

Warszawa, 27.05.2025r.

dr hab. inż. Andrzej Bartnik  
Instytut Optoelektroniki  
Wojskowa Akademia Techniczna  
gen. Sylwestra Kaliskiego 2  
00-908 Warszawa

### **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. Przemysław Tchorza dotyczy wytwarzania wiązki protonów o energiach rzędu kilku MeV, które można zastosować do reakcji jądrowych proton – jądro boru, w wyniku których następuje emisja cząstek alfa oraz neutronów. Schemat taki jest rozpatrywany jako potencjalna możliwość realizacji reaktora działającego w oparciu o syntezę termojądrową. Doktorant brał udział w badaniach eksperymentalnych, z zastosowaniem dwóch różnych systemów laserowych. Pierwszy z nich to system generujący impulsy femtosekundowe, o mocy 10 TW, znajdujący się w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, w Warszawie. Drugi to Prague Asterix Laser System (PALS) w Pradze, generujący impulsy o czasie trwania rzędu kilkuset pikosekund i mocy 2 TW. W badaniach tych dokonywał pomiarów emisji protonów, generowanych w wyniku różnych mechanizmów.

W pierwszym rozdziale pracy doktorant przedstawił idee i problemy związane z laserową syntezą termojądrową, mechanizmy akceleracji protonów w różnych konfiguracjach eksperymentalnych oraz zastosowanie wiązek protonów do reakcji proton – jądro boru.

W rozdziale drugim doktorant przedstawił możliwości symulacji numerycznych dynamiki plazmy z zastosowaniem kodu FLASH, rejestracji widma protonów w badaniach eksperymentalnych oraz wykorzystania zarejestrowanych widm do symulacji numerycznych oddziaływania protonów z tarczą wykonaną z boru, z zastosowaniem kodu FLUKA. W rozdziale tym doktorant wykonał symulacje numeryczne ewolucji plazmy nanosekundowym impulsem laserowym, wytwarzanej we wnęce wykonanej z miedzi, z warstwą polietylenu stanowiącą tarczę laserową. Symulacje wykonał dla impulsu laserowego, odpowiadającego impulsom generowanym w systemie laserowym L4n, znajdującym się w ośrodku badawczym ELI, Dolni Brezany, dla dwóch różnych geometrii wnęki. Symulacje wykonał z zastosowaniem kodu numerycznego FLASH, dostępnego poprzez stronę internetową <https://flash.rochester.edu/site/flashcode.html>. W wyniku symulacji otrzymał dwuwymiarowe rozkłady gęstości masy, ciśnienia i temperatury elektronowej, dla wybranych czasów. **Nie jest jasne w jakim celu doktorant wykonał symulacje dla tego system laserowego**, ponieważ żadne wyniki eksperymentalne przedstawione w dalszej części pracy nie są związane z tym systemem.

W dalszej części rozdziału doktorant przedstawił zasadę działania spektrometru Thomsona wraz z odpowiednimi równaniami, schematem oraz przykładowymi rejestracjami. Przedstawił też opracowane przez siebie oprogramowanie do analizy wyników pomiarów. Oprogramowanie umożliwia identyfikację krzywych odpowiadających jonom o określonym stosunku ładunku do masy oraz wykreślenie odpowiadających im profili intensywności. Jest to

istotny wkład w badania eksperymentalne dotyczące generacji wiązek protonów. Oprogramowanie może też zostać wykorzystane do pomiaru składu jonowego oraz rozkładów energii innego typu jonów.

Dalej doktorant przedstawił możliwości wykorzystania kodu FLUKA do symulacji numerycznych procesu oddziaływania wiązki protonów z tarczą wykonaną z boru. Doktorant wykorzystał kod FLUKA udostępniany przez INFN, Włochy. Przedstawił przykładowy wynik symulacji rozkładu gęstości jąder helu (cząstek alfa) generowanych w wyniku oddziaływania wiązki protonów o rozkładzie energii zarejestrowanym w jednym z eksperymentów, opisanych w dalszej części rozprawy.

W rozdziale trzecim doktorant przedstawił układ eksperymentalny znajdujący się w IFPiLM, w którym realizował badania akceleracji protonów w schemacie TNSA (Target Normal Sheath Acceleration), z zastosowaniem lasera femtosekundowego Pulsar 10TW. W charakterze tarczy stosował folie metaliczne (Al) oraz polimerowe (CH), o grubości z zakresu 1.5 – 8  $\mu\text{m}$ . Na podstawie wykonanych pomiarów, za optymalne warunki do generacji wiązki protonów uznał konfigurację eksperymentalną, gdzie tarczą była folia Al o grubości 6  $\mu\text{m}$  a ognisko lasera wypadało 150  $\mu\text{m}$  wewnątrz tarczy. Biorąc pod uwagę grubość tarczy, dużo mniejszą od tego dystansu, należy zapewne rozumieć, że ognisko było zlokalizowane poza tarczą. W tym miejscu można zauważyć, że dla wielu osób, które mogłyby w przyszłości czytać rozprawę, może być niezrozumiałe **dlaczego z folii Al emitowane są protony**. Doktorant co prawda wspomina o zanieczyszczeniach powierzchni tarczy, omawiając schemat TNSA, ale nie bezpośrednio w odniesieniu do folii Al. Na rysunku 1.2 jest wręcz widoczna, specjalne naniesiona na powierzchnię folii tytanowej, cienka warstwa zawierająca związki wodoru. Dla osoby, która nie zna wcześniejszych publikacji na temat TNSA, dobrze byłoby wyjaśnić obecność wodoru na powierzchni folii Al, a nawet można by się pokusić o wykonanie pomiarów zanieczyszczeń na powierzchni folii. Wtedy byłoby jasne czy źródłem protonów są zaadsorbowane węglowodory, woda czy inne związki zawierające wodór.

