

Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

Monika Kubkowska

WARSZAWA 2012

SPIS TREŚCI:

1. Historia powstania instytutu.....	3
2. Struktura organizacyjna Instytutu.	4
3. Działalność naukowa Instytutu.	5
4. Aparatura badawcza.	9
4.1. Urządzenie PF-1000.	9
4.2. Urządzenie PF-6.....	12
4.3. Laser Tytanowo-Szafirowy o mocy 10 TW.....	14
4.4. Inne układy laserowe i diagnostyki spektralne.....	16
4.5. Diagnostyki jonowe.....	16
4.6. Analiza powierzchni badanych próbek i pyłu powstającego w wyniku oddziaływania z impulsami laserowymi.	18
5. Przykłady realizowanych prac badawczych.....	19
6. Asocjacja „Euratom” i rola w niej IFPiLM.....	21
7. Współpraca krajowa i międzynarodowa.	22
8. Możliwości pracy/współpracy oferowane przez Instytut.	23

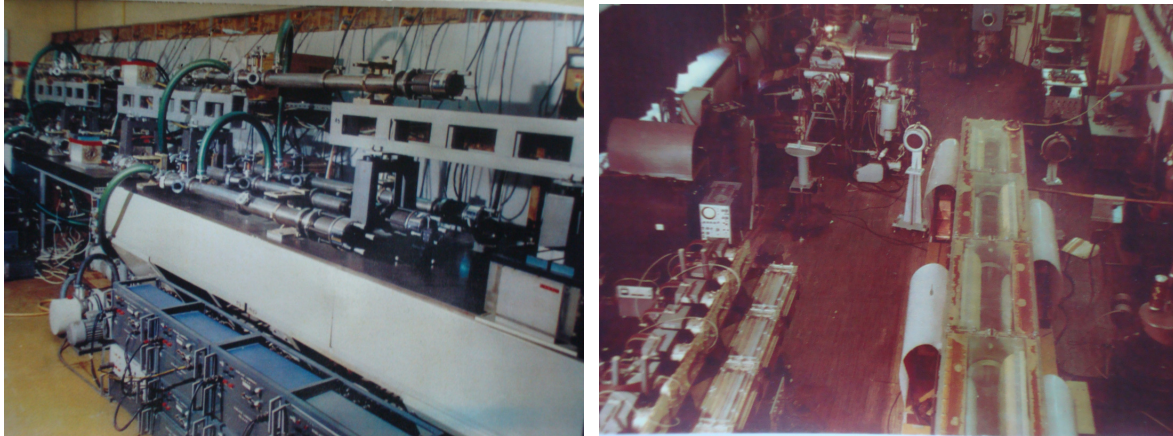
1. Historia powstania instytutu.

Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM) (www.ifpilm.pl) powstał 1 stycznia 1976 roku w wyniku połączenia czterech zespołów badawczych Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) w Warszawie w samodzielny Instytut, który wówczas podlegał Ministerstwu Nauki, Szkolnictwa Wyższego i Techniki. Pierwszym dyrektorem instytutu i jednocześnie założycielem był gen. Sylwester Kaliski. Główną działalnością badawczą instytutu w owych czasach były badania dotyczące układów plasma focus (PF), które przeprowadzane były w ścisłej współpracy z Instytutem Badań Jądrowych (IBJ) w Świerku (dzisiejsze Narodowe Centrum Badań Jądrowych, NCBJ); badania oddziaływań promieniowania laserowego z materią oraz kompresji plazmy z wykorzystaniem materiałów wybuchowych. W owych czasach IFPiLM był posiadaczem największych w Polsce laserów impulsowych, jak również układów generujących strumienie plazmowe w wyniku impulsowych wyładowań.

W 1978 r. po śmierci gen. Sylwestra Kaliskiego dyrektorem IFPiLM został doc. Sławomir Denus. Za jego kadencji, rozpoczęte w pierwszych latach istnienia instytutu prace badawcze w większości były kontynuowane, szczególnie we współpracy z IBJ oraz z Instytutem Fizyki im. Lebedewa w Moskwie. Instytut współpracował również z Instytutem Energii Atomowej im. Kurczatowa w Moskwie, gdzie brał udział w badaniach mających na celu rozwój nowych diagnostyk (interferometrii laserowej, spektroskopii rentgenowskiej, widzialnej i VUV, pomiary neutronów) przewidzianych dla budowanego tokamaka T15. Instytut brał również czynny udział w pracach nad rozwojem laserów gazowych i na ciele stałym, jak również rozwijał systemy generacji wiązek jonowych i elektronowych.

W 1987 r. instytut został podporządkowany Ministerstwu Obrony Narodowej. Kolejne lata w historii IFPiLM przyniosły zmiany programowe, mianowicie zaprzestano badań wykorzystujących materiały wybuchowe, a skupiono się bardziej na optoelektronice. Wówczas narodził się pomysł przekształcenia IFPiLM ponownie w instytut cywilny. W 1993 r. ostatecznie po dokonaniu pewnego podziału (część instytutu została wcielona do WAT) IFPiLM stał się instytutem podlegającym Państwowej Agencji Atomistyki. Wówczas dyrektorem zostaje dr Zygmunt Składanowski, który pełni tę funkcję przez następne 17 lat. W owych czasach pomimo trudnej sytuacji ekonomicznej, instytut kontynuuje badania plazmy wytwarzanej laserami oraz plazmy generowanej w urządzeniu plasma focus. W 1999 r. powstaje Międzynarodowe Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy (ICDMP - International Centre for Dense Magnetised Plasmas) wspierane przez UNESCO i Międzynarodową Agencję Energii Atomowej. Projekty badawcze realizowane na układzie PF-1000 wspierane są przez europejski program „Transnational Access”. Ponadto w instytucie zakupiony zostaje laser o mocy 1TW i czasie trwania impulsu 1 ps, który otwiera drogę badaniom nad fuzją laserową.

Rozwój naukowy instytutu nie byłby tak intensywny, gdyby nie współpraca międzynarodowa. W dziedzinie plazmy laserowej IFPiLM w owych czasach współpracował z Instytutem Fizyki Czeskiej Akademii Nauk w Pradze, gdzie prowadzono badania z wykorzystaniem lasera PERUN, a od 2000 r. nowego układu laserowego PALS (Prague Asterix Laser System), na którym badania i wspólne eksperymenty prowadzone są do dziś.



Rys. IFPiLM-1. Zdjęcia pikosekundowego lasera o mocy 1TW zbudowanego w IFPiLM.

Historycznym wydarzeniem dla instytutu było wejście Polski w 2004 r. do Unii Europejskiej, a tym samym przystąpienie do Europejskiej Wspólnoty Energii Atomowej – Euratom. Celem tej organizacji jest współpraca międzynarodowa mająca na celu rozwój technologii jądrowych. 1 stycznia 2005 r. IFPiLM podpisał z Komisją Europejską kontrakt Asocjacyjny, na mocy którego powstała polska Asocjacja Euratom, skupiająca krajowe ośrodki naukowe zajmujące się badaniami fizyki plazmy i technologii termojądrowej. Koordynatorem Asocjacji Euratom-IFPiLM zostaje prof. nadzw. Andrzej Gałkowski, obecny dyrektor instytutu. Przystąpienie polskich instytucji naukowych do Euratomu umożliwiło naukowcom dostęp do europejskich urządzeń termojądrowych, jak również do funduszy wspierających tego typu badania. Realizowane projekty dotyczą głównie fuzji jądrowej z magnetycznym utrzymaniem plazmy, a więc plazmy w układach typu tokamak czy stellarator, niemniej jednak niewielki procent finansowania skierowany jest także na tematykę fuzji z inercyjnym utrzymaniem plazmy. Wejście Polski do Euratomu umożliwiło jednocześnie uczestnictwo IFPiLM w ogromnym przedsięwzięciu naukowym, jakim jest projekt ITER (www.iter.org), mający na celu wybudowanie największego, jak dotąd na świecie, doświadczalnego reaktora termojądrowego.

Od 2007 r. w IFPiLM działał również Krajowy Punkt Kontaktowy dla krajowych jednostek naukowych realizujących zadania w ramach Euratomu, jednak ze względu na brak finansowania po koniec roku 2011 punkt ten zakończył swą działalność.

W 2007 r. IFPiLM wchodzi do europejskiego projektu HIPER (<http://www.hiper-laser.org/>), którego celem jest budowa lasera, demonstrującego efektywność fuzji laserowej. Badania realizowane w ramach tego projektu wykonywane są na europejskich systemach laserowych PALS w Czechach, LULI we Francji, czy VULCAN w Anglii.

Warto zauważyć, że w 2010 r. IFPiLM zajął drugie miejsce kategoryzacji MNiSzW zawierającej polskie ośrodki naukowe zajmujące się badaniami w dziedzinie fizyki i astronomii. We wrześniu tego samego roku, dyrektorem IFPiLM zostaje prof. nadzw. Andrzej Gałkowski, który przeprowadza instytut przez nową ustawę reformującą system nauki w Polsce.

2. Struktura organizacyjna Instytutu.

Struktura organizacyjna zmieniała się przez kolejne lata istnienia instytutu, niemniej jednak zawsze można było w niej wyróżnić dwa pioniry: jeden związany z badaniami plazmy wytwarzanej laserami i drugi oddział skupiony wokół urządzenia PF-1000. Podobnie jest i

teraz. Instytut składa się z dwóch oddziałów naukowych: Oddziału Plazmy Wytwarzanej Laserem i Oddziału Plazmy w Polu Magnetycznym.

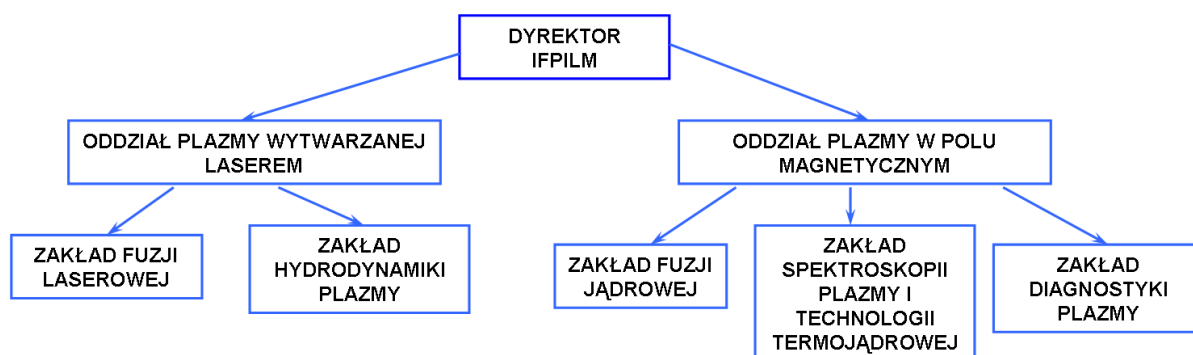
W pierwszym z nich prowadzone są badania oddziaływań impulsów laserowych z różnymi tarczami, głównie pod kątem fuzji laserowej, jak również badań procesów hydrodynamicznych zachodzących w czasie oddziaływania. Z tego powodu w Oddziale tym istnieją dwa zakłady:

- Zakład Fuzji Laserowej
- Zakład Hydrodynamiki Plazmy.

