

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosława Domańskiego pt. „Numeryczne modelowanie laserowej generacji intensywnych wiązek jonowych”.

Temat recenzowanej rozprawy doktorskiej związany jest jednym z najbardziej frapujących przedsięwzięć współczesnej nauki i technologii, które zmierza do zbudowania akceleratora cząstek naładowanych w oparciu o technikę laserową. Dzięki ogromnemu postępowi mierzonemu zarówno intensywnością ($\sim 10^{21}$ W/cm²), mocą (Tera i Peta Waty), jak i ekstremalnie krótkimi czasami trwania (\leq ps) uzyskiwanych impulsów laserowych szansa zbudowania akceleratora laserowego staje się coraz większa. Impulsy o takich parametrach oddziałując z materią wywołują liczne, nie w pełni zbadane dotąd zjawiska fizyczne, w tym akcelerację cząstek. Aby wyprodukować wiązki prędkich jonów o założonych parametrach należy przede wszystkim zbadać jak zależą one od charakterystyk impulsu laserowego (jego przebiegu w czasie – natężenia i mocy, długość fali i polaryzacji światła laserowego, rozmiaru ogniska itp.) a także od parametrów użytej tarczy (jej kształtu i grubość, składu chemicznego, warstwowości itp.). Można więc powiedzieć, że laserowa technika akceleracji cząstek, pomimo uzyskiwanych postępów, wymaga jeszcze wielu prac badawczy zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych. W prezentowanej pracy doktorskiej przedstawiono numeryczną symulację akceleracji laserowej, którą można wpisać w ogólnoswiatowy trend badawczy.

Przedmiotem pracy było komputerowe modelowanie i zbadanie wiązek jonów (głównie protonów) generowanych przez impulsy laserowe oddziałujące z dwoma rodzajami tarcz: lekką węglowodorową (CH) wykonaną z polistyrenu i ciężką - z wodorku erbu (ErH₃).

W pierwszym rozdziale przedstawionej pracy doktorskiej autor, na podstawie dostępnej literatury, omawia obszernie wiązek laserowej akceleracji cząstek z parametrami wiązek światła, które są/będą uzyskiwane w działających/budowanych) urządzeniach laserowych. Istotnym osiągnięciem techniki laserowej jest przede wszystkim skrócenie impulsów (do ps a nawet fs), co pozwala na uzyskanie ekstremalnie wysokich mocy (PW i TW) i natężeń (10^{20} - 10^{21} W/cm²). Autor analizuje charakterystyki przyspieszanych cząstek jakie udało się dotychczas otrzymać eksperymentalnie w wyniku oddziaływania światła laserowego z tarczami z materiałów stałych. Pokazuje zależność maksymalnej energii przyspieszonych jonów od natężenia i długości impulsów laserowych (Rys. 1.2 i 1.3), od grubości tarczy i od długości pre-impulsu, a także widma energetyczne, które były wyznaczone w różnych eksperymentach (Rys. 1.4).

W rozdziale pierwszym autor omawia fizyczne mechanizmy zaproponowane w celu wyjaśnienia istoty laserowej akceleracji. Najbardziej prawdopodobnym mechanizmem akceleracji w zakresie krótkich impulsów laserowych (≤ 1 ps) o średnich natężeniach (10^{17} – 10^{20} W/cm²) jest tzw. akceleracja TNSA (Target Normal Sheath Acceleration). Według tego scenariusza jony z tylnej powierzchni tarczy akcelerowane są przez pole elektryczne wytworzone przez prędkie elektrony. Elektrony te zostały przyspieszone w kierunku propagacji wiązki laserowej przez równoczesne działanie pól elektrycznego i magnetycznego fali światła laserowego. Elektrony, które przeniknęły przez tarczę utworzyły na jej tylnej powierzchni tzw. warstwę Debye'a charakteryzującą się ekstremalnie silnym polem E.

Dla impulsów laserowych o wyższym natężeniu (10^{21} – 10^{23} W/cm²) dominującą rolę w procesie przyspieszania jonów odgrywa mechanizm RPA (Radiation Pressure Acceleration).

Mechanizm ten wynika z założenia, że w rejonie warstwy krytycznej plazmy utworzonej przez pre-impuls na przedniej płaszczyźnie tarczy, generowane są dwie przeciwnie skierowane siły ponderomotoryczne (wzór 1.2) dzielące plazmę na dwa bloki propagujące się zgodnie i przeciwnie do kierunku wiązki lasera. Siła działająca zgodnie z kierunkiem wiązki dokonuje kompresji plazmy (etap drażenia otworu). Gdy przyspieszony blok plazmowy opuści tarczę jest on dalej przyspieszany przez ciśnienie światła i jego ruch jest dobrze opisywany jest przez tzw. model „żagla świetlnego”.

