

Interferometria wizytówką Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

Rozmowa z prof. **Tadeuszem PISARCZYKIEM**, kierownikiem Zakładu Hydrodynamiki Plazmy Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

Wprowadzonych od ponad 50 lat badaniach plazmowych związanych z realizacją syntezy termojądrowej dla celów energetycznych podstawowe znaczenie mają pomiary parametrów plazmy. Dotyczy to przede wszystkim takich parametrów jak koncentracja i temperatura plazmy, których znajomość zgodnie z kryterium Lawsona, dotyczącym spełnienia warunków zajścia reakcji progowej jest niezbędna dla jego weryfikacji. Kryterium Lawsona wyraża bowiem warunki, przy których zachodzi reakcja zapłonu termojądrowego plazmy, a zatem dostarcza informacji kiedy ciepło wydzielające się z reakcji fuzji wystarcza, aby utrzymać wymaganą temperaturę i koncentrację plazmy bez dostarczania energii z zewnątrz.

W uproszczeniu można więc powiedzieć, że eksperymentalna fizyka plazmy to przede wszystkim pomiary koncentracji i temperatury plazmy realizowane różnymi metodami w zależności od rodzaju urządzenia wytwarzającego wysokotemperaturową plazmę. W celu uzyskania informacji o tych wielkościach wykorzystywane są różne metody diagnostyczne, takie jak spektroskopia w zakresie widzialnym oraz rentgenowskim, pomiary emisji jonów oraz diagnostyki optyczne z których szczególnie użyteczną jest interferometria laserowa, gdyż umożliwia w wersji wielokadrowej uzyskać informację o przestrzenno-czasowych rozkładach koncentracji elektronowej w badanej plazmie.

W IFPiLM, od początku jego powstania, interferometria laserowa jest jedną z głównych diagnostyk wykorzystywanych w badaniach plazmowych związanych z realizacją syntezy termojądrowej.



Fot. Kasia Guzik

Prof. TADEUSZ PISARCZYK

Profesor fizyki pracuje w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy im. S. Kaliskiego, kierownik Zakładu Hydrodynamiki Plazmy. Ukończył Wydział Chemii i Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej na kierunku fizyki technicznej w 1976 r., uzyskując stopień magistra inżyniera w dziedzinie fizyki jądrowej. Od ukończenia studiów pracuje w IFPiLM, a domeną jego działalności naukowej jest zastosowanie interferometrii i polarymetrii w badaniach plazmy termojądrowej.

Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał za rozprawą doktorską pt: *Opracowanie metodyki i aparatury do pomiaru magnetooptycznego efektu Faradaya i jej zastosowanie do badania plazmy*, którą obronił z wyróżnieniem w 1987 roku w Wojskowej Akademii Technicznej na Wydziale Chemii i Fizyki Technicznej. Rozprawa dotyczyła badań zrealizowanych na urządzeniu plasma-focus PF-360 w Świerku oraz układzie laserowym

„DELFIN” w Instytucie Fizycznym im. Lebedeva w Moskwie.

Za pracę pt: *Badanie dynamiki i stabilności plazmy laserowej w polu magnetycznym o różnej geometrii*, uzyskał stopień doktora habilitowanego nauk fizycznych przed Radą Naukową Instytutu Problemów Jądrowych w Świerku (obecnie Narodowe Centrum Badań Jądrowych) w 1999 roku.

Jest znanym specjalistą w kraju i za granicą w zakresie pomiarów koncentracji elektronowej i pól magnetycznych w plazmie termojądrowej metodami polaro-interferometrii. Swoją pozycję naukową budował prowadząc badania naukowe w znanych ośrodkach zagranicznych: (1987-1990) - kontrakt naukowy w Instytucie Fizycznym im. Lebedeva w Moskwie, (2001-2013) - badania na układzie laserowym PALS w Pradze w ramach projektów LaserLab Europe.

Współautor 130 publikacji naukowych z listy filadelfijskiej i 150 artykułów w materiałach z międzynarodowych konferencji, indeks h=14. Promotor 3 prac doktorskich z fizyki plazmy.

Autor dwóch patentów krajowych: Nr 187831 i 185440 dotyczących budowy aparatury diagnostycznej. Jest recenzentem wielu prestiżowych czasopism naukowych (APL, PPCF, LPB, Phys. Scr., CEJP). Autor 23 projektów badawczych własnych (krajowych i zagranicznych). W badaniach prowadzonych na PALS współpracuje bardzo efektywnie z wieloma ośrodkami zagranicznymi, między innymi z Instytutem Fizyki Plazmy A. N. oraz Politechniką w Pradze, ośrodkiem laserowym CELIA (Centre Lasers Intenses et Applications) w Bordeaux, Instytutem Fizycznym A.N. im. Lebedeva w Moskwie oraz Instytutem Jądrowym w Madrycie. W przedostatniej kadencji pełnił funkcję wiceprzewodniczącego RN IFPiLM. Był współorganizatorem międzynarodowych konferencji i członkiem ich komitetów naukowych. Członek Sekcji Fizyki Plazmy Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

Zainteresowania: jest miłośnikiem gry na akordeonie – ukończył Szkołę Muzyczną I stopnia w Stalowej Woli.

drowej, które są prowadzone na dwóch kierunkach: (i) laserowej kompresji plazmy oraz (ii) plazmy wytwarzanej drogą wyładowania silno-prądowego w koncentratorach plazmowych tzw. plasm-focus.

Od początku pracy w IFPiLM diagnostyka ta rozwijana była z udziałem prof. Tadeusza Pisarczyka i stała się domeną Jego działalności naukowej – zarówno w IFPiLM jak i ośrodkach naukowych krajowych i zagranicznych, w których miał możliwość realizowania badań plazmowych. (red.)

Panie profesorze, co spowodowało, że wybrał Pan interferometrię plazmy jako dziedzinę badań, w której Pan się specjalizuje?

Żeby odpowiedzieć na to pytanie, muszę cofnąć się do połowy lat siedemdziesiątych, tzn. do okresu utworzenia Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy z inicjatywy prof. Sylwestra Kaliskiego, i czasów moich studiów, bowiem moja przygoda z interferometrią rozpoczęła się od realizacji pracy magisterskiej na kierunku fizyki technicznej WAT, w nowoutworzonym Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, którego dyrektorem był prof. Sylwester Kaliski. Praca dyplomowa dotyczyła badań interferometrycznych plazmy impulsowej wytwarzanej laserem neodymowym za pomocą 5-kadrowego układu interferometrycznego na bazie interferometru Jamina. Pracę realizowałem pod kierownictwem mgr. inż. L. Pokory (obecnie profesora) w pracowni zajmującej się budową diagnostyk laserowych i zastosowaniem ich w badaniach plazmowych prowadzonych głównie na układzie plasma-focus PF-150. Pracę realizowałem z dużym zapałem i zaangażowaniem wiedząc, że tematyka badań ma charakter w dużym stopniu nowatorski, co stwarzało duże możliwości poznawcze w realizowaniu swoich pomysłów. Duże znaczenie motywujące do pracy naukowej miała dla mnie współpraca z kolegami z pracowni, w której realizowałem pracę magisterską (A. Kasperczukiem, M. Paduchem, L. Pokorą i Z. Wereszczyńskim). Koledzy, z którymi następnie pracowałem w pierwszych latach po skończeniu studiów w WAT, odcisnęli pewnie „piętno” na moim podejściu do pracy naukowej, oczywiście pozytywne. Stanowiliśmy bardzo zgrany zespół życzliwych sobie osób otwartych na dyskusję merytoryczną, ale równocześnie koledzy Ci byli wymagający w ocenie mojej działalności naukowej i stawiali na dużą samodzielność. Już wtedy nauczyłem się być samodzielnym w realizacji stawianych mi zadań naukowych i zrozumiałem, że jest to niezbędna recepta w osiągnięciu celów naukowych.

Wracając do Pana pytania – nie mogę podać powodu, dlaczego przed laty wybrałem właśnie interferometrię plazmy jako dziedzinę badań naukowych. Był to raczej wybór, który mogę przyrównać do małżeństwa z rozsądku, który w moim przypadku sprawdził się i doprowadził mnie do uzyskania tytułu profesora fizyki. Analogicznie, jak w małżeństwie z rozsądku, widziałem w tym wyborze od samego początku dobre strony, ale zamilowanie i pasja do tej dziedziny rosły wraz z zaangażowaniem w badania i uzyskanymi wymiernymi efektami naukowymi w postaci doktoratu, habilitacji oraz licznych publikacji.