W Oddziale Plazmy w Polu Magnetycznym istnieją trzy zakłady:

- Zakład Fuzji Jądrowej – zajmujący się rozwojem diagnostyk neutronowych, z zastosowaniem metody aktywacyjnej i detektorów gazowych, dla układów z magnetycznym utrzymywaniem gorącej plazmy, jak również teorią i modelowaniem plazmy w zastosowaniu dla przyszłych reaktorów termojądrowych. W ramach tego zakładu istnieje Zespół Akceleratorów Plazmowych, który zajmuje się modelowaniem i badaniami eksperymentalnymi źródeł plazmy, w szczególności silników Halla.
- Zakład Diagnostyki Plazmy – zajmujący się opracowywaniem koncepcji nowych diagnostyk gorącej plazmy. Zespół naukowy tego Zakładu koordynuje prace eksperymentalne przeprowadzane na układzie PF-1000.
- Zakład Spektroskopii Plazmy i Technologii Termojądrowej – zajmujący się badaniami i optymalizacją procesu laserowego czyszczenia elementów wewnętrznych komory tokamaka oraz badaniem pyłu powstającego w tym procesie, jak również spektroskopią plazmy w obszarze widzialnym, ultrafiolecie i rentgenowskim.

Schemat struktury organizacyjnej instytutu przedstawiony jest na rysunku IFPiLM-2.



Rys. IFPiLM-2. Struktura organizacyjna IFPiLM wynikająca z prowadzonych badań naukowych.

Instytut od lat 90-tych ubiegłego wieku uczestniczy w pracach mających na celu badania obiektów latających pod kątem ich odporności na uderzenia pioruna. W związku z tym w IFPiLM w 1994 r. powstało Laboratorium Symulowanych Wyładowań Atmosferycznych, które otrzymało akredytację Polskiego Centrum Badań i Akredytacji.

Warto zaznaczyć, że prowadzone w instytucie badania i przeprowadzane eksperymenty często łączą ze sobą naukowców z różnych zakładów, jak i oddziałów.

3. Działalność naukowa Instytutu.

Działalność naukowa Instytutu skupia się wokół badań teoretycznych i eksperymentalnych fizyki plazmy, ale również badań nad syntezą jądrową. Reakcje termojądrowe, zachodzące w Słońcu i innych gwiazdach, polegają na połączeniu się dwóch lekkich jąder w jedno cięższe. Na Ziemi termojądrowy zapłon przeprowadzany jest w specjalnym reaktorze termojądrowym i polega on na podgrzaniu cząsteczek paliwa do bardzo

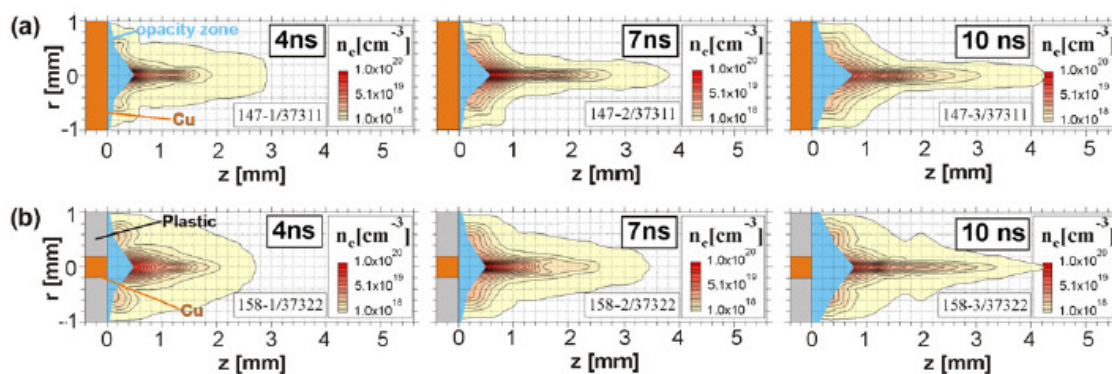
wysokiej temperatury na poziomie milionów stopni Celsjusza. Proponowanym paliwem jest deuter i tryt – produkty, które są ogólnodostępne. Deuter występuje w sposób naturalny w wodzie morskiej, natomiast tryt może być wytwarzany w samym reaktorze w wyniku reakcji litu (będącego elementem konstrukcyjnym reaktora) z neutronami. Na Ziemi trudno jest uzyskać warunki podobne do tych panujących na Słońcu, niemniej jednak można to osiągnąć poprzez dwa rozwiązania:

- zamykając plazmę w pułapce magnetycznej – pułapki tego typu to tokamak i stellarator – fuzja magnetyczna;
- skupiając impulsy laserowe o odpowiednich parametrach na paliwie termojądrowym – fuzja laserowa.

W badaniach na fuzję wykorzystywane były również urządzenia typu z-pinch, a więc i plasma focus, które, mimo że nie mogą bezpośrednio stać się podstawą reaktora termojądrowego (m.in. ze względu na niestabilności plazmy), to umożliwiają prowadzenie bardzo istotnych badań materiałowych i nad zachowaniem się plazmy w polu magnetycznym.

Badania naukowe IFPiLM powiązane są w pewnym stopniu ze strukturą organizacyjną instytutu. Realizowane zadania można podzielić na dwie grupy: badania i zastosowania oddziaływania laserów impulsowych z materią oraz badania gorącej plazmy utrzymywanej i komprymowanej polem magnetycznym.

Zadania realizowane w ramach pierwszej grupy, mają na celu przeprowadzenie badań ultra-intensywnych oddziaływań laser-plazm i laserowej akceleracji materii. W ramach tej tematyki realizowane są projekty objęte programem HiPER, SILMI (Super-Intense Laser-Matter Interactions, European Science Foundation) i innymi programami wspieranymi przez Unię Europejską. Są to zarówno badania eksperymentalne, jak i teoretyczne, których celem jest poprawa parametrów strumieni plazmowych wytwarzanych metodą opracowaną i rozwijaną w IFPiLM. Tego typu badania mają na celu wytworzenie złożonych strumieni plazmowych symulujących obiekty astrofizyczne, ale również służące do badań nad syntezą inercyjną. Przykład generowanych tzw. jetów plazmowych pokazany jest na rys.3. Przeprowadzane eksperymenty mają na celu wytworzenie określonej konfiguracji przestrzennej koncentracji elektronowej w strumieniach plazmy, która przydatna jest dla różnych zastosowań.



Rys. IFPiLM-3. Rozkłady koncentracji elektronowej wyliczone na podstawie zarejestrowanych interferogramów dla tarczy Cu (a) i tarczy plastikowej z cylindryczną wkładką Cu (b). Eksperyment przeprowadzony był na układzie PALS w Czechach

[A. Kasperczuk et al. Plasma Phys. Control. Fusion **53** (2011) 095003].

W ramach projektu HIPER instytut w pierwszej fazie realizacji ma za zadanie analizę warunków dla zainicjowania syntezy za pomocą tzw. szybkiego zapłonu protonowego (rozważany jest również zapłon udarowy). Ponadto zadaniem IFPiLM są także badania

podstawowe, jak również weryfikacja doświadczalna wyników symulacji uzyskanych dla różnych schematów zapłonu.

W instytucie prowadzone są także badania nad zastosowaniem plazmy wytwarzanej laserem do implantacji jonów w celu uzyskiwania nowoczesnych materiałów półprzewodnikowych. Tzw. laserowe źródła jonów w ostatnich latach stały się bardzo atrakcyjnym tematem dla implantacji jonów w celu zmiany właściwości elektrycznych i optycznych różnych materiałów.

Zadaniem powiązaniem zarówno z zastosowaniem laserów, jak i badaniami plazmy w polu magnetycznym jest zadanie, mające na celu opracowanie i optymalizację technik laserowych do badania i kontrolowania oddziaływania plazma-ściana w reaktorach termojądrowych. W ramach tego tematu przeprowadzane są eksperymenty, które mają zoptymalizować proces laserowego oczyszczania elementów wewnętrznych komory tokamaka, jak również mają na celu badania zmian powierzchni materiału po oddziaływaniu czy to z laserem, czy ze strumieniami plazmy. Bardzo istotne są w tym przypadku również badania pyłu powstającego podczas tego oddziaływania, który w rzeczywistym reaktorze termojądrowym może być bardzo niebezpieczny.

Kolejną bardzo istotną działalnością IFPiLM jest rozwój i zastosowanie diagnostyk neutronowych, jak i spektroskopowych ze szczególnym naciskiem na diagnostyki promieniowania rentgenowskiego. W przypadku tych pierwszych wykonywane są pomiary aktywacyjne, które następnie służą jako test porównawczy do obliczeń numerycznych związanych z kalibracją neutronową tokamaka JET czy urządzenia PF-1000. W przypadku diagnostyk promieniowania rentgenowskiego IFPiLM (we współpracy z Politechniką Warszawską i Uniwersytetem Warszawskim) od kilku lat specjalizuje się w budowie detektorów gazowych (Gas Electron Multiplier - GEM), które mogą również być zastosowane przy odpowiedniej konfiguracji do pomiarów neutronowych. Obecnie diagnostyka KX1 na tokamaku JET wyposażona jest w tego typu detektor i po kilkuletniej przerwie w pomiarach, po wymianie detektora w kampanii eksperymentalnej w 2012 r. ponownie zaczęła dostarczać istotne wyniki doświadczalne.

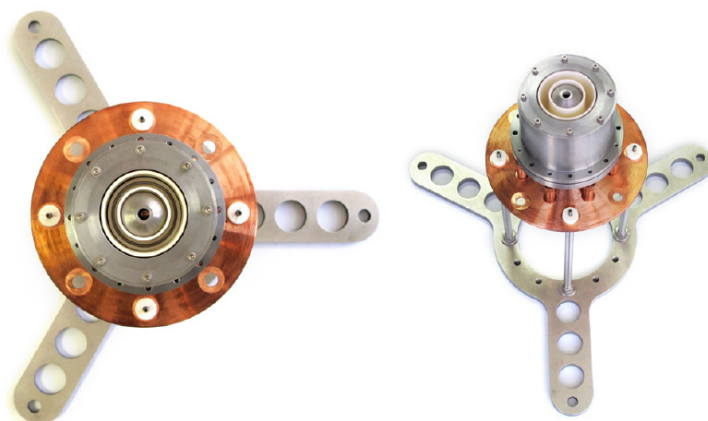
Warto w tym miejscu podkreślić duży udział polskich naukowców w prace badawcze na tokamaku JET. Poza wspomnianymi powyżej, prace te dotyczą również monitorowania zawartości berylu i innych domieszek o niskiej liczbie atomowej Z w plazmie. Jest to bardzo ważna informacja, szczególnie dla przyszłego reaktora ITER, w którym pierwsza ściana wykonana będzie z berylu.

