

SPIS TREŚCI / CONTENT

• Wstęp Introduction	A. Gałkowski	3
• 35 lat historii Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy 35 years history of the Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion	J. Wołowski	9
• Asocjacja IFPiLM – EURATOM The Euratom-IPPLM Association	A. Gałkowski	15
• Badania fuzji termojądrowej w układach z magnetycznym utrzymaniem plazmy Thermonuclear fusion research in magnetic confinement plasma devices		23
• Badania diagnostyczne plazmy w tokamaku JET w Culham (W.B.) Diagnostic plasma research in JET tokamak in Culham (GB)	A. Czarnecka, M. Scholz	25
• Modelowanie wyładowań plazmowych w układach tokamak Modelling of plasma discharges in tokamaks	R. Stankiewicz	27
• Diagnostyki miękkiego promieniowania X dla stellaratora W7-X w Greifswald (Niemcy) Soft X-ray diagnostics for W7-X stellarator in Greifswald (Germany)	M. Kubkowska	29
• Badania skutków oddziaływań plazma-ściana z wykorzystaniem technik laserowych Plasma wall interaction research with the help of laser techniques ...	P. Gąsior	31
• Badania plazmy generowanej w układach typu „Plasma Focus” Research in plasma generated in Plasma Focus devices	M. Scholz	33
• Modelowanie zjawisk w układach typu Z-pinch Modelling of Z-pinch discharge	W. Stępniewski	39
• Budowa i zastosowania układów do generacji impulsów prądowych wielkiej mocy. Laboratorium Symulowanych Wyładowań Atmosferycznych Pulsed Power systems: constructing and implementing. Lightning Test Laboratory	L. Karpiński	43
• Badania plazmy wytwarzanej laserem i laserowej fuzji termojądrowej Study of laser-produced plasma and laser fusion		47
• Badania i zastosowania oddziaływań laser-materia przy małych intensywnościach lasera Study and application of laser-matter interaction at low laser intensities	J. Wołowski	49
• Badania generacji strumieni plazmowych oraz napędzania makrocząstek za pomocą lasera PALS w Pradze (Rep. Czeska) Study of laser-driven plasma jets generation and macroparticle acceleration using PALS laser in Prague (Czech Republic)	T. Pisarczyk	51
• Badania w ramach europejskiego projektu HiPER dotyczącego budowy układu dla demonstracji efektywnej fuzji laserowej Study within the European project HiPER to demonstrate laser fusion feasibility	P. Rączka	55
• Edukacja i informacja publiczna Education and Public Information	H. Howaniec	57

WSTĘP

INTRODUCTION

Mam zaszczyt i przyjemność przedstawić folder upamiętniający trzydziestopięciolecie Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy im. Sylwestra Kaliskiego. W roku poprzedzającym Jubileusz zostałem powołany na stanowisko dyrektora Instytutu przejmując to zadanie po swoich poprzednikach: generale profesorze Sylwestrze Kaliskim, docencie Sławomirze Denusie, profesorze Mieczysławie Szustakowskim i bezpośrednio po doktorze Zygmuncie Składanowskim, który kierował Instytutem przez ostatnie 17 lat. Historię tych 35 lat przedstawia w skrócie rozdział pod tytułem 35 lat historii IFPiLM. Historię tę można podzielić na kilka wyraźnie określonych okresów, które, tak się składa, zbieżne są z okresami najnowszej historii Polski – od okresu propagandy sukcesu, poprzez trudne lata osiemdziesiąte i budowanie nowej Rzeczypospolitej na początku dziewięćdziesiątych, aż do przystąpienia Polski do Wspólnot Europejskich, w szczególności do Europejskiej Wspólnoty Energii Atomowej (Euratom), co otworzyło Instytutowi zupełnie nowe możliwości udziału w europejskim programie fuzji jądrowej (EPFJ) będącym modelowym przykładem Europejskiej Przestrzeni Badawczej. Udział w EPFJ oznacza, że największe i najważniejsze na świecie urządzenie fuzji jądrowej, tokamak JET (Joint European Torus) w Culham koło Oksfordu, jest także naszym tokamakiem, a projekt ITER, będący być może jednym z największych wyzwań technologicznych w dziejach ludzkości, jest także naszym projektem. Znaczenie Instytutu w obszarze fizyki plazmy i fuzji jądrowej zostało docenione i uznane przez europejskie gremia zarządzające EPFJ oraz przez Rząd polski, co znalazło wy-



Rys. 1 - Mapa Europy z ośrodkami Asocjacji Euratom
The map of Europe with Euratom Associations
Źródło EFDA

I am pleased and honoured to introduce a brochure to mark the thirty fifth anniversary of the Sylwester Kaliski Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion. In the year prior to the jubilee I became Director of the Institute, following on from my predecessors Gen. Prof. Sylwester Kaliski, Dr. Sławomir Denus, Prof Mieczysław Szustakowski and, most recently, Dr Zygmunt Składanowski, who was in charge of the institute for the past 17 years. The history of those 35 years is briefly presented in the chapter entitled '35 years of the history of the IPPLM'. This history can be divided into a few significant periods, which so happened to coincide with the modern history of Poland – from the prosperity propaganda, through the difficulties of the eighties and the period of building the identity of the New Republic of Poland at the beginning of nineties, to Poland's accession to the European Union and in particular to the European Atomic Energy Community (Euratom). The latter opened a door for entirely new possibilities of participating in the European fusion programme, which is part of the exemplary European Research Area. Our participation in the European fusion programme implies that the world's biggest and most important fusion facility, tokamak JET (Joint European Torus) in Culham, close to Oxford, is also our tokamak and the ITER project which is probably the biggest technological challenge in the history of mankind is our project. The achievements of the institute in the field of plasma physics and fusion are highly regarded by

raz w powierzeniu właśnie nam zadania koordynacji wszystkich prac, jakie na rzecz EPF i projektu ITER są prowadzone w Polsce.

Obecna pozycja IFPiLM została osiągnięta dzięki doświadczeniu i dorobkowi, jakie zostały zgromadzone przez kilkadziesiąt już lat badań nad fuzją jądrową i fizyką plazmy. Kamieniami milowymi na tej drodze są osiągnięcia opisane w rozdziałach poświęconych badaniom plazmy w urządzeniu *plasma focus* oraz plazmy wytwarzanej laserami. IFPiLM był i jest jedynym w Polsce ośrodkiem, w którym badana jest gorąca plazma generowana za pomocą wiązki impulsowego lasera wielkiej mocy. Dokonania w tym zakresie otworzyły nam drogę do udziału w europejskim projekcie HiPER, z którym współpracują także laboratoria laserowe na całym świecie. Celem tego projektu jest zademonstrowanie możliwości szybkiego zapłonu paliwa termojądrowego w układzie laserowym pracującym powtarzalnie. IFPiLM, wspólnie z Instytutem Problemów Jądrowych, jest liderem w zakresie badań plazmy impulsowej w układach typu *plasma focus*. To w IFPiLM jest umiejscowione Międzynarodowe Centrum Gęstej Plazmy Namagnetyzowanej (ICDMP – International Centre for Dense Magnetised Plasmas). Na potrzeby wszystkich tych badań rozwinięte zostały w Instytucie metody diagnostyki plazmy, technologie laserów impulsowych oraz technologie systemów zasilania wielkiej mocy, jakie są niezbędne w badaniach tego typu. Eksperymenty plazmowe dostarczają danych o zjawiskach w plazmie,



Rys. 2 - Mapa Europy z ośrodkami współpracy naukowej w zakresie laserów i fuzji laserowej

The map of Europe presenting cooperation in laser-related research

Źródło IFPiLM

European bodies in Euratom, and by the Polish government, which resulted in entrusting the institute with the coordination of work within the framework of the European fusion programme and ITER project in Poland.

The present high position of the IPPLM was achieved thanks to the experience and achievements of almost half a century of research in fusion and plasma physics. The milestones were the achievements described in the chapters dedicated to plasma research in the plasma focus device and the laser generated plasma. The IPPLM was, and still is, the only Polish scientific institute that does research in hot laser-driven plasma. The achievement in this field made it possible for participation in the European project HiPER (European High Power Laser Energy Research Facility) that focuses the majority of the world's laser research laboratories. The aim of this project is to demonstrate the possibility of the fast ignition of thermonuclear fuel induced by laser beams in repetitive sequences. The IPPLM hosts an International Centre for Dense Magnetised Plasmas (ICDMP). All the above mentioned research has provided the basis for development in the domain of plasma diagnostics, pulsed laser technology and technology of high power supply system. Plasma experiments give information regarding plasma phenomena that has been analysed and compared with computer simulations. The most interesting experimental results are

które są analizowane i konfrontowane z wynikami symulacji komputerowych. Część wyników badań eksperymentalnych jest patentowana i wykorzystywana do wdrożeń technicznych. Najważniejszym osiągnięciem w tym zakresie jest utworzenie w IFPiLM akredytowanego laboratorium symulowanych wyładowań atmosferycznych wykorzystywanego między innymi do komercyjnego testowania helikopterów.

Oprócz efektywnej współpracy IFPiLM z innymi ośrodkami badawczymi w ramach Wspólnoty Euratom, projektu HiPER i ICDMP zespoły z tego Instytutu realizują w ostatnim okresie wiele innych europejskich projektów, takich jak: International Access to the Megajoule plasma focus PF1000 device, LASERLAB-Europe, COST, SEMINANO i inne. Do tego należy doliczyć jeszcze projekty sponsorowane przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej we Wiedniu. Naukowcy z IFPiLM uzyskują z MNiSW finansowanie indywidualnych projektów badawczych,

Wyniki badań uzyskiwane przez pracowników IFPiLM są bardzo wysoko oceniane zarówno przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego jak i przez międzynarodowe środowiska naukowe. Świadczy o tym, między innymi, liczba i jakość artykułów publikowanych w renomowanych czasopismach naukowych, udokumentowana szeroka i efektywna współpraca międzynarodowa, a w efekcie wysoka pozycja IFPiLM w ocenie jednostek badawczych przeprowadzonej ostatnio przez



Rys. 3 - Plazma – dwuznaczna nazwa
Plasma - an ambiguous name
Źródło JET EFDA

patented and implemented into technology. The best example is the Lightning Tests Laboratory (LSWA) operating in the IPPLM, which has been accredited by the Polish Accreditation Center. One of its present aims is to test helicopters for external contractors.

Apart from cooperation with other research units within Euratom Community, HiPER project and ICDMP research groups from the IPPLM nowadays many other European projects such as International Access to the Megajoule plasma focus PF1000 device, LASERLAB-Europe, COST, SEMI-NANO and some others. There are also projects financed by International Atomic Agency in Vienna. Some scientists from IPPLM receive financial support for individual research projects from the Ministry of Science and Higher Education.

The Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion is highly regarded, both in Poland by the Ministry of Science and Higher Education, and also abroad by the international science community. The reputation rests on its high number of top quality publication in well-known science journals, and effective, broad international cooperation. As a result, in 2010 the IPPLM achieved the second best position on the Ministry's list of all the research institutions within the scope of physics and astronomy in Poland.

MNiSzW (2 miejsce na liście ośrodków zajmujących się badaniami w zakresie fizyki i astronomii).

Wszystkie te osiągnięcia nie byłyby możliwe bez zaangażowania i ofiarnej pracy załogi IFPiLM, jej profesjonalizmu i pasji. Bardzo dziękuję za to wszystkim pracownikom Instytutu, także tym którzy kiedyś z nami pracowali, a potem, z różnych względów, odeszli do innych instytucji, albo na emeryturę. Pamiętamy o wkładzie pracy naszych koleżanek i kolegów, którzy już nie żyją. Wspominamy ich z wdzięcznością. Jesteśmy dumni z tego, że wielu z nas, obecnie starszych pracowników Instytutu, całą swoją karierę życiową związało z Instytutem i teraz swoją wiedzę i doświadczenie przekazuje młodym adeptom nauki, którzy z równą pasją i oddaniem podejmują nowe wyzwania na drodze do opanowania fuzji jądrowej na potrzeby wytwarzania energii elektrycznej z energii wiązania izotopów wodoru.

Na koniec chcę podziękować wszystkim tym instytucjom i gremiom, które przez 35 lat wspierały Instytut. W ostatnich latach były to: Ministerstwa Gospodarki oraz Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Państwowa Agencja Atomistyki, Rada Główna Instytutów Badawczych, Rada Naukowa IFPiLM i Rada Asocjacji Euratom-IFPiLM.

Andrzej Gałkowski

Dyrektor IFPiLM

Koordynator Asocjacji Euratom-IFPiLM



Rys. 4 - 'Rzeźba' wita ludzi przed wejściem do instytutu IFPiLM

'A sculpture' welcomes people entering the IPPLM institute

Źródło IFPiLM

All those achievements would not have been possible without the involvement and hard work of the personnel of the IPPLM, their professionalism and passion. I would like to thank the staff of the institute, and also those who had worked with us and later, for various reasons, changed their careers or retired. We remember the contribution of our colleagues who are no longer alive. We remember them with gratitude. We are proud that many of us, now the most experienced employers of the institute, chose a career connected with the IPPLM. They are now incorporating their knowledge and experience into their future successors, the young adepts of science. Those youngsters, with similar passion and devotion, are taking the challenge of harnessing fusion in order to produce electricity from the binding energy of hydrogen isotopes.

To sum up, I would like to thank all the institutions and bodies which have supported the institute for the past 35 years. During the latest years there were: the Ministry of Economy, the Ministry of Science and Higher Education, the National Atomic Energy Agency, the Central Council of Research Institutes, Scientific Council of the IPPLM, the Euratom-IPPLM Association Council.