Podsumowując moją odpowiedź chciałbym wyjaśnić również, że w podobnej sytuacji znalazło się wielu moich kolegów rozpoczynających wówczas pracę w nowoutworzonym Instytucie i podejmujących nową tematykę badań, nie uprawianą wówczas w Polsce, jaką była fizyka plazmy termojądrowej. Ponieważ, w tym początkowym okresie, podstawową kadrę naukowo-ba-

dawczą IFPiLM stanowili głównie młodzi absolwenci fizyki technicznej WAT, bez tytułów naukowych, dlatego przy realizacji badań naukowych niezbędna była duża samodzielność oraz determinacja. Jednak muszę przyznać, że duże znaczenie w przygotowaniu Nas – absolwentów fizyki technicznej WAT – do pracy naukowej, miały wiadomości zdobyte na studiach. Chciałbym przypomnieć że kierunek fizyki technicznej, założony w WAT w latach 60-tych – przez prof. Kaliskiego był jednym z pierwszych takich kierunków studiów, który został utworzony na politechnikach polskich. Studia na tym kierunku w WAT trwały aż 6 lat, a po za tym przyjmowani byli na ten kierunek najlepsi studenci po ukończeniu pierwszego semestru i zdaniu dodatkowych egzaminów.

Mówię o tym nie bez powodu mając na myśli podział IFPiLM na początku lat dziewięćdziesiątych na dwie części, z których jedna o profilu optoelektronicznym została włączona do WAT, natomiast druga – zajmująca się badaniami plazmowymi – została instytutem cywilnym o takiej samej nazwie – IFPiLM, podległym Państwowej Agencji Atomistyki. W mojej ocenie ta transformacja była niekorzystna dla IFPiLM, gdyż doprowadziła do odejścia z Instytutu wielu znakomitych specjalistów, absolwentów właśnie fizyki technicznej WAT. Wielu z nich uzyskało już stopień naukowy doktora i byli przygotowani do prowadzenia zaawansowanych badań w zakresie fizyki plazmy. Ta transformacja przerwała ich drogę rozwoju naukowego. Prawdopodobnie wielu z nich, podobnie jak ja, posiadało by już statut samodzielnego pracownika naukowego. Niewątpliwie zwiększyło by to szanse w otrzymaniu przez Radę Naukową IFPiLM uprawnień do nadawania tytułu doktora nauk, których nasza RN wciąż nie ma.

Czy mógłby Pan przybliżyć, czego dotyczą prowadzone przez Pana badania interferometryczne plazmy, na jakich układach i gdzie były realizowane oraz jakie osiągnięcia składające się na dorobek naukowy w tej dziedzinie uznaje Pan za najważniejsze?

Ponieważ jestem pasjonatem dziedziny, którą się zajmuję i chciałbym na ten temat powiedzieć bardzo wiele, to jednak zdaje sobie sprawę, że mówienie o wszystkim i ze szczegółami nie ma sensu i będzie niezrozumiałe dla czytelników bez względu na to czy są fizykami czy uprawiają inne zawody.

Na wstępie chciałbym wyjaśnić, że badania, którymi zajmuję się od połowy lat siedemdziesiątych (prawie 40 lat), dotyczą nie tylko metody interferometrycznej, ale również dwóch sprzężonych z nią metod diagnostycznych, a mianowicie: pomiaru skręcenia płaszczyzny polaryzacji promieniowania laserowego w plazmie oraz metody fotografii cieniowej. Układ pomiarowy, w którym wykorzystywane są te trzy wymienione diagnostyki, nazywa się polaro-interferometrem. Umieszczając badaną plazmę w polaro-interferometrze i oświetlając go impulsem promieniowania laserowego o odpowiednio dobranej długości fali, możemy uzyskać trzy obrazy w każdym z kanałów: interferogram, polarogram oraz cieniogram plazmy. Analiza ilościowa tych trzech obrazów pozwala uzyskać informację nie tylko o rozkładzie koncentracji elektronowej, ale również o rozkładzie pola magnetycznego w badanej plazmie. Należy podkreślić, że jest to kosztowna i trudna diagnostyka od strony realizacji technicznej, a ponadto bardzo pracochłonna i złożony jest proces obróbki matematycznej wyników. Dlatego polaro-interferometria nie jest diagnostyką rutynowo stosowaną w badaniach plazmowych.

Z wyżej wymienionych powodów, podejmując się przed kilkudziesięciami laty implementacji tej diagnostyki na układach plazmowych IFPiLM, było to dla mnie dużym wyzwaniem.

Odpowiadając na drugą część pytania, spróbuję w sposób skondensowany przedstawić tylko najważniejsze eksperymenty plazmowe, na których ta diagnostyka była przeze mnie stosowana. Żeby zainteresować czytelników, a w szczególności młodych adeptów nauki, zrobię to w formie przeglądu wybranych badań naukowych, odzwierciedlającego moją drogę naukową od magistra do profesora.

Pierwsze próby implementacji polaro-interferometrii w badaniach plazmowych zostały podjęte przeze mnie na urządzeniu PF-150 w IFPiLM, zaraz po ukończeniu studiów. Miały one charakter badań wstępnych, ponieważ chciałem przekonać się na „własnej skórze” i poznać trudności w jej implementacji, zwłaszcza że diagnostyka ta nie była wówczas efektywnie wykorzystywana w badaniach plazmowych na urządzeniach plasma-focus i nie było publikacji w dostępnej literaturze przedstawiających szczegóły jej implementacji w badaniach na tych na urządzeniach. Jednym z istotnych ograniczeń w stosowaniu polaro-interferometrii na urządzeniach PF jest pomiar małych skręceń (na poziomie około 1 stopnia) płaszczyzny polaryzacji wiązki sondującej kolumnę plazmową w warunkach pasożytniczego świecenia plazmy. Konwencjonalne metody zwiększenia intensywności użytecznego sygnału do pasożytniczego świecenia plazmy stosowane przez eksperymentatorów, takie jak selektywne tłumienie za pomocą różnego rodzaju filtrów lub poprzez zwiększenie energii lasera diagnostycznego, były mało skuteczne. Te wstępne pomiary okazały się niezwykle przydatne do zaprojektowania nowej wersji polaro-interferometru ze specjalnym zaworem elektrooptycznym tłumiącym skutecznie pasożytnicze świecenie plazmy. Polaro-interferometer ten zastosowałem do przeprowadzenia badań rozkładu prądu w różnych fazach wyładowania plasma-focus na prototypowym urządzeniu PF-360 zainstalowanym w Instytucie Problemów Jądrowych w Świerku. Zrealizowane wówczas badania polaro-interferometryczne miały charakter zdecydowanie nowatorski i stały się częścią przygotowywanej przeze mnie rozprawy doktorskiej. Drugą część pracy stanowiły badania spontanicznych pól magnetycznych na eksperymencie DELFIN w Instytucie Fizycznym Akademii Nauk im. Lebedieva (FIAN) w Moskwie. W tym czasie (początek lat 80-tych) 213 kanałowy układ DELFIN był jednym z największych układów laserowych do kompresji mikrobalonów DT, zbudowanym do badań nad fuzją inercyjną.

Możliwość prowadzenia badań na układach laserowych w tym renomowanym instytucie pojawiła się dzięki nawiązaniu współpracy naukowej przez prof. S. Kaliskiego, pomiędzy IFPiLM a FIAN. Dyrektorem FIAN w tym czasie był prof. Nikołaj Genadijewicz Basov – laureat nagrody Nobla z roku 1964 za osiągnięcia z dziedziny maserów.

Eksperymentowanie na układzie DELFIN było dla mnie czymś wyjątkowym, gdyż układ ten był układem zamkniętym dla naukowców z zagranicy. Dopuszczenie mnie do badań na tym układzie traktowałem jako pewne wyróżnienie, na które musiałem solidnie zapracować, uczestnicząc wcześniej na eksperymentach plazmowych na mniejszym 9-wiązkowym układzie laserowym KALMAR, realizowanych początkowo w ramach współpracy, a następnie w ramach stażu naukowego w FIAN w oddziale prof. N. G. Basova. Wymiernym wkładem w badania na eksperymencie KALMAR były wyniki pomiarów interferometrycznych, w których wykorzystywałem zaprojektowany przeze mnie trój-zwierciadłowy interferometr różnicowy oraz laser azotowy, zbudowa-

ny przy moim współudziale w grupie kierowanej przez mojego kolegę dr. L. Pokorę (obecnie profesora).

Najważniejszym osiągnięciem badań polaro-interferometrycznych zrealizowanych na układzie DELFIN było określenie struktury spontanicznych pól magnetycznych, generowanych w wyniku efektu skrzyżowanych gradientów temperatury i koncentracji powstających przy wielowiązkowym oświetleniu promieniowaniem laserowym sferycznych mikrobalonów-tarcz laserowych, co umożliwiło ocenić wpływ symetrii oświetlenia na efektywność ich kompresji. Wyniki tych badań weszły również w zakres mojej rozprawy doktorskiej pt: *Opracowanie metodyki i aparatury do pomiaru magnetoptycznego efektu Faradaya i jej zastosowanie do badania plazmy*, którą obroniłem z wyróżnieniem w 1987 roku w Wojskowej Akademii Technicznej na Wydziale Chemii i Fizyki Technicznej, uzyskując stopień doktora nauk technicznych. Dużym zaszczytem jest dla mnie praca dotycząca zrealizowanych badań polaro-interferometrycznych na układzie DELFIN, której współautorem jest profesor Nikołaj G. Basov, opublikowana w czasopiśmie *Journal Experimental and Theoretical Physics* 45(4), 173 (1987).