Rozdział pierwszy kończą rozważania na temat roli jaką w procesie akceleracji może odegrać zastosowana tarcza oraz jaki może być jej wpływ na parametry uzyskiwanych wiązek jonów. Z przytoczonego przeglądu literatury wynika że, optymalna grubość tarczy przy oddziaływaniu mechanizmu TSNA zawiera się w granicach kilku μm . Zastosowanie impulsów o dużym kontraście może spowodować zmniejszenie tej grubości aż od 0.1 μm . Na parametry uzyskiwanych wiązek jonowych wpływa również to z jakich pierwiastków tarcza jest zbudowana i jaka jest jej struktura (jednowarstwowa, wielowarstwowa implantowana wodorem itp.). Aby zwiększyć liczbę przyspieszanych protonów zwiększano się ilość wodoru w tarczy poprzez zastosowanie tarcz wielowarstwowych z cienką warstwą bogatą w wodór na tylnej powierzchni tarczy. Jednak okazało się, że nadmierna ilość wodoru wpływa negatywnie na proces akceleracji. Protony, które są cząstkami bardziej ruchliwymi niż inne jony (np. erbu czy węgla), szybciej docierają do warstwy elektronowej obniżając tym samym wielkość pola przyspieszającego E i skracają czas akceleracji. Autor przytacza interesujące wyniki uzyskane w pracy M.Foord et al. J. Appl. Phys. 103 056106 (2008), które pokazują, że problem może być rozwiązany przez użycie tarcz zawierających wodorki ciężkich pierwiastków takich jak erb i uran.

Autor dla swoich analiz (symulacji numerycznych) wybiera więc dwa rodzaje tarcz; lekką z polistyrenu CH i właśnie tą ciężką z wodorku erbu ErH_3 . Aby dokonać symulacji oddziaływania impulsu laserowego z wymienionymi tarczami, autor opracował jedno- i dwuwymiarowe kody komputerowe typu „cząstka w komórce” (particle in cell PIC). Schematy obliczeniowe użyte w tych kodach podobne są do tych użytych w kodzie LPIC⁺⁺ (R.Lichters et al. Report Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ 225), Garching 1997). Kody te zbudowano na bazie relatywistycznych równań ruchu cząstek w polach E i B (równań Maxwella) oraz równania Vlasova.

Zadanie jakie wykonał autor polegało na teoretycznym wyznaczeniu ilości generowanych jonów (głównie protonów) i ich rozkładu przestrzennego, średniej i maksymalnej energii protonów oraz kształtu ich widma energetycznego jak również natężenia i gęstość prądu wiązki protonów oraz przebiegu czasowego impulsu jonowego. Badania te (symulacje) autor wykonał dla dwu zakresów wielkości natężeń impulsów laserowych:

- dla impulsów o natężeniach od 10^{20} do 10^{21} W/cm^2 , długości fali światła $\lambda = 800$ nm i czasie trwania 25 fs. Impulsy takie oddziaływały z tarczami o grubości 0.59 μm w przypadku tarczy CH i 0.05 μm dla ErH_3 ;
- dla impulsów o natężeniach od 10^{21} do 10^{23} W/cm^2 charakteryzujących się czasem trwania 130 fs, i $\lambda = 800$ nm. Impulsy o tak wysokich natężeniach uzyskiwane będą, według przewidywań, z laserów budowanych w centrach tzw. Europejskiej Infrastruktury ELI (Extreme light Infrastructure).

Dla obydwu zakresów natężeń badano oddziaływanie impulsów światła o polaryzacji zarówno liniowej (LP) jak i kołowej (KP).