Andrzej Gałkowski

IPPLM Director

Head of Research Unit of the Euratom-IPPLM

Association

35 LAT HISTORII INSTYTUTU FIZYKI PLAZMY
I LASEROWEJ MIKROSYNTEZY

35 YEARS HISTORY OF THE INSTITUTE OF PLASMA
PHYSICS AND LASER MICROFUSION

OKRES POCZĄTKOWEGO ROZWOJU I NARASTANIA NIESTABILNOŚCI (LATA 1976–1992)

Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy powstał 1 stycznia 1976 roku w wyniku wyłączenia z Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie czterech zespołów badawczych i połączenia ich w samodzielny Instytut podległy ówczesnemu Ministerstwu Nauki, Szkolnictwa Wyższego i Techniki. Dużą część kadry instytutu stanowili oficerowie wykształceni w WAT. Instytut ten, kontynuując działalność badawczą realizowaną przez Zespoły w WAT, prowadził badania i zastosowania gorącej plazmy wytwarzanej laserami, w układach plasma focus i z wykorzystaniem materiałów wybuchowych. W badaniach tych wykorzystywano największe w tym czasie w Polsce lasery impulsowe zbudowane w IFPiLM i układy do generacji plazmy w wyniku wyładowania silnoprądowego (układy plasma focus) zbudowane w Instytucie Badań Jądrowych (IBJ) w Świerku. Część badań realizowano we współpracy z IBJ i z Instytutem Fizycznym (FIAN) w Moskwie. Uzyskano oryginalne wyniki badań plazmy w tych układach, niektóre rezultaty odnosiły się do kontrolowanej fuzji jądrowej.

Po śmierci pierwszego dyrektora i patrona IFPiLM, gen. Sylwestra Kaliskiego, w 1978 roku dyrektorem został doc. Sławomir Denus. W latach 1978–1987 w IFPiLM kontynuowano poprzednie kierunki badań, w dużym stopniu we współpracy z IBJ i z FIAN. Wspólnie z FIAN prowadzono badania sferycznej laserowej kompresji plazmy. Rozpoczęto przygotowania kilku dużych układów diagnostycznych dla tokamaka T15 budowanego w Instytucie Energii Atomowej w Moskwie. Niestety, prace te przzerwano pod koniec lat 80-tych z powodu wstrzymania budowy tego układu. W roku 1987 podporządkowano Instytut Ministerstwu Obrony Narodowej. Pod nowym kierownictwem instytut doświadczył kilku lat ciągłych reorganizacji i zmian programowych (np. przerwano badania z wykorzystaniem metod wybuchowych, ograniczono badania plazmowe i rozpoczęto prace w zakresie optoelektroniki). Część pracowników IFPiLM podjęła starania o przekształcenie Instytutu w cywilną jednostkę badawczą. Z drugiej strony pewne gremia wojskowe dążyły do wcielenia IFPiLM do WAT, a nawet do jego likwidacji.

OKRES NOWEJ SAMODZIELNOŚCI I BUDOWANIA TOŻSAMOŚCI W III RZECZPOSPOLITEJ (LATA 1993–2004)

W roku 1993 podjęto decyzję o podziale IFPiLM wcielając jego część do WAT, a sam Instytut, pod dotychczasową nazwą, podporządkowano Państwowej Agencji Atomi-

THE PERIOD OF THE BEGINNING OF DEVELOPMENT AND RISING INSTABILITY (1976–1992)

The Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion (IPPLM) was established 1st January 1976 as a result of the separation of four Research Departments from the Military University of Technology. They formed one independent institute under the control of the Ministry of Science and Higher Education. A large number of the personnel of the newly-created institute constituted army officers, who had graduated from the Military University of Technology. They continued their research (that had been conducted at the Military University of Technology) into the properties of laser plasma and its application in plasma focus devices using explosive materials. For the research impulse lasers were used, constructed in the IPPLM, and machines for generating plasma in high voltage electrical discharge (plasma focus) built in the Institute of Nuclear Research (IBJ) in Świerk. Some of the research was carried out in cooperation with IBJ and with the Physics Institute (FIAN) in Moscow. Interesting results were achieved, some of which concerned controlled laser fusion.

After the death of the first Director and patron of the IPPLM, Gen. Sylwester Kaliski, in 1978, his successor was Dr Sławomir Denus. In the period 1978–1987 the IPPLM continued its previous research plan, mainly in cooperation with IBJ and FIAN. The Spherical Laser Compression of Plasma was carried out with FIAN. There was some preparation towards a few large diagnostic research projects for the tokamak T15, under construction in the Atomic Energy Institute in Moscow. Unfortunately, the work stopped in the late 80s as the overall project in Moscow was stopped. In 1987 the IPPLM was put under the control of the Ministry of National Defense. Under the new supervision the institute underwent some structural reorganization, and changes in the research programme took place (they stopped the research using explosive methods, limited plasma research, and started research of optoelectronics). Some of the IPPLM personnel made an effort to change the status of the institute into a civil research centre, whereas others wanted to join the Military University of Technology.

THE PERIOD OF NEW INDEPENDENCE AND BUILDING THE IDENTITY IN THE THIRD REPUBLIC OF POLAND (1993–2004)

In 1993, the institute split up, with one part joining the Military University of Technology (WAT) and the second part keeping the IPPLM name and becoming a new re-

styki. W następnych latach, pod dyktando dr. Zygmunta Składanowskiego prowadzono, mimo trudnej sytuacji ekonomicznej, ambitne badania podstawowe w zakresie fizyki plazmy laserowej, plazmy generowanej w układzie plasma focus PF1000 i teorii plazmy przyściennej w układach tokamak. W drugiej połowie lat 90-tych nastąpiły istotne zmiany zarówno w zakresie badań jak i ich efektywności. Na potrzeby badań plazmy w układzie PF1000 udoskonalano metody pomiarowe i rozszerzono współpracę międzynarodową z kilkoma ośrodkami na świecie. Podjęto prace technologiczne dotyczące praktycznych zastosowań impulsowych generatorów prądowych.

Badania plazmy laserowej w IFPiLM realizowano za pomocą zbudowanego w Instytucie nowego lasera o mocy ~ 1 TW w impulsie pikosekundowym. Jednocześnie podjęto trwającą do dziś współpracę z Instytutem Fizyki CzAN w Pradze realizując badania plazmy laserowej za pomocą działającego tam dużego lasera jodowego PERUN. Po 2000 roku nastąpił dalszy rozwój badań plazmy laserowej głównie dzięki zainstalowaniu dużego lasera jodowego PALS w nowym Ośrodku Badawczym PALS w Pradze. Prace są realizowane przez zespół z IFPiLM wraz z innymi zespołami w ramach projektów sponsorowanych przez Konsorcja LASERNET-Europe, a następnie przez LASERLAB-Europe. Badania te są do dzisiaj bardzo efektywne – dostarczają wyników na poziomie międzynarodowym przyczyniając się do umocnienia pozycji Instytutu wśród europejskich laboratoriów laserowo-plazmowych.

OKRES PODEJMOWANIA NOWYCH WYZWAŃ I POSZERZANIA UDZIAŁU W EUROPEJSKICH PROGRAMACH BADAWCZO - ROZWOJOWYCH (LATA 2005–2010)

Przełomowym dla Instytutu wydarzeniem było stowarzyszenie z programem fuzji jądowej Wspólnoty Euratom



Rys. 1 - Budynek Oddziału Plazmy w Polu Magnetycznym (OPPM)
Division of Magnetised Plasma in IPPLM
Źródło IFPiLM

structured institute under the control of the National Atomic Energy Agency. In the following years, with a new director, Zygmunt Składanowski, numerous ambitious research projects were carried out, in spite of the difficult financial situation. There were as follows: laser plasma physics, plasma generated in plasma focus PF1000 and, theory of plasma wall interaction in a tokamak. In the second half of the 90s there were a lot of changes both in the range of topics of research and in their efficiency. As regards the PF1000, measurement methods were improved and international cooperation was widened. An effort was made to undertake technology work to implement practical usage of pulsed-power generators.

Research in laser plasma was carried out at the IPPLM with the use of a newly constructed laser of the power of 1 TW in picoseconds impulses. Simultaneously, a cooperation with the CzAN Institute of Physics in Prague was established, and the research in laser plasma was broadened by means of its big iodine laser called PERUN. After the year 2000, progress in research into laser plasma developed, particularly thanks to the installation of the big iodine laser in the new PALS research institution in Prague. All the research (of laser plasma) previously carried out at the IPPLM was financed first by the LASERNET-Europe Consortium and later by LASERLAB-Europe. That research was, and still is, extremely sophisticated – their results are highly regarded by the other European laser-plasma institutions, which improves the significance of IPPLM in Europe.

THE PERIOD OF TAKING CHALLENGES AND BROADENING THE RANGE OF PARTICIPATION IN THE EUROPEAN RESEARCH PROGRAMME (2005–2010)

A milestone for the development of the institute was the establishing of the Euratom-IPPLM Association on 1st Janu-

w wyniku akcesji Polski do Unii Europejskiej, co nastąpiło 1 maja 2004 roku. IFPiLM podpisał z Komisją Europejską Kontrakt Asocjacyjny, na mocy którego od 1 stycznia 2005 roku rozpoczęła swoją działalność Asocjacja Euratom-IFPiLM obejmująca kilkanaście ośrodków naukowych w Polsce zajmujących się badaniami nad fizyką plazmy i rozwojem technologii fuzji jądrowej. Oznacza to, że Instytut koordynuje w Polsce prace współfinansowane przez Wspólnotę EURATOM dotyczące opanowania fuzji jądrowej z magnetycznym utrzymaniem plazmy w układach tokamak i stellarator. Jednocześnie zainicjowano kilka projektów we współpracy z innymi Asocjacjami, w tym: badania procesów zachodzących w tokamaku JET (wspólne przedsięwzięcie członków Wspólnoty EURATOM) w Culham (Anglia) z zastosowaniem spektroskopii promieniowania emitowanego z plazmy i diagnostyki neutronowej (przygotowanej w IFPiLM), badania laserowego usuwania warstwy tzw. kodepozytu z elementów tokamaka, przygotowanie dwóch diagnostyk rentgenowskich i diagnostyki neutronowej dla budowanego w Greifswald (Niemcy) stellaratora W7-X oraz badania teoretyczne i symulacje numeryczne plazmy przyściennej w układach tokamak i stellarator (kontynuacja poprzednich badań). Część tych prac jest ukierunkowana na poznanie i optymalizację procesów, które będą zachodzić w wielkim tokamaku ITER budowanym we Francji przez wspólnotę siedmiu mocarstw światowych (włączając UE). W IFPiLM realizowany jest także projekt sponsorowany przez Wspólnotę EURATOM dotyczący fuzji z inercyjnym utrzymaniem plazmy (ICF). W Instytucie działa Krajowy Punkt Kontaktowy dla polskich ośrodków badawczych wykonujących prace w ramach Asocjacji EURATOM-IFPiLM.

Od roku 2007 IFPiLM uczestniczy w europejskim projekcie HiPER dotyczącym budowy w Europie infrastruktury laserowej dla zademonstrowania efektywności fuzji laserowej (ICF). Zespół z Instytutu realizuje w tym projekcie prace



Rys. 2 - Budynek Oddziału Plazmy w Polu Magnetycznym (OPPM)
Division of Magnetised Plasma in IPPLM
Źródło IFPiLM

ary 2005, made possible after the accession of Poland to the European Union on 1st May 2004. As a result, the Polish research programme was associated with the European Euratom programme. The Euratom-IPPLM Association is made up of over ten institutions all over Poland that carry out research in plasma physics and technology. This means that the IPPLM coordinates work related to magnetic confinement fusion in the tokamak and stellarator carried out in the framework of the Euratom programme. At the same time some new projects were initiated in cooperation with other Associations: the research of the processes in the JET tokamak (a joint project of the Euratom members) in Culham (England) by means of the spectroscopy of radiation emitted from plasma and neutron diagnostics (elaborated and prepared in the IPPLM), research in laser-induced codeposit removal from tokamak in-vessel components, development of two soft X-ray diagnostics and a neutron diagnostics for the stellarator W7-X, that is under construction in Greifswald (Germany), theoretic research and numerical simulation of close-to-wall plasma in the tokamak and in the stellarator (continuation of previous research). Some of the research is directed into better knowledge and optimization of the processes that will occur in a big tokamak ITER which is being built in France as a mutual effort of seven of the world's most powerful countries (including the EU). Moreover, in the IPPLM institute, a project related to inertial confinement fusion (ICF) under the financial support of EURATOM is being carried out. In the institute there is also the headquarters of the institution called National Contact Point for the use of the Polish institutions that participate in the work of the EURATOM-IPPLM Association.

Since 2007 the IPPLM has participated in the European HiPER project, whose aim is to build a fusion infrastructure to demonstrate the effectiveness of ICF. One group of scientists from the IPPLM has carried out work related to three options of ICF: fast ignition initiated by a beam of protons,

dotyczące trzech opcji ICF: szybki zapłon inicjowany wiązką protonów, inicjowany makrocząstką, w obu wypadkach przyspieszanych intensywnym impulsem laserowym oraz zapłon inicjowany silną falą uderzeniową. Zespół prowadzi też prace związane z możliwością zastosowania układu HiPER w badaniach podstawowych (w tym do symulacji zjawisk astrofizycznych, wzbudzania reakcji jądrowych, oraz w tzw. hadronoterapii). Badania eksperymentalne Instytutu w ramach projektu HiPER wykonywane są przy użyciu wielkich laserów europejskich (PALS w Republice Czeskiej, LULI'100 we Francji i VULCAN w Anglii) w ramach szerokiej współpracy międzynarodowej. W 2010 roku Instytut zakupił laser wielkiej mocy (~10 TW w impulsie 40 fsek) na potrzeby dalszego rozwoju powyższych badań. Przedmiotem działania tego laboratorium są prace dotyczące zastosowań laserowego źródła jonów, w tym do implantacji jonów celem modyfikacji materiałów półprzewodnikowych (produkcji nanokryształów Ge w warstwie SiO₂). Do generacji jonów stosowany jest neodymowy laser repetytywny małej mocy. Prace te w latach 2004–2007 były wykonywane w ramach europejskiego projektu SEMINANO.

