

Zbigniew Kłos,
Centrum Badań
Kosmicznych PAN

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Romana Dudzaka

Pt.: Implementation of the femtosecond polaro – interferometry in research on PALS facility, related to shock ignition concept of ICF

1. Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi uchwała Rady Naukowej NCBJ oraz umowa -zlecenie Sekretarza Naukowego NCBJ No 160/16/ZL z dnia 01.07.2016 roku na wykonanie recenzji.
2. Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr Romana Dudzaka pt. Implementation of the femtosecond polaro – interferometry in research on PALS facility, related to shock ignition concept of ICF . Praca ma charakter eksperymentalno-badawczy i składa się z **7** rozdziałów głównych ,Listy Tabel zawartych w Pracy, Listy **136** rysunków zawartych w Pracy oraz Spisu **88** pozycji literatury. W ramach realizacji głównych celów pracy wykonano obszerne i wielowątkowe badania laboratoryjne z zakresu sferycznej kompresji plazmy w impulsie laserowym tj. podstawowej konfiguracji tzw. inercyjnej metody uzyskania fuzji termojądrowej (Inertial Confinement Fusion-ICF).Badania skoncentrowano na uwarunkowaniach grzania i zapłonu falą uderzeniową generowaną oddziaływaniem lasera z plazma tarczy na Układzie Eksperymentalnym PALS zlokalizowanym w Pradze czeskiej

Omówienie Pracy

W Roz.1 autor, krótko omówił różne konfiguracje eksperymentalne układów plazma-laser realizowane dla badania ICF. Szczególnie opisał koncepcję z zapłonem falą uderzeniową (shock ignition) jako jedną z najbardziej obiecujących podkreślając rolę szybkich elektronów w transferze energii impulsu lasera do tarczy i generacji dużego ciśnienia ablacyjnego niezbędnego dla wytworzenia fali zapłonowej.

W Roz.2 autor opisał konfigurację układu PALS, oraz jego diagnostyki w tym wielo-kadrową interferometrię pozwalające na przeprowadzanie badań charakterystyk procesów fizycznych zachodzących w inercyjnym grzaniu plazmy laserem poprzez tzw. szybki zapłon. Przy czym konfiguracja ICF symulowana jest wykorzystaniem tarczy podwójnej tj. twardej podstawy tarcz (Cu, Molibden, AL) i nałożonej na nią cienka folią. Fragmenty foli zwane makrocząstkami są przyspieszane do dużych prędkości w wyniku laserowej ablacji plazmy. Na takiej konfiguracji grupa PALS eksperymentowała od kilkunastu lat publikując uzyskane rezultaty między innymi po raz pierwszy zademonstrowano efekt szybkich elektronów na transfer energii lasera (1-harmoniczna lasera jodowego) do fali uderzeniowej generowanej w masywnej części tarczy. Wiąże się to z koncepcją mechanizmu zapłonu szokowego badanego przez autora w niniejszej pracy. Układ PALS wyposażony w 3-kadrowy interferometr diagnostyczny pozwolił również na generowanie i badanie strumieni naddźwiękowych plazmy. Na tej konfiguracji eksperymentalnej przeprowadzono również pierwsze badania nad szokiem zapłonowym. Ale w niniejszej pracy badanie wzbogacono o diagnostykę emisji szybkich elektronów, jonów oraz efektywność formowania kraterów w rdzeniu tarczy. Eksperymenty te pokazały silny wpływ długości fali i intensywności wiązki lasera na efektywność transferu energii lasera do rdzenia tarczy niezależnie od jej materiału.

Przeprowadzono wiele dalszych eksperymentów na tym układzie opisanych przez autora badając wpływ długości fali lasera, generacji wstępnej plazmy (pre-plazmy), stopnia zogniskowania wiązki lasera na warunki generacji fali uderzeniowej. Badania te potwierdziły, że używając 3-harmonicznej lasera jodowego PALS jako głównej wiązki można wygenerować fale uderzeniowa z ciśnieniem ablacyjnym osiągającym 90 Megabar. Było to znacznym postępem na drodze do osiągnięcia reżimu uderzeniowego zapłonu a zwiększając