Istotnym osiągnięciem pracy jest „kompleksowa analiza wpływu składu tarczy oraz jej grubości na proces laserowej akceleracji jonów”. W pracy pokazano, że dla pierwszego zakresu natężeń (mechanizm TNSA), bezwzględnie lepsze parametry wiązki protonowej uzyskuje się dla tarczy z ErH_3 . Protony generowane z takiej tarczy - w porównaniu z protonami z tarczy CH - charakteryzują się: wyższymi energiami, węższymi widma

energetycznymi i mniej rozbieżnymi rozkładami kątowymi. Impulsy protonowe z tarczy ErH₃ mają czasy trwania porównywalne z długością impulsu laserowego (~ 25 fs), podczas gdy impulsy protonowe (prądowe) uzyskiwane z tarcz CH są kilkakrotnie dłuższe i na ogół mają dwa maksima. Ponadto natężenia wiązek protonów generowanych z tarczy ErH₃ są o rząd wielkości większe niż wiązek uzyskiwanych z tarcz CH. Jako przykład pokazano, że impuls laserowy o natężeniu 10²¹ W/cm², długości 25 fs oraz liniowej polaryzacji może wyprodukować w tarczy ErH₃ wiązkę protonów o maksymalnej energii 65 MeV, średniej energii ~ 10 MeV (Rys. 3.6 b) oraz o szczytowym natężeniu ~ 8·10¹⁸ W/cm² (Rys. 3.12). Porównując impulsy laserowe o polaryzacji liniowej i kołowej okazało się, że te ostatnie generują wiązki protonowe o parametrach kilkakrotnie (nawet o rząd wielkości) niższych i wpływ składu tarczy na te parametry jest zdecydowanie mniejszy.

Sytuacja ta ulega odwróceniu przy użyciu wiązki laserowej o natężeniach z drugiego zakresu (od 10²¹ do 10²³ W/cm²). Dla impulsów laserowych o najwyższych rozważanych w tej pracy natężeniach lepszą wydaje się tarcza CH. Wyniki symulacji pokazały, że impuls o takim natężeniu oraz polaryzacji kołowej oddziałując z tarczą polistyrenową może wyprodukować wiązkę protonów o czasie trwania ~11 fs, średniej energii 1.8 GeV i natężeniu szczytowym 0.8·10²² W/cm² tj. o parametrach dwa rzędy wielkości lepszych niż przy użyciu tarczy ErH₃. Szczytowa gęstość prądu tej wiązki wynosi 4.5·10¹² A/cm², co stanowi wielkość o rząd wielkości większą niż w przypadku tarczy ErH₃

Praca niniejsza, jak twierdzi jej autor, jest jedną z nielicznych, w których badano i analizowano takie charakterystyki wiązek jonowych jak: natężenie prądu wiązki, gęstość prądu czy kształt impulsu jonowego.

Autor pokazuje, że wyniki uzyskane za pomocą jedno- (1D) i dwu-wymiarowego (2D) kodu numerycznego typu PIC, w pewnych przypadkach nie różnią się znacznie między sobą. Przez analogię twierdzi również, że założenie dwuwymiarowości prezentowanych zjawisk i tym samym symulacje 2D w miarę dokładnie odzwierciedlają rzeczywiste procesy. W pracach (S.C.Wilks, et al., Phys. Plasmas, 8, 2 (2001), A.Pukhov, Phys. Rev Lett, 86, 16, (2001), T.Esirkepov, Phys. Rev. Lett. 92, 17 (2004)) pokazano jednak, że transportowi prędkich elektronów z przedniej powierzchni tarczy do tylnej jak również akceleracji jonów towarzyszą różnego typu niestabilności i rozmaite efekty wielowymiarowe takie jak filamentacja wiązki prędkich elektronów i tym samym wielokanałowa struktura magnetyczną. Pokazuje to, że problem generacji pola elektrycznego i magnetycznego w mechanizmie TSNA i akceleracji jonów jest trójwymiarowy i powinien być rozważany w przestrzeni 3D. Również w prezentowanej pracy pokazane są przypadki gdy wyniki symulacji 1D znacznie różnią się od wyników 2D (Rys. 2.7, Rys. 3.8 i 3.9, Tab. 2.5 i 2.6.). Nasuwa się więc pytanie jak bardzo będą różniły się wyniki symulacji 3D od 2D. Dlatego też, nie umniejszając znaczenia wyników uzyskanych za pomocą kodów 1D i 2D, warto zasugerować kontynuowanie tego tematu, a w szczególności opracowanie kodu 3D.

W recenzowanej pracy można napotkać pewne niejasności i nieścisłości merytoryczne jak również liczne pomyłki natury redakcyjnej. Przytoczę poniżej tylko niektóre z nich.

