



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ
FIZYKI

dr hab. Katarzyna Krajewska, prof. UW

Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
Pasteura 5, 02-093 Warszawa
tel.: (22) 55 32 923
email: Katarzyna.Krajewska@fuw.edu.pl

Warszawa, 11 czerwca 2025

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława Tchórze
„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 autorstwa mgr. inż. Przemysława Tchórze zatytułowana „Laser induced proton-boron fusion using TW-class laser system – study of novel approach employing protons produced during thermonuclear D(d,p)T reaction” została przygotowana w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM) pod kierunkiem dr. hab. Sławomira Jabłońskiego oraz dr. inż. Marcina Rosińskiego. Rozprawa ma formę pracy pisemnej, liczy 88 stron, podzielona jest na cztery rozdziały i opatrzona jest spisem literatury zawierającym 74 pozycje. Podstawowe wyniki rozprawy oparte są o publikacje Kandydata, w tym o publikacje, w których występuje On jako pierwszy autor i jako autor korespondencyjny:

- P. Tchórz, M. Szymański, M. Rosiński, T. Chodukowski, S. Borodziuk, „Capabilities of Thomson parabola spectrometer in various laser-plasma- and laser-fusion-related experiments”, *Nukleonika* **68**, 29-36 (2023); doi: 10.2478/nauka-2023-0005,
- P. Tchórz, T. Chodukowski, M. Rosiński, S. Borodziuk, M. Szymański, R. Dudzak, M. Krupka, T. Burian, A. Marchenko, M. Kustosz, S. Agarwal, „Proton beams generated via thermonuclear deuterium–deuterium fusion by means of modified cavity pressure acceleration-type targets as a candidate for proton–boron fusion driver”, *Phys. Plasmas* **31**, 084503 (2024); doi: 10.1063/5.0207108.

Całość napisana została w języku angielskim.

Celem rozprawy jest zbadanie charakterystyk wiązek protonowych powstałych w oparciu o metodę Cavity Pressure Acceleration oraz możliwości zastosowania tychże wiązek do przeprowadzenia fuzji

typu proton-boron ($p\text{-}^{11}\text{B}$). Jest to temat aktualny, a sama rozprawa doktorska ma niewątpliwe walory praktyczne.

Typowe scenariusze dla laserowo indukowanej fuzji typu proton-boron wymagają zastosowania ultrasilnych układów laserowych, o mocach sięgających petawatów. W rozprawie wykazano, że na skutek oddziaływania laserów mniejszej mocy z tarczami osadzonymi w specjalnie skonstruowanych wnękach udaje się wyprodukować intensywne i wysokoenergetyczne, ukierunkowane wiązki protonów. Na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych wykazano ponadto, iż tak wyprodukowane wiązki umożliwiają efektywną generację cząstek alfa powstałych w wyniku reakcji fuzji: $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$. Co ważne, zaprezentowano, iż zachodzi to dla realnych grubości tarcz borowych.

Rozprawa składa się z czterech rozdziałów. Pierwszy z nich stanowi ładnie napisane wprowadzenie do tematyki doktoratu. Koncentruje się na dwóch najważniejszych z punktu widzenia rozprawy metodach produkcji energetycznych wiązek protonowych, czyli na Cavity Pressure Acceleration (CPA) oraz Target Normal Sheath Acceleration (TNSA). Metody te użyto w kampaniach pomiarowych przeprowadzonych przy udziale Autora rozprawy a ich skuteczność skonfrontowano ze sobą na podstawie symulacji numerycznych produktów fuzji $p\text{-}^{11}\text{B}$. Sama reakcja fuzji wraz z przeglądem prac eksperymentalnych także została opisana w Rozdziale 1. Sformułowano tam również w sposób klarowny hipotezę rozprawy doktorskiej.

Rozdział drugi koncentruje się na wprowadzeniu metod umożliwiających zarówno wytworzenie jak i zbadanie charakterystyk wiązek protonowych generowanych w scenariuszu CPA. Opisany jest w nim również pakiet FLUKA, jaki został zaadaptowany do wykonania symulacji Monte Carlo oddziaływania wiązek protonowych z tarczami borowymi. Jednym z aspektów poruszanych w tym rozdziale jest uwidocznienie roli geometrii wnęki na własności przyspieszanych protonów. Zastanawia mnie jednak, dlaczego symulacje w Rozdziale 2.1 wykonano dla parametrów układu laserowego z ELI-Beamlines (L4n), skoro nie przeprowadzono na nim doświadczenia opisanego w rozprawie? Sugerowałabym także, aby Autor sprawdził wartości w Tabeli 2.1, wedle której na przykład wnęki A i B charakteryzują się taką samą grubością warstwy polietylenu.

Kolejnym elementem rozprawy jest opis działania spektrometru Thomsona, jaki zbudowany został w IFPiLM wraz z opisem oprogramowania (TPSeer) stworzonego przez Autora pracy na potrzeby analizy danych otrzymanych w wyniku spektrometrii mas. Stworzenie tego oprogramowania niewątpliwie stanowi oryginalne osiągnięcie Autora, które zostało następnie wykorzystane do interpretacji danych doświadczalnych w Rozdziale 3. Pozwoliło bowiem na zrekonstruowanie rozkładów energetycznych przyspieszanych protonów. Niedosyt pozostawia natomiast dość pobieżne przedstawienie samych metod numerycznych, jakie zostały użyte przez Autora. Rozdział 2.2.2 sprawia wrażenie instrukcji obsługi oprogramowania dla użytkowników zewnętrznego pakietu TPSeer. Pytanie zatem, kiedy praca nad pakietem TPSeer zostanie ukończona i w jakiej formie zostanie on udostępniony do użytku zewnętrznego?

Na zakończenie rozdziału drugiego Autor omawia pakiet FLUKA, w oparciu o który wykonane zostały w Rozdziale 3 symulacje Monte Carlo oddziaływania wiązek protonowych z tarczami borowymi. Na tej podstawie oszacowane zostało również całkowite tempo produkcji cząstek alfa.

Sygnał produkowanych cząstek alfa w wyniku reakcji fuzji $p\text{-}^{11}\text{B}$ zależy od parametrów wiązki protonów i od warunków charakteryzujących tarczę borową, w tym między innymi od gęstości tarczy,

jej temperatury czy składu chemicznego. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera Rozdział 3, który zawiera zasadnicze rezultaty rozprawy oraz ich dyskusję.

Rozdział 3 składa się z dwóch części, gdyż Autor bada optymalne warunki dla eksperymentów proton-boron z udziałem protonów przyspieszanych laserowo dwiema metodami: TNSA versus CPA. Pierwszy z tych przypadków opisany jest w Rozdziale 3.1 i dotyczy eksperymentu przeprowadzonego w IFPiLM z udziałem układu laserowego Pulsar 10 TW. Charakterystyki przyspieszonych protonów zmierzone i przeanalizowane za pomocą spektrometru Thomsona i pakietu TPSeer, wskazują na produkcję protonów o energiach sięgających do 2,4 MeV, co stwarza możliwość zajścia reakcji $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$. W rozprawie przedstawiono rozkłady energetyczne produkowanych cząstek alfa posługując się pakietem FLUKA. Z praktycznego punktu widzenia interesujące są wyniki dotyczące wpływu grubości tarczy borowych na sygnał produkowanych cząstek alfa. W szczególności, okazuje się, że dla grubości tarcz powyżej 5 μm , sygnał produkowanych w wyniku reakcji cząstek alfa szybko maleje, zaś dla tarczy grubszych niż 50 μm cząstki alfa nie są w stanie spenetrować tarczy i jej opuścić. Ciekawym przewidywaniem teoretycznym wysnutym na podstawie symulacji FLUKA jest też stwierdzenie nieobecności neutronów, które często towarzyszą reakcjom $p-{}^{11}\text{B}$. Porównanie z kolei wyników badań dla dwóch typów tarcz, mających w składzie czysty ${}^{11}\text{B}$ bądź bor naturalny (80% ${}^{11}\text{B}$ i 20% ${}^{10}\text{B}$) wykazało, dobrze rozumianą, 20% różnicę w sygnale emitowanych cząstek alfa.

Najobszerniejszą częścią rozprawy jest Rozdział 3.2, przedstawiający analizę eksperymentu opartego o scenariusz CPA produkcji energetycznych protonów. Chodzi o kampanię pomiarową przeprowadzoną na układzie laserowym The Prague Asterix Laser System (PALS) w Czechach, której wyniki zostały zreferowane w publikacji [74]. Publikacja ta ukazała się drukiem w Physics of Plasmas jako „Brief Communication”. Zaskakującym wynikiem było zaobserwowanie podwójnego śladu produkowanych protonów w spektrometrze masowym. Dzięki stworzonemu oprogramowaniu, Autor wskazał osobne mechanizmy powstawania obu śladów; chodzi o protony powstałe w wyniku ablacji z powierzchni wewnętrznej oraz protony powstałe w jednym z kanałów reakcji fuzji deuter-deuter: $D+D \rightarrow T+p$. Ten ostatni mechanizm prowadzi do emisji bardziej energetycznych protonów, o energiach na poziomie 5 MeV. Ponadto, w przypadku fuzji deuter-deuter zaobserwowano również różnego rodzaju zachowanie rozkładów energetycznych protonów. W szczególności, na Rys. 3.16 widoczne są wyniki, spośród których zdecydowanie wyróżnia się krzywa zielona z wyraźnym maksimum przypadającym na około 3,7 MeV (pomiar nr 59125). Jest to moim zdaniem wynik ciekawy. W rozprawie brak jest jednak pogłębionej analizy tego zjawiska, a proponowane wyjaśnienie ma charakter spekulacyjny. W związku z tym nasuwa się pytanie, jakiego rodzaju pomiary czy symulacje numeryczne należałoby wykonać, aby zinterpretować obserwowane zjawisko?

