

*RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
WYDZIAŁU FIZYKI
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ*

Tytuł rozprawy: Numeryczne modelowanie laserowej generacji intensywnych wiązek jonów

Autor rozprawy mgr. inż. Jarosław Domański

Praca ma charakter teoretyczny i jest poświęcona opracowaniu oryginalnych, relatywistycznych kodów komputerowych, jedno- i dwuwymiarowych, pozwalających na kompleksowe modelowanie generacji wiązek jonów, powstałych w wyniku oddziaływania piko- i femtosekundowymi impulsami laserowymi o dużych natężeniach, tj. przekraczających 10^{18}W/cm^2 , z tarczą stałą. Opracowane programy, opisujące model laserowego akceleratora lekkich jonów pozwalają na uzyskanie pełnej charakterystyki generowanych wiązek obejmującej wyznaczenie maksymalnej i średniej energii jonów, struktury i szerokości widma energetycznego, przestrzennej struktury i rozbieżności kątowej wiązki, natężenia wiązki, gęstości prądu jonowego oraz kształtu czasowego impulsu jonowego w zależności od natężenia, polaryzacji oraz czasu trwania impulsu laserowego oraz grubości i składu tarczy. Warto podkreślić, iż możliwość przewidywania i kształtowania natężenia wiązki jonów, gęstości prądu jonowego czy też kształtu czasowego impulsu jonowego odgrywa istotną rolę w wielu zastosowaniach wiązek jonowych, np. w szybkim zapłonie fuzji termojądrowej czy też wytwarzania stanów o wysokiej gęstości energii, stąd parametry te powinny być uwzględniane w pełnej jej charakteryzacji. Uzyskane w rozprawie wyniki pozwoliły w sposób przekonujący dowieść tezy, iż właściwy dobór rodzaju tarczy stałej zawierającej wodór ma istotny wpływ na proces akceleracji jonów. Ponadto, wykazano, iż sprawność akceleracji jonów dla tarcz wykonanych z różnych materiałów w sposób istotny zależy od natężenia i polaryzacji wiązki laserowej, jak również od grubości tarczy.

Przeprowadzona w rozprawie pełna analiza literatury światowej, oraz wyciągnięte na jej podstawie wnioski, pozwalające na zdefiniowanie celu i zakresu pracy, zostały sformułowane w sposób przekonujący, świadcząc o głębokiej wiedzy Autora rozprawy oraz dużej swobodzie w poruszaniu się w obszarze zagadnień związanych z laserową generacją i akceleracją jonów.

Za podstawę opracowanego komputerowego modelu generacji wiązek jonów Autor rozprawy przyjął schemat laserowej akceleracji obserwowany dla tarcz cienkich (tj. o grubości poniżej $100 \mu\text{m}$), w którym impuls laserowy po wytworzeniu plazmy na powierzchni tarczy przyspiesza jony i elektrony zgodnie z kierunkiem propagacji. Jest to powszechnie stosowane rozwiązanie dla piko- i femtosekundowych impulsów o dużych natężeniach, rozważanych w pracy. Rozwiązanie to pozwala na uzyskiwanie wyższych gęstości jonów i protonów, średniej i maksymalnej energii protonów czy też gęstości prądu wiązki. Opracowane przez Autora jedno i dwuwymiarowe kody obliczeniowe są typu PIC, tzn. „cząsteczka w komórce” (ang. Particle in Cell). Do obliczeń ruchu

częstek została wykorzystana metoda warunkowa typu "leap frog". Implementacja równań Maxwell'a, relatywistycznych równań ruchu dla makrocząsteczek, schematu interpolacji pola elektromagnetycznego, procedury wyznaczania ładunku i prądów oraz schematu wyznaczania gęstości ładunku, jak również opisu impulsu laserowego nie budzi zastrzeżeń. Poprawne działanie opracowanych w rozprawie kodów zostało potwierdzone przez porównanie wyników symulacji i uzyskanie bardzo dobrej zgodności jakościowej z wynikami przedstawionymi w publikacji A.Sgattonie'ego dla kodu 3D, gdzie dla identycznych warunków generacji wiązki jonowej obliczenia wykonano na superkomputerze FERMI znajdującym się w centrum obliczeniowym CINECA we Włoszech. Poprawność i wiarygodność kodu 2D została również potwierdzona przez porównanie wyników symulacji generacji wiązek jonów z opisanymi w publikacjach danymi eksperymentalnymi. W tym przypadku różnice pomiędzy parametrami wiązek jonowych zarejestrowanych w eksperymencie a uzyskanymi z obliczeń nie przekraczają 30% , potwierdzając wysoką jakość opracowanego w rozprawie modelu numerycznego. Model ten został wykorzystany do symulacji akceleracji jonów generowanych w infrastrukturze ELI oraz z udziałem pentawatowego lasera tytanowo-szafirowego przy zastosowaniu cienkich tarcz wykonanych z wodorku erbu (ErH_3) i polistyrenu (CH). W obu przypadkach przyjęte do symulacji założenia oraz wartości parametrów charakteryzujące wiązki laserowe i opisujące użyte tarcze, są poprawne.