Pomiary widma protonów, wykonane z zastosowaniem spektrometru masowego TPS (Thomson Parabola Spectrometer), pozwoliły na rejestrację rozkładu energii protonów z maksimum przy 500 keV i maksymalnej energii 2.4 MeV. Jest to zakres energii wystarczający do reakcji  $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$ . W związku z tym, dla zarejestrowanego rozkładu energii protonów, doktorant wykonał symulacje numeryczne emisji cząstek alfa, z zastosowaniem kodu FLUKA. Symulacje przeprowadził dla różnych grubości tarczy wykonanej z izotopu boru  ${}^{11}\text{B}$  oraz boru występującego w naturze. Zakres grubości wynosił 2 – 50  $\mu\text{m}$ . Największą wydajność emisji uzyskał dla grubości 5  $\mu\text{m}$ . Oczywiście dotyczy to cząstek alfa opuszczających tarczę. W grubszych tarczach są one w dużej mierze zatrzymywane wewnątrz. Na przedstawionych wykresach emisji cząstek alfa widoczne są dwa maksima. Doktorant przedstawił interpretację ich występowania. Oprócz wykresów emisji cząstek alfa doktorant przedstawił też wykresy emisji neutronów.

W dalszej części rozdziału doktorant przedstawił układ eksperymentalny stosowany w eksperymentach przeprowadzonych w ośrodku PALS w Pradze, z zastosowaniem systemu laserowego generującego impulsy o energii  $<1$  kJ i czasie trwania 300 ps FWHM. Stosowane były trzy konfiguracje tarczy we wnętrzu. Materiałem tarczy był deuterowany polietylen  $\text{CD}_2$ . Źródłem protonów w tej sytuacji powinny być protony będące produktem syntezy trytu. W

zarejestrowanych obrazach TPS widoczna jest podwójna parabola odpowiadająca obecności protonów. Jak pisze doktorant podwójna struktura świadczy o istnieniu dwóch źródeł protonów, zlokalizowanych w różnych miejscach, z których jedno jest związane z emisją protonów powstających w reakcji syntezy trytu. **Nie jest jasne co jest drugim źródłem. Jeżeli tarczę stanowi wyłącznie  $CD_2$ , to w generowanej plazmie nie ma protonów, chyba że tarcza zawiera też zwykły polietylen.** Nie jest to dobrze wyjaśnione. Doktorant przedstawił widma protonów zarejestrowane w czterech strzałach. **Nie ma informacji dla której konfiguracji tarczy zostały wykonane.** Do detekcji protonów zastosowane też zostały detektory śladowe CR39 przesłonięte filtrami Al o grubościach 20 – 83  $\mu m$ , umożliwiające detekcję protonów w różnych zakresach energii. Detektory te zastosowane dla najszerszych zakresów widmowych były przeeksponowane. Rejestracja w zakresie energii powyżej 3 MeV była jednak możliwa. Pozwoliło to na wyznaczenie całkowitego strumienia protonów. Podobnie jednak jak w przypadku rejestracji TPS, nie ma informacji dla której konfiguracji tarczy zostały wykonane pomiary. Nasuwa się też inna uwaga odnośnie przedstawionych obrazów mikroskopowych. **Doktorant nie wyjaśnił co widać lub czego nie widać na tych obrazach, co świadczy o przeeksponowaniu a co jest śladem po przejściu protonu.** W szczególności dotyczy to pierwszego z obrazów, gdzie powiększony fragment wygląda jak polikrystaliczny materiał oglądany z zastosowaniem detektora BSE, zawierający mikrokryształy zbudowane z atomów o różnych liczbach atomowych.

W dalszej części doktorant przedstawił wyniki symulacji numerycznych ewolucji plazmy w trzeciej z konfiguracji tarczy przedstawionych na rys.3.10, dla profilu intensywności wiązki laserowej, odpowiadającemu rzeczywistemu impulsowi w systemie PALS. Podobnie jak w rozdziale 2, symulacje zostały wykonane z zastosowaniem kodu numerycznego FLASH. Z symulacji tych wynika, że temperatura elektronowa osiągnęła wartość 7 keV, natomiast gęstość masy nie przekroczyła 10 g/cm<sup>3</sup>. Na podstawie analizy wyników symulacji doktorant odniósł się do wyników pomiarów masowych w strzale #59104, potwierdzając obecność dwóch typów źródeł protonów.