Możliwość prowadzenia interesujących badań plazmowych na największym w Europie układzie plasma focus PF1000 stworzyła warunki dla dalszego rozszerzenia tych prac w ramach utworzonego w IFPiLM Międzynarodowego Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy (ICDMP), wspieranego przez UNESCO oraz w ramach projektów badawczych realizowanych wspólnie przez zespoły zagraniczne i polskie (z IFPiLM i z IPJ) objętych wsparciem przez europejski program „Transnational Access”. Działające w IFPiLM laboratorium testów wysokonapięciowych uzyskało oficjalną akredytację krajową. Wykonuje ono badania odpornościowe różnych urządzeń (np. helikoptera) na zlecenie zewnętrznych kontrahentów.

Od roku 2001 Instytut jest podporządkowany Ministerstwu Gospodarki, do września 2010 jako jednostka badawczo-rozwojowa, od października jako instytut badawczy, zgodnie z nową ustawą reformującą system nauki w Polsce. Podstawowe finansowanie jego działalności zapewnia Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (finansowanie działalności statutowej i dofinansowanie projektów badawczych). Do października 2010 roku Instytutem kierował dr Z. Składanowski. We wrześniu tego samego roku Minister Gospodarki mianował na to stanowisko prof. nadzw. Andrzeja Gałkowskiego. Instytut jest wysoko notowany – w 2010 roku zajął drugą pozycję na liście rankingowej MNiSzW obejmującej wszystkie polskie ośrodki naukowe zajmujące się badaniami w zakresie fizyki i astronomii.

macroparticle (in both cases particles are accelerated by the intensive laser impulse), and ignition initiated by a strong shock wave. The group has also conducted an investigation into the implementation of the results obtained in the HiPER project into basic research (for example the simulation of various astrophysical phenomena, the initiation of nuclear reactions, and so-called hadron-therapy). Some European facilities in the frame of broad international cooperation are used in the experimental research of the HiPER project. These facilities house the most powerful lasers in Europe: PALS in the Czech Republic, LULI'100 in France and VULCAN in England. In 2010 the IPPLM institute bought a powerful laser (~10 TW, impulse 40fs) with a view to further developing the above research. The main subject of the lab activity is the practical usage of the laser-ion-source into the ion implantations to modify semiconductor materials, in other words, the production of germanium nanocrystals in the layer of silicon dioxide (Ge in SiO₂). For the ion generation a repetitive Neodymium (Nd) low power laser is used. All this work was performed in the frame of European SEMINANO project in 2004–2007.

The possibility of interesting research programme in the biggest plasma focus facility (PF1000) in Europe created the opportunity for further development of the work in the frame of the International Centre for Dense Magnetized Plasma (ICDMP) supported by UNESCO, and also in the frame research projects carried out by Polish (from the IPPLM and SINS) and international teams supported by the European 'Transnational Access' Programme. The Lightning Tests Laboratory (LSWA) that has functioned in the IPPLM has been accredited by the Polish Accreditation Center. The main aim of its activity is research into the resistance of the materials in various devices (for example helicopters) for external contractors.

From 2001 till the 30th September 2010 the institute was under the control of the Ministry of Economy. On the 1st October 2010 it became a research institute as the result of changes in the system of education in Poland. Basic financial support comes from the Ministry of Science and Higher Education. Money is allocated for activities anticipated in the statute (of the institute) and for financing the research programme. Until October 2010, the Director of the institute was Dr Z. Składanowski, but in September of the same year the Minister of Economy nominated Prof Dr Hab Andrzej Gałkowski for this post. The Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion is highly regarded – in 2010 the IPPLM achieved the second best position on the Ministry's list of all the research institutions connected with Physics and astronomy in Poland.

ASOCJACJA IFPILM – EURATOM

THE EURATOM-IPPLM ASSOCIATION

Od roku 2005 nowego, znacznie szerszego wymiaru nabrały prowadzone w Polsce badania w dziedzinie fuzji termojądrowej, co związane jest z przystąpieniem naszego kraju do Wspólnoty Euratom. Fakt ten stworzył zupełnie nowe perspektywy dla prowadzenia prac badawczych, zwłaszcza w zakresie dostępu do europejskich urządzeń i ośrodków badawczych oraz funduszy przeznaczonych na wspieranie badań.

Celem badań naukowych i prac badawczo-rozwojowych oraz wdrożeniowych w ramach Europejskiego Programu Fuzji Jądrowej jest doprowadzenie do zbudowania reaktora termojądrowego zdolnego do ciągłego podtrzymywania reakcji fuzji. Osiągnięcie tego celu stworzy nową perspektywę dla rozwoju energetyki.

Program fuzji jądrowej Wspólnoty Euratom ma trzy główne filary:

- Program ITER (droga po łacinie) powiązany z programem BA (Broader Approach). Program ITER jest przedsięwzięciem międzynarodowym, w którego realizację zaangażowane są Stany Zjednoczone, Japonia, Korea, Chiny, Indie, Federacja Rosyjska i Wspólnota Euratom. Głównym udziałowcem jest Euratom (50%). Natomiast program BA obejmuje udział Wspólnoty Euratom w przedsięwzięciach naukowych na terenie Japonii (modernizacja tokamaka JT60U, budowa ośrodka analiz i studiów w Rokkasho oraz IFMIF – International Fusion Materials Irradiation Facility);
- Projekt JET (Joint European Torus) – przedsięwzięcie europejskie. JET to obecnie największy na świecie tokamak, jedyny, który może pracować na mieszaninie deuteru i trytu.
- Program towarzyszący realizowany w krajach członkowskich Wspólnoty Euratom.

Prace na rzecz ITER-a i BA koordynuje w UE instytucja mająca osobowość prawną o nazwie F4E (Fusion for Energy) z siedzibą w Barcelonie. Pozostałe prace koordynuje konsorcjum EFDA (European Fusion Development Agreement), które utrzymuje dwa ośrodki wspierające, tzw. Close Support Units (CSU):

- w Culham koło Oksfordu koordynujący projekt JET;
- w Garching koło Monachium, zajmujący się koordynacją prac badawczych z wykorzystaniem innych urządzeń fuzyjnych w Europie oraz rozwojem technologii dla urządzeń kolejnej generacji (program DEMO).

In 2005, research into fusion in Poland received a big boost for its considerable development. It was possible after the accession of Poland to the European Union. This fact opened an entirely new perspective for the research especially as regards the possibility of using cutting-edge fusion facilities in the biggest, most prestigious European research institutes, and accessibility of financial support.

The aim of all the research: scientific and technical implementation within the European Fusion Programme is to build a thermonuclear reactor, capable of sustaining fusion reaction for a long time. It will open a door to new possibilities of energy research development.

The programme of the Euratom Community has three main streams:

- The ITER ("route" in Latin) programme connected with the BA (Broader Approach) programme. This is an international project whose participants are the USA, Japan, Korea, China, India, Russia and Euratom (the European Union). The main participant is Euratom (50%). The BA programme is a part of Euratom and it includes Euratom contribution in scientific research in Japan (modernization of the JT60U tokamak, building an institution of analysis and study in Rokkasho, and IFMIF – the International Fusion Materials Irradiation Facility);
- JET (Joint European Torus) European project. JET - the world's biggest tokamak, with deuterium and tritium as fuel
- Accompanying programme carried out in European countries – Euratom's members

All European projects connected with ITER and BA are coordinated by an institution with legal entity called F4E (Fusion for Energy) in Barcelona. All the other fusion related European projects are coordinated by EFDA (European Fusion Development Agreement) in two so-called Close Support Units (CSU):

- in Culham, close to Oxford, which coordinates the JET project
- in Garching, close to Munich, which coordinates the research carried out using all the other fusion facilities in Europe, and technology development for the next generations of fusion facilities (DEMO programme)

Wysoki stopień integracji prac oraz swobodny dostęp do europejskich urządzeń dla wszystkich uczestników programu stworzyły podstawę do intensywnej współpracy i realizacji spójnego programu w ramach wspólnie przyjętej strategii. W realizację programu zaangażowanych jest ponad 2000 pracowników naukowych i inżynierów, w tym około 260 doktorantów. Przedsięwzięcie prowadzone jest jako JEDEN program europejski. Idea tzw. Europejskiej Przestrzeni Badawczej, której utworzenie jest priorytetowym celem 7. Programu Ramowego, została tu wcielona w życie ponad 30 lat temu.

Przystąpienie do Programu Ramowego Wspólnoty Euratom w obszarze fuzji wiąże się z zawarciem Kontraktu Asocjacyjnego, którego stronami są Wspólnota Euratom, reprezentowana przez Komisję Europejską, i instytucja krajowa koordynująca realizację prac w ramach przyjętego programu (Euratom Associate). Podstawowy Kontrakt Asocjacyjny uzupełniony jest dodatkowymi porozumieniami wielostronnymi:

- EFDA (European Fusion Development Agreement) – umowa obejmująca wszystkie Asocjacje (jest ich ponad 20 we wszystkich krajach Unii Europejskiej) i Komisję Europejską;
- porozumienie w sprawie JET (JET Agreement) – umowa ustalająca zasady wspólnego użytkowania unijnego tokamaka JET;
- porozumienie w sprawie wymiany personelu badawczego (Mobility Agreement).

Ze strony polskiej wszystkie cztery ww. umowy zostały podpisane przez Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie, instytucję upoważnioną przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego do koordynacji



Rys. 1 - Słońce - wzór dla reaktora plazmowego
The Sun - template for a fusion reactor
Źródło JET EFDA

High level of integration and free access to European fusion facilities for all participants of the projects have created a basis for intensive cooperation and realization of the concise programme within a mutually acceptable strategy. There are over 2000 scientists and engineers including 260 PhD students involved in the programme. That enormous enterprise has been undertaken as one single European programme. An idea of the so-called European Research Area, which became a priority of the 7th Research Framework, was incorporated here 30 years ago.

Accession to the Research Framework of the Euratom Community in fusion area involves signing an Association Contract between Euratom Community members, represented by the European Committee and the national institution which coordinates projects carried out within a mutually acceptable programme (Euratom Associate). The basic Association Contract has been completed by additional multilateral agreements:

- EFDA (European Fusion Development Agreement) – arrangement including all Associations (more than 20 from all countries in the European Union) and the European Committee;
- JET Agreement – an agreement assigning rules regarding mutual usage of the European tokamak JET
- An agreement regarding the exchange of research personnel (Mobility Agreement)

From the Polish side, all four of the above-mentioned agreements were signed by the Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion in Warsaw, the institution entitled by the Ministry of Science and Higher Education to coordinate activities within those agreements in Poland. As a result of the Association Contract, the Euratom-IPPLM Association was

w Polsce działań w zakresie tych umów. Na mocy Kontraktu utworzona została Asocjacja Euratom-IFPILM grupująca ośrodki naukowe w Polsce, które uczestniczą w programie badań nad fuzją. Obecnie Asocjację tworzą:

1. Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy
2. Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej
3. Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Otwocku
4. Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie
5. Uniwersytet Opolski
6. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
7. Akademia Morska w Szczecinie
8. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
9. Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu
10. Politechnika Wrocławska
11. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
12. Politechnika Poznańska
13. Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe w Poznaniu.

Program badań nad fuzją jądrową w Polsce realizowany w ramach Wspólnoty Euratom obejmuje następujące projekty badawcze:

- A. Światowy projekt ITER
- B. Europejski projekt JET
- C. Projekty realizowane w ramach Porozumienia EFDA, dotyczące:
 - a. Oddziaływania plazmy ze ścianą
 - b. Modelowania plazmy
 - c. Rozwoju diagnostyki
 - d. Nowych materiałów dla fuzji
 - e. Inercyjnej fuzji jądrowej
 - f. Socjologii i ekonomiki dotyczących fuzji jądrowej



Rys. 2 - Ośrodki tworzące Asocjację Euratom-IFPILM
Research Units in Polish Association
Źródło: IFPILM

established. It brings together scientific institutions which take part in the fusion research programme. Presently, the Association comprises the following institutions:

1. The Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion in Warsaw
2. The Warsaw University of Technology, Material Department
3. National Centre for Nuclear Research in Otwock
4. The PAS Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics in Kraków
5. The University of Opole
6. The West Pomeranian University of Technology
7. The Maritime University of Szczecin
8. The AGH University of Science and Technology in Kraków
9. The PAS Institute of Low Temperature and Structure Research in Wrocław
10. The Wrocław University of Technology
11. The Poznań University of Technology
12. The Nicolaus Copernicus University in Toruń
13. The Poznań Supercomputing and Networking Centre

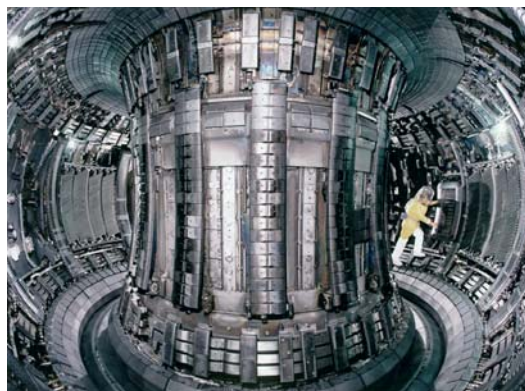
The fusion programme in Poland, carried out within the European Community, includes the following research projects:

- A. Global project – ITER
- B. European project JET
- C. The projects within EFDA Agreement:
 - a. Plasma-wall interaction
 - b. Plasma modelling
 - c. Diagnostics development
 - d. New fusion materials
 - e. Inertial fusion
 - f. Sociology and economy regarding fusion

- D. Projekty towarzyszące, dotyczące budowy aparatury i prowadzenia badań na urządzeniach Wspólnoty Euratom, obejmujące:
- Udział w budowie stellaratora W7-X i przygotowaniu diagnostyk dla tego układu
 - Badania plazmowe i materiałowe w tokamakach ASDEX UG, TEXTOR, Tore Supra, ISTTOK, COMPASS.