W/w osiągnięcia naukowe umożliwiły mi, wkrótce po obrobie pracy doktorskiej, zakwalifikowanie w drodze konkursu przez Polską Akademię Nauk, na trzyletni (1987-1990) kontrakt naukowy do FIAN. W ramach kontraktu kontynuowałem badania polarymetryczne i interferometryczne plazmy laserowej na eksperymencie DELFIN, w których wykorzystywałem nowy typ polaro-interferometru, opracowany przy współudziale mojego asystenta G. Sarkisova (obecnie doktora pracującego w ośrodku w Newadzie).

Po powrocie z kontraktu, we wrześniu 1990 r., moja działalność naukowa do chwili obecnej związana jest głównie z plazmą laserową. Zostałem zatrudniony w Zakładzie Plazmy Laserowej, obejmując kierownictwo eksperymentu: „Plazma Laserowa w Polu Magnetycznym”, z nadzieją uzyskania pierwszych wyników, ponieważ eksperyment ten był wówczas jeszcze w fazie przygotowań. Celem badań było poznanie wpływu pola magnetycznego na parametry hydrodynamiczne plazmy laserowej i emisję promieniowania rentgenowskiego oraz jonów. Baza diagnostyczna, którą wówczas dysponowałem to trójkanałowy polaro-interferometr, zbudowany na kontrakcie w FIAN oraz diagnostyki rentgenowskie zaoferowane w ramach współpracy naukowej z FIAN oraz Instytutem Naukowo-Badawczym Pomiarów Fizyko-Technicznych i Radiotechnicznych w Mendelejewie k/Moskwy.

W okresie tym sytuacja finansowa IFPiLM nie była na tyle dobra, żeby wystarczająco finansować rozpoczęte przeze mnie badania plazmy laserowej w polu magnetycznym. Nieoczekiwanie dużym wsparciem finansowym w realizowaniu tych badań okazał się wówczas system grantów wprowadzany na początku lat 90-tych przez Komitet Badań Naukowych. Jako jednemu z pierwszych w Instytucie udało się mi otrzymać dwa projekty badawcze własne: 1) Nr 8 8084 91/02 pt: *Automatyzacja układu polarymetryczno-interferometrycznego do badania plazmy laserowej* oraz 2) Nr 8 T11B007/09 pt: *Układ akwizycji obrazu do diagnostyki impulsowych źródeł promieniowania rentgenowskiego*.

Dzięki otrzymanym środkom finansowym z pierwszego projektu wyposażyłem polaro-interferometr w kamery CCD, co zautomatyzowało rejestrację obrazów w poszczególnych kanałach polaro-interferometru i tym samym wielokrotnie skróciło czas ich ilościowej analizy.

Zrealizowanie drugiego projektu umożliwiło mi modernizację diagnostyk rentgenowskich wykorzystywanych w tym eksperymencie.

Zbudowana przeze mnie aparatura, była w okresie realizacji projektów aparaturą unikalną, w dużym stopniu pionierską i niedostępną komercyjnie, o czym świadczy przyznanie mi dwóch patentów: nr 187831 i nr 185440.

Mówiąc o osiągnięciach uzyskanych w eksperymencie Plazma w Polu Magnetycznym, muszę wyróżnić dwa etapy badań, co związane było z podziałem IFPiLM, o którym wspominałem już wcześniej.

Pierwszy etap, gdy instytut podlegał pod MON, realizowany był w dość liczny zespół z udziałem grupy dr. H. Fiedorowicza (obecnie profesora) specjalizującej się w diagnostykach rentgenowskich plazmy oraz dr. A. Faryńskiego. Zrealizowane w tym pierwszym etapie badania plazmy laserowej w osiowym polu magnetycznym o indukcji 20 T, z udziałem trójkanałowego polaro-interferometru i diagnostyk rentgenowskich, pokazały:

- (i) możliwość wytworzenia w wydłużonej (dzięki osiowemu polu magnetycznemu) rekombinującej kolumnie plazmy fluorowej (z tarcz teflonowych) inwersji obsadzeń odpowiadającej za emisję spójnego promieniowania rentgenowskiego o długości fali około 60 oraz około 100 Å oraz
- (ii) realną możliwość sterowania rozkładem intensywności miękkiego promieniowania rentgenowskiego, widoczną na zintegrowanych obrazach emisji rentgenowskiej.

Wyniki tych badań wzbudziły wówczas duże zainteresowanie środowiska naukowego, a w szczególności Instytutu Fizycznego w Moskwie, w którym byłem na 3-letnim kontrakcie. Zaproszony zostałem przez Dyрекcję FIAN do wygłoszenia wykładu na temat osiągnięć w/w eksperymencie. Stosowane seminarium wygłosiłem w FIAN 5 marca 1992 roku. Efektem dyskusji z prof. S. Gus'kovem oraz prof. V. B. Rozanovem po wykładzie było zgłoszenie nowej idei wspólnie z w/w profesorami, dotyczącej zastosowania pola magnetycznego do sterowania strumieniami plazmowymi, w celu zwiększenia efektywności pracy tarcz laserowych z grzaniem pośrednim typu cannonball lub hohlraum, wykorzystywanych w badaniach do realizacji fuzji inercyjnej.

Szczegóły eksperymentalne i teoretyczne, uzasadniające taką ideę, prezentowałem na 23rd ECLiM w Paryżu w 1993 roku. Są one również opublikowane w pracy: *Gus'kov, S.Yu., Pisarczyk, T., Rozanov, V. B. Magnetic control of the plasma flows in laser targets, Laser and Particle Beams, 12 (3), pp. 371-377 (1994).*

Jednakże w/w idea nie wzbudziła wówczas zainteresowania największych ośrodków w Livermore oraz Osace zajmujących się realizacją fuzji inercyjnej.

Okazało się jednak niedawno, co stwierdzam z dużą satysfakcją, że po dwudziestu latach idea zastosowania pola magnetycznego do sterowania strumieniami plazmowym w tarczach termojądrowych wydaje się być wciąż aktualna. Jedną z najbardziej obiecujących opcji związanych z w/w ideą, jest zastosowanie silnego, zewnętrznego pola magnetycznego do kompresji wiązki elektronów wykorzystywanych w tarczach do termojądrowego zapłonu, które są obecnie prowadzone na układzie laserowym FIREX w ośrodku w Osace.

W drugim etapie w/w eksperymencie – po podziale – gdy kadra została mocno ograniczona, a instytut stał się cywilną placówką naukową, badania prowadziłem w bardzo nielicznym zespole naukowym wspólnie z kolegami: dr. A. Kasperczukiem oraz dr. R. Miklaszewskim, który zajmował się 2D modelowaniem re-

alizowanych przez nas eksperymentów plazmowych. Z tego powodu eksperymenty ukierunkowane były głównie na badania dynamiki i stabilności plazmy laserowej w polu magnetycznym o różnej geometrii. Stosowane było pole magnetyczne o indukcji 20 T o kierunku linii sił zarówno podłużnym jak i poprzecznym do kierunku wiązki laserowej wytwarzającej plazmę.

W eksperymentach z podłużnym polem magnetycznym wykorzystywany był nowy trójkadrowy układ interferometryczny. Badania dostarczyły nowych nieopublikowanych informacji na temat: (I) reżimów ekspansji oraz (II) dynamiki szybkiej i powolnej składowej plazmy laserowej. Możliwość sterowania reżimami ekspansji poprzez wytwarzanie określonego rozkładu intensywności promieniowania laserowego na tarczy w podłużnym polu magnetycznym stworzyło duże możliwości kształtowania strumienia plazmy o określonym rozkładzie koncentracji elektronowej. Szczególnie interesującą konfiguracją, ze względu na możliwość zastosowania jej w badaniach nad laserami rentgenowskimi, jest cylinder plazmowy powstający podczas ekspansji kątowej.

Znaczącym osiągnięciem w badaniach plazmy laserowej z poprzecznym polem magnetycznym było zastosowanie po raz pierwszy do pomiaru koncentracji elektronowej plazmy laserowej metody tomograficznej, pokazując deformacje tych rozkładów pod wpływem pola magnetycznego, prostopadłego do kierunku ekspansji.

Wyniki badań plazmy laserowej w polu magnetycznym uzyskane w 1 i 2 etapie zostały podsumowane pracą habilitacyjną, którą obroniłem przed Radą Naukową Instytutu Problemów Jądrowych w Świerku (obecnie Narodowe Centrum Badań Jądrowych) w 1999 roku.

