

dr hab. Agnieszka Kulińska, prof. IFJ PAN
Zakład Fizyki Transportu Promieniowania
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
Kraków

Kraków, 25.06.2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Tchórza

pt. „Laser induced proton – boron fusion using TW-class laser system – study of novel approach employing protons produced during thermonuclear D(d,p)T reaction”

Rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Tchórza pt. „**Laser induced proton – boron fusion using TW-class laser system – study of novel approach employing protons produced during thermonuclear D(d,p)T reaction**” („Laserowo indukowana fuzja proton-bor z wykorzystaniem układów laserowych klasy TW – badanie alternatywnego podejścia wykorzystującego wiązki protonowe wyprodukowane podczas reakcji D(d,p)T”) została przygotowana w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy pod kierunkiem dr hab. Sławomira Jabłońskiego (promotor) i dr inż. Marcina Rosińskiego (promotor pomocniczy). Praca skupia się na wykazaniu możliwości użycia układów laserowych o mocach rzędu kilku terawatów do produkcji strumieni cząstek alfa, produkowanych w reakcji $p + {}^{11}\text{B}$, z propozycją nowatorskiego wykorzystania metody Cavity Pressure Acceleration (CPA). Tematyka pracy wpisuje się ściśle w stale rosnące (szczególnie w ostatnich dwóch dekadach) zainteresowanie społeczności naukowej reakcją syntezy proton-bor ze względu na jej potencjalne zastosowania w różnych dziedzinach. Od możliwości zbudowania „czystego” reaktora fuzyjnego, poprzez wykorzystanie generowanych cząstek alfa w terapii nowotworowej, do koncepcji napędu kosmicznego.

Praca została napisana w języku angielskim, obejmuje 108 stron z czego 88 to zasadnicza część rozprawy składająca się z 4 rozdziałów i bibliografii, zawierającej 74 pozycje, z czego autor jest współautorem 7 z nich. Zasadnicza część pracy poprzedzona jest streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisem rysunków i tabel oraz podziękowaniami. Praca oparta jest na danych doświadczalnych uzyskanych przez autora w eksperymentach, w których brał czynny udział, jak również na analizie wyników przeprowadzonych przez autora symulacji hydrodynamicznych oraz metodami Monte Carlo.

Rozdział 1 stanowi zwięzłe wprowadzenie do tematyki rozprawy. Zawiera on krótki przegląd literaturowy związany z wykorzystaniem laserów do inicjacji reakcji syntezy i utrzymania plazmy oraz laserowego przyspieszania cząstek naładowanych. Trochę szerzej, ale również

zwięźle został przedstawiony model *Target Normal Sheath Acceleration* (TNSA), którego podejście jest najbardziej istotne dla zagadnienia pracy ze względu na poziom intensywności impulsu laserowego dostępnego w Instytucie Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy. Najwięcej miejsca w Rozdziale 1 autor poświęcił koncepcji i wykorzystaniu metody *Cavity Pressure Acceleration* (CPA), przyspieszania makrocząstek z użyciem lasera, i możliwości jej zastosowania do zaindukowania reakcji syntezy protonu i boru. Wykorzystanie laserów wysokiej mocy do otrzymywania dużych strumieni cząstek alfa, będących produktami reakcji $p + {}^{11}\text{B}$, stało się w ostatnich latach bardzo intensywnie rozwijającą się gałęzią badań.

Wpisując się w ten nurt badań i poszukiwań nowych rozwiązań, została sformułowana i postawiona teza dysertacji: „*The intense proton beam generated through thermonuclear reaction of $D + D$ via Cavity Pressure Acceleration method allows to more efficient generation of alpha particles by means of $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$ fusion reaction comparing to standard approach to laser ion acceleration methods using TW-class laser system*”; (Intensywna wiązka protonów wytworzona w wyniku reakcji termojądrowej $D + D$ metodą Cavity Pressure Acceleration pozwala na wydajniejszą generację cząstek alfa w reakcji fuzji $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$ w porównaniu do standardowego podejścia do metod przyspieszania jonów laserem z wykorzystaniem systemu laserowego klasy TW).