Politechnika Wrocławska, Politechnika Warszawska i AGH uczestniczą w pracach na rzecz ITER-a w ramach kontraktów zawartych z IO (ITER Organization) oraz grantów F4E. Politechnika Wrocławska, w ramach wsparcia dla India DA (Domestic Agency), kontynuuje badania materiałów w niskich temperaturach (kontrakt związany z Review of complex cryolines) oraz podjęła nowe zadanie związane z analizą niezawodności systemu kriogenicznego dla ITERa. AGH otrzymała grant z F4E na badania związane z aktywacją materiałów, transportem neutronów oraz produkcją trytu w reaktorze. Politechnika Warszawska prowadzi analizę wstępną mechaniki płaszcza dla ITERa.

W pracach badawczych na JET bierze udział 16 oddelegowanych pracowników naukowych polskiej Asocjacji. Wykonują oni projekty związane z diagnostyką aktywacji neutronowej, promieniowania rentgenowskiego, spektroskopii promieniowania próżniowego (VUV), polarymetrii oraz budują elektronowo-gazowy detektor do spektrometrii rentgenowskiej. Grupa również bierze udział w badaniach nowych technologii dla JET. Warto zaznaczyć, że praca w ramach projektu JET bardzo dobrze wpływa na integrację polskiej społeczności fuzyjnej.



Rys. 3 - Wnętrze komory tokamaka JET
The inside view of JET vacuum vessel
Źródło JET EFDA

- D. Accompanying projects connected with producing equipment and carrying out research on European facilities including:
- Contribution in constructing the W7-X stellarator and preparing diagnostics for this system
 - Plasma and material research in tokamaks: ASDEX UG, TEXTOR, Tore Supra, ISTTOK, COMPASS.

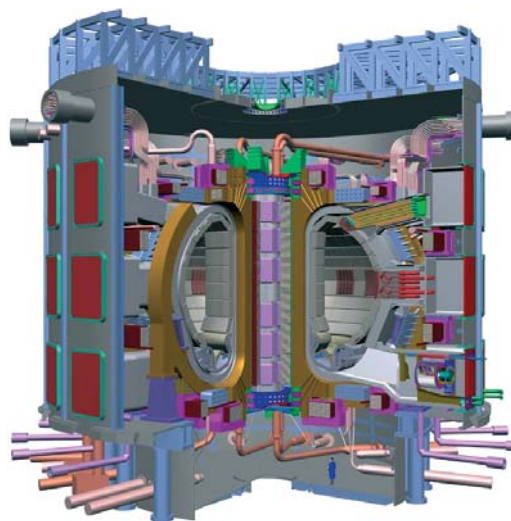
The Universities of Technology in Wrocław and Warsaw, and AGH University of Science and Technology participate in the ITER programme through the ITER Organization (IO) and grants from F4E (Fusion for Energy), the European Domestic Agency for ITER. The Wrocław University of Technology (WrUT) carries out projects connected with cryogenics (for ITER and the Indian Domestic Agency). AGH University of Science and Technology has received grants from F4E in relation to Nuclear Data studies in support of Test Blanket Module (TBM) activities related to the problems of activation and neutron transport, as well as tritium breeding. The Warsaw University of Technology has performed preliminary mechanical analysis of a blanket manifold for ITER.

The Association participates in the JET programme; 16 of our secondees (mostly from the IPPLM) took part in JET experimental campaigns. They contribute to the development and operation of X-ray and VUV spectroscopy diagnostics, as well as neutron activation diagnostics and polarimetry. Our scientists are developing a Gas Electron Multiplier Detector for X-ray Crystal Spectrometry under JET Order. We also take part in JET Technology Task agreements. It is worth emphasizing that the involvement in the JET programme provides a very important platform for integration of the Polish fusion community.

W zakresie oddziaływania plazmy z powierzchniami materialnymi zespoły badawcze Asocjacji zajmują się badaniami dotyczącymi zanieczyszczeń w plazmie, metodami usuwania resztek paliwa z plazmy, erozją, przemieszczaniem się materiału o małej wartości Z oraz oddziaływaniem plazmy ze ścianą. Badania materiałowe to domena Politechniki Warszawskiej z udziałem AGH w zakresie zastosowania spektroskopii Mössbaurowskiej do charakteryzacji stopów żelaza. Politechnika Warszawska zajmuje się wolframem i stopami wolframu z tantalem i wanadem oraz, stalami martenzytowo-ferrytowymi ODS. Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN prowadzi badania nadprzewodników wysokotemperaturowych, które znajdą zastosowanie u następcy ITER-a – prototypie reaktora komercyjnego o nazwie DEMO.

Najważniejszym partnerem współpracy międzynarodowej, dla IFPiLM i całej Asocjacji, są niemieckie instytuty w Garching i Greifswaldzie (Institute of Plasma Physics), Karlsruhe (Karlsruhe Institute of Technology) i w Jülich (Institute of Plasma Physics). Udział Polski w Programie Wendelstein 7-X jest postrzegany jako spełniający bardzo pożyteczną rolę integrującą wszystkie jednostki naukowe wchodzące w skład Polskiej Asocjacji Euratom. Zaangażowanie polskich grup w prace nad W7-X obejmuje udział w złożeniu części stellaratora w jedno urządzenie, opracowanie systemu numerycznego do badań diagnostycznych promieniowania rentgenowskiego, monitorowanie C/O, badania w zakresie diagnostyk neutronowych i mikrofalowych oraz prace obliczeniowe.

W zakresie diagnostyk główne prace prowadzone są przez IFPiLM, IFJ, IPJ, Politechnika Poznańska i Uniwersytet Opolski. Dotyczą diagnostyk neutronowych, spektroskopii



Rys. 4 - Model tokamaka ITER
The model of ITER
Źródło EFDA

The Association research groups (from the IFPILM and the Warsaw University of Technology) deal with the study of dust generation and characterization (conversion of deposits to dust), fuel removal, erosion, transport and deposition of low-Z materials, and Plasma Wall Interaction in a full-W device.

Research into material sciences is the domain of Warsaw University of Technology (particularly tungsten and tungsten alloys with tantalum and vanadium) and partly of the AGH University of Science and Technology (Mössbauer spectroscopy for ferric alloy). The Institute of Low Temperature and Structural Research carries out research into high temperature superconductors for application in the ITER successor DEMO, the future commercial reactor.

German institutes in Garching and Greifswald (the Institute of Plasma Physics), Karlsruhe (the Karlsruhe Institute of Technology) in Jülich (the Institute of Plasma Physics) are our most important partners. Polish involvement in the Wendelstein 7-X stellarator programme is quite extended, ranging from cooperation on device assembly and development of the NBI system, through development of several diagnostics (X-ray pulse height analysis PHA, C/O monitor, neutron and microwave diagnostics) to structural and mechanical calculations, and neutron MCNP calculations. Our contribution in the W7-X programme is considered to play a very important role in the integration of all Polish parties which form the Association.

In the field of diagnostics, the major part is carried out by groups from IFPILM, the Soltan Institute of Nuclear Studies in Świerk, the Institute of Nuclear Physics in Kraków, Poznań University of Technology and the University of

rentgenowskiej i promieniowania próżniowego (VUV), detektorów Czerenkowa, detektorów śladowych i diamentowych oraz czujników Halla.

Badaniami teoretycznymi i modelowaniem komputerowym zajmują się: IFPiLM (rozwiąz kodu ETS – European Transport Solver, modelowanie plazmy brzegowej), Akademia Morska – fale EM (teorie i symulacje) oraz ZUT – niestabilności fal Alfvén generowane szybkimi cząstkami, produktami fuzji jądrowej. Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe wspomaga te badania pracami dotyczącymi rozwoju narzędzi informatycznych.

Nie można też nie wspomnieć o badaniach socjologicznych, które ostatnio prowadzi zespół badaczy z Uniwersytetu imienia Mikołaja Kopernika. Wcześniej prace w zakresie ekonomiki reaktora termojądrowego prowadził Instytut Energii Atomowej.

Polska Asocjacja przykłada dużą wagę do prac w zakresie edukacji i popularyzacji fuzji jądrowej w społeczeństwie, w szczególności wśród młodzieży – gimnazjalnej i licealnej. Wyrazem tego jest nasz udział w europejskim programie edukacyjnym Fusenet oraz zainicjowanie i realizacja projektu edukacyjnego dla szkół gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych pod nazwą „Fuzja w szkole i społeczeństwie”. Polska Asocjacja organizuje coroczną Letnią Szkołę Fizyki Plazmy i Fuzji Jądrowej w Kudowie Zdroju. Dzięki staraniom instytutu europejska wystawa Fusion Expo gościła już w 8 miastach w Polsce

Podsumowując, w stosunkowo krótkim czasie pięciu lat, polska Asocjacja znalazła swoje miejsce w Europejskim Programie Fuzji Jądrowej i odgrywa w nim dużą, ciągle rosnącą rolę. Udział w tym programie jest najważniejszym elementem programu badań i rozwoju w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy.

Opole. They focus mainly on neutron diagnostics, X-ray and VUV spectroscopy, Cherenkov detectors, diamond and track detectors, and Hall sensors.

Theoretical research and computer modelling have been performed mainly by the IPPLM (numerical code ETS – European Transport Solver, edge and SOL plasma modelling), and also the Maritime University of Szczecin (EM wave theory and simulation) and West Pomeranian University of Technology (global stability analyses of Alfvén and energetic particle modes). The Poznań Supercomputing and Networking Centre supports the research.

We should mention here the sociology research being conducted by the Nicolaus Copernicus University in Toruń. Previously, the work on the economy of a thermonuclear reactor had been done by the Institute of Atomic Energy.

The IPPLM's ongoing concern is education and public information. The institute is an active participant in the European fusion educational Fusenet project. It annually organises the Kudowa Plasma Physics Summer School for university students. A national educational project for secondary school students called 'Fusion at school and in society' has been initiated, worked out and has taken place for over three years now. The European Fusion Expo has already been shown in eight big cities in Poland.

In its short five years of existence, the Polish IPPLM Association has found its place in the European Fusion Programme, and plays within it an important, continuously increasing role. Participation in this European programme is the most important part of the research done at the Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion.

BADANIA FUZJI TERMOJĄDROWEJ W UKŁADACH
Z MAGNETYCZNYM UTRZYMANIEM PLAZMY

THERMONUCLEAR FUSION RESEARCH IN MAGNETIC
CONFINEMENT PLASMA DEVICES

BADANIA DIAGNOSTYCZNE PLAZMY W TOKAMAKU JET W CULHAM (WIELKA BRYTANIA)

Główne zadania realizowane w czasie eksperymentów na tokamaku JET przez zespół z IFPiLM były związane z:

1. pomiarami neutronów za pomocą techniki aktywacyjnej (KN2),
2. analizą danych spektralnych związanych ze zintegrowanymi pomiarami linii przejść w Li – podobnym Ni, Fe i Cu (KT2)
3. widmowym monitoringiem domieszek Be oraz domieszek o niskim Z innych niż Be (KS6)

i wykonane z wykorzystaniem układów diagnostycznych przedstawionych na rys.1.

Neutronowa diagnostyka aktywacyjna na JET (KN2) jest wykorzystywana do kalibracji monitorów całkowitej emisji neutronów (KN1). Próbki specjalnie wybranych materiałów są napromieniowywane przez neutrony w trakcie wyładowania plazmowego. Na podstawie obliczeń transportu neutronów można określić aktywność napromienianych próbek. To pozwala określić absolutną emisję neutronów, a zatem przeprowadzić kalibrację innych diagnostyk neutronowych w stosunku do KN2.

Standardowo na JET wykorzystuje się zwykle próbki aktywacyjne z indu i toru dla 2.5 MeV neutronów oraz z żelaza i krzemu dla neutronów 14 MeV. W trakcie eksperymentalnej kampanii zespół z Instytutu użył po raz pierwszy do tych pomiarów próbki aktywacyjne wieloelementowe, w których wykorzystano nowe nieużywane do tej pory materiały. Współczesny, wykalibrowany spektrometr germanowy (HPGe) wykorzystano do pomiaru aktywności promieniotwórczej zastosowanych próbek. To pozwalało zmierzyć aktywność próbek z dokładnością lepszą niż do tej pory. Jednocześnie wprowadzono poprawki do dotychczasowego modelu transportu neutronów dla JET w celu sprawdzenia prawidłowości stosowanych współczynników aktywacji dla zastosowanych nowych materiałów.

Zespół Instytutu przeprowadził pomiary neutronowe dla spektrometru TOFOR na JET (KM11) metodą aktywacyjną. W wyniku pomiaru wydzielono i porównano dwie energetyczne składowe neutronów. Określono stosunek neutronów prędkich do rozproszonych.

DIAGNOSTIC PLASMA RESEARCH IN JET TOKAMAK IN CULHAM (GB)

The main tasks performed by the IPPLM staff during the JET Experiments were oriented on:

1. neutron measurements by activation techniques (KN2),
2. analysis of spectrometric data connected with the line integrated measurements of transitions in Li-like Ni, Fe, and Cu (KT2)
3. spectroscopic monitoring of the Be and other low-Z impurities (KS6) and carried out with the use on JET diagnostic system presented on fig.1.

The neutron activation system at JET (KN2) is used to inter-calibrate total neutron yield monitors (KN1). Samples of purpose-selected materials are irradiated by neutrons during plasma discharge. Due to specific neutron transport calculations the response of activation samples can be determined in a very precise way. It allows measuring fusion neutron yield and, therefore, cross-calibrating other neutron diagnostics against KN2.