Po habilitacji zostałem mianowany na stanowisko docenta w Zakładzie Fizyki Plazmy i Laserów Wielkiej Mocy. Zostałem kierownikiem Pracowni Hydrodynamiki Plazmy Laserowej, a następnie, od 2006 roku, zakładu o tej samej nazwie. Z powodu zmian struktury organizacyjnej IFPiLM, związanych z uruchomieniem nowego urządzenia plazmowego PF-1000, nie mogłem kontynuować badań plazmy laserowej w polu magnetycznym, dlatego w początkowym okresie, do 2001 roku, zaangażowałem się w rozpoczęte badania na tym urządzeniu, wykorzystując swoją wiedzę i doświadczenie w zakresie stosowania diagnostyk optycznych.

Uczestnictwo w badaniach na urządzeniu PF-1000 stworzyło mi jednak możliwości w kształceniu młodej kadry, między innymi jako promotor prac doktorskich oraz opiekun naukowy tzw. post-doktorów odbywających staże naukowe w Międzynarodowym Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy przy IFPiLM.

Od 2001 r. pojawiły się możliwości prowadzenia badań interferometrycznych na układzie laserowym PALS (Prague Asterix Laser System) w Pradze. PALS jest to laser jodowy (przeniesiony z ośrodka w Garching) o maksymalnej energii promieniowania do 1 kJ w podstawowej harmonicznej (1315 nm) w impulsie subnanosekundowym (~250 ps) z możliwością pracy na drugiej i trzeciej harmonicznej podstawowej długości fali. Interferometrią na PALS zainteresowana była strona czeska, zwłaszcza, że takie badania nie były prowadzone na tym laserze gdy był zainstalowany w Garching. Wbrew pozorom, nie było to łatwe zadanie, gdyż warunkiem prowadzenia badań na PALS było otrzymanie projektu badawczego w ramach LaserLab Europe w drodze konkursu.

Tak więc, badania plazmy laserowej na eksperymencie PALS rozpocząłem w ramach pierwszego mojego projektu, nr PALS/013 uzyskanego z LaserLab w ramach 5 programu ramowego EU.

Dobrze pamiętam mój pierwszy, zaledwie kilkudniowy wyjazd na PALS, który miał mieć charakter badań wstępnych związanych z adaptacją trzy kanałowego układu polaro-interferometrycznego do warunków eksperymentu PALS oraz testowaniem oprogramowania do sterowania zapisem obrazów z kamer CCD w układzie akwizycji polaro-interferometru i jego synchronizacji z laserem PALS. Okazało się, że wyniki były dużo lepsze niż pierwotnie oczekiwałem i byłoby dużym niedopowiedzeniem, jeśli nie wspomnielibym, że w dużym stopniu przyczynił się do tego mój syn Paweł (wówczas student informatyki Politechniki Warszawskiej, a obecnie prezes dużej firmy informatycznej: ATENDE SOFTWARE zajmującej się wdrażaniem nowych technologii informatycznych), który jako jedyny pomagał mi wówczas w uruchomieniu trój-kanałowego polaro-interferometru. To w dużym stopniu dzięki niemu udało się zsynchronizować prototypowy (jak na owe czasy) układ akwizycji obrazów polaro-interferometru z laserem PALS i uzyskać pierwsze interferogramy, których analiza ilościowa i interpretacja umożliwiła poznanie właściwości plazmy laserowej na eksperymencie PALS, niezbędnych do określenia najbardziej interesującej tematyki badań w drugim etapie.

W drugim etapie postanowiłem pójść dalej i za akceptacją strony czeskiej spróbować zrealizować wielokadrowe pomiary interferometryczne, umożliwiające uzyskanie informacji o rozkładach przestrzennych i czasowych koncentracji elektronowej w plazmie laserowej. Było to przedsięwzięcie trudne technicznie i kosztowne (przekraczające środki finansowe projektu LaserLab) i nie było by możliwe do zrealizowania bez zaangażowania i dużej przychylności ze strony Dyrekcji laboratorium PALS oraz ówczesnego Dyrektora IFPiLM – dr. Z. Składanowskiego. Przedsięwzięcie powiodło się, a zainstalowany wówczas na PALS, ponad 10 lat temu, trzy-kadrowy układ interferometryczny to jedyny działający wielokadrowy interferometr zainstalowany na tak dużym eksperymencie laserowym. Schemat optyczny trój-kadrowego interferometru zainstalowanego na PALS oraz jego widok przedstawiony jest na rys. 1.

Stał się on jedną z diagnostyk głównych na eksperymencie PALS, w pewnym sensie standardową i wykorzystywany jest również w celach dydaktycznych do szkolenia zarówno studentów, jak i doktorantów odbywających praktyki lub staże naukowe w laboratorium PALS. Stanowi on „wizytówkę” polskiej grupy z IFPiLM, realizującej eksperymenty na PALS. Układ ten jest co kilka lat modernizowany. Dotyczy to między innymi stosowania nowszych kamer CCD o coraz większej rozdzielczości i dynamice i dostosowania parametrów układów optycznych i mechanicznych do warunków prowadzonych eksperymentów plazmowych.

Oceniając z perspektywy czasu działalność naukową na PALS mojego zespołu, chciałbym podkreślić, że uruchomienie wielokadrowej interferometrii na tym eksperymencie było ważnym krokiem i stworzyło mojemu zespołowi duże możliwości w podjęciu efektywnych badań związanych z różnymi obszarami zastosowań plazmy laserowej, a w szczególności badań dotyczących realizacji:

- fuzji inercyjnej (ICF – Inertial Confinement Fusion)
- badań związanych z astrofizyką.

Tak się szczęśliwie złożyło, że w tych obszarach zastosowań plazmy laserowej istotną rolę odgrywają badania dynamiki i parametrów plazmy ablacyjnej, a w szczególności zmian przestrzennych i czasowych rozkładów koncentracji elektronowej, co zapewnia właśnie wielo-kadrowa interferometria.

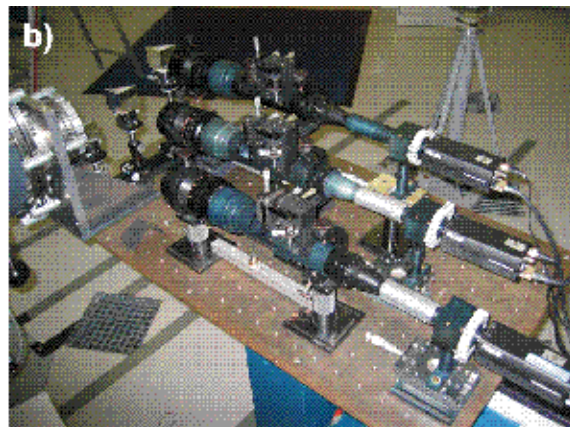
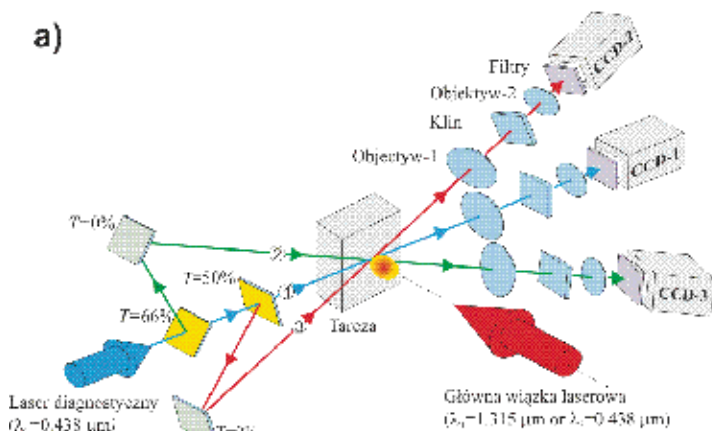
Tak więc, dysponując takim przydatnym narzędziem diagnostycznym, mogliśmy od pierwszych eksperymentów na PALS włączyć się w nowy wówczas obszar badań związany z realizacją ICF poprzez tzw. szybki zapłon (ang. fast ignition).

Ten sposób realizacji ICF polega na przyspieszeniu zapłonu komprimowanego paliwa termojądrowego poprzez szybkie dogrzewanie w momencie, w którym osiąga ono maksymalną kompresję i może być realizowany np:

- (i) przez dostarczenie dodatkowej porcji energii poprzez strumień plazmowy (ang. plasma jet), albo
- (ii) poprzez zderzenie napędzonej do wysokiej prędkości makrocząstki ze skompresowanym peletem (tzw. impact fast ignition).

Eksperymenty na PALS dotyczące ICF rozpoczęliśmy od tematu drugiego (II), wykorzystując jedną z efektywnych metod przyspieszania makrocząstek do bardzo wysokich prędkości – jaką jest laserowa akceleracja ablacyjna cienkich folii lub dysków, realizowana w tarczach podwójnych, w których jednym z elementów jest napędzana cienka folia (lub dysk) usytuowana przed masywnym elementem tarczy. W literaturze taki sposób napędzania tarczy nazywany jest metodą lecącego targetu (flyer target method).