Rozdział 2 poświęcony jest charakterystyce wiązki jonów, przyspieszanej metodą CPA, oraz ich oddziaływania z tarczą boru. Podrozdział 2.1, zawiera szczegółowy opis symulacji oddziaływania impulsu lasera wysokiej mocy z tarczą polietylenową umieszczoną we wnęce rezonansowej (CPA) o dwóch różnych geometriach (A i B). Zostały porównane parametry takie jak: gęstość, temperatura elektronowa, ciśnienie oraz ich zmienność w czasie, otrzymane jako rezultat symulacji kodem FLASH (Fig. 2.3-2.9). Pokazały one jak istotną rolę jest odpowiednie zaprojektowanie wnęk dopasowane do danego układu laserowego, aby uzyskać optymalne warunki do przeprowadzenia reakcji jądrowych. Podrozdział 2.2. poświęcony jest opisowi zasady działania podstawowego układu diagnostycznego wykorzystanego w prezentowanej pracy tj. spektrometru parabol Thomsona (TPS) wraz z oprogramowaniem (TPSeer) do analizy śladów jonów i ich parametrów, którego doktorant jest autorem, i który nadal jest rozwijany. Program ten można z powodzeniem zastosować do analizy i porównywania danych otrzymanych z użyciem spektrometrów TPS w innych eksperymentach, co potwierdzają m.in. Ref. 55 (w której doktorant jest współautorem) i Ref. 56. W kolejnym podrozdziale autor przedstawił zastosowanie pakietu oprogramowania FLUKA, opartego na metodach Monte Carlo, szeroko stosowanego w różnych dziedzinach: od radiologii, przez dozymetrię, projektowanie tarcz i detektorów, radioterapię, fizykę cząstek elementarnych, a także między innymi do weryfikacji danych eksperymentalnych w pracach poświęconych reakcji proton – bor indukowanej impulsami laserowymi. Pakiet FLUKA umożliwia w szczególności oszacowanie całkowitej wydajności i rozkładu oraz widm energetycznych cząstek w symulowanym eksperymencie (wyniki pokazano zarówno w Rozdziale 2 jak i 3).

Rozdział 3, to zasadnicza część pracy zawierająca wyniki eksperymentów przeprowadzonych w Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie (laser Pulsar – 10 TW) oraz w Ośrodku Badawczym PALS w Pradze (laser 2 TW). Wyniki dotyczące podejścia TNSA laserowego przyspieszania jonów zostały uzyskane w IFPiLM, podczas gdy dane dotyczące wykorzystania mechanizmu CPA w ośrodku PALS. W obu przypadkach charakterystyka wiązki protonów opiera się wyłącznie na wynikach uzyskanych za pomocą spektrometru parabol Thomsona zaprojektowanego i obsługiwanego przez zespół IFPiLM. (Szczegółowy opis możliwości wykorzystania TPS został przedstawiony przez autora w Ref. 53) W obu przypadkach wiązka protonów służyła jako dane wejściowe (input) do symulacji Monte Carlo i oddziaływała ona z tarczą wtórną wykonaną z czystego ^{11}B lub naturalnego boru (abundancja wynosi ^{11}B – 80 %, ^{10}B – 20%). Na podstawie wyników symulacji zostały omówione możliwości obu podejść pod względem produkcji cząstek alfa podczas reakcji $p + ^{11}\text{B}$. W bardzo oszczędny, wręcz skrótowy sposób zostały przedstawione układy eksperymentalne, w tym komora i diagnostyki, wykorzystane w eksperymentach przeprowadzonych w zarówno w IFPiLM (Fig. 3.1) jak i w PALS (Fig. 3.11).

W eksperymentach przeprowadzonych w Laboratorium Laserów Wielkich Mocy, opierając się na danych uzyskanych spektrometrem Thomsona, autor uzyskał widmo energetyczne protonów, które zostało użyte w symulacjach pakietem FLUKA. W symulacjach, dwa rodzaje tarczy („catcher”): z czystego ^{11}B i z naturalnego boru, zostały poddane działaniu wiązki protonów, o tym właśnie widmie energetycznym. Wykorzystując estymatory w pakiecie FLUKA (np. USRBDX, USRBIN) otrzymano widma energetyczne cząstek alfa dla różnych grubości tarcz, a następnie porównano wydajność cząstek alfa w funkcji grubości tarczy. Różnica wydajności cząstek alfa dla tarcz z czystego ^{11}B i z naturalnego boru odzwierciedla różnicę zawartości ^{11}B w obu materiałach (Fig. 3.6). Warto zaznaczyć, że wyniki symulacji nie wskazują na produkcję neutronów (Fig. 3.8 i 3.9), które to były obserwowane w wielu eksperymentach poświęconych reakcji proton-bor prowadzonych przez inne grupy. Neutrony te powstają w wyniku wtórnych reakcji wewnątrz tarczy borowej, takich jak $^{11}\text{B}(p,n)^{11}\text{C}$, $^{11}\text{B}(p,n)^{14}\text{N}$, a następnie $^{14}\text{N}(\alpha,n)^{17}\text{F}$. Tymczasem z analiz przedstawionych w pracy wynika, że energia protonów jest znacznie niższa niż energia wymagana do wywołania tych wtórnych reakcji. Dlatego też rzeczywiście w tym przypadku można mówić o źródle cząstek alfa bez emisji neutronów.