- W pracy brak jasnego określenia co to jest sprawność akceleracji.
- Str. 51, wiersz 13 od góry autor stwierdza... *siła oddziaływania jonów Er⁺¹⁰ z polem elektrycznym jest znacznie mniejsza niż w przypadku jonów C⁺⁶*, co jest zdaniem nieprawdziwym. Jak również (str. 51 wiersz 10) *...oddziaływanie to (pomiędzy ciężkimi jonami i polem elektrycznym) zależy od stosunku ładunku jonu i jego masy*, co również nie jest prawdą. Prawdą jest, że **przyspieszenie** jonu jest proporcjonalne do ilorazu ładunku i masy ale **oddziaływanie pomiędzy jonem a polem elektrycznym zależy tylko od ładunku jonu i natężenia pola elektrycznego**. Podobny błąd autor robi w kilku innych miejscach pracy, np. przy omawianiu Rys. 4.4 (str. 62 wiersz 4 od dołu).

- Str. 6, wiersz 4, *szczytowa gęstość prądu wynosi $4.6 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2$* , powinno być $4.6 \cdot 10^{12} \text{ A/cm}^2$ (jednostki). Podobny błąd jest na Str. 69, wiersz 8 od góry oraz wiersz 2 od dołu.
- Str. 14, wzór 1.4, nie określono co oznacza σ .
- Str. 15, wiersz 13, *...tarcza może stać się przezroczysta. Dzieje się tak na skutek spadku gęstości elektronów poniżej gęstości krytycznej w skutek wzrostu wartości tej ostatniej w wyniku efektów relatywistycznych...*” podobne zdanie jest na str. 21, wiersz 10 od dołu... nie wiadomo o jakich efektach relatywistycznych jest tu mowa?
- Str. 17, wiersz 1, *Oznacza to, że wymiar przestrzenny plazmy L_n jest znacznie mniejszy od długości Debye'a*” o który wymiar tu chodzi?
- Str. 20, wzór 1.11, co oznaczają symbole A, F_0, ϵ_0 ?
- Str. 21, wiersz 14 od dołu, *Zgodnie z wzorem 1,10 wraz ze zmniejszeniem się grubości tarczy wzrasta także efektywność mechanizmu RPA.* Czy efektywność mechanizmu RPA mierzona jest energią osiąganą przez jony? Wzór 1.10 wyraża bowiem energie osiąganą przez jony w obszarze dominacji mechanizmu RPA.
- Str. 21, wzór 1,13, co reprezentuje symbol I_l ?
- Str. 36, wzór 2.23 zamiast Δx w mianowniku powinno być Δt , taka sama nieścisłość występuje we wzorach 2.24 -2.29.
- Str. 48, brak w spisie literatury (Bibliografia) pozycji [84] i [85].
- Str. 49, wiersz 12 od góry, *Tarcze miały gęstość powierzchniową $\sigma = 0.06 \text{ mg/cm}^2$, a ich wymiar poprzeczny wynosił $12 \mu\text{m}$.* Czy wymiar poprzeczny to coś innego niż grubość?
- Str. 49, akapit na dole strony oraz Rys. 3.1, 3.2 i 3.3. Tekst niezbyt jasno objaśnia przedstawione wyniki w szczególności zdanie: *W związku z powyższym natężenia dla polaryzacji kołowej były o połowę mniejsze niż w przypadku polaryzacji liniowej*”. Zdanie to jest sprzeczne ze zdaniem poprzednim stwierdzającym, że: *Wykresy te (Rys. 3.1 i 3.2) przedstawiają wyniki symulacji 2D dla impulsów laserowych o natężeniu 10^{21} W/cm^2* , oraz z podpisami pod Rys. 3.1 i 3.2.
- Str. 54. wiersz 19 od góry. Analizując wyniki przedstawione na Rys. 3.8 i 3.9, które pokazują ilości wysokoenergetycznych protonów w funkcji natężenia impulsu laserowego i zostały obliczone przy użyciu kodów D2 i D1, autor stwierdza, że: *widać dobrą zgodność jakościową pomiędzy wynikami z różnych kodów.* Jednakże autor nie komentuje faktu, że kod D1 wykazał, trzy rzędy większą ilość protonów wysokoenergetycznych niż kod D2.
- Str. 57, Rys. 3.11, Z jakim punktem na tarczy związany jest początek układu współrzędnych wykresów zamieszczonych na tym rysunku?, to samo dotyczy Rys. 4.11. Dlaczego maksima gęstości ładunków występują przy odległości $15 \mu\text{m}$.
- Str. 58, wiersz 8 od góry, *...intensywność wiązki (protonowej) jest proporcjonalna do iloczynu energii i prędkości jonów.* Czym według autora jest intensywność i jaki jest wymiar tej wielkości ?
- Str. 59, wiersz 20 od góry, *Wyjątek stanowiły symulacje dla tarcz polistyrenowych o gęstości powierzchniowej **większej** niż $\sigma = 0.2 \text{ mg/cm}^2$, które przeprowadzono przy użyciu 9000000 mikrocząstek. Krok przestrzenny wynosił 26.6 nm Dla tarcz CH o gęstości powierzchniowej **większej** niż $\sigma = 0.2 \text{ mg/cm}^2$ krok przestrzenny wynosił 53.2 nm .* Wyrażna pomyłka.
- Str. 63, wiersz 5 pod Rys. 4.5. *Odchylenie standardowe ...wyrażone jest w jednostkach energii średniej i wynosi $\Delta E/E$.* ..Przytoczony wzór pokazuje, że jest to wielkość bezwymiarowa.
- Str. 67, Rys. 4.10. Jak wytłumaczyć fakt, że impulsy protonowe wygenerowane z tarczy ErH₃ pojawiły się w odległości $40 \mu\text{m}$ za tarczą wcześniej od impulsów wyprodukowanych w tarczy CH skoro energia tych pierwszych (a także odpowiednio prędkość) jest około 3 razy mniejsza niż tych drugich (str. 64 wiersz 9 od góry)?