Chciałbym jednocześnie wyjaśnić, że eksperymenty z zastosowaniem tarcz podwójnych mogą dostarczyć istotnych informacji o procesie implozji sferycznych targetów, na której oparta jest idea fuzji laserowej i mogą modelować zachowanie się sferycznych tarcz laserowych we wczesnej fazie implozji, traktując dysk w takim eksperymencie jako jedną z sekcji sferycznej tarczy. Na podstawie eksperymentów z tarczami podwójnymi można uzyskać między innymi informacje o: prędkości napędza-



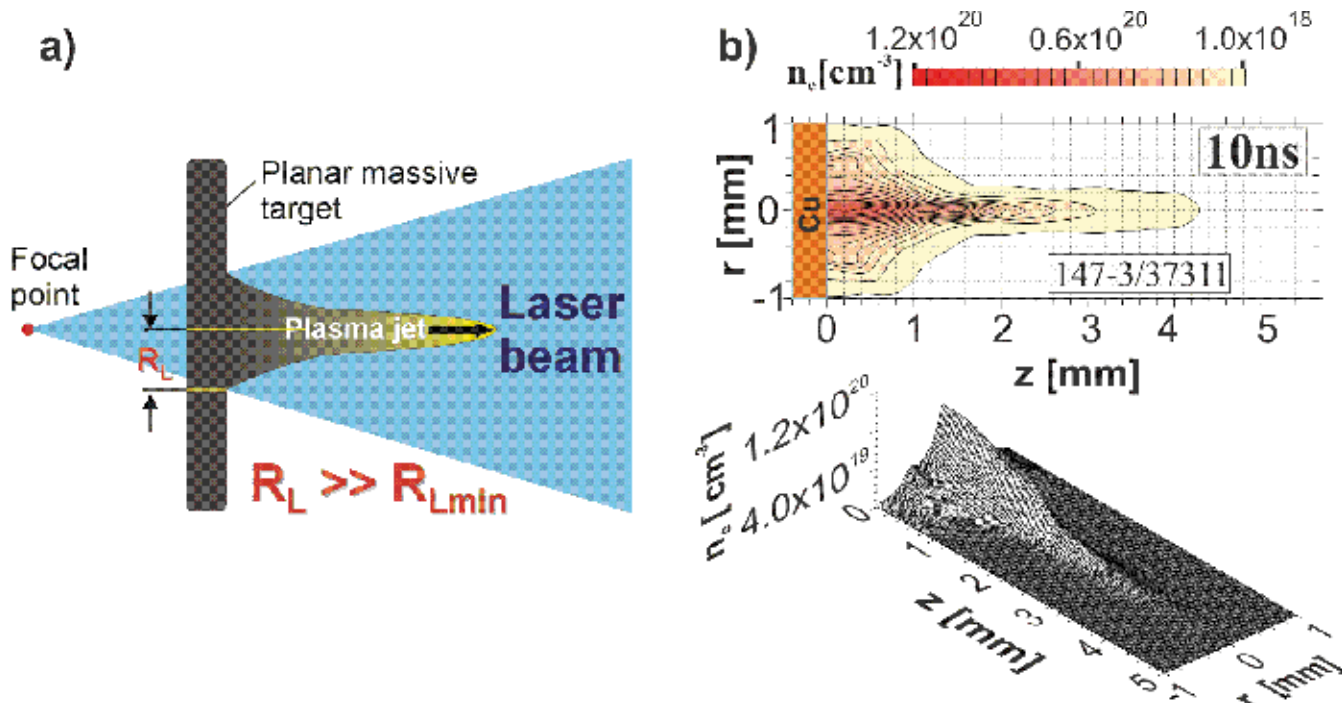
Rys. 1. Trój-kadrowy interferometr: a) schemat optyczny i b) widok układu rejestracji.

nej folii, absorpcji promieniowania laserowego, ciśnieniu ablacyjnym i generacji fali uderzeniowej, efektywności hydrodynamicznej, transporcie energii, wymaganiach odnośnie jednorodności impulsu laserowego itd.

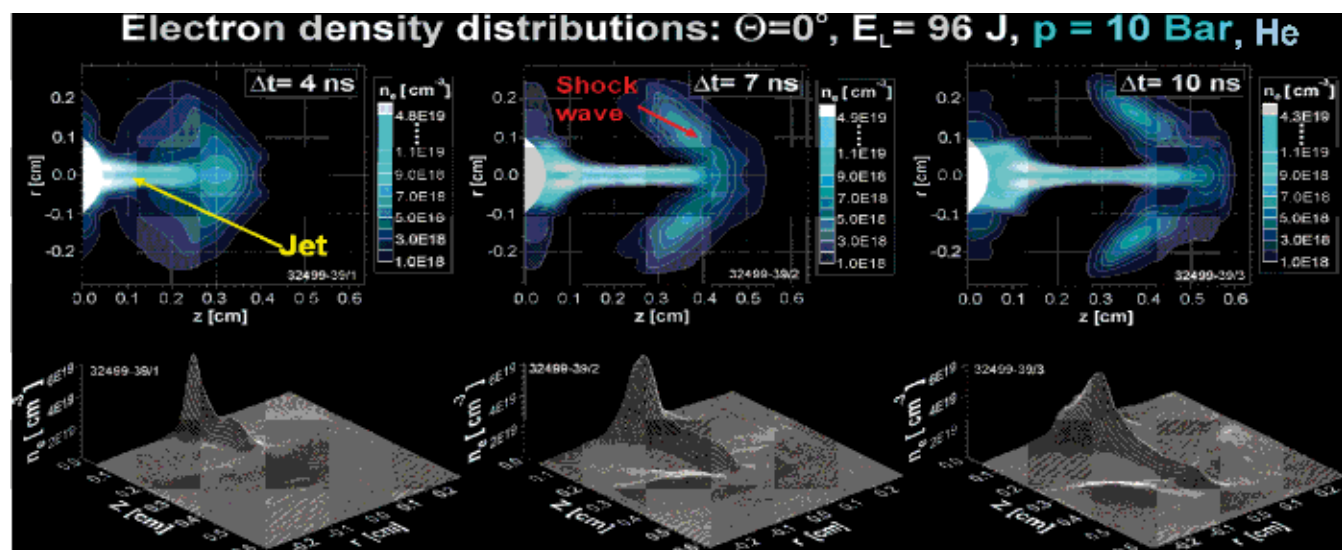
W badaniach tych, oprócz wielo-kadrowej interferometrii prowadzone były również pomiary objętości kraterów będących efektem oddziaływania przyspieszanego dysku lub folii z tarczą masywną. Objętości kraterów, określane opracowaną przez mnie metodą dwu-ekspozycyjnej fotografii ich replik, stanowiły podstawę do oceny efektywności przekazu energii laserowej do fali uderzeniowej generowanej w tarczy masywnej.

Analiza wyników badań interferometrycznych oraz procesu formowania krateru prowadzona była we współpracy z grupą teoretyczną z Instytutu Fizyki im. Lebedeva w Moskwie, kierowaną przez prof. S. Yu. Gus'kova. Do interpretacji wyników wykorzystany był dwu-wymiarowy model analityczny generacji fali uderzeniowej pod wpływem ciśnienia ablacyjnego.

Oceniając z perspektywy czasu wyniki tych eksperymentów przedstawione w wielu publikacjach okazało się, że były to jedne z pierwszych eksperymentów w owym czasie, potwierdzające wpływ szybkich elektronów na przekaz energii promieniowania laserowego do fali uderzeniowej. Mówię o tym dlatego, że od kilku lat badania generacji szybkich elektronów są „na topie”, po-



Rys. 2. Nowa metoda generacji naddźwiękowych strumieni plazmowych: a) idea metody oraz b) ekwidensytoprogram i profil przestrzenny koncentracji elektronowej uzyskany w eksperymentalnie na układzie laserowym PALS.



Rys. 3. Rozkład koncentracji elektronowej ilustrujący oddziaływanie strumienia plazmowego z obłokiem gazowym uzyskany w eksperymencie astrofizycznym zrealizowanym na układzie laserowym PALS.

nieważ dotyczą jednej z najbardziej realistycznych koncepcji realizacji ICF – zapłonu za pomocą silnej fali uderzeniowej (ang. shock-ignition (SI)). Prowadzone obecnie eksperymenty na PALS dotyczą właśnie tematyki (SI), o czym będę mówił w dalszej części mojego wywiadu.

Eksperymenty na PALS, dotyczące wytwarzania strumieni plazmowych dla potrzeb ICF (pierwszy z wymienionych wyżej tematów), rozpoczęto od testowania metody wytwarzania strumieni plazmowych poprzez kumulację stożkowo ukształtowanej cienkiej, metalowej folii w wyniku oświetlania jej wiązką promieniowania laserowego. Autor tej metody – prof. P. Velarde z Uniwersytetu w Madrycie, proponował wówczas wykorzystanie tej metody do realizacji nowej koncepcji szybkiego zapłonu, tzw. *fast ignition*, podczas kompresji paliwa termojądrowego metodą laserową. Propozycja wykorzystania naszego układu interferometrycznego zainstalowanego na PALS do potwierdzenia przydatności tej metody w realizacji ICF, wynikającej z symulacji numerycznych prowadzonych przez grupę teoretyczną prof. Velarde, pojawiła się na jednej z konferencji ECLIM-2006 po moim referacie w którym przedstawiałem wyniki badań interferometrycznych uzyskanych na eksperymencie PALS. Dodatkowym argumentem do współpracy była możliwość wykonania przez IFPiLM wyrafinowanych tarcz stożkowych o wymaganych parametrach. Jednakże, mimo bardzo obiecujących prognoz, wynikających z numerycznego modelowania, wyniki badań interferometrycznych na PALS, wykonanych dla tych samych warunków jak symulacje numeryczne, nie dały zadowalających rezultatów.