Usually at JET some standard activation samples were used; there were the indium and thorium samples for 2.5 MeV neutrons, the iron and silicon for 14 MeV neutrons. During the Experimental Campaigns the IPPLM staff (have) applied some new multi-element materials that served as the activation samples. A modern, pre-calibrated High-Purity Germanium gamma-spectrometer has been used by the IPPLM staff to calculate the activity of irradiated samples. It allows measuring the activity level of the samples with high accuracy which had not been achieved before. Certain improvements of the MCNP input file have been made to check the correctness of applying activation coefficients and to calculate ones for new materials.

The IPPLM staff carried out neutron measurements at the end of KM11 line-of-sight by means of activation method. Two energy components: fast neutrons and scattered ones have been separated. Their relative contribution has been compared.

Spectroscopic monitoring of the Be and other low-Z impurities will be essential for the ITER-like wall research program on JET as well as for future experiments on ITER where Be will be the main wall component. The present Bragg rotor spectrometer (KS6)

Widmowy monitoring Be i innych domieszek o niskim Z w plazmie będzie istotny dla nowego programu badań na JET związanego z 'ILW' jak również dla przyszłych eksperymentów na ITER, gdzie pierwsza ścianka będzie wykonana z berylu. Obecny spektrometr Bragga stosowany na JET (KS6) wykorzystuje cztery kanały do rejestracji promieniowania plazmy z czterech różnych zakresów energii. W jednym z kanałów zastosowano OV110L (V-C), wielowarstwowy element dyfrakcyjny do obserwacji Ly- α Ly- β promieniowania (75.9 Å i 64.1 Å) emitowanego przez jony Be⁺³. Inny kanał monitoruje charakterystyczne promieniowanie emitowane przez jony C⁺⁵ (21.7–41.6 Å), O⁺⁷ (11.7–32.7 Å) oraz miękkie promieniowanie X z zakresu 2.5 Å do 5.8 Å (Cl i Ar monitoring). Ukierunkowany na ITER program badań na JET stawia nowe wymagania dla kalibracji czułości diagnostyk, co jest wyzwaniem dla niskoenergetycznego widma w zakresie XUV. W przypadku metody kalibracyjnej opartej na pomiarach continuum główne trudności są spowodowane niepewnością co do składu domieszek w plazmie, niepewnością wyższych rzędów dyfrakcji od warstw lub kryształu oraz dużej absorpcji w oknie detektora. Zatem, dobre warunki do kalibracji absolutnego strumienia fotonów daje technika oparta na wielu rzędach odbicia oraz obliczeniach i pomiarach ciągłego promieniowania emitowanego z plazmy helowej JET-a i ta technika została zastosowana przez zespół z Instytutu.

Problem domieszek i wzrostu ich obecności w plazmie wiąże się ze wzrostem mocy i czasem grzania RF plazmy za pomocą anteny ILA zastosowanej na JET. Do określenia gęstości metalicznych domieszek i ich rozrzedzeniem w stacjonarnej plazmie JET-a w fazie divertorowej, zespół Instytutu wykorzystał metodę pasywnej emisji VUV. Metoda ta jest oparta na pomiarach absolutnie wykalibrowanych natężeniach przejść VUV z obliczeniami za pomocą uniwersalnego kodu transportu. W analizie wykorzystano zintegrowane pomiary przejść liniowych w Li podobnym niklu, żelazie i miedzi dla testowych wyładowań charakteryzujących się szerokim zakresem zmian profili plazmy. W symulacjach rozważono szeroką klasę współczynników transportu dla dyfuzji D(r) i konwekcji v(r). Dla danego zbioru D(r) i v(r) obliczone intensywności linii były porównywane z mierzonymi w eksperymencie. Otrzymano w przybliżeniu liniową zależność między znalezionymi gęstościami domieszek metali, ich rozrzedzeniem i natężeniem linii na lokalną temperaturę elektronową plazmy. Te liniowe zależności są wykorzystane do znalezienia lokalnej gęstości domieszek metali i ich rozrzedzenia w wyładowaniach na JET.

uses four channels to register plasma radiation from four different energy ranges. One of the channels, employing an OV110L (V-C) multilayer diffractor, observes Ly- α and Ly- β radiation (75.9 Å and 64.1 Å) emitted by Be⁺³ ions. Other channels monitor the characteristic radiation emitted by C⁺⁵ (21.7–41.6 Å), O⁺⁷ (11.7–32.7 Å) and soft X-ray radiation ranging from 2.5 Å up to 5.8 Å (Cl and Ar monitoring). The ITER-oriented JET research program brings new requirements for the instrument's sensitivity calibration which is challenging especially in the low energy XUV spectral range. In the case of the calibration method based on the continuum measurements, the main difficulties come from the uncertainty of the impurity composition of the plasma, uncertainties due to higher diffracted orders from multilayers or crystals and extremely high absorption in the detector window. Therefore, the team from the IPPLM has employed a calibration technique that relies on multi-order reflectivity calculations and measurements of continuum radiation emitted from JET helium plasmas which offer excellent conditions for the absolute photon flux calibration due to their low level of impurities.

The impurity question is of increasing concern as RF power and pulse length increases and therefore it is especially relevant to the assessment of the ITER-like antenna (ILA) in JET. To this end, a method for determining the metal impurity density, ΔZ_{eff} , and dilution in steady-state JET plasmas in the divertor phase using passive VUV emission has been developed by the IPPLM group. The method is based on the combination of absolutely calibrated VUV transition intensity measurements with Universal Transport Code (UTC) simulations. In the analysis the line integrated measurements of transitions in Li-like Ni, Fe, and Cu have been used for test discharges characterized by widely varied plasma profiles. In simulations a wide class of transport coefficients for diffusion D(r) and convection v(r) has been considered. For a given set of D(r) and v(r), the simulated line intensity was matched to that measured in the experiment. An approximately linear dependence of the ratio between the derived metal densities, ΔZ_{eff} , dilution and the line intensity on the local electron temperature has been obtained. The linear dependences are exploited to derive local metal densities, ΔZ_{eff} and dilution for JET discharges.

MODELOWANIE WYŁADOWAŃ PLAZMOWYCH W UKŁADACH TOKAMAK

W instytucie opracowano programy numeryczne do analizy wyładowań w tokamakach w rdzeniu i warstwie brzegowej. Programy zostały użyte do analizy wielu istniejących tokamaków. Rezultaty testów wykazały dobrą zgodność z eksperymentem.

Programy zostały też użyte do analizy pracy projektowanych układów ITER, DEMO. W szczególności analizowano możliwość wypromieniowania części energii przez domieszki dodatkowo wprowadzone do układu w celu redukcji obciążenia termicznego płyt diwertora do wartości dopuszczalnej dla stosowanych materiałów.

Rozwiązanie problemu obciążenia termicznego materiałów reaktora jest kluczowe dla powodzenia energetyki termojądrowej. Główne programy to w warstwie brzegowej kod TECXY i dla całego układu kod COREDIV. Kod TECXY opisuje ewolucję gęstości jonów, temperatury elektronów i jonów izotopów wodoru, pędu izotopów wodoru oraz gęstości domieszek dla poszczególnych stopni jonizacji przy użyciu równań transportu. W kodzie uwzględniono dryfy i prądy. Kod COREDIV opisuje transport w całym układzie tokamaka. Ze względu na złożoność problemu warstwa brzegowa jest opisana za pomocą kodu EPIT będącego uproszczoną wersją kodu TECXY. Uproszczenia dotyczą geometrii (geometria płyty z kierunkami radialnym i poloidalnym) oraz opisu pędu tylko w kierunku poloidalnym. W rdzeniu użyto równań transportu uśrednionych po powierzchniach magnetycznych.

Na granicy obszarów założono ciągłość wartości i strumieni rozpatrywanych wielkości. Na rysunku przedstawiano zależność mocy wypromieniowanej, mocy całko-

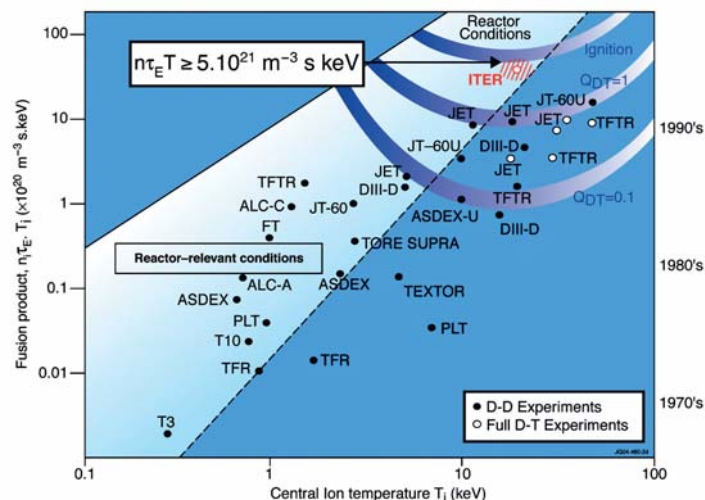
MODELLING OF PLASMA DISCHARGES IN TOKAMAKS

A few numerical codes have been worked out in the institute to analyse core and edge plasma discharges. The programmes were used in several existing tokamaks. The tests' results show well-compliance with the experiments.

They were also used to analyse the functioning of the future reactors like ITER and DEMO. In particular, the codes can be used to analyse possibility of radiation energy losses due to impurities which had been induced in the system in order to reduce heat loads of the divertor up to the value allowable for the materials applied.

The key issue for the success of thermonuclear energy is a solution of a heat load of the reactor materials. A TECXY code has been used for the scrape of layer and a COREDIV code for all the system. The TECXY code describes evolution of ions density, electrons' temperature, the temperature and momentum of hydrogen isotopes ions and impurity ions density for the ionization stage by using transport equations. It also includes drifts and currents. The COREDIV code describes transport in the whole tokamak system. Because of its complexity the scrape of layer is described by the EPIT code, which is a simpler version of the TECXY code. The simplification concerns radial and poloidal geometry and description of poloidal momentum. The transport equations in the core were averaged over the magnetic surfaces.

On the border of the areas a continuity of value and flux of the items was ascertained. In the graph the relationship between several concepts has been shown: radiating energy and total energy, the energy transported to the scrape of layer, the energy delivered to the divertor, the impurity density and the Q ratio of the energy produced

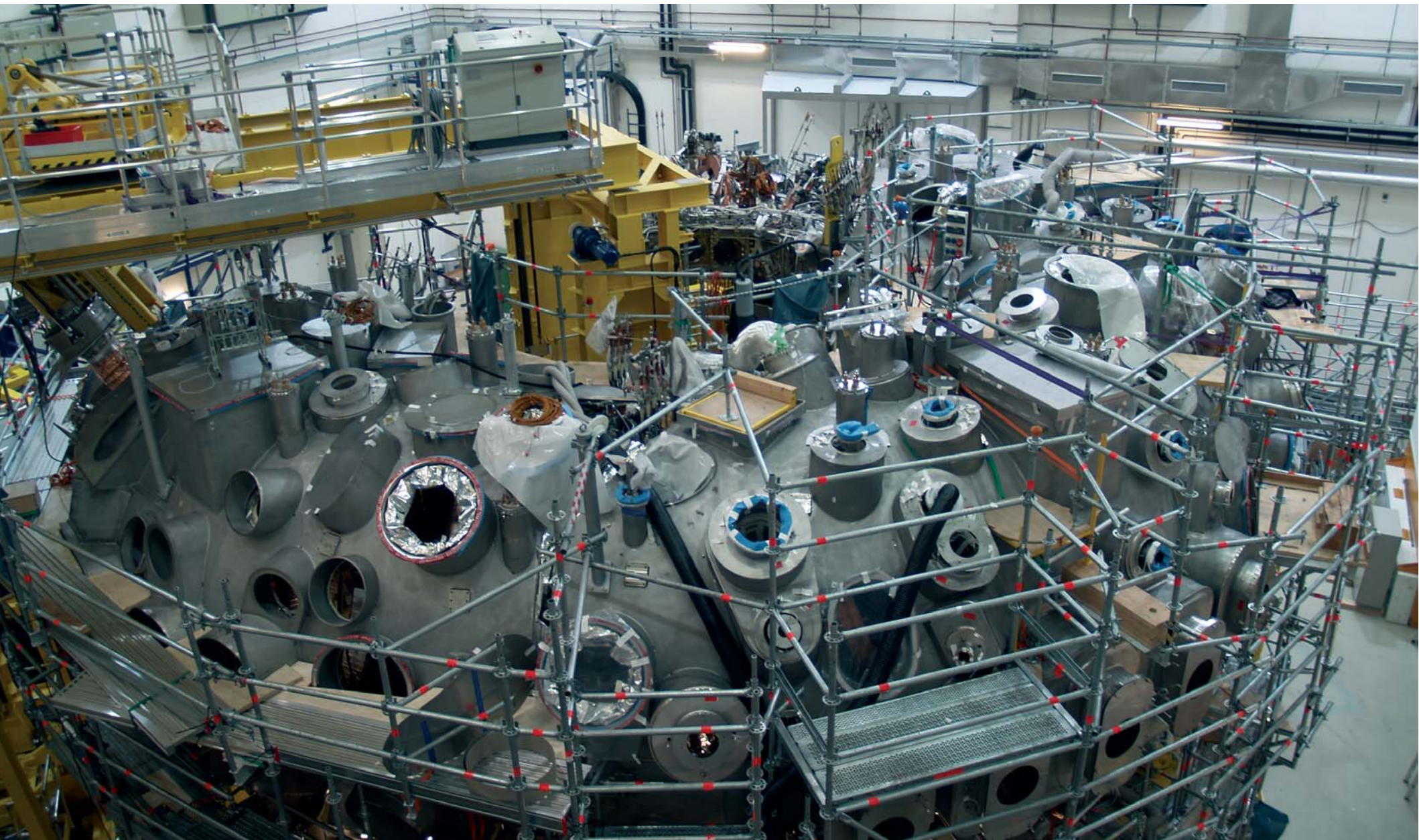


Rys. 1 - Postęp w badaniach w dziedzinie fuzji
Progress in fusion
Źródło JET EFDA

Rys. 2 - Stellarator W7-X / W7-X stellarator

W7-X stellarator

Źródło IFPILM



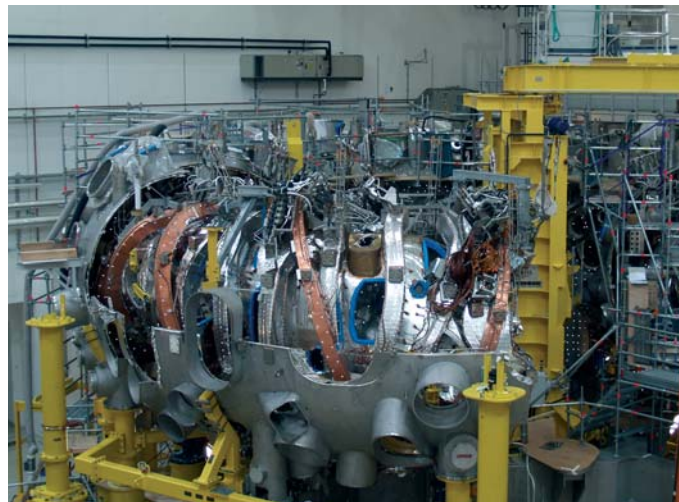
witej P_{tot} mocy przekazywanej do warstwy brzegowej P_{sol} , mocy dostarczanej do płyty diwertora gęstości domieszek oraz Q stosunek mocy produkowanej do dostarczonej w zależności od ilości dostarczonej domieszki dodatkowej dla stacjonarnego rozwiązania dla ITERA.