Recenzowana praca zawiera szereg oryginalnych wyników. Podstawowym i samodzielnym dorobkiem Autor jest niewątpliwie opracowanie jedno- i dwuwymiarowego modelu laserowego akceleratora lekkich jonów dla relatywistycznego obszaru natężeń światła, tj. natężeń większych od 10^{18}W/cm^2 . Wykorzystanie opracowanego narzędzia numerycznego pozwoliło w przypadku pentawatowego lasera tytanowo-szafirowego generującego impulsy o natężeniach z zakresu 10^{20} - 10^{21}W/cm^2 i czasie trwania 25fs wykazać, iż za akcelerację jonów jest głównie odpowiedzialny mechanizm TNSA (Target Normal Sheath Acceleration). Stwierdzono również, iż zastosowanie tarcz wykonanych z wodorku erbu zamiast polistyrenowych daje możliwość generacji krótszych impulsów protonowych o wyższych natężeniach oraz o wyższych średnich energiach jonów gdy impuls laserowy posiada liniową polaryzację. W przypadku przeprowadzonego badania generacji jonów dla laserów infrastruktury ELI wykazano, iż dominująca rola w procesie przyspieszania jonów odgrywa mechanizm RPA (Radiation Pressure Normal Sheath Acceleration). Ponadto wykazano, iż dla wyższych natężeń impulsu laserowego, przekraczających 10^{22}W/cm^2 oraz tarcz cienkich zastosowanie tarcz polistyrenowych pozwala na wytwarzanie krótszych impulsów protonowych o wyższych natężeniach, gęstościach prądów i średnich natężeniach niż w przypadku tarcz wykonanych z wodorku erbu. Parametry te osiągają największe wartości, gdy impuls laserowy jest spolaryzowany kołowo. Warto podkreślić, iż przedstawione w rozprawie wyniki zostały już w znacznej mierze opublikowane przez Autora rozprawy w pięciu recenzowanych czasopismach, w tym czterech o obiegu międzynarodowym, co w pełni potwierdza ich oryginalność.

Praca jest napisana w sposób jasny i zwięzły. Autor rozprawy wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawienia przez siebie wyników. Podobnie pod względem edycyjnym praca nie budzi zastrzeżeń, choć może niektóre rysunki zamieszczone w tekście charakteryzują się zbyt dużym stopniem miniaturyzacji.

W pracy, według mego przekonania, jest trudno doszukać się istotnych wad, choć pewnie dodanie w paru miejscach komentarzy czy doprecyzowanie stwierdzeń nie wpłynęło by negatywnie na wartość merytoryczną rozprawy. Na przykład można by się pokusić o wyjaśnienie dlaczego

metoda warunkowa „leap frog” jest lepiej dostosowana do analizy problemów rozważanych w pracy niż metoda bezwarunkowa? Podobnie przy opisie procedury wyznaczania gęstości ładunku i prądów dla przypadku dwuwymiarowego na czym polegała modyfikacja podejścia opisanego przez Villasenor’a i Buneman’a? Czy też w przypadku ustalania warunków symulacji dla dwóch systemów generacji wiązki jonów (lasera pentawatowego i systemu EII), jakie było kryterium doboru liczby makrocząstek?

Podsumowując, praca stanowi samodzielny i ciekawy dorobek naukowy Autora, potwierdzony szeregiem publikacji w czasopiśmie o obiegu międzynarodowym. W świetle przedstawionych w rozprawie wyników i analiz można stwierdzić, iż cel pracy, polegający na opracowaniu komputerowego jedno- i dwuwymiarowego modelu laserowego akceleratora lekkich jonów dla relatywistycznego obszaru natężeń światła oraz wykazaniu, iż poprzez właściwy dobór rodzaju tarczy stałej zawierającej wodór można znacznie podwyższyć parametry wiązki protonów generowanej laserem, został w pełni zrealizowany. Uzyskana szereg oryginalnych wyników badawczych dotyczących oddziaływania relatywistycznych impulsów laserowych z tarczami stałymi, pozwalających na identyfikację mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za przyspieszanie jonów, jak również kształtowanie parametrów wiązek jonów, w tym natężenia wiązki, gęstości prądu jonowego czy kształtu czasowego impulsu. Warto podkreślić, iż możliwość przewidywania i kształtowania wielkości tych parametrów ma kluczowe znaczenie dla wielu zastosowań praktycznych, np. takich jak szybki zapłon fuzji termojądrowej czy też wytwarzanie stanów materii o wysokich gęstościach energii.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgra Jarosława Domańskiego spełnia wszystkie wymagania ustawy o tytule i stopniach naukowych (art. 13 ustawy z dnia 14.03. 2003 Dz. U.Nr 65/03, poz 595 z póź. Zm. oraz rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15.01.2004r. Dz. U. Nr 15/04, poz. 128 z póź. Zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony, jak również wnioskuję o jej wyróżnienie.


Paweł Szczepański