W eksperymentach przeprowadzonych w Ośrodku Badawczym PALS w Pradze, przetestowano trzy warianty tarcz wnękowych Cavity Pressure Acceleration (CPA), w celu nie tylko weryfikacji poprzednich wyników, zwiększenie produkcji neutronów z reakcji $\text{D} + \text{D}$, ale także zbadanie różnych konstrukcji tarcz CPA. Tarcza z wnęką wypełnioną częściowo proszkiem CD_2 została zaproponowana w celu weryfikacji, czy produkcja neutronów następuje zgodnie z mechanizmem wiązka-tarcza, jak w Ref. 65, 66, czy raczej ze względu na spełnione kryteria reakcji termojądrowej podczas kompresji plazmy deuteru wewnątrz wnęki, co zostało zasugerowane przez symulacje hydrodynamiczne. Aby wyjaśnić tę kwestię, naturalnym wydaje się skorzystanie z obydwu kanałów reakcji $\text{D} + \text{D}$, w których jest takie samo prawdopodobieństwo produkcji trytu i protonu, jak i helu-3 i neutronu. Zdecydowana

większość wyników omawianych w pracy dotyczy eksperymentów z wnęką CPA wypełnioną proszkiem CD_2 o grubościach 10 – 300 μm .

Analiza wyników rejestracji protonów spektrometrem Thomsona, nie pokazała oczekiwanego pików w pobliżu energii 3 MeV, poza wyładowaniem 59125, gdzie można zaobserwować wyraźnie większy udział protonów o energiach około 3.7 MeV (np. Fig. 3.16 ta praca oraz Fig. 3 w Ref. 74). Natomiast najwyższą energię protonów (> 5 MeV) zaobserwowano dla wyładowania 59104 (np. Fig. 3.14, 3.15).

Umieszczając detektory śladowe CR-39 w pobliżu wejścia do układu TPS, udało się autorowi wyznaczyć liczbę protonów o energii 3 MeV (1.3×10^{10} protonów/sr), która jest porównywalna tą uzyskaną przez TPS ($\sim 7 \times 10^{10}$ protonów) oraz liczbą neutronów zarejestrowanych przez detektory bąbelkowe BD-PND ($2.15 \pm 0.42 \times 10^9$ neutronów).

Aby sprawdzić potencjał wykorzystania reakcji syntezy D-D, wykonano dodatkowe symulacje magneto-hydro-dynamiczne MHD (pakiet FLESH), dla geometrii wnęki użytej w wyładowaniu 59104 z wykorzystaniem danych eksperymentalnych. Obliczenia te pokazały, że kształt cavity nie jest optymalny w kontekście tworzenia gęstego strumienia plazmy, jednakże zdają się potwierdzać powstawanie dodatkowej siły przyspieszającej. Poznanie mechanizmów zwiększania energii protonów poza wartość oczekiwaną z reakcji D-D stanowi kolejne wyzwanie w badaniach nad zastosowaniem CPA m.in. w laserowej inicjacji reakcji proton – bor z użyciem laserów klasy TW.

Tak jak w przypadku eksperymentów wykonanych w IFPiLM, również dla układów użytych w PALS, przeprowadzono serie symulacji pakietem FLUKA. Wyznaczono widma energetyczne cząstek alfa i neutronów w zależności od grubości „catcher” borowego, wykonanego z czystego ^{11}B jak i naturalnego boru. Przedstawiono wyniki symulacji, z zastosowaniem widm energetycznych protonów dla wyładowania 59104 (zarejestrowano protony o najwyższej energii) i dla 59125 (widoczny pik o energii w około 3.7 MeV). Wyznaczony stosunek całkowitej liczby neutronów do liczby cząstek alfa w funkcji grubości tarczy boru (Fig. 3.46). Najbardziej optymalna grubość warstwy boru, ze względu na stosunek alfa/neutrony, to 12 μm . Biorąc pod uwagę dane otrzymane ze wszystkich omawianych pomiarów i symulacji, wyznaczono maksymalną liczbę cząstek alfa na ok 1.3×10^{10} osiągniętą dla wyładowania 59104 (Ref. 74). Wartość ta jest porównywalna z wartościami osiągniętymi w innych eksperymentach w ciągu ostatnich 20 lat, jednak z użyciem laserów klasy Peta Watów (Fig. 3.47).