powierzchnię ogniskowania wiązki można uzyskać zwiększenie ciśnienia. To jednak wymagało dalszego zgłębienia wiedzy o charakterystykach fizycznych zachodzących procesów absorpcji i transferu energii lasera do fali i udziału w tym szybkich elektronów. Te badania stanowią cel niniejszej pracy. Dla procesu szokowego zapłonu istotna jest pierwsza faza ekspansji związana z oddziaływaniem impulsu lasera z plazmą przez niego wytworzoną, w którym zachodzi anomalna absorpcja kreująca szybkie elektrony pola elektryczne i magnetyczne charakterystyczne dla plazmy niejednorodnej. W tym celu podstawowy system diagnostyczny oparto o interferometrię i polarometrię. Jako źródło światła dla diagnostyki wykorzystano femtosekundowy laser tytanowo szafirowy (Ti:Si).

W Roz 3. autor syntetyzuje tezy Pracy a więc wykorzystanie diagnostyki :systemu trzy-kadrowego interferometru ,dwu-kanałowego polaro-interferometru oświetlanego światłem femtosekundowego lasera tytanowo szafirowego (fala 808nm i długość impulsu 70 fsek) na układzie PALS. Wymagało to opracowania metody synchronizacji impulsu lasera oświetlającego w eksperymencie z generacją impulsu lasera jodowego PALS, tak na pierwszej harmonicznej (moc 10^{13}W/cm^2) inicjującej powstanie pre-plazmy imitującej warunki ICF, jak i impulsu silniejszego (moc 10^{15}W/cm^2) mającego wygenerować szok zapłonowy. W eksperymencie miedzianą płaską tarczę pokrywano różnymi warstwami plastiku i oświetlano pierwszą i trzecią harmoniczną o różnej mocy lasera jodowego układu PALS.

Głównym celem pomiarów interferometrycznych było otrzymanie rozkładów elektronowych ze znacznie większą rozdzielczością czasową we wczesnej fazie ekspansji plazmy ablacyjnej. Natomiast zastosowanie 2-kanalowego polaro-interferometru daje możliwość pomiaru pola magnetycznego poprzez kombinację mierzonego interferometrycznie rozkładu elektronów z rotacją płaszczyzny polaryzacji. Tym samym zdaniem autora istnieje możliwość identyfikacji mechanizmów absorpcji energii lasera i jej transferu do fali uderzeniowej. Łącznie z interferometrią zastosowano również diagnostykę spektroskopii rentgenowskiej, pomiaru intensywności jonów oraz badanie kraterów tarczy.

Rozdział 4 pracy omawia szczegóły techniczne zestawionego na układzie PALS :3-kadrowego interferometru, 2-kanałowego polaro- interferometru oraz

femtosekundowego lasera tytanowo-szafirowego używanego jako źródło światła pozwalającego na pomiary z rozdzielczością femtosekundową. Przedstawiono bardzo użyteczną analizę charakterystyk lasera determinującą stabilność pracy warunkującą pożądaną synchronizację pracy z głównym laserem układu.

Wyniki eksperymentów dotyczących transferu energii lasera do fali uderzeniowej dla różnych warunków istotnych dla procesu szokowego zapłonu przedstawił autor w **Rozd.5**.

Eksperymentowano oświetlając dwuwarstwową płaską tarczę (miedziany rdzeń pokryty warstwą CH) 1-harmoniczną lub 3-harmoniczną wiązką jodowego lasera PALS o energii 250J. Mniejszej intensywności wiązka (40kJ) wytwarzała pre-plazmę z warstwy CH a następnie z opóźnieniem 1,2ns główna wiązka oświetlała rdzeń tarczy generując fale uderzeniową. Możliwa była zmiana powierzchni ogniskowania wiązki na tarczy. Diagnostykę interferometryczną uzupełniano o spektrometrię rentgenowską dającą efektywną temperaturę oraz gęstość plazmy ablacyjnej, rozkłady szybkich elektronów opartych o pomiar linii emisyjnej CuK α , kolektor jonów oraz zobrazowanie kraterów.