DIAGNOSTYKI MIĘKKIEGO PROMIENIOWANIA X DLA STELLARATORA W7-X W GREIFSWALD (NIEMCY)

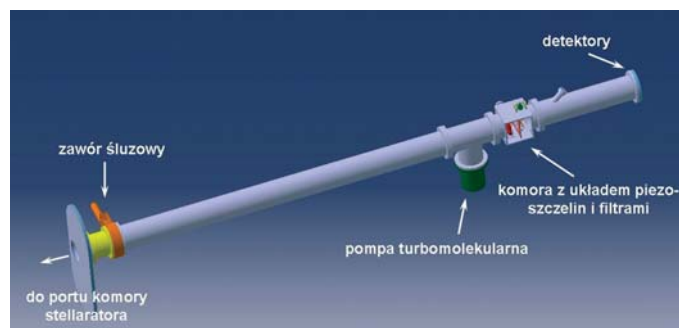
W Zakładzie Fizyki i Technologii Termojądrowych Plazmy Laserowej naukowcy pracują nad projektem „Spektrometria miękkiego promieniowania X ze stellaratora W7-X”. Projekt realizowany jest w ramach współpracy z Instytutem Fizyki Plazmy w Greifswaldzie w Niemczech i jednocześnie jest częścią kontraktu asocjacyjnego z Europejską Wspólnotą Energii Atomowej-EURATOM na wykonanie prac naukowych i technologicznych związanych z programem syntezy termojądrowej.

Stellarator jest urządzeniem do podtrzymywania plazmy, w którym odpowiednio ukształtowane cewki wytwarzają niesymetryczne pole magnetyczne, którego linie mają śrubowy kształt. Podstawową różnicą w pracy stellaratora i tokamaka jest fakt, że stellarator nie wymaga wzbudzenia prądu w plazmie, tak jak to się dzieje w tokamakach. Z punktu widzenia budowy elektrowni termojądrowej, stellaratory mogą przynieść łatwiejsze technicznie rozwiązania niż tokamaki, ale to jednak wymaga potwierdzenia eksperymentalnego, co może przynieść nam budowany w Niemczech stellarator Wendelstein 7-X.

Celem projektu jest opracowanie dwóch diagnostyk rentgenowskich dla plazmy w stellaratorze W7-X. Pierwsza z nich wykorzystuje analizę amplitudową im-



Rys. 3 - Stellarator W7-X
W7-X stellarator
Źródło IPPLM



Rys. 4 - Projekt graficzny układu PHA dla stellaratora W7-X
Conceptual design of PHA diagnostics system for W7-X
Źródło IPPLM

to the energy delivered depending on the quantity of the additional impurity for stationary solution for ITER.

SOFT X-RAY DIAGNOSTICS FOR W7-X STELLARATOR IN GREIFSWALD (GERMANY)

In the Department of Physics and Thermonuclear Technology of Laser Plasma scientists have carried out the project „Spectrometry of soft X-ray emission from W7-X stellarator” which is in the frame of cooperation between IPP Greifswald and IPPLM. This project is a part of the contract of Association between EURATOM and IPPLM, performed within the framework of the European Fusion Development Agreement.

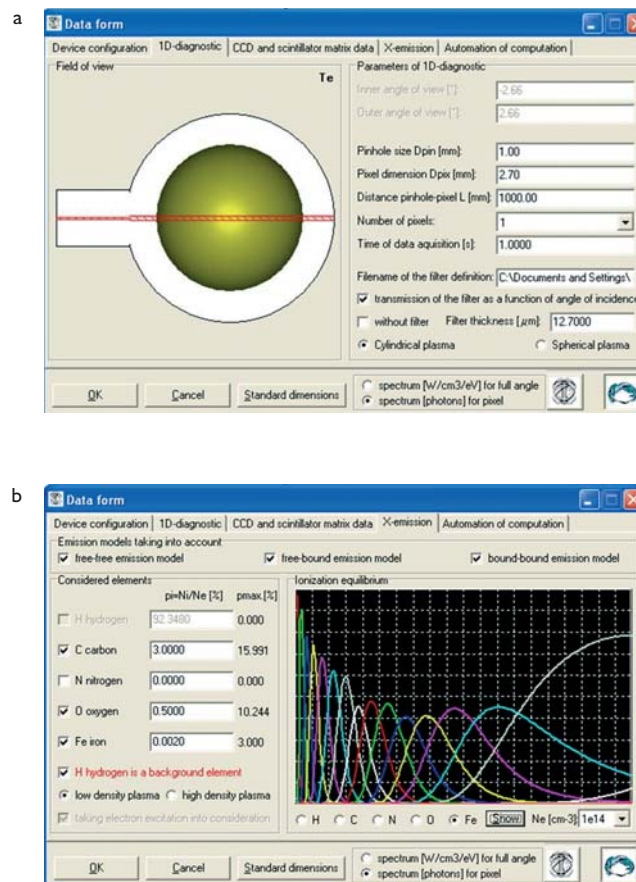
A stellarator is a device used to confine a hot plasma with magnetic fields in order to sustain a controlled nuclear fusion reaction. Unlike tokamak, it does not require a toroidal current (this current, which is induced in plasma is one of the methods of heating plasma in tokamaks). In the stellarator, the magnetic field cage is formed by a single coil system. For a fusion power plant, the stellarators could provide a technically simpler solution than tokamaks that can be experimentally confirmed on Wendelstein 7-X which is now under construction in Greifswald.

The main goal of this project is to develop two soft X-ray diagnostics on W7-X. First one is a pulse height analysis (PHA) diagnostic system which is planned to obtain the shape of X-ray spectrum by measurement of the energy carried by individual quanta (the height of a pulse measured is proportional to this energy). The intensity of radiation must be low enough to assure that the condition

pulsów z chłodzonego detektora półprzewodnikowego pracującego w reżimie zliczania kwantów (z ang. *pulse height analysis method* - PHA), druga diagnostyka to układ wielokanałowy z zastosowaniem matryc detektorów półprzewodnikowych (z ang. *multi-foil spectrometry* - MFS), w którym wykorzystywane są różne filtry krawędziowe, co umożliwi obserwację widma promieniowania rentgenowskiego w szerokim zakresie spektralnym.

W celu zaprojektowania obu diagnostyk w IFPiLM został opracowany specjalny kod komputerowy, nazwany RayX, który produkuje widma energetyczne w zakresie do 20 keV. Kod ten uwzględnia geometrię diagnostyki, tzn. położenie detektorów i szczelin względem sznura plazmowego, parametry plazmy, tzn. rozkład gęstości i temperatury elektronowej oraz skład plazmy (plazma wodorowa, której głównymi zanieczyszczeniami są węgiel, tlen i żelazo).

Wyniki symulacji pozwoliły na zaprojektowanie diagnostyki PHA, bazującej na 3 detektorach typu SDD (Silicon Drift Detector) i szczelinach o regulowanej szerokości, co jest niezbędne w tym przypadku ze względu na ograniczoną ilość fotonów docierających do detektora. Diagnostyka MFS będzie składała się z 8-miu matryc, po 5 detektorów w każdej.



Rys. 5 - a i b Przykładowy interfejs programu RayX

Exemplary interface of the RayX

Źródło IFPiLM

at which the electrical signals from the individual quanta do not overlap (no “pile-up” effect) in the electronics following the detector. The second diagnostic is a multi-foil temperature analysis system (MFS) which is a method destined to obtain the shape of the X-ray spectrum from the data recorded with the use of different semiconductor detectors. In this method the spectrum is determined by measurements of the total X-ray emission (as the effect of an interaction of many quanta) in some different ranges of energy, which are determined by the type and thickness of filters and the thickness of detectors. The MFS method is characterised by the lower spectral resolution in comparison with the PHA system.

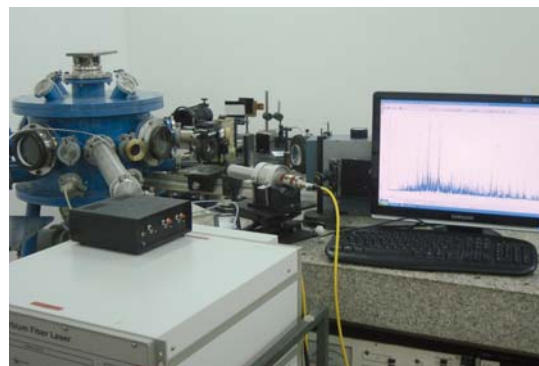
For designing these two diagnostic systems a numerical code for evaluation of X-ray emission from stellarator plasma, named RayX has been developed. The code simulates the composition of ionization stages for some important elements (C, Fe, O) and the intensity of free-free, free-bound and bound-bound radiation. Basing on the assumption about the configuration of the detection system and the amount of impurities, the code predicts the response of the 1-D imaging system for a given plasma density and temperature spatial profiles.

The results of simulations for predicted plasma scenarios, different diagnostic geometry, different kinds of detectors and thickness of applied filters were used in designing the diagnostic systems. The PHA system diagnostic will be based on 3 SDD (Silicon Drift Detector) detectors viewing the central plasma with a changeable slits to assure flexibility of the system. The MFS system will be based on 8 arrays of detectors, each one operating in different energy range (determined by the use of different transmission filters). Each array will contain 5 detectors. Each detector will observe the same region of the plasma.

BADANIA SKUTKÓW ODDZIAŁYWAŃ PLAZMA-ŚCIANA Z WYKORZYSTANIEM TECHNIK LASEROWYCH

Od momentu przystąpienia do wspólnoty EURATOM w Oddziale Plazmy Laserowej IPPLM prowadzone są badania nad oddziaływaniami plazmy ze ścianą komory w reaktorach termojądrowego typu tokamaka. Badania te mają na celu usuwanie zawierającego paliwo (czyli deuter i tryt) kodepozytu ze ścian reaktora oraz charakteryzację przebiegu tego procesu i jego produktów za pomocą diagnostyk optycznych oraz jonowych. Prace prowadzone są przy wykorzystaniu 3.5 nanosekundowego lasera repetytywnego Nd:YAG o energii impulsu do 0.6 J, impulsowego lasera światłowodowego o energii i długości impulsu odpowiednio 1 mJ i 100 ns oraz mocy średniej do 100W, spektrometru MECHELLE 5000 z kamerą ISTAR oraz kolektorów i analizatora jonów. Część badanych próbek dostarczają tokamaki (TEXTOR, AUG), w których były one poddane działaniu plazmy, ale są i takie, które pochodzą bezpośrednio od producentów, którzy wytwarzają na nich tzw. skalibrowane warstwy o zadanych parametrach. Próbkę umieszczane są w komorze próżniowej na sterowanym zewnątrz stanowisku przesuwu. Eksperymenty prowadzone są w warunkach próżniowych oraz w obecności wybranych gazów o różnym ciśnieniu we współpracy z CIEMAT w Hiszpanii. Powierzchnie oczyszczone za pomocą promieniowania laserowego w IPPLM są następnie badane w laboratoriach współpracujących z instytutem, takich jak FZ Juelich w Niemczech oraz Alfvén Lab w Szwecji.

W bieżącym roku sprzęt eksperymentalny został uzupełniony szybką kamerą CCD pozwalającą na obserwację procesów generacji pyłu, które są ważne nie tylko podczas laserowego usuwania warstw ko depozytowych, lecz również podczas



Rys. 6 - Widok stanowiska pomiarowego
Photo of the experiment
Źródło IPPLM

PLASMA WALL INTERACTION RESEARCH WITH THE HELP OF LASER TECHNIQUES

The investigation of plasma wall interaction phenomena at the Division of Laser Plasma (DLP) of the IPPLM has been started very shortly after the establishment of collaboration between EURATOM and IPPLM. The investigation has been focused on development and optimization of the laser removal of co-deposits and fuel (deuterium and tritium) from plasma facing materials and components together with development of the diagnostic methods for this process by the means of optical and ionic measures. The works has been conducted with the use of a 3.5 nanosecond repetitive Nd:YAG laser system with the pulse energy up to 0.6 mJ, high power pulse Yb:fiber laser with 1 mJ in 100 ns pulses and average power of 100W, Mechelle 5000 spectrometer with ISTAR camera, electrostatic ion energy analyzer and a set of various ion collectors. Some of the samples for investigation have been provided by real tokamaks (TEXTOR, AUG) where they were subjected to plasma operation and the others have come from specialized manufacturers that produce so called "calibrated layers" which contain a detailed chemical composition. In the experiments the samples have been mounted inside the vacuum chamber on the remotely controlled motion stage. The experiments are conducted in vacuum conditions as well as in ambient of various gasses of given pressure (in collaboration with CIEMAT, Spain). The cleaned surfaces have been investigated by the means of material research in collaborating units such as FZ Juelich, Germany or Alfvén Lab., Sweden.