Innym zadaniem instytutu jest projekt i budowa diagnostyk miękkiego promieniowania rentgenowskiego emitowanego z plazmy budowanego obecnie w Greifswald w Niemczech stellaratora Wendelstein 7-X. Jedną z diagnostyk będzie diagnostyka wykorzystująca analizę amplitudową impulsów z chłodzonego detektora półprzewodnikowego pracującego w reżimie zliczania kwantów promieniowania X (PHA - z ang. Pulse Height Analysis). Drugą natomiast diagnostykę stanowi układ wielokanałowy z zastosowaniem matryc detektorów półprzewodnikowych (z ang. multi-foil spectrometry - MFS), w którym wykorzystywane są różne filtry krawędziowe, umożliwiające obserwację widma w szerokim zakresie energetycznym. Uruchomienie obu diagnostyk na urządzeniu planowane jest w drugiej połowie 2014 r.

Kolejne duże zadanie badawcze realizowane w IFPiLM skupione jest wokół urządzenia PF-1000. Głównym celem prowadzonych badań jest wyznaczenie zależności całkowitego wyjścia neutronowego od prądu płynącego w warstwie prądowej w trakcie końcowej fazy radialnej kompresji plazmy. Ponadto urządzenie to daje wiele możliwości badań oddziaływań strumieni plazmowych z materiałami pod kątem zarówno fuzji, jak i badań materiałowych.

W instytucie realizowany jest również temat czysto teoretyczny dotyczący teorii i modelowania plazmy w zastosowaniu dla przyszłych reaktorów termojądrowych. Projekt ten realizowany jest w ramach europejskiego programu ITM (Integrated Tokamak Modelling), w ramach którego prowadzone są prace nad modułem rozwiązującym równania transportu opisujące transport cząstek, energii, prędkości toroidalnej oraz prądów w plazmie.

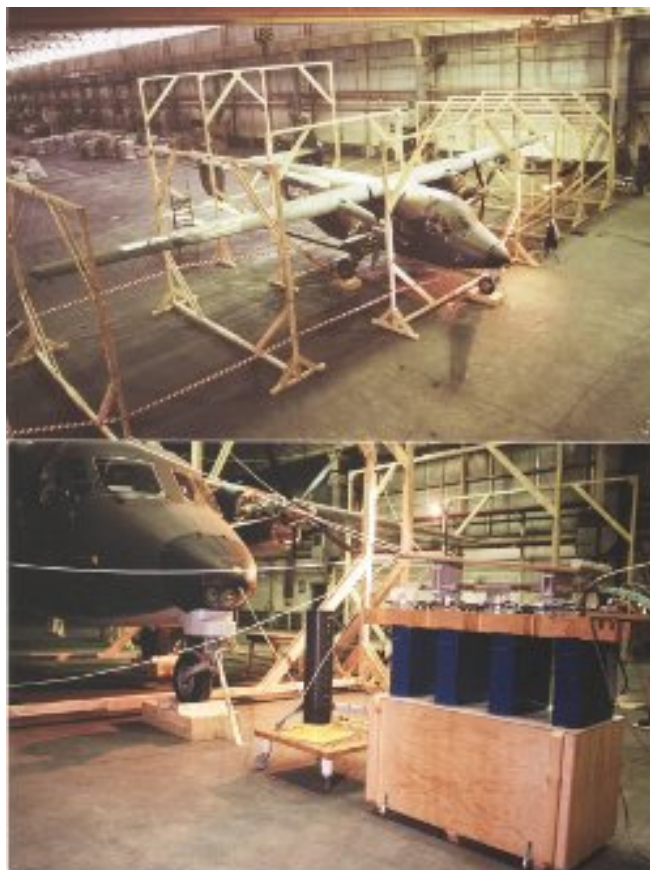
Kolejnym tematem badawczym instytutu są badania nad optymalizacją plazmowego silnika Halla małej mocy wraz z teoretycznym i numerycznym modelowaniem procesów w zachodzących w takim silniku. Projekt ten ma na celu opanowanie technologii elektrycznych napędów kosmicznych, które mają zastosowanie zarówno w technice satelitarnej, jak i w nowoczesnej obróbce materiałowej, w której silnik Halla jako akcelerator plazmowy pełni rolę stacjonarnego źródła strumieni plazmy, służących do modyfikacji powierzchni.



Rys.IFPiLM-4. Zdjęcia kryptonowego silnika Halla wykonanego w IFPiLM ze zdemontowaną katodą [J. Kurzyna et al. IEPC-2011-221, 2011]

W Laboratorium Symulowanych Wyładowań Atmosferycznych Instytutu prowadzone są badania związane z certyfikacją obiektów latających w celu zbadania ich odporności na uderzenia pioruna. Analiza powierzchni badanego obiektu po oddziaływaniu z symulowanym wyładowaniem atmosferycznym niesie ze sobą informacje o spowodowanych zniszczeniach, które z kolei mogą mieć ogromny wpływ na lot badanego obiektu. Prowadzone badania skupiają się na mechanizmach zniszczeń, a więc na podziurawieniu powłok materiału, odparowaniu materiału, ale również na naprężeniach mechanicznych i indukowanych przez sprzężenia elektromagnetyczne w materiale obiektu.

Ponadto Laboratorium wykonuje także kompleksowe stanowiska badawczo-pomiarowe dla przemysłu elektrotechnicznego.



Rys. IFPiLM-5. Testy piorunowe samolotu Sky-Truck [www.ifpilm.pl]

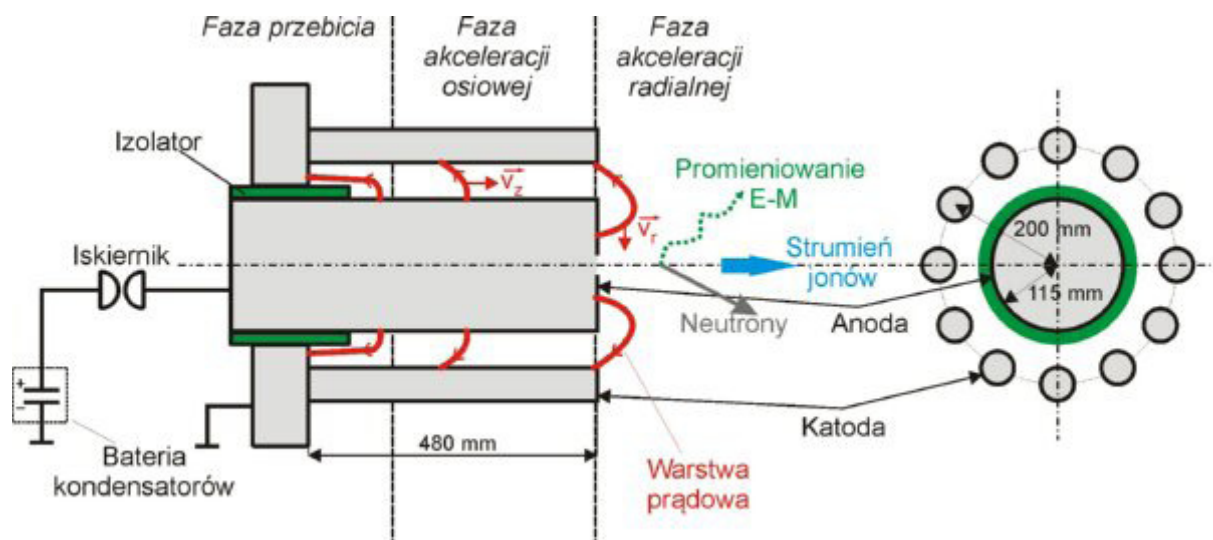
O jakości prowadzonych w IFPiLM badań świadczy przynależność tego instytutu do wieloletnich programów naukowych, zarówno europejskich, jak i krajowych. Projekty realizowane są dzięki finansowaniu badań ze środków krajowych, głównie przez MNiSzW, ale również ze środków zagranicznych (Euratom). Projekty realizowane są na podstawie kontraktów na wykonanie określonych badań podpisywanych z międzynarodowymi ośrodkami naukowymi, na podstawie umów o współpracy międzynarodowej podpisywanej na szczeblu rządowym czy też instytutów i uczelni.

Dzięki doświadczeniu i dorobkowi naukowemu zdobytemu na przestrzeni ostatnich 36 lat istnienia instytutu, IFPiLM znalazł się w czołówce krajowych jednostek w dziedzinie badań plazmy, a liderem w dziedzinie badań nad energetyką termojądrową.

4. Aparatura badawcza.

4.1. Urządzenie PF-1000.

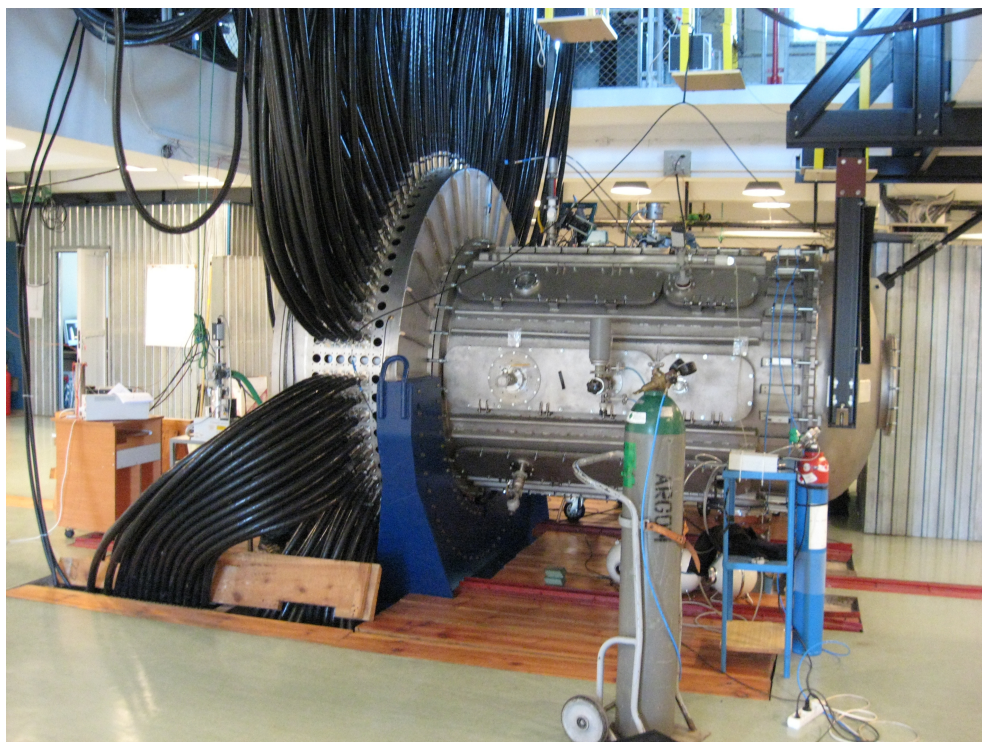
W Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy znajduje się największe w Europie urządzenie typu plasma focus – PF-1000. Układ ten zaliczany jest do tzw. niecylicydrycznych układów typu Z-pinch, które zapoczątkowały światowe badania nad kontrolowaną syntezą termojądrową.