Wykonano całe serie pomiarów, w których z otrzymanych interferogramów (3-kadry co 400ps, pierwszy synchronizowany w przedziale -400do200ps względem maksimum intensywności wiązki głównego lasera) odtworzono rozkłady koncentracji elektronowej plazmy ablacyjnej. Wyniki przedstawiono dla przypadków z brakiem pre-plazmy (tylko główna wiązka lasera) jak i z pre-plazmą, dla różnych powierzchni ogniskowania wiązki na tarczy. Przedstawiono również aproksymowane rozkłady gęstości wzdłuż osi układu. To wieloparametrowe zobrazowanie rozkładu koncentracji elektronów plazmy ablacyjnej daje panoramiczny ogląd charakteru ekspansji generowanej plazmy, która jest bardziej osiowa ze wzrostem oświetlanej powierzchni tarczy. Ponadto otrzymane rozkłady gęstości elektronowej wskazują, że pre-plazma generowana z cienkiej warstwy plastikowej ogranicza ekspansję głównej plazmy ablacyjnej. Bez pre-plazmy osiowa skala gęstości plazmy ablacyjnej jest znacznie większa. Przedstawione zależności maksymalnego gradientu gęstości plazmy, skali osiowej oraz maksymalnej gęstości plazmy silnie zależą od ogniskowanej energii lasera. Maksymalną wartość gradient ten osiąga dla najbardziej zogniskowanej wiązki. Jak wyjaśnia autor wtedy są najlepsze

warunki generacji szybkich elektronów na skutek rezonansowej absorpcji i dalej transfer energii do fali uderzeniowej w tarczy. Podobnie z przedstawionych wykresów wynika, że w obecności pre-plazmy efekt transferu energii jest znacznie słabszy. Przedstawione zależności czasowych zmian całkowitej zawartości plazmy są zgodne z oczekiwaniami.

Autor zastosował również rutynową diagnostykę pomiaru objętości kraterów generowanych impulsem laserowym w rdzeniu dwuwarstwowej tarczy. Efektywność transferu energii zależy bowiem od całkowitej ilości materiału tarczy z kraterów, która ulegnie przemianie fazowej za falą uderzeniową propagującą się w rdzeniu tarczy. Powiązanie pomierzonej pojemności wywołanych kraterów z całkowitą ilością powstałych termicznych elektronów określonych interferometrycznie dało możliwość oszacowania efektywności kreowania kraterów. I tak przy braku pre-plazmy efektywność tworzenia kraterów wzrasta wraz z maleniem oświetlanego ogniska. Odpowiada za to zdaniem autora transfer energii przez szybkie elektrony generowane w oddziaływaniu rezonansowym. Jednakże gdy wielkość oświetlanego ogniska wzrasta i przekroczy wartość krytyczną temperatura szybkich elektronów maleje (maleniem energii od lasera) i rola szybkich elektronów w procesie ablacji jest mniejsza niż przewodnictwa cieplnego. Potwierdza to zdaniem autora wzrost gradientu gęstości związanego z osiową ekspansją plazmy ablacyjnej. W konkluzji malenie poprzecznej ekspansji powoduje wzrost ciśnienia i transformację energii do fali uderzeniowej. Nie szacuje autor jednak roli przewodnictwa cieplnego w tym procesie.

Porównanie gęstości plazmy ablacyjnej określonej interferometrycznie z tymi uzyskanymi diagnostyką spektroskopii rentgenowskiej pokazuje, że zgodność zależy od powierzchni ogniska oświetlenia. Są zbliżone dla małej powierzchni ogniska, a rozbiegają się dla dużych. Autor tłumaczy to względnym udziałem w transferze energii szybkich elektronów i przewodnictwa cieplnego. Brak jednak oszacowań potwierdzających ten proces.

Moim zdaniem bardzo interesująco określono energię szybkich elektronów generowanych rezonansowym impulsem lasera przez pomiar emisji linii CuK_α poprzez zasymulowanie wzbudzenia linii K odpowiednim kodem numerycznym dla tarcz z różną grubością pokrycia warstwą plastiku. Następnie do otrzymanych z symulacji intensywności dopasowane te obserwowane w

eksperymentach. Ostatecznie otrzymano dla szybkich elektronów energie ca 29keV. Eksperymenty dla warunków bez pre-plazmy i w jej obecności potwierdziły, że obecność pre-plazmy redukuje udział szybkich elektronów w transferze energii do rdzenia tarczy. Podobnie pre-plazma zmniejsza efektywność transferu energii lasera do szybkich elektronów.