In the last year the set-up has been enriched by an application of a fast, high resolution CCD camera for the observation of dust generation processes. This application is impor-

kontaktu plazmy ze ścianami urządzenia w czasie pracy reaktora. Do tej pory w IFPiLM nie można było obserwować pyłów w momencie ich tworzenia podczas oddziaływania lasera z próbkami, były one jedynie zbierane za pomocą różnych kolektorów i badane metodami post-mortem we współpracujących laboratoriach.

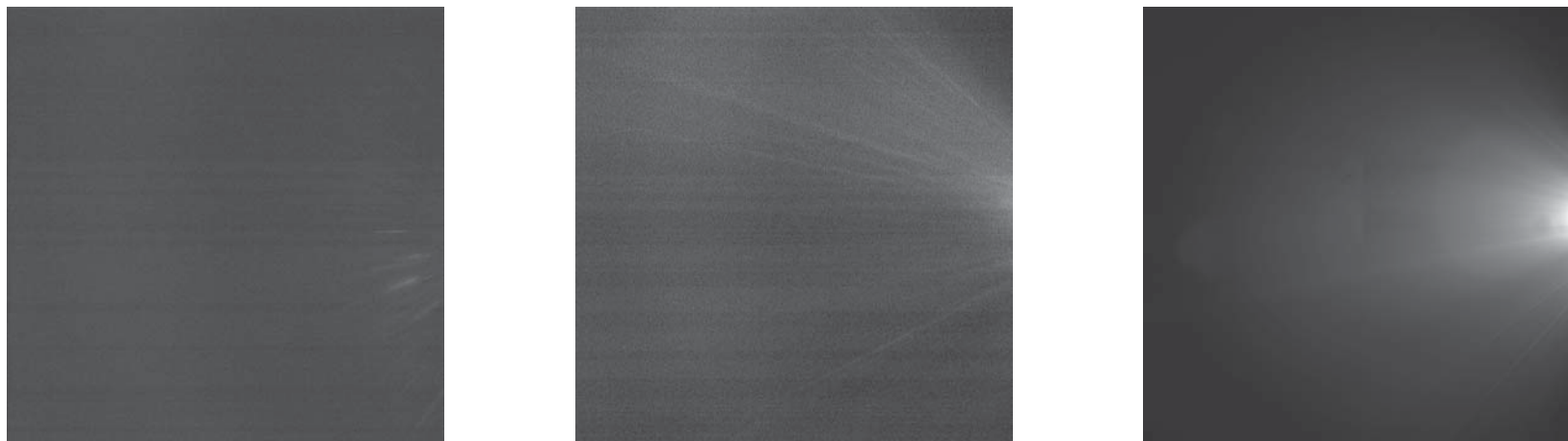
Na początku roku 2011 zaplanowano zainstalowanie stanowiska profilometrycznego, które pozwoli na charakteryzację kraterów powstałych na skutek oddziaływania laserowego. Będzie to dalszy krok w kierunku doskonalenia opracowywanych metod.

Z wyników otrzymanych w naszych eksperymentach korzystają organizacje EFDA, JET, F4E i ITER.

tant not only for investigation of laser induced phenomena but also for observation of dust originating from the impact of plasma on the wall of the thermonuclear devices. Up till the last year (2009) the dust samples had merely been collected with the use of various collectors and they were later sent to collaborators for post-mortem analyses.

However, as the installation of a profilometry stage has been scheduled at the beginning of 2011 this new equipment will allow a detailed characterization of laser-induced craters which will result in further development and optimization of the methods applied in DLP.

The results of the experiments have been appreciated and widely used by EFDA, JET, F4E and ITER.



Rys. 7 - Obraz wytwarzanych laserowo pyłów uzyskanych za pomocą szybkiej kamery

Image of dust taken by the fast camera

Źródło IFPiLM

BADANIA PLAZMY GENEROWANEJ
W UKŁADACH TYPU „PLASMA FOCUS”

RESEARCH IN PLASMA GENERATED
IN PLASMA FOCUS DEVICES

Badania gęstej namagnesowanej plazmy (Dense Magnetised Plasma) w układach typu Plasma-Focus prowadzone były w Wojskowej Akademii Technicznej od 1972 roku, jeszcze przed powstaniem Instytutu. W latach 1973–1976, najpierw w WAT, a później w IPPLM tworzony był zespół naukowy składający się głównie z młodych absolwentów WAT, stopniowo rozwijana baza materialna przyszłego zakładu Plasma-Focus oraz prowadzone pierwsze prace badawcze. W momencie utworzenia IPPLM zakład Plasma-Focus dysponował już dwoma nowoczesnymi generatorami plazmy typu Plasma-Focus: PF-20 (energia baterii 20 kJ) oraz PF-150 (nominalna energia baterii 150 kJ) wyprodukowanymi w Instytucie Badań Jądrowych (obecnie Instytut Problemów Jądrowych) przez zespół pod kierownictwem dr A. Jerzykiewicza. Zakład PF dysponował też pierwszymi układami diagnostycznymi zbudowanymi od podstaw przez członków zespołu jak również pierwszymi doświadczeniami w prowadzeniu prac badawczych.

Lata 1976–1987 to okres intensywnego rozwoju potencjału badawczego zakładu Plasma-Focus. Dzięki budowie nowoczesnych diagnostyk oraz rosnącemu potencjałowi intelektualnemu zespołu prowadzono w tym okresie szereg nowatorskich badań zjawisk występujących w gęstej namagnetyzowanej plazmie. Pozwoliły one zdobyć Instytutowi wysoką pozycję w międzynarodowej społeczności zajmującej się tego typu badaniami mimo silnej w tym okresie konkurencji renomowanych zespołów zagranicznych.

Jednym z wielu przykładów sukcesu badań prowadzonych w tamtym okresie było zbudowanie cztero-kadrowego interferometru laserowego (wykorzystującego zbudowany także przez zespół nanosekundowy laser rubinowy) pozwalającego rejestrować interferogramy o niespotykanej wysokiej jakości, a na ich podstawie uzyskiwać rozkłady przestrzenne gęstości plazmy. Wykorzystując to znakomite narzędzie opracowano precyzyjną sekwencję zjawisk występujących w kolejnych fazach wyładowania plazmowego w układach PF-150 i PF-360 (w IPJ, Świerk) oraz zbadano związki między dynamiką plazmy a intensywnością emisji neutronów z tzw. pinchu.

Kontynuując przedstawione powyżej badania, pod koniec lat osiemdziesiątych układ interferometru rozbudowany został o możliwość pomiaru skręcenia płaszczyzny polaryzacji wiązki laserowej uzyskując w ten sposób (po raz pierwszy w świecie) możliwość jednoczesnego wyznaczenia rozkładów przestrzennych gęstości plazmy oraz rozkładów pola magnetycznego w „pinchu”. Ważnym, naukowym efektem zastosowania tego zaawansowanego systemu diagnostycznego było stwierdzenie istotnego z teoretycznego punktu widzenia zjawiska przepływu prądu w stosunkowo wąskiej warstwie w pobliżu

The research into dense magnetised plasma in Plasma-Focus devices had been carried out at the Military University of Technology (WAT) from 1972, before the establishment of the IPPLM institute. In the years 1973–1976, first in WAT, later in the IPPLM a group of researchers was gradually created from a young scientists of WAT, the material base of the future Plasma Focus Division was gradually developed and the first research was carried out. At the moment of establishing the IPPLM institute the Plasma Focus Division had already owned two modern Plasma-Focus generators: PF-20 (condensed bank energy 20 kJ) and PF-150 (condenser bank energy 150 kJ) that had been produced in the Institute of Nuclear Research (now the Institute of Nuclear Studies) under the supervision of Dr A. Jerzykiewicz. The Plasma Focus Division possessed the first diagnostic systems as well. It had been built from scrapes by the staff, who had already carried out the first research.

The period 1976–1987 was the period of intensive research capability growth of the Plasma Focus Division. Due to the construction of modern diagnostics and growing of intellectual capacity a number of new research projects in dense magnetized plasma was introduced. They resulted in the high position of the institute in the international fusion community in spite of the high level of competition abroad.

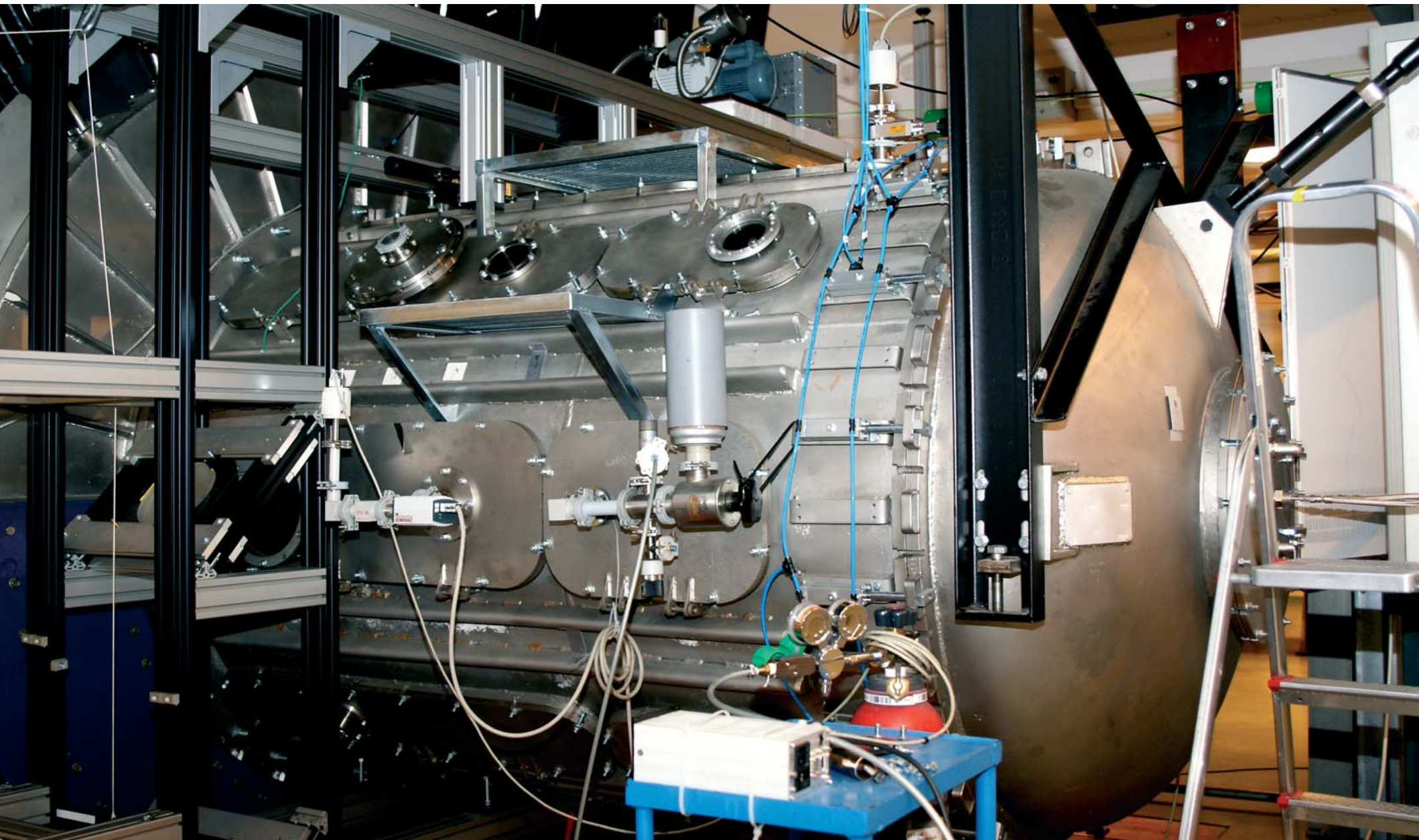
One of many achievements from that time was a construction of the 4-frame laser interferometer that contained nanoseconds laser. It allowed registering high quality interferograms used for estimation of radial and axial density distribution. With the help of that excellent tool, it was possible to work out the precise sequences of phenomena in consecutive phases of plasma shots in PF-150 and PF-360 (in SINS, Świerk) and analyze the relationship between plasma dynamics and intensity of neutron emission from a pinch.

In order to continue the above mentioned research, at the end of eighties the interferometer set-up was developed so as it can measure Faraday rotation of a laser beam. Thus, it became possible to determine simultaneously distribution of plasma density and magnetic field in the pinch (for the first time ever). A very important scientific result was achieved after implementing advanced diagnostics. It was a confirmation of electric current in a quite narrow layer close to the surface of the plasma column. Further development of the diagnostic system by using ultrafast

Rys. 1 - Urządzenie Plazma Fokus PF-1000 do badania reakcji fuzji jądrowej

Plasma Focus device PF-1000 for fusion research

Źródło IFPiLM

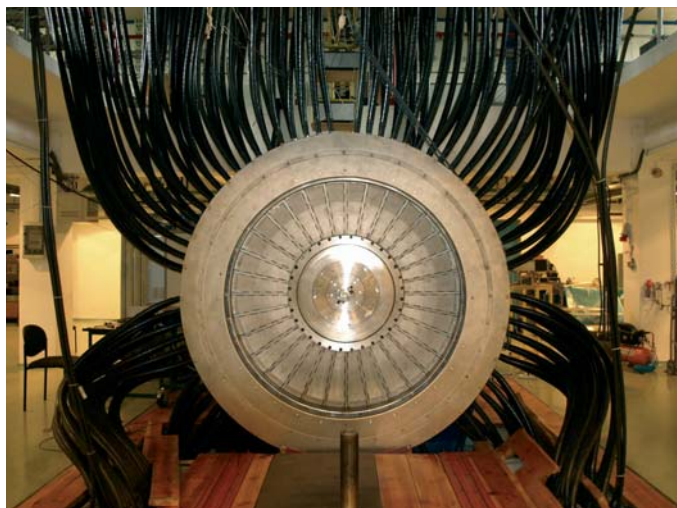


powierzchni kolumny plazmowej. Dalsza rozbudowa systemu diagnostycznego poprzez zastosowanie ultraszybkich kamer kadrowych o czasie ekspozycji 1 ns, rejestrujących obrazy plazmy w świetle widzialnym, pozwoliła uzyskiwać w tym samym momencie (z dokładnością do 0.5 ns) rozkłady gęstości plazmy, pola magnetycznego oraz temperatury elektronowej.