Rys. IFPiLM-6: Schemat urządzenia PF-1000.
 [T.Chodukowski, rozprawa doktorska, Warszawa 2012].

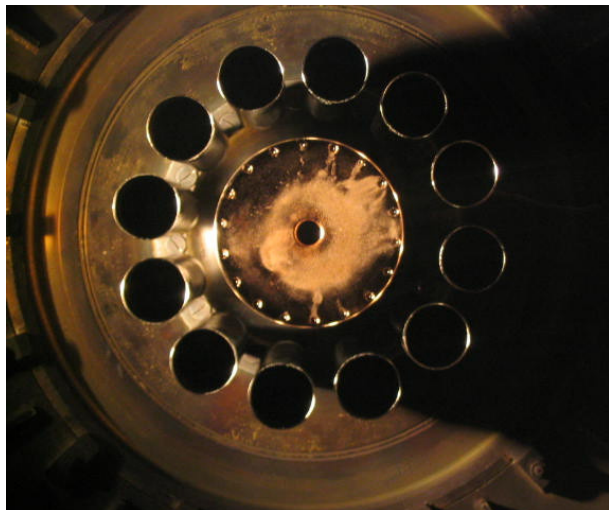
W układzie plasma focus, którego schemat przedstawiony jest na rys.6, silnoprądowe wyładowanie między koncentrycznymi elektrodami wytwarza warstwę zjonizowanego gazu, którym wypełniona jest komora urządzenia, tzw. warstwę prądową, która pod wpływem własnego pola magnetycznego doznaje przyspieszenia wzdłuż osi układu, a następnie po dojściu do końca elektrod doznaje radialnej kompresji. Cechą charakterystyczną tego typu układów jest właśnie fakt, że prąd wyładowania, który płynie przez kolumnę plazmową indukuje pole magnetyczne komprymujące plazmę.

Urządzenia typu plasma-focus dzielą się na dwa typy: Mather'a i Filippova, przy czym o podziale decyduje stosunek długości elektrody centralnej do jej średnicy. W urządzeniach typu Mather'a stosunek ten jest większy od jedności, a dla typu Filippova mniejszy. PF-1000 jest urządzeniem typu Mather'a. Zdjęcie tego urządzenia przedstawione jest na rys. 7.



Rys. IFPiLM-7. Urządzenie Plasma-Focus PF-1000 w IFPiLM

W PF-1000 wyróżnić możemy komorę próżniową, widoczną na zdjęciu (rys.7) o wymiarach 1.4m na 2.5m, która połączona jest z kolektorem generatora prądowego. Wewnątrz znajduje się miedziana elektroda wewnętrzna oraz elektroda zewnętrzna, składająca się z 12 prętów wykonanych ze stali nierdzewnej, co pokazane jest na rys.8. Elektrody rozdziela izolator wykonany z albuminy.



Rys. IFPiLM-8. Wnętrze komory PF-1000 z widocznymi elektrodami wewnętrzną i zewnętrzną.

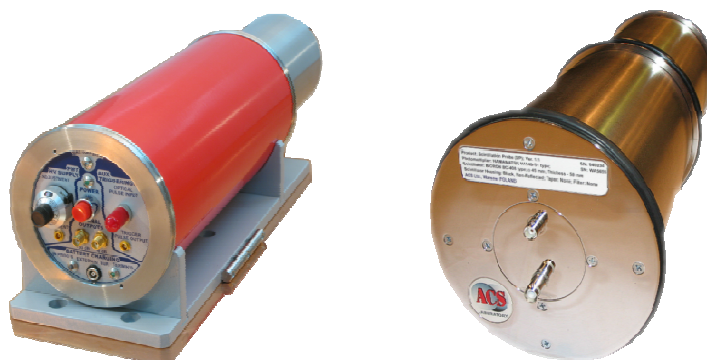
Wyładowanie w urządzeniu PF-1000 zainicjowane zostaje włączeniem w obwód baterii kondensatorów (o łącznej pojemności 1.332mF), co powoduje w komorze próżniowej wypełnionej gazem pod odpowiednim ciśnieniem, powstawanie w obszarze przyizolatorowym nieregularnych lawin jonizacyjnych, prowadzących do powstania kanałów prądowych (tzw. streamerów).

W baterii kondensatorów przy napięciach ładowania 20–40kV można zgromadzić energię elektryczną rzędu 266 – 1064kJ, co pozwala komprimować plazmę polem magnetycznym indukowanym przez prąd o natężeniu 2-5MA.

Kanały prądowe powodują oderwanie od powierzchni izolatora przewodzącej prąd warstwy plazmowej, która powoduje jonizację gazu i przemieszczanie się warstwy w kierunku elektrody zewnętrznej. W momencie dotarcia warstwy do otwartego końca elektrod następuje kompresja radialna, w wyniku której wytworzony zostaje sznur plazmowy (tzw. pinch) o następujących parametrach plazmy: koncentracji elektronowej rzędu $10^{20}/\text{cm}^3$ i temperaturze do 1keV ($1.2 \times 10^7\text{K}$). Po czasie do 200ns od momentu powstania pinchu w wyniku braku równowagi między plazmą a polem magnetycznym, zaczynają rozwijać się w nim niestabilności, które w konsekwencji prowadzą do jego rozpadu.

Badania plazmy o takich parametrach i zjawisk fizycznych towarzyszących formowaniu, kompresji i samemu rozpadowi sznura plazmowego, wymagają zastosowania złożonych systemów diagnostycznych. Do pomiarów prądu stosowane są paski Rogowskiego, ulokowane w komorze próżniowej w pobliżu katody. Do pomiarów pola magnetycznego i pochodnej prądu stosowane są sondy magnetyczne. Ponadto do rejestracji gęstości plazmy wykorzystywany jest 16-kadrowy interferometr Macha-Zehndera, umożliwiający rejestrację pojedynczego kadru w czasie krótszym niż 1 ns z odstępem między kadrkami rzędu 10–20 ns. Należy zaznaczyć, że interferometr został zaprojektowany i wykonany przez zespół pracowników IFPiLM. Ponadto laboratorium plasma focus wyposażone jest w kamery wielokadrowe i kamery smugowe oraz detektory typu pin-diody rejestrujące promieniowanie z zakresu widzialnego i rentgenowskiego. Do pomiarów neutronowych i twardego promieniowania rentgenowskiego wykorzystywane są wyskalowane za pomocą źródła Am-

Be liczniki srebrne umieszczone pod różnymi kątami w stosunku do komory urządzenia, umożliwiające bezwzględny pomiar wydatku neutronowego plazmy w zależności od kąta emisji oraz sondy scyntylacyjne umieszczone w różnych odległościach od plazmy, które z kolei umożliwiają pomiar widma neutronów metodą czasu przelotu (rys.9).

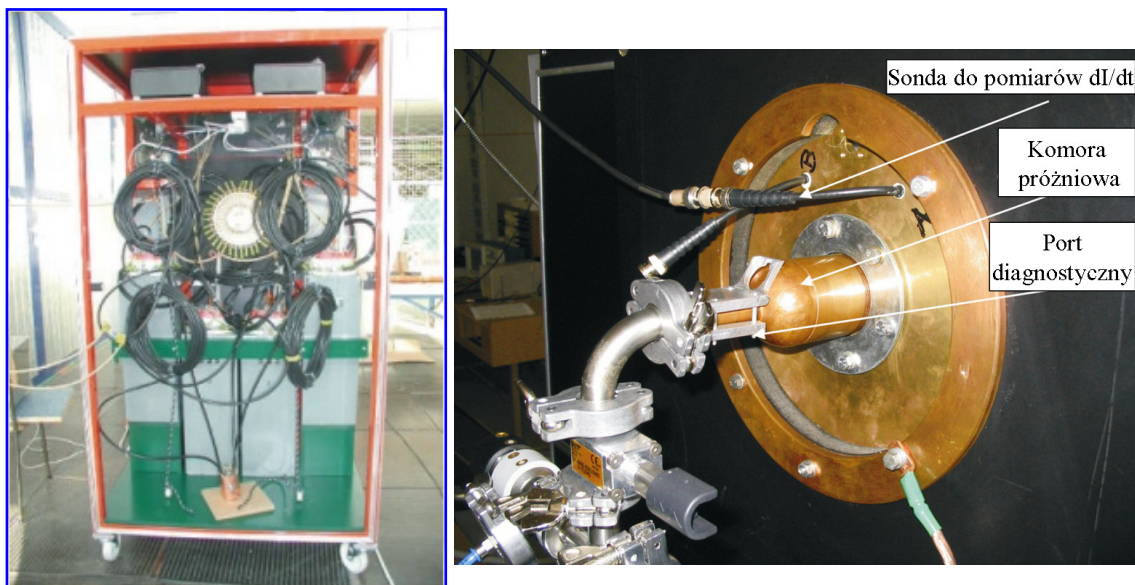


Rys. IFPiLM-9. Scyntylatory do pomiarów neutronowych: MCP-PMT i ultraszybki BC-422Q (BICRON) scyntylator plastikowy (po lewej) oraz klasyczny PMT i szybki BC-408 (BICRON) scyntylator plastikowy (po prawej)

Warto podkreślić, że urządzenie PF-1000 ze względu na swoje parametry techniczne i wyposażenie diagnostyczne jest urządzeniem które pozwala na wykonywanie wielu badań z zakresu plazmy termojądrowej.