Dla porównania dla skonfigurowanego układu eksperymentalnego zdiagnozowano również generowane impulsem lasera strumienie jonów. Są one w obecności pre-plazmy 2-3 krotnie większe i generowane dla każdego rozmiaru ogniska. Oszacowanie na podstawie otrzymanych danych energii szybkich elektronów daje ca 70keV. Te wartości są jednak większe od tych otrzymanych ze spektroskopii rentgenowskiej. Autor tłumaczy to ich generacją w obszarach chłodniejszych – bliższych powierzchni ablacji ale czy czasowa zależność intensywność impulsu lasera nie ma tutaj znaczenia?

Dla porównania autor przytoczył symulację 2D transportu energii lasera do fali uderzeniowej w plazmie ablacyjnej wykonanej przez prof. N. N. Demchenko w oparciu o dane analizowane w niniejszej pracy ze swoim udziałem. Porównując dane eksperymentalne i numeryczne dane symulacji można stwierdzić, że w eksperymencie obecność pre-plazmy zmniejsza efektywność transferu energii od 1-harmonicznej lasera do tarczy przez szybkie elektrony podczas gdy symulacje pokazują, że na skutek rezonansowej absorpcji ta efektywność się zwiększa. W obu przypadkach pre-plazma zmniejsza osiowy gradient gęstości. Autor tłumaczy to efektem gradientu gęstości na granicy tarczy jakkolwiek nie jest to oczywiste.

W następnej części pracy autor powtarza pomiary omówione wyżej wykorzystując 3-harmoniczną wiązkę jodowego lasera głównego.

W przeciwieństwie do wiązki 1-harmonicznej rozkład elektronowej gęstości elektronowej generowanej przez 3-harmoniczną wykazuje osiowy charakter ekspansji niezależnie od powierzchni ogniska oraz maksymalną gęstość na osi. W przypadku 1-harmonicznej na osi lokowało się minimum gęstości. Ten fakt zmienia również obserwowane skale długości. W obecności pre-plazmy skale te są dwukrotnie większe niż w jej nieobecności. W sytuacji braku pre-plazmy energia szybkich elektronów była w przypadku 1-harmonicznej wiązki

efektywniej transformowana niż elektronowe przewodnictwo cieplne. W przypadku 3-harmonicznej ten proces występuje jeszcze wyraźniej.

Jeśli chodzi o formowanie kraterów to w przypadku 3-harmonicznej autor sugeruje jako główny mechanizm transferu energii przewodnictwo cieplne elektronów. Generalnie przy 3-harmonicznej głównego impulsu lasera konwersja energii lasera do szybkich elektronów jest bardzo słaba i minimalnie zależy od obecności pre-plazmy. Wspomagająca diagnostyka sugeruje, że w tym przypadku plazma ablacyjna i jej ekspansja jest określona transferem energii przez przewodnictwo elektronowe.

W roz.6 autor stosując femtosekundowy polaro-interferometr stara się pomierzyć pola magnetyczne generowane spontanicznie w oddziaływaniu lasera z tarczą. Analizuje przy tym warunki koncepcji szokowego zapłonu kiedy na skutek rezonansowej absorpcji ok.5% energii lasera jest transferowana do szybkich elektronów o temperaturze ok.50 keV w ekspandującej plazmie. Dlatego diagnostykę wzbogacono o pomiar parametrów pozwalających zrozumieć charakter wpływu ekspansji sferycznej szybkiej składowej lekkiej plazmy ablacyjnej oraz ekspansji osiowej ciężkiej plazmy na strukturę powstających spontanicznych pól magnetycznych. Materiał oświetlano 1-harmoniczną wiązką lasera układu PALS. Wykonane pomiary zobrazowano polarogramami i stowarzyszonymi interferogramami wykonanymi w każdym kanale polar-interferometru, oraz kompleksowymi interferogramami. Korzystając z zależności wiążących kąt rotacji Faraday'a i fazę z parametrami plazmy określono lokalne pole magnetyczne. W tym ujęciu wyliczenie rozkładu przestrzennego spontanicznego pola magnetycznego w osiowo symetrycznej plazmie sprowadza się do równania Abel'a. Wyniki pokazały, że maksymalne pole magnetyczne 10MG osiągnęte jest w pobliżu powierzchni tarczy i nie zmienia się w istotny sposób w czasie trwania impulsu laserowego. Jednakże znacznie zmienia się rozkład przestrzenny pola w trakcie ekspansji plazmy ablacyjnej i jest całkowicie różny dla plazmy lekkiej (plastik) oraz ciężkiej(Cu). Nie przedstawiono jak zależą spontaniczne pola magnetyczne od różnych charakterystyk impulsu wiązki laserowej.