W podsumowaniu autor jasno przedstawił główne zalety i wady alternatywnego, nowatorskiego, zastosowania wnęk - cavity oraz podejścia „Cavity Pressure Acceleration” poprzez reakcję $D(d,p)T$ do generowanie intensywnych wiązek protonów w badaniach związanych z laserowo indukowaną reakcją fuzji typu proton – bor. Niedogodność stanowi konstrukcja tarczy/wnęki oraz znaczna ilość cząstek, odłamków, które również mogą zostać przyspieszone w kierunku optyki i urządzeń umieszczonych w komorze eksperymentalnej. Wymuszając wprowadzania dodatkowych precyzyjnych pomiarów w celu ich odróżnienia.

produkcji, przy użyciu laserów klasy Tera Watów, cząstek alfa o porównywalnej wydajności jak ta uzyskiwana przy użyciu najintensywniejszych układów laserowych na świecie.

Kolejne sesje eksperymentalne stanowiące kontynuację tematyki przedstawionej w pracy są już zaplanowane, co świadczy o jej wartości i potencjale rozwoju.

Wybrane uwagi krytyczne:

- i) W rozdziale 2 brakuje mi chociażby poglądowego rysunku/schematu dla cavity A i B użytych w symulacjach. W Tabeli 2.1 warstwa polietylenu ma podaną grubość 300 μm , natomiast na Fig. 2.2 wygląda jakby miała 200 μm .
- ii) W opisach eksperymentów, są ograniczone informacje np. na temat ile wyładowań ostatecznie było wykonanych w IFLiPM a ile w PLAS, a ile szczegółowo zostało przeanalizowanych.
- iii) Czy było coś szczególnego w przebiegu wyładowania 59125, że tylko dla niego zaobserwowano pik energii protonów w pobliżu 3 MeV?
- iv) str. 55 Czy liczby protonów i neutronów otrzymane z pomiarów detektorami BD-PND i CR39 oraz TPS były jakoś normalizowane?
- v) Na rysunku Fig. 3.1 brak opisów dla niektórych elementów i diagnostyk. Fig. 3.2, 3.12, 3.13, brak jednostek lub opisów osi. Fig. 3.26 w podpisie do rysunku powinno być: Alpha particle and neutron energy spectra...
- v) Brak odniesień do publikacji dla kilku rysunków np. Fig. 3.26, 3.27, 3.35, 3.41 Ref. [74]
- vi) Dla szeregu rysunków przedstawiających wyniki symulacji FLUKA np. Fig. 3.4, 3.5, jednostka dN/dE podana jest jako $[\text{MeV}^{-1} \text{ sr}^{-1} n_{\text{protons}}^{-1}]$, moim zdaniem powinno być $[\text{MeV}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ per proton}]$ jak również jednostka fluencji na np. Fig. 2.24 3.28, 3.29 jest $[\text{cm}^{-2} \text{ particle}^{-1}]$ a powinno być $[\text{cm}^{-2} \text{ per particle}]$, jak jest to w Manualu do pakietu FLUKA i jak sam autor zaznaczył w treści pod rysunkiem 2.4 (str. 37). Obecny opis jednostki sugeruje, że otrzymaną wartość np. fluencji musimy jeszcze podzielić przez liczbę „particle”.
- vii) Mam również wątpliwości co do jednostki na Fig. 1.13 i 3.47 (pokazujących progres w produkcji cząstek alfa w ciągu ostatnich 20 lat) jest Alpha-partice Flux $[\text{sr}^{-1}]$, i mimo, że rysunek jest zaczerpnięty z publikacji [35], moim zdaniem powinno być Alpha-partice yield $[\text{sr}^{-1}]$. Jaka jest różnica pomiędzy fluencją i strumieniem (fluence i flux)? Nawiasem mówiąc w publikacji [42] na Fig.9 tamże Giuffrida porównuje właśnie „...maximum α particles/sr”, a w opisie osi mamy „Max α yield (α/sr)”.
- viii) jako przykład błędów literówek można uznać zapis zależności na str. 38 jest $J = \Theta/2$, a powinno być $J = \Phi/2$

Wybrane uwagi krytyczne wymienione powyżej nie wpływają na moją pozytywną opinię na temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Tchórz. Przedstawiona praca świadczy o opanowaniu przez autora umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, planowania i przeprowadzania eksperymentów i analizy wyników, ich dyskusji oraz wyciągania wniosków. Ponadto, należy podkreślić, że rozprawa doktorska przedstawia nowatorskie podejście wykorzystania CPA i produktów reakcji D-D w badaniach nad laserowo indukowaną reakcją fuzji proton-bor, i stanowi istotny wkład w rozwój tej gałęzi badań, a także ma znaczenie w innych dziedzinach nauki i technologii.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska kandydata mgr inż. Przemysława Tchórz pt. *„Laser induced proton – boron fusion using TW-class laser system – study of novel approach employing protons produced during thermonuclear D(d,p)T reaction”* spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (z późn.zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Przemysława Tchórz do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.