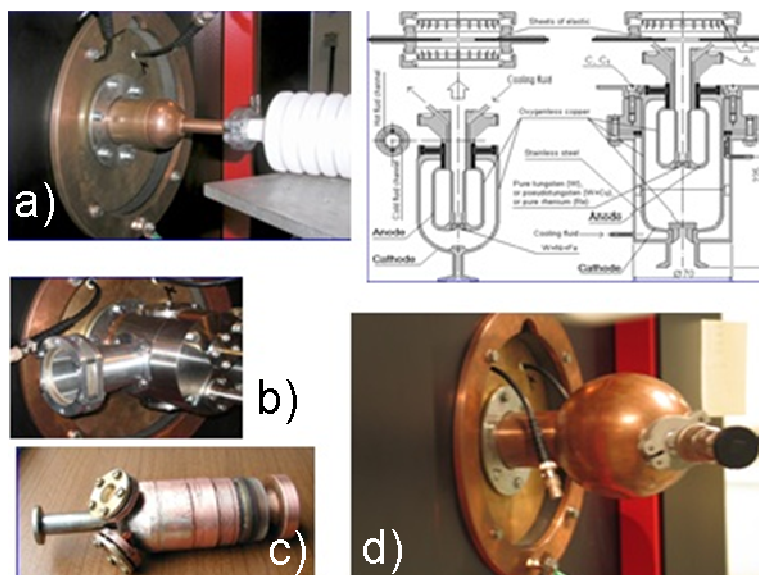
4.2. Urządzenie PF-6

W IFPiLM poza wymienionym wyżej układem znajduje się również mniejszy, mobilny układ typu plasma focus PF-6. Składa się on głównie z czterech kondensatorów typu KMK 30-7 (30 kV, 7 uF, 10 nH, 350 kA), układu inicjującego wyładowanie oraz komory napełnionej odpowiednim gazem roboczym, w której to wyładowanie powstaje. W baterii kondensatorów przy napięciach ładowania 12-20kV można zgromadzić energię elektryczną rzędu 2-7kJ, co pozwala na uzyskanie maksymalnego natężenia prądu komprymującego plazmę ok. 760 kA. Urządzenie to jest wykorzystywane do różnych celów badawczych. W zależności od rodzaju komory (Rys. 10) układ PF-6 może służyć do pomiarów 2.5MeV neutronów generowanych w różnych warunkach eksperymentalnych, jako obiecujące źródło neutronów mogące posłużyć do kalibracji w zastosowaniu do dużych urządzeń fuzyjnych. Jak również do pomiarów neutronów o energii 14.1 MeV z reakcji jąder deuteru i trytu używając do tego odpowiedniej komory próżniowej. W optymalnych warunkach pracy układu uzyskiwane wyjście neutronów o energii 2.5 MeV może sięgać do 10^9 w trakcie pojedynczego wyładowania.



Rys. IFPiLM-10. Mobilne urządzenie PF-6 w IFPiLM z widoczną po prawej stronie komorą próżniową przeznaczoną w tym przypadku do pomiarów neutronowych.

Ze względu na parametry techniczne urządzenia PF-6 oraz możliwość zmiany komory zoptymalizowanej do konkretnego obszaru badań (rys. 11), układ ten może służyć jako źródło twardego promieniowania rentgenowskiego do różnego rodzaju zastosowań, innymi.in. defektoskopii, czyli badań mających na celu wykrycie nieciągłości materiału. Ponadto może być wykorzystywany do napyłania warstw metalicznych oraz implantacji jonów, jak również do badań oddziaływania plazmy z materiałem, co jest niezwykle ważne w obecnie projektowanych nowych urządzeniach termojądrowych.

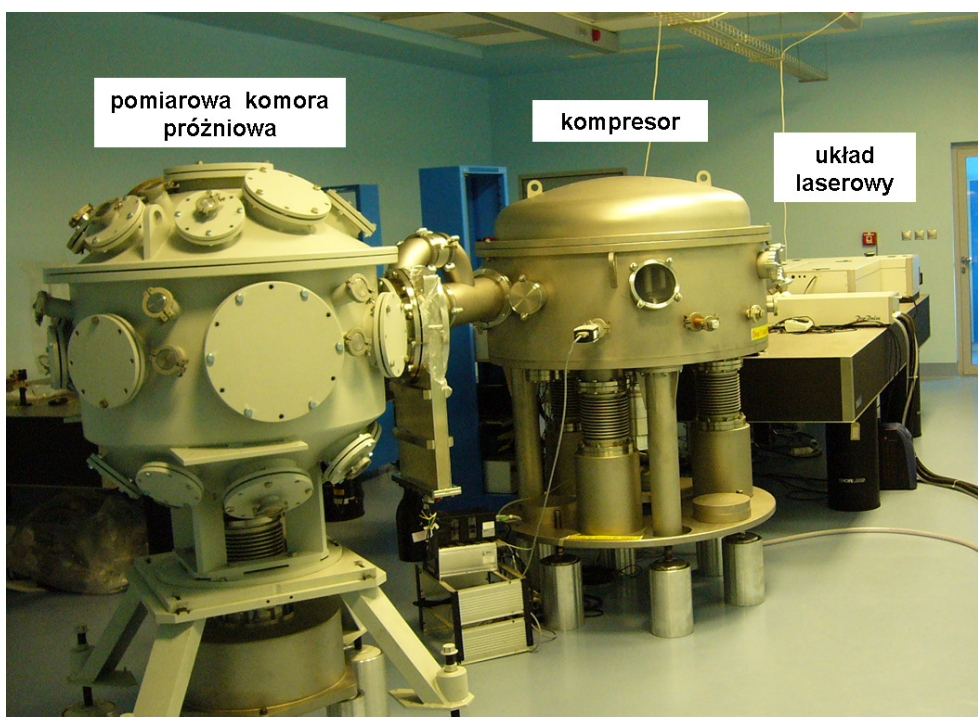
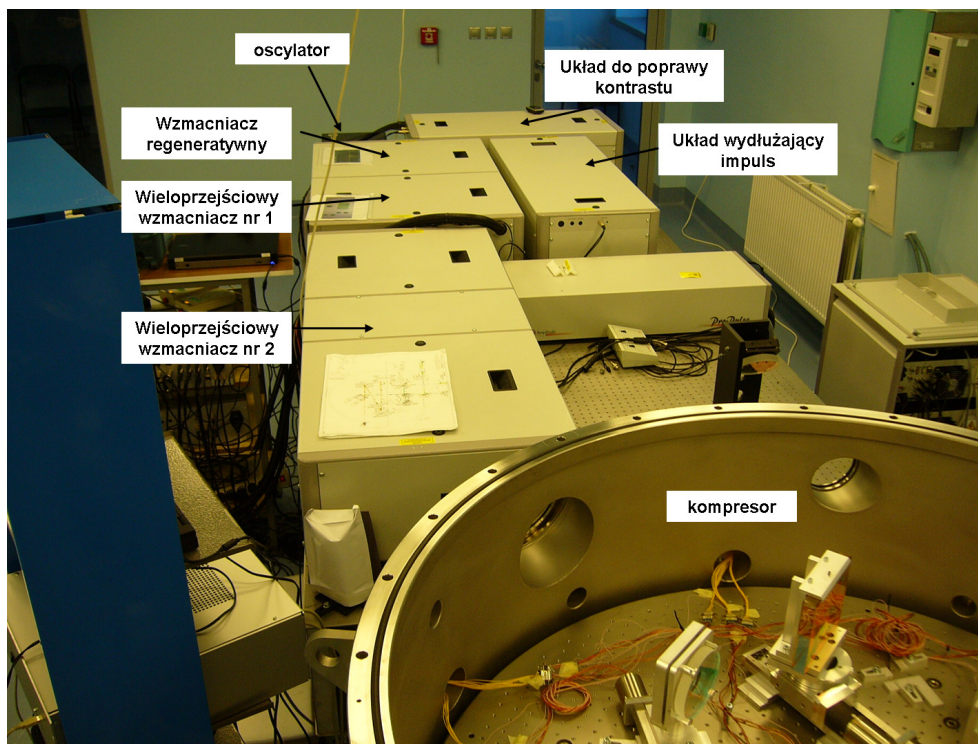


Rys. IFPiLM-11. Komory próżniowe urządzenia PF-6 w IFPiLM odpowiednio do: a) i d) pomiarów neutronowych, b) badań materiałowych, c) pomiarów rentgenowskich.

Do pomiarów neutronowych i twardego promieniowania rentgenowskiego wykorzystywane są liczniki srebrne oraz sondy scyntylacyjne umieszczone w różnych odległościach od plazmy. Do pomiarów prądu zastosowany jest pas Rogowskiego, umieszczony przy komorze próżniowej w pobliżu katody. Z kolei do pomiarów pola magnetycznego i pochodnej prądu stosowane są sondy magnetyczne.

4.3. Laser Tytanowo-Szafirowy o mocy 10 TW.

Innym sztandarowym urządzeniem IFPiLM jest zakupiony w 2010 r. laser Tytanowo-Szafirowy (Amplitude Technologies) o 40-sto femtosekundowym (40×10^{-15} s) impulsie o energii ponad 0.5J, który daje możliwości uzyskania 10TW mocy. Schemat układu laserowego przedstawiony jest na Rys. IFPiLM-10. 20-sto femtosekundowy impuls laserowy z oscylatora po przejściu przez układ do poprawy kontrastu (tzw. booster) zostaje 'wydłużony' przez „strecher” do 300ps (300×10^{-12} s). Następnie impuls o energii poniżej 1mJ skierowany zostaje do wzmacniacza degeneratywnego, gdzie na wyjściu uzyskuje energię ok. 1mJ. Następnie impuls wzmacniany jest przez dwa wzmacniacze wieloprzejęciowe, na wyjściu których uzyskujemy impuls o energii 800 mJ i czasie trwania 300ps (po pierwszym wzmacniaczu wieloprzejęciowym impuls ma energię 25-30mJ i czas trwania 300ps). Taki impuls ulega następnie kompresji i na wyjściu z kompresora otrzymujemy impuls 40-sto femtosekundowy o energii 600mJ. Poszczególne elementy systemu laserowego wraz z komorą eksperymentalną przestawione są na rys. 12.



Rys. IFPiLM-12. Układ lasera femtosekundowego wielkiej mocy zlokalizowanego w laboratorium Oddziału Plazmy Wytwarzanej Laserem w IFPiLM

Ekspertyzy przeprowadzane z wykorzystaniem tego urządzenia mają na celu badania nad fuzją laserową oraz badania oddziaływań laser-materia. Diagnostyki stosowane w tego typu badaniach są bardzo złożone i składają się ze spektrometru rentgenowskiego na wygiętym kryształach, szybkiej kamery rentgenowskiej, interferometru wielo-kadrowego oraz dwóch masowych spektrometrów jonowych. Cała aparatura pomiarowa wraz z diagnostykami obecnie jest budowana i kompletowana.