Równolegle z opisanymi powyżej pracami badawczymi, prowadzonymi na układach PF-20 oraz PF-150 trwała, rozpoczęta w 1977, budowa jednego z największych w świecie generatorów plazmy typu Plasma-Focus, nazwanego PF1000, o energii gromadzonej w baterii kondensatorów do 1 MJ. Budowa tego generatora, ukończona została w 1992 roku tuż przed zmianą statusu Instytutu z wojskowego na cywilny.

Oddanie do użytku układu PF-1000 (rys. 1) umożliwiło w nowej sytuacji organizacyjnej Instytutu powołanie międzynarodowego centrum badawczego o nazwie International Center for Dense Magnetised Plasmas (ICDMP) działającego pod auspicjami UNESCO. Po wizycie w Polsce Sekretarza Generalnego UNESCO w 1998 roku utworzono ICDMP oraz fundację, której celem jest zdobywanie środków finansowych na działalność Centrum. W badaniach prowadzonych w ramach ICDMP brało udział ponad stu naukowców z kilkunastu krajów (Rep. Czeska, Egipt, Estonia, Francja, Gruzja, Mauretania, Niemcy, Rosja, Singapur, Ukraina, Wielka Brytania, Włochy).

Głównym urządzeniem badawczym ICDMP jest zmodernizowany układ Plasma-Focus PF-1000 wyposażony w unikalny kompleks diagnostyczny, w którego skład wchodzi między innymi: unikalny szesnasto-kadrowy interferometr laserowy, ultraszybkie kadrowe kamery



Rys. 2 - Układ PF-1000
Układ PF-1000
Źródło IFPILM

frame cameras with time exposure of 1 ns made it possible to estimate distribution of density, magnetic field and electron temperature at the same time (with accuracy of 0.5 ns).

Paralleled to the above described research carried out on PF-20 and PF-150, another similar but much bigger, one of the biggest in the world, Plasma Focus generator PF1000 was being built. Its amount of energy storage in its capacitors reaching 1 MJ. The construction started in 1977 and finished in 1992, well-timed with the change of a status of the institute, from military to non-military one.

Putting PF-1000 into service and reorganization of the institute structure opened a door for creating the International Center for Dense Magnetised Plasmas (ICDMP) under the auspicious of UNESCO. As a result of the UNESCO General Secretary visit in Poland in 1998, the ICDMP and a foundation was established. The aim of the latter is fund raising for the Center activities. Over a hundred scientists from more than ten countries (Czech Republic, Egypt, Estonia, France, Georgia, Mauritania, Germany, Russia, Singapore, Ukraine, United Kingdom, Italy) participated in the research in the frame of ICDMP.

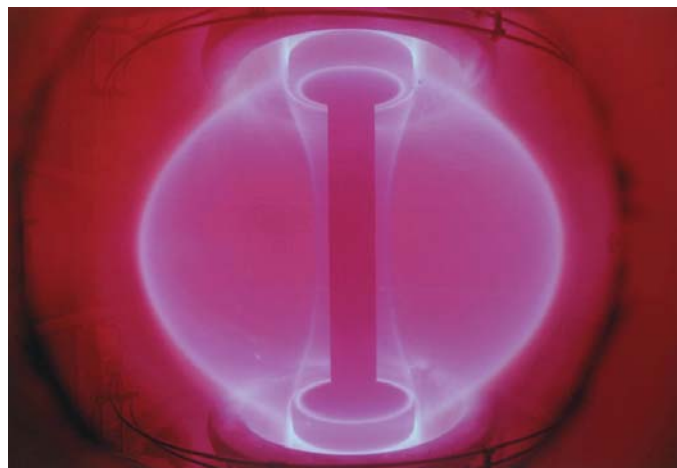
The main research device of the ICDMP is modernized Plasma-Focus, PF-1000, equipped with unique diagnostic system, that includes unique 16-frame laser interferometer, ultrafast frame cameras to register soft X-rays, mobile Faraday cages for nanoseconds neutron pulses in different distances from the pinch - including Micro-channel Plate scintillator within 1 ns time resolution.

w rejestrujące promieniowanie w zakresie miękkiego promieniowania X, mobilne zestawy do rejestracji nanosekundowych impulsów neutronowych w różnych odległościach (bazach przelotu neutronów) od „pinchu” (w tym układy ze scyntylatorem typu Microchannel Plate o czasowej zdolności rozdzielczej < 1 ns).

W latach 1998–2010 kompleks PF-1000 wykorzystywany był do realizacji różnych programów i projektów międzynarodowych, w tym czterech projektów Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) oraz trzech projektów Komisji Europejskiej (w programach ramowych FP-5 i FP-6). W programach tych zespół zakładu Plasma-Focus uczestniczył w realizacji projektu objętego programem INCO-Copernicus, koordynował badania prowadzone na układzie PF-1000 przez międzynarodowe zespoły w ramach projektów Centre of Excellence i Transnational Access to Major European Facilities (FP-6).

W 2006 roku laboratorium Plasma-Focus PF-1000 jako pierwsze w Polsce uzyskało status jednego z głównych europejskich urządzeń badawczych w ramach FP-6, a w latach 2006–2010 Komisja Europejska finansowała badania prowadzone z wykorzystaniem kompleksu Plasma-Focus PF-1000 przez 24 międzynarodowe zespoły naukowców z krajów UE.

W tym samym czasie Plasma-Focus PF-1000 był intensywnie wykorzystywany jako źródło neutronów oraz promieniowania X do testowania diagnostyk dla tokamaka JET oraz stellaratora Wendelstein-7X w ramach międzynarodowego programu EURATOM.



Rys. 3 - Plazma w tokamaku Start
Start plasma
Źródło EFDA

In 1998–2010, PF-1000 system was used in various international programmes and projects including four projects from International Atomic Energy Agency (IAEA) and three projects from the European Commission (Framework Programmes FP-5, FP-6). To mention only a few of them: the INCO-Copernicus project, the Centre of Excellence and Transnational Access to Major European Facilities (in the FP-6).

In 2006, Plasma-Focus PF-1000 division as the first laboratory in Poland received a status of one of the main European research facility in the frame of FP-6. In 2006–2010, the European Commission financially supported the research carried out on Plasma-Focus PF-1000 by 24 international teams from European Union.

At the same time PF-1000 was being extensively used as a neutron and X-ray source in diagnostics for tokamak JET and stellarator Wendelstein-7X in the EURATOM programme.

MODELOWANIE ZJAWISK W UKŁADACH TYPU Z-PINCH

MODELLING OF Z-PINCH DISCHARGES

Modelowanie komputerowe wspomaga eksperyment i pomaga wyjaśnić zachodzące w nim procesy fizyczne. Jest ono szczególnie ważne w fizyce plazmy i badaniach nad kontrolowaną syntezą termojądrową. Projektowanie dużych układów eksperymentalnych nie byłoby możliwe bez zaawansowanego modelowania komputerowego.

W Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Oddziale Plazmy w Polu Magnetycznym opracowano różne modele komputerowe do analizy prowadzonych eksperymentów na układach typu Plasma Focus (PF). Modelowanie dynamiki plazmy na tych urządzeniach jest poważnym wyzwaniem ze względu na duży zakres zmian parametrów oraz konieczność dwuwymiarowego opisu zjawisk. Opisujący główną fazę zjawiska układ równań magneto hydrodynamiki MHD jest układem silnie nieliniowym i wymaga stosowania specjalnych metod numerycznych do których potrzebne są duże moce obliczeniowe. W Instytucie opracowano dwa kody numeryczne MHD (metoda Eulera i metoda cząstek swobodnych). Ich wyniki wykazały dużą zgodność z eksperymentem w zakresie podstawowych mierzonych parametrów - prędkości i kształtu warstwy prądowej oraz zmian prądu. Symulacje pozwoliły ocenić parametry, które trudno jest mierzyć, takie jak temperatura plazmy, czy profile pola magnetycznego. Kod w którym stosowana jest bezsiatkowa metoda cząstek swobodnych jest stale udoskonalany. Za jego pomocą modelowana jest dynamika wyładowań w układzie PF-1000.

Dla celów projektowania i optymalizacji układów Plasma Focus opracowano prostsze kody oparte na modelu „pługa śnieżnego”. Dzięki nim można szybko ocenić wpływ parametrów geometrycznych układu elektrod, ciśnienia gazu roboczego w komorze oraz parametrów baterii na przebieg podstawowych parametrów wyładowania, na prędkość warstwy prądowej i przebieg prądu. Dzięki tym symulacjom zoptymalizowano układy PF-20 i PF-150.

Modelowano także ważną dla przebiegu zjawiska PF początkową fazę wyładowania tzw. przebicia, w tym jonizację gazu roboczego w pobliżu izolatora i powstawania kanału prądowego. Dla opisu tej fazy zjawiska stosowano przybliżenie dwupłynowe z uwzględnieniem jonizacji w polu elektrycznym. Obliczenia te pozwoliły określić optymalne rozmiary izolatora, przy których można uniknąć pasożytniczych kanałów wyładowania.

Computer modelling supports the very experiment and helps to explain phenomena that occur in this experiment. It is especially important in plasma physics and fusion research. All the work with designing big experimental facilities would not be possible without advanced computer modelling.

Various computer methodology to analyse experiments carried out on Plasma Focus PF device has been worked out in the Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion in the Division of Magnetised Plasma. Plasma dynamics modelling in plasma focus like devices is a big challenge regarding a wide range of possible parameters changes and the necessity of two-dimensional description of the phenomena.

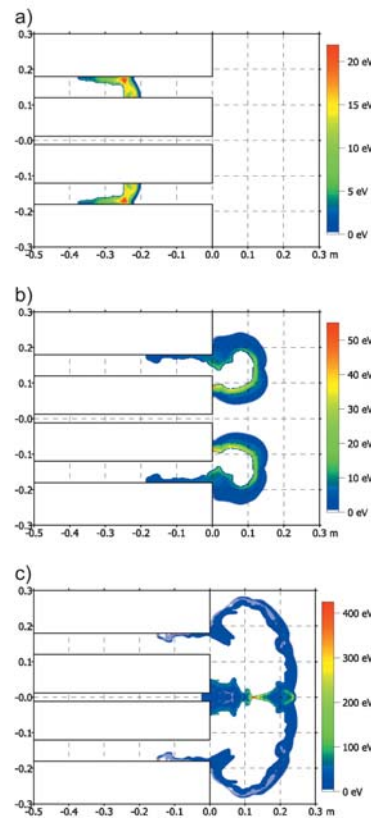
The system of magnetohydrodynamics (MHD) equations that describes the main phase of the phenomena is strongly non-linear and demands application of complicated codes that requires high computing powers. In the IPPLM, two numerical codes have been developed in which the Euler method and the free point method are used. The results showed high accordance with the experiment as regards basic parameters measured - current sheath velocity, shape as well as current changes. Simulations allowed assessing the parameters that are difficult to be measured such as plasma temperature and magnetic field profile. The code based on the meshless free point method is continuously developed. This code helps modelling the PF-1000 discharge dynamics.

For purposes to design and optimise Plasma Focus devices, simpler codes like the snow-plough model have been worked out. With its help it is possible to estimate the influence of electrodes geometry, gas pressure in the chamber and condenser bank parameters on the changes of basic discharge parameters like the current sheath velocity and the current. Thanks to those simulations the system PF-20 and PF-150 have been optimised.

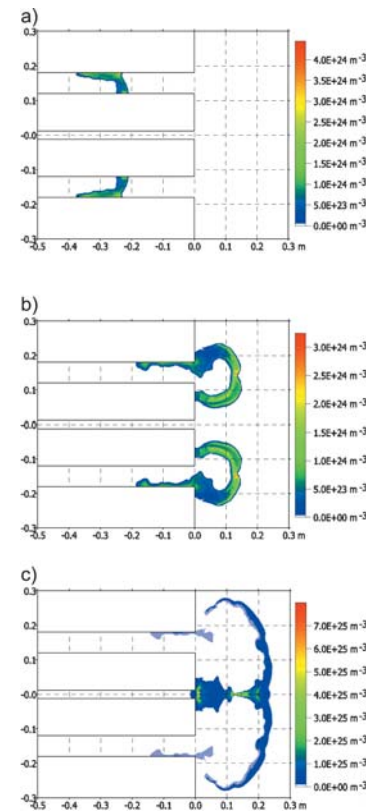
The first phase of discharge in Plasma Focus so called breakdown has also been analysed and modelled. The model includes gas ionization close to isolator and current channel formation. To describe this phase of the phenomena two-fluid model with the ionization process in electrical field has been used. The calculation allowed estimation of the optimal size of isolator so as to avoid parasitic discharge channels.

W ramach współpracy z Instytutem Fizyki AN Rosji (FIAN) modelowano dynamikę silnie zjonizowanej i promieniującej plazmy wytwarzanej w eksperymentach z eksplodującymi drucikami i w układach X-pinch (skrzyżowane przewodniki). