rozróżniają, nawet jeżeli wydruk czy plik są w kolorach. Warto byłoby zastosować bardziej przyjazne dla daltonistów możliwości identyfikacji krzywych. W wielu miejscach w pracy (szczególnie w podpisach do rysunków) zdarzają się także literówki – pierwsze z nich są jeszcze zanim się praca zacznie, czyli w tabeli oznaczeń już mamy „świtała” (zamiast „światła”) i „różniczkwy” przekrój czynny. W niektórych miejscach są błędy stylistyczno-gramatyczne, głównie polegające na pogubieniu się doktoranta w zdaniu lub zgubieniu słowa. Na przykład na stronie 20 dowiadujemy się, że „Wyznaczenie funkcji [...] nastęrcza większych trudności” – prawdopodobnie miało być tam „nie”, ale zaginęło. Na stronie 29 w podpisie rysunku mamy „Wartości uzyskane dla $n = 1$ porównane zostały z klasycznym wynikiem uzyskanym przez zastosowanie wzoru (2.17) i wartości polaryzowalności atomu wodoru $a_H = 7.418A^2s^4kg^{-1}$ zaczepniętą z pracy [68].” - zamiast zaczepniętej. Największa gęstość literówek występuje na stronie 98, gdzie pojawia się „eletronowa”, „lini”, „równaie”, „impuls laserowa próbkującego” oraz „nie przypadka na centralny obszar”, wszystko w jednym akapicie. Warto również pamiętać, że metoda nazywa się „ab initio”, a nie „inicio” (str. 116).

Literówki czy błędy gramatyczne nie wpływają w większości na zrozumienie pracy, natomiast czasami zdarza się coś odrobinę poważniejszego. Z takich edytorskich błędów wyliczylibym:

- równanie 2.76 na stronie 36, gdzie w pierwszym wyrazie po prawej stronie w liczniku ułamek mamy $1 - \chi_i(k, \omega)$, a w porównaniu z pracą źródłową jestem przekonana że powinien być tam plus,
- w omówieniu przy wzorach 2.92 i 2.93 (strona 44), gdzie χ nazwane jest przenikalnością dielektryczną, chociaż jest to podatność – to wytłumaczenie (kończące się na następnej stronie) jest zresztą niejasne i jeszcze do niego wrócę,
- w okolicach wzoru 3.13, gdzie pojawia się znikąd niewytłumaczona wielkość I^{DC} , która jest najprawdopodobniej oceną prądu ciemnego, ale tego wyjaśnienia brakuje,
- na stronie 51 mamy nieco nieszczęśliwe sformułowanie „Rzeczywiste widma”, w przypadku widm pochodzących z symulacji uwzględniających czynniki aparaturowe,
- w wyprowadzeniu wzoru 3.50 z 3.49 coś jest nie tak – jeżeli podstawiam tam zgodnie z tym, jak wyprowadzenie jest opisane, to w liczniku wzoru 3.50 powinien być pierwiastek z N_L i nie wiem, czy zabrakło go tylko w równaniu, czy też w późniejszych obliczeniach (a przy okazji N_f zmienia się w N_F),
- nie rozumiem nieco opisu z sekcji 3.1.3, głównie sformułowania że światło zostało „jednorodnie rozproszdzone po powierzchni matrycy [...] poprzez przesuw końcówki tego światłowodu w obszarze, w którym generowana jest plazma” – mam nadzieję, że nikt końcówki światłowodu do plazmy nie wprowadzał.

Wszystkie powyższe uwagi odnoszą się do, w moim przekonaniu, czystych pomyłek, nie będących wątpliwościami merytorycznymi. Jest jednak również kilka uwag merytorycznych.

Pierwsza z nich odnosi się do tekstu na stronie 28 – doktorant analizuje tam przekroje czynne na rozpraszanie na atomach (czyli Rayleigha) i podaje wzory 2.52 oraz 2.53 na całkowity przekrój czynny

oraz przekrój czynny tylko na tę część atomów, która znajduje się w stanie wzbudzonym. Te wzory są potem wykorzystywane do otrzymywania populacji atomów wodoru z widma światła rozproszonego (str. 62 i dalej). Rzecz w tym, że czasami doktorant zakłada, że jedynie poziom wzbudzone znajdują się w stanie równowagi termicznej, natomiast poziom podstawowy jest od nich „odczepiony” – rzecz w tym, że wzory te zawierają funkcje podziału energii zależne od temperatury wzbudzeniowej, a funkcja rozkładu jest sumą po **wszystkich** stanach, z podstawowym włącznie. Myślę, że akurat dla opisywanego w pracy zakresu temperatur i gazu roboczego będącego wodorem, helem, azotem czy argonem problem dla atomów powinien być marginalny, ale jest to rzecz, którą należałoby mieć na uwadze. Dla jonów sprawa może być bardziej złożona.

Drugą z uwag chciałabym omówić wracając do wzorów 2.92 – 2.97 oraz tekstu znajdującego się przy nich. Porównując z pracą źródłową stwierdzam, że przeskok od równania 2.94 do 2.95, gdzie z χ^{eq} nagle robi się $\chi_{e,i}$ jest bardzo mylący, ponieważ sugeruje że równania dalsze odnoszą się oddzielnie dla części jonowej i elektronowej podatności dielektrycznej plazmy. Rzecz w tym, że w relacjonowanej pracy wielkość χ^{eq} jest ich **sumą**, a to co jest poprawne dla sumy, nie musi być poprawne dla każdego składnika z osobna. Zwłaszcza luźne stwierdzenie, że obie te podatności są w rozpatrywanych sytuacjach jedności... nie jest to zgodne ani z pracą źródłową, ani z intuicją. Nie nazwałabym także podstawienia parametru alfa przybliżeniem, chyba że uznamy za przybliżenie założenie rozkładu Maxwella. Cały ten kawałek jest później na stronie 46 w gruncie rzeczy odrzucany (doktorant ocenia, że wpływ tych efektów można pominąć), więc na wyniki ostateczne nie wpływa, ale wychodzi nieco nieelegancko. Swoją drogą, w uzasadnieniu że efekty te są zaniedbywalne, dla odmiany zabrakło mi jakiegoś cytowania lub odwołania do innej części pracy.

Najważniejszą rzeczą, co do której chciałabym szerszego omówienia i ewentualnie pokazania niektórych dodatkowych wyników jest sprawa wprowadzenia „rozkładu statystycznego gęstości elektronów” (strona 46, równanie 2.104). Jak rozumiem, jest to w pewnym zakresie trick matematyczny, uwzględniający w jednej wielkości sumaryczny wpływ wielu procesów mniej więcej stochastycznych, ale przydałoby się trochę lepiej przedyskutować jego sens fizyczny. Rzecz w tym, że w równaniach 2.102 i 2.103 doktorant odnosi się do natężenia wiązki próbkującej, sugerując pewien efekt pomiarowy. Potem nazywa to rozrzutem gęstości elektronów (równanie 2.104) i mówi o tym rozrzucie jako o efekcie niepowtarzalności generacji plazmy – który zależy już od innego lasera, zupełnie innej wiązki, i jest efektem fizycznym niekoniecznie liniowym w stosunku do mocy impulsu. To czego bym chciała to szerszej dyskusji od czego ten wyznaczany później współczynnik należy, a kiedy w okolicach strony 68 doktorant pokazuje wyniki fitowania chciałabym nie tylko pokazania, że funkcja lepiej pasuje do zależności spektralnej, ale też chciałabym pokazania i przedyskutowania jakie były wyniki temperatury i koncentracji elektronów dla $\sigma_e = 0$ (ponieważ poznamy tylko wynik dla $\sigma_e \neq 0$). Jest krótka relacja na temat zmian tego współczynnika podczas rozwoju plazmy, natomiast bardzo brak dyskusji co to znaczy fizycznie, czyli czym ten współczynnik podczas eksperymentu jest w efekcie zdeterminowany. Samo wprowadzenie współczynnika wydaje mi się bardzo dobrym pomysłem, po prostu uważam, że można by go bardziej skomentować i ewentualnie wykorzystać.

Najbardziej zabawny błąd edytorski trafił się doktorantowi na sam koniec pracy. Kiedy w podsumowaniu, na stronie 117, doktorant relacjonuje które części pracy zostały już opublikowane i gdzie, twierdzi, że „obserwacja występowania temperatury jonowej znacząco przewyższającej

temperaturę elektronową w początkowym stadium ewolucji plazmy generowanej w wodorze, który to wynik został zamieszczony w publikacji [102].” Rzecz w tym, że publikacja 102 to „*Stark effect of He II Paschen- α : Resolution of the disagreement between experiment and theory*”, czyli pomiary w plazmie helowej, a wyniki z rozprawy są opublikowane w pracy Sobczuk et al, „*Two-color laser scattering for diagnostics of hydrogen plasma*”, której w literaturze w ogóle zabrakło.

Reasumując, w rozprawie doktorskiej mgr Sobczuk przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazał się wiedzą i umiejętnościami tak w dziedzinie teorii i obliczeń jak i praktycznymi oraz samodzielnością w dziedzinie prowadzenia pracy naukowej. Uznaję więc, że rozprawa w pełni spełnia warunki ustawowe dla rozpraw doktorskich i wnoszę o dopuszczenie mgra Franciszka Sobczuka do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony pracy.

E. Sobczuk