Pomimo pewnych nieścisłości i mankamentów należy uznać, że praca zawiera bardzo dużą ilość wartościowych wyników uzyskanych na bazie opracowanych przez autora kodów numerycznych, które w przeważającej większości analizowane są i interpretowane w sposób poprawny. Szczegółowy przegląd literatury, którego autor dokonał w Rozdziale 1. pozwala zorientować się w światowych osiągnięciach w dziedzinie technik laserowych jak również w zastosowaniu zbudowanych (i budowanych) urządzeń laserowych w różnych dziedzinach nauki i techniki, z których najważniejszą jest tzw. fuzja laserowa (Inertial Confinement Fusion). Laserowa metoda akceleracji cząstek również zasługuje na najwyższą uwagę i prace wykonywane w tym temacie powinny być traktowane ze szczególnym zainteresowaniem.

W pracy pokazano, w szczególności, że tarcze wykonane z wodorku erbu (ErH_3) są bezwzględnie lepsze dla pierwszego zakresu analizowanych natężeń impulsów laserowych i pozwalają uzyskać wiązki jonowe o parametrach o rząd wielkości lepszych niż powszechnie używane dotychczas tarcze polistyrenowe. Wysoko energetyczne wiązki jonowe o parametrach obliczonych przez autora dla drugiego zakresu natężeń osiągalne będą po zbudowaniu laserów wchodzących w skład tzw. europejskiej infrastruktury ELI. Dla tego zakresu natężeń – jak wykazał to autor - lepsze efekty daje tarcza wykonana z polistyrenu.

Podsumowując osiągnięcia Doktoranta w realizacji badań (symulacji), których wyniki zawiera prezentowana praca doktorska, chciałbym podkreślić jego duży wkład i osobiste zaangażowanie w opracowanie i uruchomienie kodów numerycznych 1D i 2D. Na podkreślenie zasługuje szczególnie to, że aby dokonać właściwych obliczeń (symulacji) autor musiał uwzględnić moce obliczeniowe dostępnego dla niego komputera HYDRA dobierając odpowiednio ilość symulowanych cząstek. Na szczególne uznanie zasługuje interpretacja otrzymanych wyników i formułowanie ostatecznych wniosków, które, jak to już wcześniej zaznaczono, są w większości poprawne a wyciągnięte wnioski właściwe. Wyniki zademonstrowane w niniejszej pracy były prezentowane na kilku międzynarodowych konferencjach i zostały opublikowane w czterech artykułach zamieszczonych w renomowanych czasopismach, w których doktorant jest pierwszym współautorem. Należy również dodać, że doktorant jest współautorem innych publikacji zawierających wyniki symulacji inne niż te prezentowane w pracy doktorskiej.

Stwierdzam więc, że przedstawiona przez Pana Jarosława Domańskiego praca doktorska pt. „Numeryczne modelowanie laserowej generacji intensywnych wiązek jonowych” spełnia wszystkie wymagania merytoryczne i formalne rozprawy doktorskiej wynikające z obowiązujących obecnie przepisów o stopniach naukowych i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

H. Pyrekowski