W **Rozdziale 7** podsumowane są literalnie uzyskane wyniki eksperymentalne

Ogólna ocena pracy

Praca ma charakter wielowątkowy z główną tezą, że energia do fali uderzeniowej powstającej w oddziaływaniu lasera z tarczą dostarczana jest poprzez strumień rezonansowo przyspieszanych elektronów. W eksperymentach z 1-harmoniczną wiązką lasera jodowego wspartych kompleksową diagnostyką potwierdzono obecność tych wysoko energetycznych strumieni. Analiza pomiarów 3-kadrowym interferometrem pokazała, że wytwarzanie wstępne plazmy raczej utrudnia efekt transferu. Eksperymenty przeprowadzone z wykorzystaniem 3-harmonicznej wiązki lasera głównego nie pokazują tak wyraźnej akceleracji wiązki elektronów tzn., że transfer zachodzi poprzez proces konkurencyjny przewodnictwa cieplnego elektronów. Przedstawione w pracy kompleksowe zależności charakterystyk oddziaływania lasera z tarczą dają użyteczny materiał do dalszych analiz. Szkoda, że autor nie pokusił się o głębszą analizę jakościową i nie oszacował skali transferu energii przez przewodnictwo cieplne elektronów. Jaką rolę może ono odegrać na femtosekundowych skalach czasu? Dokonane pomiary spontanicznych pól magnetycznych są pionierskie i należy je wsparte rezultatami bardziej kompleksowej diagnostyki jak najszybciej opublikować. Pomimo, że autor korzystał ze wspólnie osiągniętych danych eksperymentalnych to w pracy widać samodzielne autorskie spojrzenie na te kompleksowe dane. Autor demonstruje wiedzę jak kolejne pomiary uzupełniają obraz fizyczny zachodzących procesów.

Ocena edycji pracy

Praca napisana jest i edytowana bardzo starannie. Czyta się ją dobrze, moim zdaniem napisana jest poprawnym naukowym językiem angielskim. Zauważone drobne usterki:

- Skala temperatury na Rys.5.27b str70 podana jest w (cm^{-3})
- Autor podaje swoje współautorstwo pracy umieszczonej w spisie literatury na pozycjach: 59,60,61,63.,jednak nie jest wymieniany. Są to postery i być może podano jedynie odpowiedzialnych za prezentację

Wnioski końcowe

W recenzowanej pracy doktorskiej mgr Roman Dudzak rozwiązał oryginalne zadanie naukowe, polegające na wyznaczeniu kompleksową diagnostyką nowych zależności charakterystyk fizycznych w plazmie ablacyjnej generowanej oddziaływaniem impulsu lasera z tarczą. Stwierdzam, że główny cel rozprawy doktorskiej został osiągnięty. Doktorant wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem, umiejętnościami planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych i ich interpretacji.. Przeprowadził w szerokim zakresie badania doświadczalne oraz ich analizy ,przyjął również do rozwiązania postawionego problemu poprawne metody badawcze. Uzyskał nowatorskie wyniki oraz wykazał, że potrafi analizować i krytycznie oceniać uzyskane rezultaty. Jest odpowiednio przygotowany do samodzielnego prowadzenia prac naukowobadawczych. Moje uwagi i znaki zapytania wymienione tekście nie obniżają dobrego, poziomu merytorycznego i ogólnej wysokiej oceny pracy a raczej mają charakter dyskusyjny. Rozprawa wnosi wkład w rozwój wiedzy dotyczącej inercyjnej fuzji termojądrowej.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr Romana Dudzaka Pt.: Implementation of the femtosecond polaro – interferometry in research on PALS facility, related to shock ignition concept of ICF spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14.03.2003 roku "O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" (Dz.U. Nr 65, poz. 595) oraz Rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15.01.2004 roku (Dz.U. Nr 15, poz. 128). W związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