4.4. Inne układy laserowe i diagnostyki spektralne.

Innymi laserami, jakie znajdują się w instytucie są:

- laser Nd:YAG (EKSPLA) o energii w impulsie 0.5J dla 1063nm i czasie trwania 3.5ns. Laser ten może pracować z częstością repetycji do 10 Hz (rys.13). Istnieje również możliwość pracy lasera Nd:YAG na drugiej i trzeciej harmonicznej z odpowiednio niższą energią (0.3J@532nm i 0.1J@355nm)
- laser światłowodowy Nd:glass (IPG Photonics) o energii w impulsie 1mJ dla 1065nm i czasie trwania impulsu 100-150ns (rys.13). Laser ten jest laserem repetytywnym pracującym z częstotliwością w zakresie od 20 do 100kHz, co umożliwia uzyskiwanie średniej mocy wyjściowej na poziomie 100W.

Oba lasery wykorzystywane są do badań oddziaływania impulsów laserowych z materią i ukierunkowane są na technologiczne badania nad fuzją. Laser Nd:YAG wykorzystywany jest również w eksperymentach nad implantacją jonów. Ponadto laser ten stosowany jest do pomiarów spektroskopowych z zastosowaniem spektroskopii emisyjnej ze wzbudzeniem laserowym (z ang. LIBS - Laser Induced Breakdown Spectroscopy). W metodzie tej stosowany jest spektrometr z siatką typu *echelle* – Me5000, umożliwiający pomiary czasowe w przedziale długości fali od 200 do 970nm z widmową rozdzielczością $\lambda/\Delta\lambda = 4000$.

Laboratorium laserowe wyposażone jest w 3 stanowiska pomiarowe – komory próżniowe, które służą różnym badaniom.



Rys. IFPiLM-13. Spektrometr Me5000 z kamerą iStar (iCCD) wykorzystywany do pomiarów metodą LIBS (po lewej) oraz laser światłowodowy Yb:glass (po prawej).

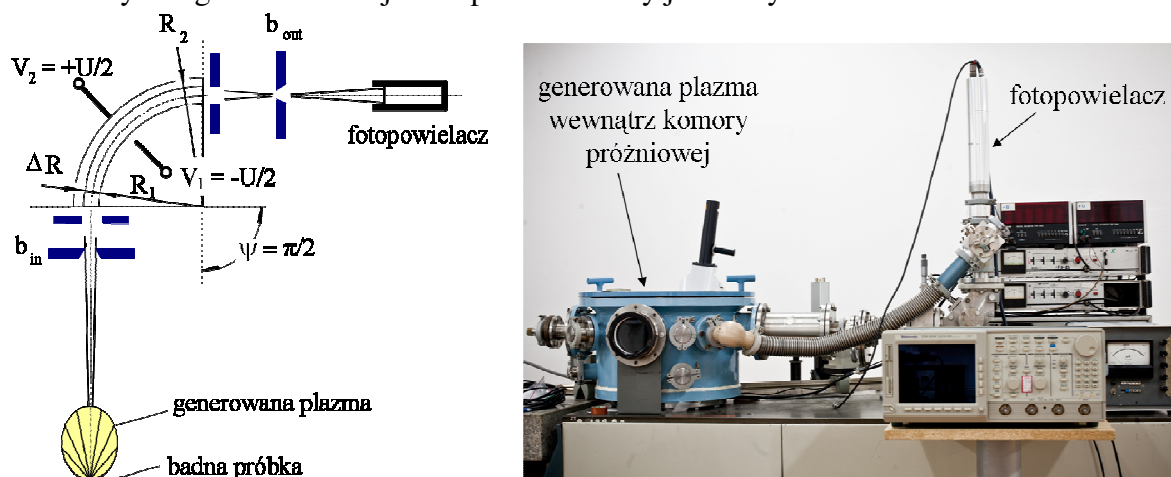
Co do diagnostyk promieniowania rentgenowskiego generowanego z plazmy wytwarzanej laserem, to laboratorium posiada analizator amplitudy impulsów rentgenowskich oraz liczne detektory półprzewodnikowe (Si, Ge, diamentowe) i detektory scyntylicyjne twardego promieniowania rentgenowskiego.

4.5. Diagnostyki jonowe.

Bardzo istotnymi diagnostykami w badaniach plazmy są diagnostyki jonowe. Jedną z takich diagnostyk są kolektory jonów (puszki Faraday'a), które służą do pomiarów prądu jonowego. Odseparowanie elektronów w kolektorach następuje za pomocą statycznego pola elektrostatycznego w obszarze znajdującym się za uziemioną siatką separacyjną, a samym kolektorem na potencjale ujemnym. Średnie energie jonów plazmy można wyznaczyć z sygnału kolektorowego na podstawie pomiaru czasu przelotu. Czas w jakim zachodzą procesy jonizacyjno-rekombinacyjne w plazmie wytwarzanej impulsem laserowym jest na tyle mały w porównaniu z czasem przelotu jonów od miejsca ich powstania do miejsca ich rejestracji, że można założyć punktowy charakter plazmy oraz fakt, że wszystkie jony występujące w plazmie wytworzone zostały jednocześnie. Rozkłady energetyczne poszczególnych jonów

występujących w plazmie można również mierzyć łącząc ze sobą pomiar czasu przelotu z metodą, która umożliwi rozdzielenie jonów o różnym stopniu jonizacji.

W IFPiLM wykorzystywany jest elektrostatyczny analizator energii jonów, który umożliwia określenie składu jonowego badanej plazmy. Głównym jego elementem jest układ analizujący, tzw. deflektor, o kącie odchylenia ψ , który stanowi wycinek dwóch koaksjalnych metalowych cylindrów utrzymywanych na odpowiednich potencjałach. Schemat elektrostatycznego analizatora jonów przedstawiony jest na rys. 14.



Rys. IFPiLM-14. Schemat elektrostatycznego analizatora energii jonów (po lewej) wraz ze zdjęciem układu diagnostycznego.

Warunek przejścia cząstki naładowanej o ładunku ez , masie M_i i prędkości v , po trajektorii o promieniu R_0 (średni promień układu analizującego), tzn. cząstki poruszającej się po powierzchni, na której nie występuje skok potencjału, można wyznaczyć z warunku równowagi sił: odśrodkowej i pola elektrycznego:

$$\frac{E_i}{z} = eR_0 E_r(R_0) = eU \left[2 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right].$$

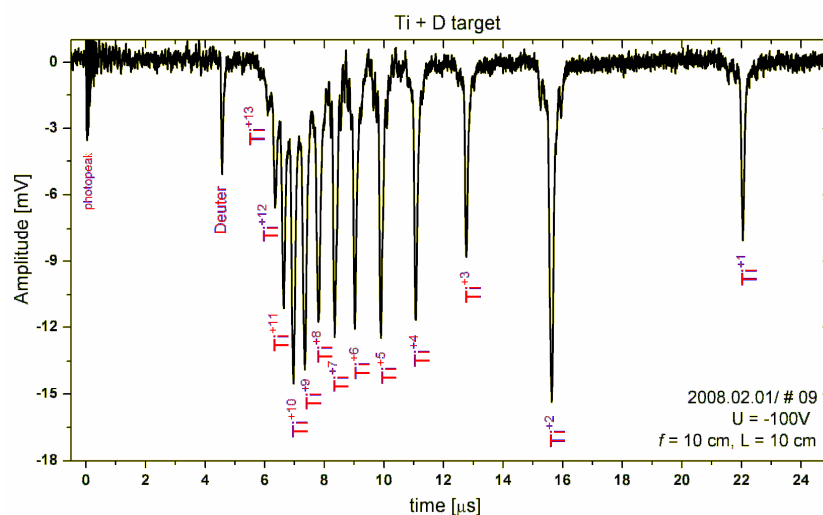
Rozwijając w szereg wyrażenie $2 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$ i uwzględniając tylko pierwszy człon tego rozwinięcia, uzyskujemy warunek przejścia cząstki naładowanej w następującej postaci:

$$E_i/z = \kappa eU,$$

gdzie κ jest tzw. stałą geometryczną analizatora, $E_i = M_i v_i^2/2$ – energią kinetyczną cząstki, z – krotnością jonizacji cząstki, e – ładunkiem elementarnym.

Z powyższego równania wynika, że w przypadku symetrycznej polaryzacji okładek układu analizującego i ustalonej różnicy potencjałów między jego okładkami, przez analizator przelatują tylko cząstki o ściśle określonej wartości E_i/z , stosunku ich energii kinetycznej do ich krotności jonizacji.

Dodatkowo stosując jako detektor cząstek naładowanych otwarty fotopowielacz do rejestracji dodatnio naładowanych cząstek, w zarejestrowanym sygnale zaobserwujemy rozdzielenie się sygnałów w zależności od stosunku masy jonu do jego krotności jonizacji M_i/z . Przykład zarejestrowanego sygnału z elektrostatycznego analizatora jonów dla próbki Tytanowej pokazany jest na rys. 15. W tym przypadku próbka zanieczyszczona była deuterem, stąd w sygnale jonowym „pik” pochodzący właśnie od tego elementu.

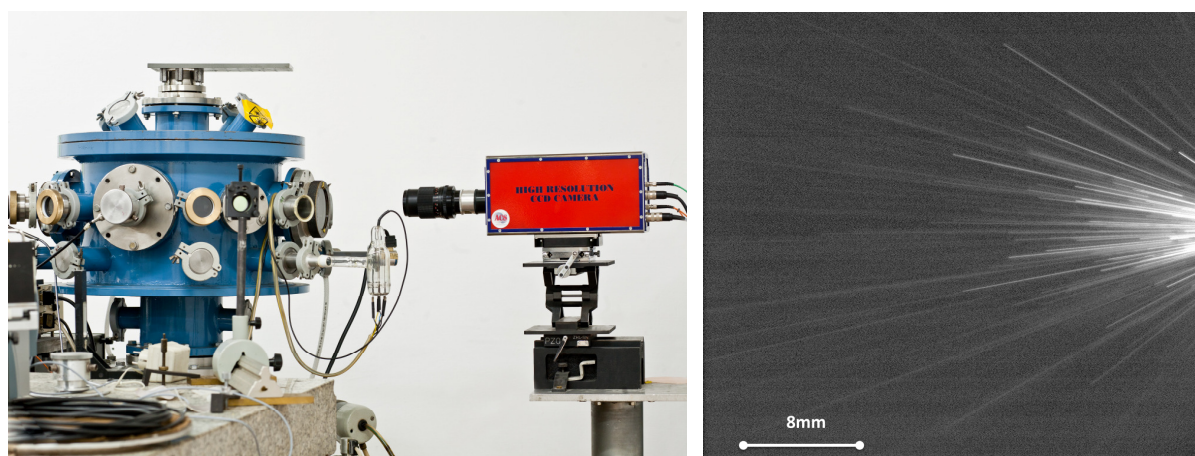


Rys. IFPiLM-15. Przykład zarejestrowanego sygnału dla próbki tytanowej.

Sygnał napięciowy zarówno z analizatora, jak i z kolektora jonów mierzony jest za pomocą oscyloskopu. Jednoczesne zastosowanie obu tych diagnostyk daje możliwość zrekonstruowania rozkładów energetycznych jonów poszczególnych krotności jonizacji. Ponadto instytut posiada detektory śladowe szybkich jonów.

4.6. Analiza powierzchni badanych próbek i pyłu powstającego w wyniku oddziaływania z impulsami laserowymi.

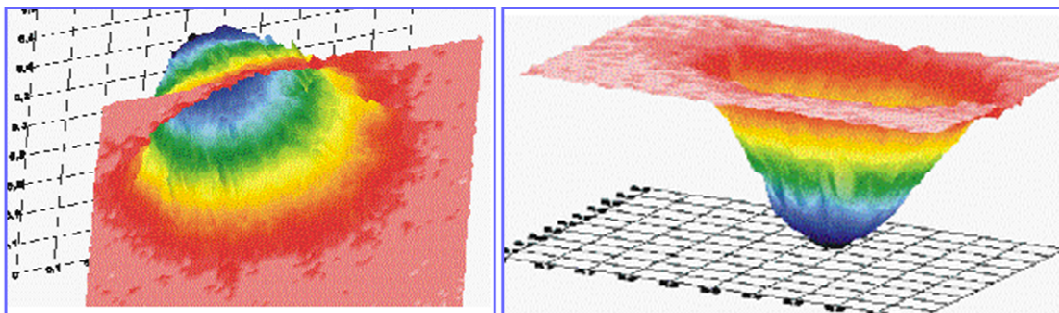
W pomiarach oddziaływania impulsów laserowych z różnymi tarczami, szczególnie dedykowanych usuwaniu kodepozytu z elementów wewnętrznych urządzeń termojądrowych, istotne są badania pyłu powstającego w trakcie depozycji mocy na ścianie reaktora. W tego typu eksperymentach w IFPiLM stosowana jest wysokiej rozdzielczości kamera CCD umożliwiającą rejestrację mikrocząstek, a następnie określanie prędkości ich rozlotu. Zdjęcie układu eksperymentalnego z kamerą CCD wraz z przykładowym zdjęciem zaobserwowanych cząstek przedstawione jest na rys.16.



Rys. IFPiLM-16. Stanowisko eksperymentalne do badań pyłów powstających w wyniku oddziaływania impulsów laserowych z tarczami z widoczną po prawej stronie kamerą CCD wraz z przykładowym zdjęciem zarejestrowanym w eksperymencie z tarczą z tokamka TEXTOR.

Do pomiarów temperatury powierzchni badanych próbek stosowane są pirometry, które wyznaczają temperaturę w oparciu o ilość energii promieniowania podczerwonego

emitowanego przez dany obiekt. Stosowane urządzenia umożliwiają precyzyjny pomiar temperatury od (-40) do 1600°C.



Rys. IFPiLM-17. Przykład zmierzonych profilometrem kraterów po oddziaływaniu lasera Nd:YAG z tarczą grafitową dla dwóch gęstości mocy: $P = 9.4 \text{ MW/cm}^2$, gdzie głębokość krateru wyniosła 240 μm (po lewej) oraz $P = 8.3 \text{ MW/cm}^2$, gdzie głębokość krateru wyniosła 210 μm (po prawej).

W przypadku badań materiałowych w instytucie korzysta się z kilku mikroskopów optycznych oraz profilometru, który umożliwia pomiary 3D z rozdzielczością 25nm. Dokładny pomiar krateru powstałego wskutek oddziaływania impulsu laserowego z materiałem niesie ze sobą wiele informacji, na których podstawie wyznaczyć można m.in. gęstość mocy lasera czy ilość odparowanych atomów materiału. Przykład zmierzonych za pomocą profilometru kraterów pokazany jest na rys. 17.

Warto podkreślić, że sprzęt i aparatura naukowa może być po wcześniejszym zaplanowaniu eksperymentu, wykorzystywana przez wszystkich pracowników naukowych instytutu.

5. Przykłady realizowanych prac badawczych.

Wymienione powyżej układy i aparatura badawcza służą IFPiLM do realizacji licznych projektów naukowych zarówno krajowych, jak i międzynarodowych. Eksperymenty przeprowadzane na urządzeniu PF-1000 realizowane są głównie w ramach ICDMP (Międzynarodowe Centrum Gęstej Plazmy Namagnetyzowanej) i mają na celu badania gorącej plazmy wytwarzanej w układzie PF-1000. Ostatnie sesje eksperymentalne miały na celu pomiar pola magnetycznego w pinchu oraz pomiary neutronowe dla różnych odległości sond neutronowych w kierunku 0^0 , 90^0 i 180^0 w stosunku do osi z układu. Pomiary te skorelowane były z interferometrycznymi pomiarami gęstości plazmy. Ponadto przeprowadzono pomiary neutronowe za pomocą licznika berylowego skonstruowanego w IFPiLM oraz badano rozkład kątowny strumienia neutronów wokół komory za pomocą aktywacji próbek indowych.

Istniejący w instytucie Zespół Akceleratorów Plazmowych zajmuje się teoretycznym oraz eksperymentalnym badaniem źródeł plazmy, które polegają na modelowaniu komputerowym i studiach teoretycznych oraz badaniach eksperymentalnych źródeł plazmy w szczególności silników Halla. Silniki te są jedną z odmian elektrycznych napędów kosmicznych, w których wykorzystywany jest zazwyczaj ksenon. W IFPiLM zbudowany został napęd plazmowy typu Halla, który zaprojektowany został do pracy z kryptonem, który jest gazem nawet dziesięciokrotnie tańszym od ksenonu. Testy takiego silnika przeprowadzane będą w komorze próżniowej urządzenia PF-1000.

IFPiLM od 2005 r. tworzy Asocjacje EURATOM i bierze czynny udział w długofalowych projektach koordynowanych przez tę organizację. Prowadzone w instytucie

prace badawcze dotyczące syntezy termojądrowej, a w szczególności jej aspektu energetycznego, są skorelowane z programem Unii Europejskiej w tym zakresie.

Jednym z takich zadań jest badanie i optymalizacja procesu laserowego czyszczenia elementów wewnętrznych komory tokamaka oraz badanie pyłu powstającego w tym procesie. Na powierzchni ścian wewnętrznych komory tokamaka gromadzi się warstwa tzw. kodepozytu, która zawiera materiał odparowany z elementów wewnętrznych komory w trakcie wyładowania. W skład tej warstwy oprócz podstawowego materiału ścianek komory, wchodzi również inne zanieczyszczenia materiałami pochodzącymi z elementów układów diagnostycznych, anten dostarczających dodatkowe grzanie plazmy i z innych urządzeń. Warstwa kodepozytu zawiera też zabsorbowane paliwo termojądrowe: deuter lub mieszaninę deuteru i trytu. Te izotopy wodoru nie mogą się gromadzić w warstwie kodepozytu nieograniczenie, gdyż stanowią zagrożenie dla bezpieczeństwa pracy układu termojądrowego i muszą być systematycznie usuwane. Układy eksperymentalne wykorzystujące laser Nd:YAG i laser światłowodowy służą w IFPiLM do prac badawczych dotyczących usuwania kodepozytu z komponentów tokamaka znajdujących się w komorze próżniowej.

Stosowaną metodą jest w tym przypadku laserowa ablacja kodepozytów. Liczne eksperymenty pokazały także możliwość symulacji w laboratorium tworzenia się pyłu w komorze tokamaka za pomocą ablacji stymulowanej promieniowaniem laserowym.

W przypadku zastosowania plazmy laserowej do implantacji jonów w instytucie prowadzone są badania nad optymalizacją wykorzystywanego układu elektrostatycznego, który umożliwi implantacje danego rodzaju jonów na konkretnej głębokości w określonym materiale.

W IFPiLM rozwijany jest także nowy rodzaj laserowego akceleratora gęstej materii, tzw. akcelerator LICPA. W zaproponowanej metodzie umieszczona w komorze cienka tarcza (mikropocisk) oświetlana intensywną wiązką lasera przez otwór w ścianie komory przyspieszana jest (do dużych prędkości $> 100\text{km/s}$) pod wpływem ciśnienia wytwarzanego i akumulowanego w komorze przez gorącą plazmę ekspandującą z powierzchni tarczy lub pod wpływem ciśnienia fotonów impulsu laserowego uwięzionego w komorze. W zależności od natężenia i długości impulsu laserowego akcelerator LICPA może pracować w reżimie hydrodynamicznym, w którym dominuje ciśnienie hydrodynamiczne plazmy, w reżimie fotonowym, gdzie dominuje ciśnienie fotonów lub w reżimie mieszanym.

Instytut prowadzi również liczne eksperymenty w innych jednostkach naukowych. W eksperymentach prowadzonych na układzie laserowym PALS w Czechach testowane są nowe koncepcje generacji strumieni plazmowych za pomocą tarcz o różnej geometrii i konstrukcji (pierścieniowej, kanałowej oraz stożkowej z komorą ciśnieniową), które wykonane są z różnych materiałów. Ponadto eksperymenty przeprowadzane na tym układzie mają za zadanie zbadanie wpływu preplazmy wytwarzanej na powierzchni tarczy dodatkowym impulsem laserowym, który jest odpowiednikiem nanosekundowego impulsu komprymującego paliwo DT, na parametry fali uderzeniowej generowanej w tarczy sub-nanosekundowym impulsem o dużym natężeniu, w warunkach odpowiednich dla udarowego zapłonu fuzji termojądrowej.

Warto tu również wspomnieć o uczestnictwie naukowców z IFPiLM w kampaniach eksperymentalnych na zagranicznych układach termojądrowych, takich jak JET czy ASDEX. Główne zadania realizowane w czasie sesji eksperymentalnych na tokamaku JET związane są z pomiarami neutronowymi bazującymi na technice aktywacyjnej oraz z rejestracją i analizą widm spektralnych, mających na celu wyznaczenie parametrów plazmy.

Plazma generowana w układzie JET, a także w innych tokamakach, zawiera zanieczyszczenia, które powstają na skutek oddziaływania plazmy z otaczającymi ją powierzchniami. Zanieczyszczenia te powodują straty energetyczne plazmy w wyniku wzrostu promieniowania powstałego przez częściowo zjonizowane atomy zanieczyszczeń. Ponadto jony te powodują także rozrzedzenie składników paliwa, co wpływa na zmniejszenie

efektywności procesu syntezy, a nawet może prowadzić do zerwania sznura plazmowego. Jednym z celów prac realizowanych na tokamaku JET, było opracowanie metody, mającej na celu analizę zanieczyszczeń plazmy, która to dodatkowo uwzględniała wpływ transportu cząstek w plazmie i temperatury elektronowej na koncentracje tych zanieczyszczeń, a także ich wkład do efektywnego ładunku jonów oraz ich wpływ na rozrzedzenie plazmy.

Jak to już zostało wspomniane wcześniej, w IFPiLM rozwijane są również badania teoretyczne i modelowanie numeryczne zjawisk towarzyszących wyładowaniom plazmowym zarówno w tokamakach, jak i w urządzeniu PF-1000.

6. Asocjacja „Euratom” i rola w niej IFPiLM.

Przystąpienie do Programu Ramowego Wspólnoty Euratom w dziedzinie fuzji nastąpiło w 2005 r. przez podpisanie ze Wspólnotą Euratom reprezentowaną przez Komisję Europejską Kontraktu Asocjacyjnego z IFPiLM, który został upoważniony przez ministra nauki i szkolnictwa wyższego do koordynowania prac realizowanych w ramach programu Euratom – Fusion. Przystąpienie Polski do Euratomu dało ogromne możliwości realizowania prac badawczych na europejskich urządzeniach termojądrowych typu tokamak czy stellarator, których nie było i nie ma w naszym kraju. Ponadto członkostwo we Wspólnocie dało nowe możliwości pozyskiwania funduszy wspierające badania nad fuzją jądrową. Podpisany przez IFPiLM Kontrakt Asocjacyjny uzupełniony został porozumieniem z EFDA¹, porozumieniem dotyczącym badań na tokamaku JET oraz porozumieniem w sprawie wymiany osobowej.

Obecnie (dane z sierpnia 2012 r.) w skład polskiej Asocjacji Euratom-IFPiLM wchodzi 13 jednostek naukowych z całego kraju:

1. Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy
2. Narodowe Centrum Badań Jądrowych
3. Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej
4. Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego PAN
5. Instytut Fizyki Uniwersytetu Opolskiego
6. Instytut Fizyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
7. Akademia Morska w Szczecinie
8. Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej
9. Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych im. Włodzimierza Trzebiatowskiego PAN
10. Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechniki Wrocławskiej
11. Wydział Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej
12. Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe
13. Instytut Socjologii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika

Działalność Asocjacji w kraju nadzoruje koordynator Asocjacji (do końca 2011r. prof. A. Gałkowski, od 2012r. prof. R. Zagórski), z kolei z zewnątrz działania Asocjacji nadzorowane są przez tzw. Komitet Kierujący, który zbiera się raz na rok, aby podsumować zrealizowane zadania badawcze i przedyskutować plany na przyszłość. W każdej jednostce naukowej wchodzącej w skład Asocjacji wyznaczona jest osoba kontaktowa do współpracy z koordynatorem Asocjacji-IFPiLM.

Wszelkie umowy Euratomowe zawierane są przez Asocjację-IFPiLM, która jest dysponentem środków finansowych przekazywanych przez Komisję Europejską na prace związane z projektami przez jednostki Asocjacji. W przypadku projektów podstawowych jest

¹ EFDA (European Fusion Development Agreement) – organizacja koordynująca program fuzji jądrowej w Europie, nie posiadająca osobowości prawnej, która korzysta z osobowości prawnej Komisji Europejskiej.

to 20% budżetu zadania lub 40% w przypadku projektów priorytetowych. O pozostałe środki instytucje indywidualnie występują do MNiSzW. Warto tu zaznaczyć, że Komisja Europejska w całości finansuje wizyty naukowców z Polski w ośrodkach Euratomu, o ile wizyta trwa ponad 4 tygodnie. W przypadku krótkich wyjazdów, Komisja pokrywa tylko koszty pobytu naukowców.

W 2007 r. Komisja Europejska powołała organizację F4E (Fusion for Energy), która posiada osobowość prawną, i której celem jest zarządzanie w Europie wkładem do światowego projektu ITER. Członkami tej organizacji są kraje Wspólnoty Euratom, a więc i Polska, reprezentowana przez Asocjację Euratom-IFPiLM, jednak wszelkie kontrakty F4E zawierane są bezpośrednio z wykonawcami.

Warto dodać, że polska Asocjacja bierze udział w europejskim programie edukacyjnym Fusenet, który ma na celu integrację programu edukacji w dziedzinie fizyki i technologii fuzji jądrowej w Europie. Instytut wraz z Asocjacją Euratom są reprezentantami polskich jednostek pracujących w dziedzinie fuzji w tym projekcie. Program Fusenetu ukierunkowany jest na europejską współpracę instytutów i uczelni zajmujących się badaniami nad fuzją, począwszy od szkoły średniej, przez studia licencjackie, magisterskie, a skończywszy na studiach doktoranckich.

7. Współpraca krajowa i międzynarodowa.

IFPiLM od początku swojego istnienia współpracuje z obecnym Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku (dawne IPJ). Współpraca odbywa się tu na wielu płaszczyznach i dotyczy wielu tematów badań. Głównymi są badania na układzie PF-1000 zlokalizowanym w IFPiLM oraz badania na układach PF-360 i RPI-IBIS zlokalizowanych w Świerku. Realizowane prace dotyczą badań plazmy wytwarzanej w tych urządzeniach w różnych warunkach eksperymentalnych oraz skupiają się na zastosowaniu strumieni plazmowych generowanych w tych urządzeniach do badań oddziaływań plazma-ściana.

Poza tym urządzenie PF-1000 wykorzystywane jest przez inne ośrodki zarówno krajowe jak i zagraniczne, wchodzące w skład ICDMP (Międzynarodowe Centrum Gęstej Plazmy Namagnetyzowanej):

- Politechnika Praska, Czechy
- Instytut Fizyki Plazmy Czeskiej Akademii Nauk w Pradze,
- Instytut Metalurgii RAN im. Baikova, Moskwa
- Uniwersytet Sofijski, Bułgaria
- P.N. Lebedev Physical Institute, Moskwa
- Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków
- Nanyang Technological University Singapur
- Uniwersytet w Talinie, Estonia
- RNC Krchatov Institute, Moscow, Russia
- Instytut Fizyki Rosyjskiej Akademii Nauk w Troicku

Wiele projektów realizowanych w ramach Euratomu wykonywanych jest również we współpracy z ośrodkami krajowymi, wchodzącymi w skład Asocjacji Euratom-IFPiLM. W przypadku współpracy z jednostkami zagranicznymi należy wymienić:

- Instytut Fizyki Plazmy im. Maxa Plancka w Garching i Greifswald w Niemczech – współpraca dotyczy badań z dziedziny fuzji magnetycznej, głównie projektów EFDA, ale również dotyczy projektu i wykonania różnych diagnostyk dla stellaratora W7-X
- EFDA JET (Joint European Torus) w Culham koło Oxfordu w Anglii – współpraca dotyczy uczestnictwa polskich naukowców w kampaniach eksperymentalnych na

tokamaku JET oraz rozwoju diagnostyk neutronowych i promieniowania rentgenowskiego (metoda aktywacyjna i detektory gazowe, prace w ramach EFDA)

- PALS Research Center Czeskiej Akademii Nauk w Pradze – współpraca dotyczy uczestnictwa w eksperymentach z wykorzystaniem kilodżulowego lasera PALS w ramach projektów HIPER i LaserLab.
- Instytut Fizyki Plazmy w Jülich w Niemczech – współpraca dotyczy realizacji projektów EFDA oraz badań materiałowych
- Instytut Fizyki Plazmy ENEA we Frascati w Włoszech – współpraca dotyczy realizacji projektów EFDA dotyczących badań oddziaływania plazma-ściana, pomiarów neutronowych oraz modelowania plazmy.
- Królewski Instytut Technologiczny w Sztokholmie w Szwecji – współpraca dotyczy badań materiałowych w ramach projektów EFDA
- Uniwersytet w Szeged na Węgrzech – współpraca dotyczy badań detektorów półprzewodnikowych w szczególności diamentowych i krzemowych.
- Rutherford Appleton Laboratory, Didcot, Wielka Brytania – współpraca dotyczy badań plazmy wytwarzanej laserami w ramach projektu HIPER
- i inne (szczegóły można znaleźć na stronie instytutu www.ifpilm.pl)

Warto podkreślić bardzo wszechstronną współpracę międzynarodową, która owocuje wieloma publikacjami w renomowanych czasopismach o wysokim *impact factor*, jak również licznych prezentacjach konferencyjnych. Uczni z IFPiLM często zapraszani są na międzynarodowe konferencje w celu wygłoszenia wykładu i zaprezentowania najnowszych wyników.

8. Możliwości pracy/współpracy oferowane przez Instytut.

Zgodnie z Ustawą o instytutach badawczych z dn. 30 kwietnia 2010 r. (Dz.U. 96, poz. 618) § 43 p.7 „Zatrudnienie pracownika naukowego jest poprzedzone konkursem. Kryteria i tryb przeprowadzania i ogłaszania konkursu określa statut instytutu”. Od kandydata oczekuje się predyspozycji do prowadzenia badań eksperymentalnych w zakresie fizyki plazmy, w przypadku osób zajmujących się modelowaniem, oczekuje się znajomości podstaw fizyki klasycznej. Kandydat powinien wykazywać się też gotowością do badań w różnych ośrodkach zagranicznych, o ile będzie to celowe.

Ciekawym sposobem zapoznania się z pracą w IFPiLM na pewno są praktyki studenckie, które instytut prowadzi od lat. Zainteresowane osoby mogą skontaktować się z sekretariatem naukowym instytutu (Kierownik Sekretariatu Naukowego - Paweł Nadrowski pawel.nadrowski@ifpilm.pl), bądź też bezpośrednio z osobą, u której zainteresowane są odbyć praktyki.

Pracownicy naukowcy IFPiLM mogą być opiekunami prac inżynierskich, magisterskich lub doktorskich. Tematy i opis takich prac zgłaszane są do dziekanatu Wydziału Fizyki PW, gdzie można zapoznać się z ich treścią.

Jeśli chodzi o współpracę, pracownicy IFPiLM są gotowi do dyskusji i otwarcia na propozycje wspólnych eksperymentów.

Studentów zachęcamy również do odwiedzania instytutu podczas Festiwalu Nauki, który odbywa się co roku w Warszawie we wrześniu. Można wtedy wysłuchać ciekawych wykładów i zwiedzić laboratoria, a przy okazji porozmawiać z pracownikami instytutu.

Zachęcamy również do odwiedzenia poniższych stron internetowych lub do bezpośredniego kontaktu z naukowcami z IFPiLM:

www.ifpilm.pl

<http://www.energetykatermojadrowa.pl/>

<http://www.efda.org/>

<http://www.fusenet.eu/>

www.hiper-laser.org/

www.iter.org/

www.iter.org/