Natomiast dużym sukcesem naszych badań interferometrycznych na PALS okazała się nowa metoda wytwarzania strumieni plazmowych (zaproponowana przez dr A. Kasperczuka), która umożliwia - w wyniku oddziaływania pojedynczej wiązki laserowej z płaską tarczą masywną wykonaną z materiału o stosunkowo dużej liczbie atomowej ($Z > 29$, Cu) - otrzymanie naddźwiękowych strumieni plazmowych o prędkościach powyżej 500 km/sek, maksymalnej koncentracji elektronowej powyżej 10^{19} cm^{-3} i czasie życia o ponad 2 rzędy wielkości przekraczającym długość trwania wytwarzającego je impulsu promieniowania laserowego. Idea tej nowej metody oraz wyniki pierwszych eksperymentów demonstrujących ją, zostały opublikowane po bardzo przychylnych recenzjach w czasopiśmie *Physics of Plasmas*.

Metoda ta okazała się konkurencyjną w stosunku do bardzo skomplikowanych metod wytwarzania strumieni plazmowych poprzez wielowiązkowe oświetlenie tarcz stożkowych, które zrealizowane zostało tylko na największych systemach laserowych w świecie: NOVA w Livermore oraz GEKKO XII w Osace. Oczekiwania związane z wykorzystaniem tej metody zarówno w badaniach nad realizacją inercyjnej syntezy laserowej ICF) oraz w badaniach astrofizycznych stały się motywacją do podjęcia intensywnych badań na eksperymencie PALS, które prowadzimy do chwili obecnej.

Rozwijaniem tej nowej metody w aspekcie badań astrofizycznych zainteresowany był między innymi ośrodek w Bordeaux (Centre Lasers Intenses et Applications-CELIA), oferując wsparcie takich badań przez grupę prof. V. Tikhonchuka, zajmującą się modelowaniem plazmy laserowej.

Aby nawiązać współpracę z tą grupą, zostałem zaproszony razem z moim kolegą dr A. Kasperczukiem przez prof. Tikhonchuka do ośrodka CELIA w Bordeaux w marcu 2006 roku, gdzie przedstawialiśmy wyniki badań interferometrycznych uzyskane na eksperymencie PALS dotyczące tej nowej metody formowania strumieni plazmowych.

Pierwsze wspólne eksperymenty astrofizyczne na PALS zostały zrealizowane w roku 2007 w ramach projektu LaserLab Nr PALS 001326 w ramach 6. PR UE. Badania dotyczyły oddziaływania strumieni plazmowych z obłokiem gazowym z Ar i He. Do wytwarzania obłoku gazowego stosowano układ typu gass-puff (wykonany przez prof. C. Steną z CELIA w Bordeaux), umożliwiający uzyskanie kolumny gazowej (He lub Ar) o ciśnieniu do 60 bar, średnicy ok. 3 mm i gęstości w zakresie 10^{17} to 10^{19} cm^{-3} .

Uzyskane na podstawie interferogramów przestrzenno-czasowe rozkłady gęstości elektronów pokazujące procesy tworzenia i przemieszczania się fali uderzeniowej wywołanej ruchem strumienia plazmy w gazie, są pierwszymi publikowanymi w literaturze światowej, rys. 3.

Szczegółowa analiza tych wyników pokazała możliwość skalowania ich do rzeczywistych warunków astrofizycznych. Badania potwierdziły, między innymi, dużą przydatność wytwarzanych strumieni plazmowych o różnych składzie atomowym plazmy do modelowania strumieni plazmowych wytwarzanych w obiektach Herbig-Haro.

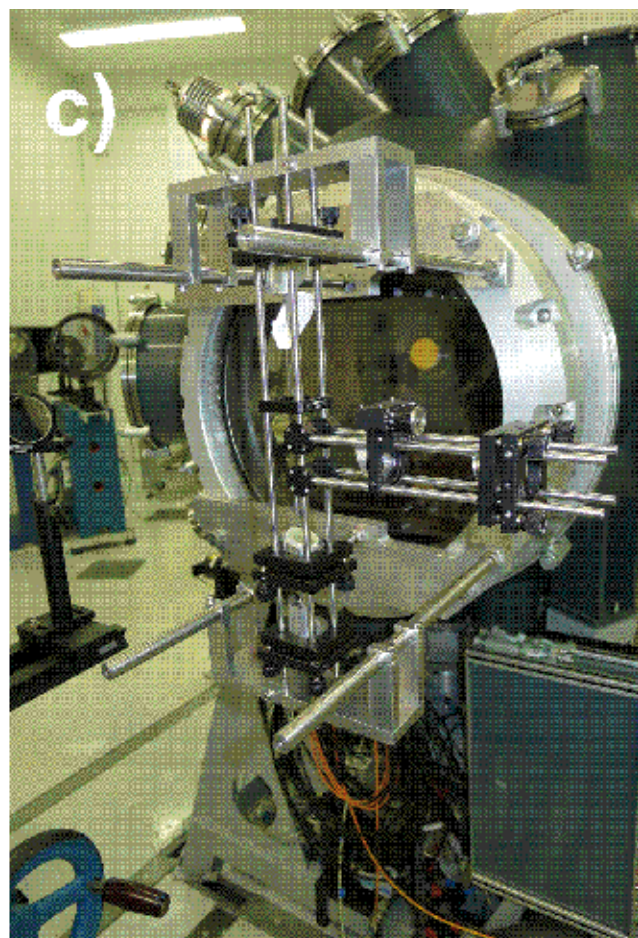
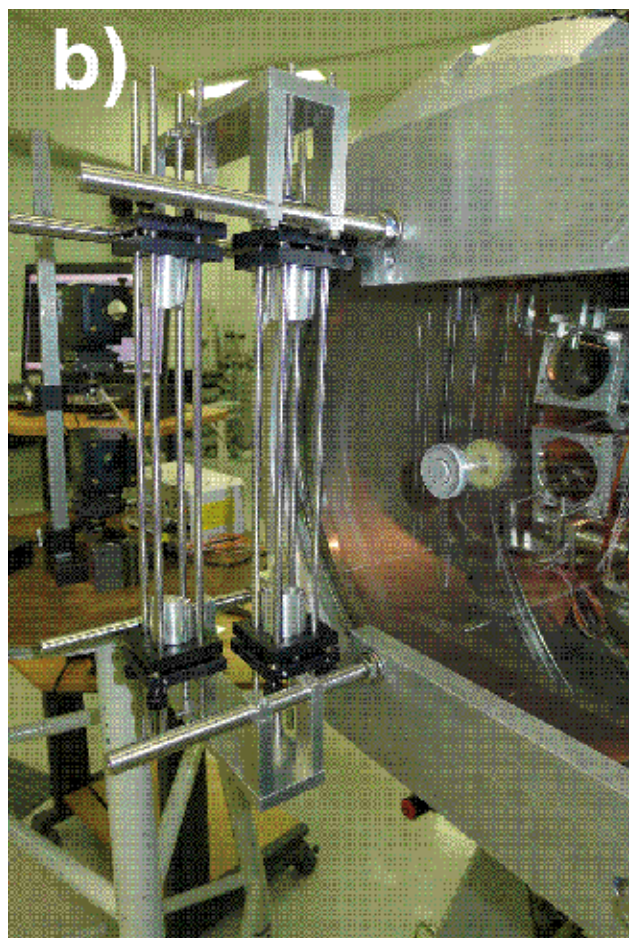
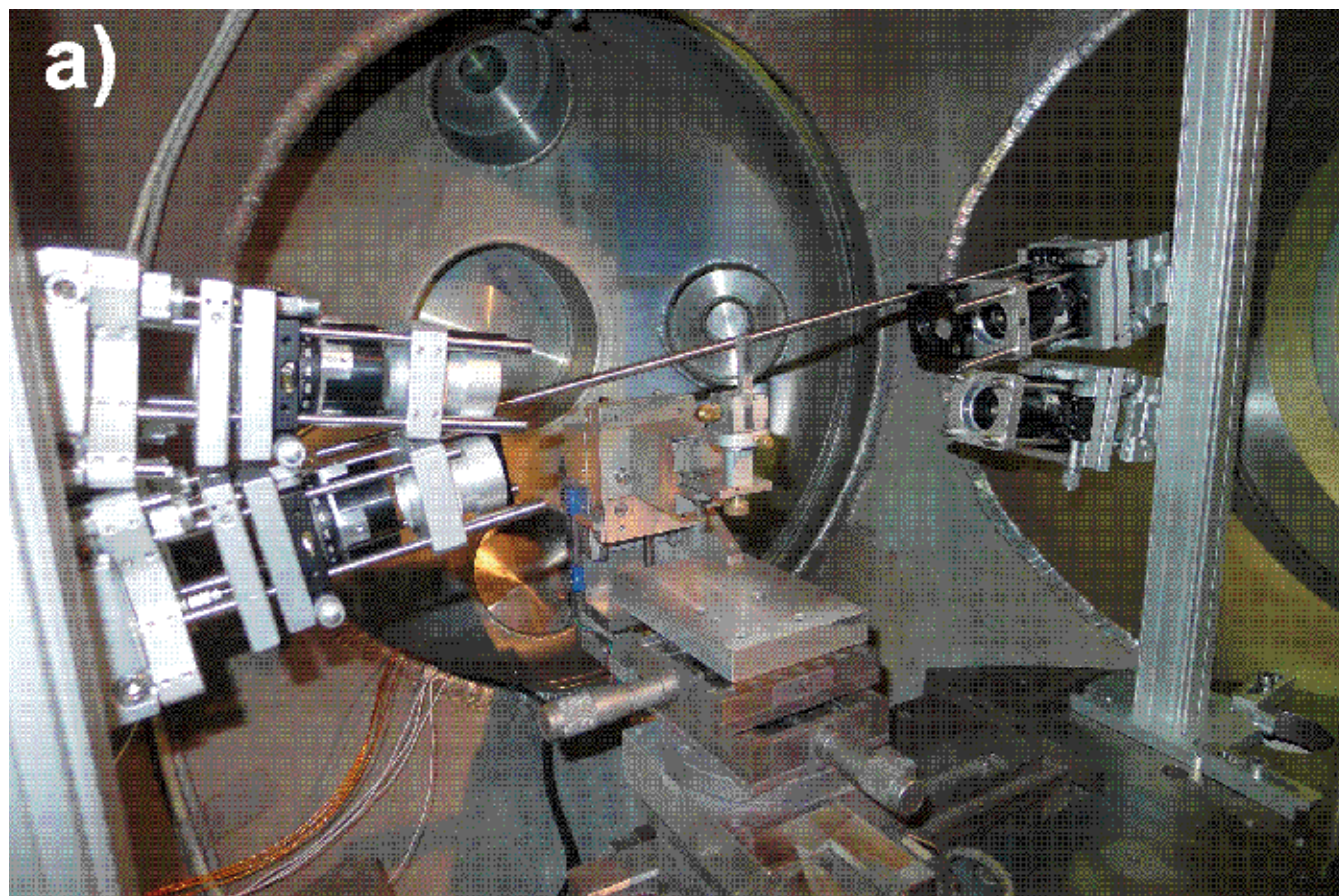
Innym znaczącym osiągnięciem naukowym mojego zespołu zrealizowanym na eksperymencie PALS jest nowa metoda dwustopniowej akceleracji makrocząstek (cienkich folii lub dysków), jako alternatywa do powszechnie stosowanej klasycznej metody ablacyjnej. Idea tej metody została zaproponowana przez dr Stefana Borodziuka i nazwana została metodą RAS (Reverse Acceleration Scheme). Ta nowa metoda wykorzystuje do napędzania folii plazmę ablacyjną generowaną z powierzchni tarczy masywnej oświetlanej impulsem lasera i specjalną konstrukcją tarczy, co gwarantuje wysoką efektywność procesu akceleracji. Taki schemat napędzania pozwala w znacznie lepszym stopniu wykorzystywać zaabsorbowaną energię impulsu laserowego i zdecydowanie zwiększa ciśnienie powodujące akcelerację folii. W efekcie uzyskuje się znacząco wyższe wartości podstawowych parametrów przyspieszanej makrocząstki, tj. jej prędkości, gęstości, a przede wszystkim współczynnika wydajności hydrodynamicznej (stosunek energii kinetycznej makrocząstki do zaabsorbowanej energii impulsu laserowego). Metoda ta eliminuje w dużym stopniu podstawową sprzeczność klasycznej akceleracji ablacyjnej, w której to metodzie uzyskanie wysokich wartości prędkości i współczynnika wydajności hydrodynamicznej okupione jest utratą masy i spadkiem gęstości napędzanej makrocząstki.

Najbardziej istotne wyniki potwierdzające słuszność tej nowej idei to:

- napędzanie bardzo cienkich folii lub dysków z lekkich materiałów (takich jak polistyren, Al) do rekordowych prędkości bliskich 10^8 cm/s przy energiach lasera prawie o rząd niższych niż w innych laboratoriach
- napędzanie grubych (0.3 i 0.5 mm) folii Al do prędkości $\sim 1 \times 10^7 \text{ cm/s}$,

co jest niemożliwe do osiągnięcia w przypadku metody klasycznej dla tych samych parametrów lasera.

Te dwie przedstawione w/w metody, jedna dotycząca nowego sposobu wytwarzania strumieni plazmowych, zaś druga bardziej efektywnego sposobu akceleracji makrocząstek (folii lub dysku), zdominowały tematykę badań prowadzonych na PALS w ostatnich latach. Badania te prowadzone są w ramach projektów LaserLab, międzynarodowych projektów współfinansowanych jak również w ramach projektów badawczych własnych MNiSzW. Nie chwaląc się, mój zespół otrzymał do tej pory, na badania związane z eksperymentem PALS, kil-



Rys. 4 Widok podzespołów polaro-interferometru zainstalowanych na eksperymencie PALS: a) moduły polaro-interferometru, b) linia opóźniająca oraz c) układy wyprowadzania wiązek diagnostycznych i rejestracji.

kanaście projektów, których tematyka zdominowana była przez zagadnienia związane z poznaniem i doskonaleniem w/w metod. W pierwszym przypadku badania skoncentrowane były na poznaniu mechanizmów formowania strumieni plazmowych wytwarzanych nową metodą, natomiast w ramach tematu drugiego prowadzone były badania związane z doskonaleniem nowej metody napędzania - RAS (Reverse Acceleration Scheme).

Najważniejszym osiągnięciem w zakresie pierwszego tematu było znalezienie dodatkowego mechanizmu, który bierze udział w formowaniu skumulowanych strumieni plazmowych razem z rozważanymi dotychczas mechanizmami, mianowicie: (i) chłodzeniem radiacyjnym plazmy i (ii) oświetleniem pierścieniowym tarczy. W oparciu o dane uzyskane z przeprowadzonych eksperymentów i numerycznych symulacji zidentyfikowano dwa reżimy ekspansji plazmy:

- ekspansję o płaskiej geometrii w przypadku plazmy wytwarzanej z tarczy Cu oraz
- ekspansję o charakterze sferycznym występującą dla plazmy wytwarzanej z plastiku.

Stanowią one nieuwzględniany dotychczas czynnik, mający istotny wpływ na kreowaną, wydłużoną strukturę plazmy. Uwzględnienie powyższych mechanizmów w dwu-wymiarowych symulacjach prowadzonych przez grupę teoretyczną z CELIA, pozwoliło uzyskać numerycznie symulowane strumienie plazmowe niemalże identyczne jak wytwarzane w warunkach eksperymentu PALS. Stworzyło to duże możliwości zastosowania tych strumieni do modelowania eksperymentów kombinowanych, symulujących zjawiska astrofizyczne.

Nowe możliwości w kreowaniu strumieni plazmowych o parametrach przydatnych z punktu widzenia ich aplikacji przyniosło połączenie ww. metody generacji strumieni plazmowych z ideą o możliwości komprimowania ciężkiej plazmy przez lekką, wynikającą z dotychczasowych badań na PALS. Stosując tarcze pierścieniowe wykonane z materiałów o małej i dużej liczbie atomowej (kombinacje: plastik-Cu oraz plastik-Al), pokazano możliwość:

- otrzymania strumieni plazmowych z Cu i Al o lepszych parametrach (mniejszej średnicy, większej koncentracji elektronowej oraz prędkości) oraz
- wytwarzania strumieni o konfiguracji koncentracji elektronowej w postaci „rurki” bądź powłoki stożkowej.

W pierwszym przypadku za szczególnie ważne osiągnięcie należy uznać wytworzenie zbieżnego strumienia plazmowego z lekkiego materiału Al, co nie było dotychczas możliwe i co stwarza możliwości aplikacji takich strumieni w badaniach nad realizacją ICF.

W drugim przypadku proponowany sposób, poprzez dobór konstrukcji tarcz pierścieniowych, materiałów pierścieni oraz odpowiedniego ich oświetlenia wiązką laserową, stwarza dodatkowe możliwości w kreowaniu określonych struktur strumieni plazmowych przydatnych w badaniach astrofizycznych.