W odróżnieniu od scenariusza wykorzystującego TNSA, ze względu na wysokie energie protonów (sięgające 10 MeV) w Rozdziale 3.2 zaobserwowano znaczną produkcję neutronów pochodzących z reakcji wtórnych, ${}^{11}\text{B}(p,n){}^{11}\text{C}$ czy ${}^{11}\text{B}(p,n){}^{14}\text{N}$. W tym kontekście dodatkowego znaczenia nabiera optymalizacja grubości tarcz borowych przedstawiona w rozprawie. Pokazano w szczególności, że cząstki alfa są najefektywniej produkowane w oddziaływaniu protonów z tarczami borowymi o grubości 20-30 μm , dla których jednocześnie produkcja neutronów jest stosunkowo niska (Rys. 3.27). Trend ten ulega jednak odwróceniu wraz ze wzrostem grubości tarczy. W rozprawie przeanalizowano ponadto wpływ składu tarcz borowych na produkcję cząstek α . Dowiedziono przy tym, że mechanizm wychwytu neutronu w reakcji z izotopem ${}^{10}\text{B}$: ${}^{10}\text{B}+n \rightarrow {}^{10}\text{B}^* \rightarrow \alpha+{}^7\text{Li}+2.31\text{ MeV}$, będącym składnikiem boru naturalnego, odgrywa znikomą rolę w rozpatrywanym procesie.

Pod koniec Rozdziału 3 zaprezentowano porównanie przewidywanych sygnałów cząstek alfa (na liczbę protonów) w obu analizowanych scenariuszach: TNSA oraz CPA. Być może lepszym pomysłem byłoby ujęcie tego materiału w postaci odrębnego rozdziału bądź w ramach podsumowania. Ta część zawiera bowiem główne wnioski wynikające z rozprawy doktorskiej. Jak pokazano, metoda CPA prowadzi do bardziej efektywnej generacji cząstek α w stosunku do metody TNSA (wzrost na poziomie 50%), co ma miejsce dla grubszych tarcz borowych. Jednocześnie w przypadku metody CPA symulacje numeryczne przewidują znaczącą produkcję neutronów z reakcji wtórnych. Aspekt ten jest bardzo ważny i wymaga kontynuowania prac badawczych.

Rozdział 4 zawiera krótkie podsumowanie wyników rozprawy.

Od strony językowej i technicznej praca napisana jest w sposób zadowalający, choć Autor nie ustrzegł się błędów. W moim odczuciu, Autor dość frywolnie nazywa osie na niektórych wykresach (chodzi o podpisy osi: „Tele”, „Depo” i „Pres”), głównie prezentowanych w Rozdziale 2.1. Dodatkowo, pojawiają się tam niezdefiniowane pojęcia „code length” i „code time” jako jednostki na osiach. Sprawia to, że wykresy te stają się mało czytelne. Ponadto, tekst rozprawy zawiera drobne potknięcia językowe (np. „thesis” zamiast „hypothesis”, w tekście pojawia się też nagminnie „on Figure” zamiast „in Figure”). Chciałabym podkreślić, że te uwagi krytyczne nie umniejszają jakości otrzymanych wyników.

W podsumowaniu uważam, że cele rozprawy doktorskiej zostały wyraźnie określone i konsekwentnie zrealizowane. Rozwiązany został aktualny problem badawczy, o walorach praktyczności, a osiągnięte wyniki są ważne dla przyszłych badań nad fuzją typu proton-boron z udziałem laserów terawatowych.

Na zakończenie stwierdzam, że przygotowana przez mgr. inż. Przemysława Tchórze rozprawa dostarcza oryginalnych rozwiązań problemów naukowych związanych z laserowo indukowaną fuzją typu proton-boron a także prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w tej dziedzinie. Warto podkreślić, że przedstawione w pracy rezultaty zostały częściowo opublikowane i że Autor rozprawy pełni w tych publikacjach rolę wiodącą. Świadczy to o umiejętności Kandydata do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa spełnia wszystkie warunki stawiane rozprawom doktorskim przez stosowną ustawę i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów procedury w postępowaniu doktorskim.

Katarzyna Krajewska