Dla rozkładów energii protonów, zarejestrowanych w strzałach #59104 oraz #59125, doktorant wykonał symulacje numeryczne emisji neutronów i cząstek alfa, z zastosowaniem kodu FLUKA. Symulacje zostały wykonane dla różnych grubości tarczy z izotopu boru <sup>11</sup>B oraz boru występującego w naturze. Zakres grubości wynosił 10 – 180  $\mu m$ . Największą wydajność emisji cząstek alfa uzyskał dla grubości 20-30  $\mu m$ . Zgodnie z oczekiwaniami oraz wynikami przeprowadzonych symulacji, większa wydajność emisji cząstek alfa ale również neutronów, miałyby miejsce w przypadku oddziaływania protonów z czystym izotopem <sup>11</sup>B.

Część cząstek alfa jest zatrzymywana w tarczy. Doktorant przedstawił odpowiednie wizualizacje rozkładów cząstek alfa zatrzymanych oraz wyemitowanych z tarczy. Wskazał na wyraźną różnicę odnośnie rozkładów cząstek alfa zatrzymanych w tarczy, przy grubości tarczy 300  $\mu m$ , dla różnych rozkładów energii protonów w strzałach #59104 oraz #59125. O ile rozkład ten dla strzału #59104 wykazuje monotoniczny spadek liczby cząstek alfa zatrzymanych w materiale tarczy, w kierunku propagacji protonów, o tyle w strzale #59125 jest pewne maksimum na głębokości 100  $\mu m$ . Doktorant wskazał, że jest to związane z obecnością piku intensywności w rozkładzie energii protonów, dla energii 3.7 MeV. Protony o takiej energii, wnikając na głębokość około 100  $\mu m$ , są spowalniane do 675 keV, co jest wartością

odpowiadającą maksimum przekroju czynnego na reakcję  $p + {}^{11}\text{B}$ . Piku takiego nie ma w strzale #59104.

Doktorant dokonał też porównania wydajności emisji cząstek alfa w odniesieniu do protonów, dla warunków eksperymentalnych w schemacie TNSA oraz CPA. Pokazał, że maksimum emisji cząstek alfa dla TNSA wypada dla mniejszych grubości tarczy oraz, że wydajność jest mniejsza, w maksimum ponad dwa razy. Przedstawił też uzyskane wyniki w odniesieniu do innych, podobnych badań, przeprowadzonych w ostatnich 20 latach.

Praca jest ciekawa, przedstawione są różne możliwości wytwarzania i akceleracji wiązek protonów o energii rzędu MeV, pokazana jest możliwość ich zastosowania do reakcji proton – jądro boru.

Można by dyskutować ze sformułowaniem postawionej tezy. Jest tam mowa o wydajności **generacji cząstek alfa** w wyniku reakcji proton - jądro boru. Z przedstawionej analizy wynika jednak raczej, że chodzi o cząstki alfa **wyemitowane** z tarczy. Wtedy, dla zbyt cienkich tarcz, duża część protonów przez nie przelatuje, dla zbyt grubych, tylko cząstki alfa emitowane wstecznie je opuszczają. Stąd mamy maksimum emisji w funkcji grubości. Należałoby zatem mówić o emisji a nie o generacji cząstek alfa.

Zastrzeżenie moje budzi fakt, że doktorant w wielu miejscach przyjmuje pewne sprawy za oczywiste, i ich nie wyjaśnia. Dotyczy to generacji protonów z folii Al, źródła protonów w  $\text{CD}_2$  nie będących produktem syntezy trytu, konfiguracji tarczy dla której wykonane zostały pomiary protonów w schemacie CPA czy wreszcie opisu obrazów mikroskopowych detektorów śladowych po ekspozycji.

Mam jeszcze uwagę odnośnie wyników eksperymentalnych. Doktorant przedstawił jedno widmo protonów z eksperymentu w IFPiLM oraz widma z czterech strzałów wykonanych na PALS, z czego 2 wziął do dalszej analizy. Z informacji zawartych w tekście wynika, że pomiarów w IFPiLM było wiele, wybrany został jeden wynik. Byłoby wskazane pokazanie innych wyników w formie wykresu czy zestawu wykresów np. całkowitej emisji, emisji w maksimum, energii protonów w maksimum czy maksymalnej energii. Na tej podstawie można by wskazać warunki, które uznaje się za optymalne, dla których zarejestrowane jest widmo wzięte do dalszej analizy. Jeśli chodzi o eksperymenty w Pradze, to nie było to zapewne takie proste z uwagi na niewielką możliwą liczbę strzałów w ciągu dnia, niemniej jednak można było przedstawić powody, dla których wybrano tylko wyniki analizowane w rozprawie. Być może były to jedyne udane rejestracje a może były typowe.

Powyższe niedociągnięcia nie umniejszają wartości pracy, zakładam, że doktorant odniesie się do nich w trakcie obrony. Należy stwierdzić, że praca jest oryginalna o wysokim poziomie naukowym. W związku z tym rekomenduję dopuszczenie do publicznej obrony.