Podsumowując moją wypowiedź, chciałbym jeszcze dodać, że dotychczasowe osiągnięcia mojego zespołu w badaniach interferometrycznych plazmy na PALS zostały przedstawione w kilkudziesięciu publikacjach z listy filadelfijskiej (ostatniej dekady), z których znaczna liczba to publikacje w najbardziej prestiżowych czasopismach takich jak *Physics of Plasmas*, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, *Laser and Particle Beams* czy *Applied Physics Letters*. Do tego należy dodać co najmniej dwukrotną liczbę referatów na międzynarodowych konfe-

rencjach naukowych, z których wiele to referaty tzw. invited oraz typu oral, wygłaszane przeze mnie oraz moich kolegów: dr. A. Kasperczuka oraz dr. S. Borodziuka. Ten znaczący dorobek naukowy na PALS przyczynił się w znacznym stopniu do bardzo wysokiej oceny parametrycznej działalności naukowej, jaką uzyskał IFPiLM w ostatnim rankingu.

Co szczególnie absorbuje uwagę uczonych realizujących aktualnie badania na PALS?

Obecnie najbardziej interesującą tematyką badań nad fuzją inercyjną stał się tzw. udarowy zapłon termojądrowy (ang. shock ignition). Ta najnowsza, bardzo obiecująca koncepcja fuzji inercyjnej jest intensywnie rozwijana obecnie w Stanach Zjednoczonych, a także w Chinach, Japonii i Europie, m.in. w ramach międzynarodowego programu HiPER. W koncepcji tej zarówno kompresja paliwa termojądrowego (DT) jak i jego zapłon jest realizowany za pomocą jednego, odpowiednio ukształtowanego impulsu laserowego (generowanego w postaci wielu wiązek oświetlających sferycznie kulę DT). Nanosekundowa (~ 5 ns) część impulsu o umiarkowanej intensywności ($I_L \sim 10^{14} - 10^{15}$ W/cm²) komprimuje paliwo DT, zaś subnanosekundowy ($0.2 < t < 0.5$ ns) pik o dużej intensywności ($I_L \sim 10^{16}$ W/cm²), usytuowany na końcu impulsu, wytwarza bardzo intensywną, zbieżną falę uderzeniową, która powoduje zapłon paliwa w momencie, gdy jego gęstość jest największa. Zaawansowane symulacje numeryczne wykazały, że wzmocnienie energii ~ 100 razy można uzyskać w tym przypadku już przy energiach lasera (UV) $\sim 200 - 300$ kJ, a więc blisko 10 razy mniejszych niż w wariancie konwencjonalnym (z tzw. centralnym samozapłonem, badanym obecnie na megadżulowym układzie laserowym National Ignition Facility w Livermore, USA). Pierwszy eksperyment typu „proof-of-principle” eksperyment na wielowiązkowym laserze Omega w laboratorium Uniwersytetu Rochester w USA potwierdził możliwość dodatkowego podgrzania paliwa wytworzoną w powyższy sposób koncentryczną falę uderzeniową i zwiększenia efektywności procesu syntezy deuteronów w plazmie.

W roku 2011 badania nad shock ignition zostały podjęte również na PALS, przy moim współudziale, w ramach wspólnych projektów LaserLab z ośrodkami w Pizie oraz Bordeaux. Dotyczy to 2 projektów: jeden, pod kierownictwem prof. Bataniego z ośrodka CELIA w Bordeaux i dr. Petry Koester z ośrodka w Pizie, zaś drugi prof. Badziaka z IFPiLM. We wszystkich trzech projektach wykorzystywane są: (i) trzy kadrowy układ interferometryczny, jako główna diagnostyka oraz pomiary kształtu i wymiarów kraterów za pomocą metody tomograficznej.

Jednym z ważniejszych aspektów badawczych, związanych z *shock ignition*, jest mechanizm wytwarzania ciśnienia ablacyjnego podczas oświetlenia tarczy termojądrowej, w którym istotną rolę odgrywają procesy bezderzeniowego pochłaniania promieniowania laserowego prowadzące do generacji szybkich nadtermicznych elektronów, takie jak: absorpcja rezonansowa, wymuszone rozproszenie Raman’a, rozpad dwu-plazmonowy fali świetlnej, wymuszone rozpraszanie Brillouina, czy niestabilność filamentacyjna.

W związku z powyższym, aktualnym pozostaje pytanie nie tylko o udziale w/w procesów w całkowitej absorpcji promieniowania laserowego, ale przede wszystkim o wpływie transportu energii przenoszonej przez szybkie elektrony na formowanie ablacyjnego ciśnienia generowanego przez falę uderzeniową.



W uzyskaniu odpowiedzi na w/w pytanie niezbędne są informacje na temat parametrów i dynamiki plazmy ablacyjnej, dlatego szczególnie przydatną diagnostyką w takich badaniach jest interferometria.

W dotychczasowych badaniach na eksperymencie PALS, realizowanych z udziałem mojego zespołu, wykorzystywany jest 3-kadrowy układ interferometryczny oświetlany 1 lub 3 harmoniczną promieniowania lasera jodowego o czasie trwania porównywalnym z impulsem wiązki laserowej wytwarzającym plazmę. Przy takiej relacji czasów trwania impulsów diagnostycznego i głównego, układ ten nie daje możliwości efektywnego sondowania plazmy laserowej, której prędkość ekspansji jest wysoka, ok. 10^8 cm/s, co odpowiada szybkiej składowej plazmy ablacyjnej generowanej w początkowym etapie ekspansji plazmy. Co więcej, rozmycie prążków interferencyjnych w pobliżu tarczy nie pozwala na pomiar maksymalnej koncentracji elektronowej plazmy, wynikającej z długości fali stosowanego lasera diagnostycznego.

Z punktu widzenia badań nad „shock ignition”, szczególnie interesująca jest właśnie wczesna faza ekspansji związana z oddziaływaniem impulsu laserowego z kreowaną przez niego plazmą do momentu jego zakończenia. W fazie tej rozwijają się w/w procesy absorpcji anomalnej odpowiedzialne za generację szybkich elektronów oraz powstają pola elektryczne i magnetyczne, będące wynikiem zarówno ruchu tych elektronów, jak i efektem różnych zjawisk i procesów zachodzących w plazmie niejednorodnej takich jak np. spontaniczne pola magnetyczne związane z efektem skrzyżowanych gradientów temperatury i koncentracji elektronowej. Pola te mogą w istotny sposób modyfikować parametry i transport szybkich elektronów od źródła ich powstawania do strefy (powierzchni) ablacji i wpływać na formowanie ciśnienia fali uderzeniowej.

Z wyżej wymienionych powodów zachodzi konieczność stosowania interferometrii oraz polarymetrii do badania wczesnej fazy ekspansji plazmy laserowej z dużo krótszym czasem trwania impulsu diagnostycznego niż w badaniach dotychczasowych.

W/w oczekiwania spełnia dwu-kanalowy polaro-interferometr oświetlany impulsem lasera femtosekundowego, zbudowany pod moim kierownictwem w ramach projektu sponsorowanego przez regionalny program operacyjny województwa mazowieckiego.

Właśnie za pomocą tego polaro-interferometru zamierzam kontynuować rozpoczęte badania na PALS dotyczące tematyki SI. Tak się szczęśliwie składa, że mogę takie badania realizować w ramach mojego kolejnego projektu LaserLab (nr PALS-001994) pt: *Femtosecondpolaro-interferometric investigation of initial stages of the shock ignition relevant plasmas generated by laser irradiation of plana targets*, który został mi przyznany po bardzo przychylnych recenzjach. Zastosowanie do badań w/w układu diagnostycznego pozwoli przede wszystkim na uzyskanie rozkładów koncentracji elektronowej z dużo większą czasową rozdzielczością, wystarczającą do zarejestrowania czytelnych interferogramów w początkowej fazie ekspansji, odpowiadającej czasowi trwania impulsu laserowego wytwarzającego plazmę. Co więcej, układ ten stwarza również możliwość pomiaru rozkładu pól magnetycznych w plazmie dzięki powiązaniu pomiarów koncentracji elektronowej z rozkładami skręcenia płaszczyzny polaryzacji promieniowania laserowego, uzyskanymi na podstawie polarogramów.

Pierwsze wyniki badań wchodzące w zakres projektu zostały już uzyskane w sesji pomiarowej, która się odbyła pod koniec 2013 roku. Widok polaro-interferometru zainstalowanego na eksperymencie PALS przedstawiony jest na rys. 4.

W tym momencie mogę powiedzieć tylko tyle, że wyniki badań są bardzo interesujące i zgodne w dużej części z oczekiwaniami. Są obecnie przedmiotem ilościowych analiz i interpretacji, część z nich została przedstawiona na konferencji 33rd European Conference on Laser Interaction with Matter w Paryżu, we wrześniu 2014 r. Niezależnie od prezentacji konferencyjnych uzyskany materiał naukowy zamierzam jak najszybciej opublikować.

Dziękuję za rozmowę

Rozmawiał: **Marek Bielski**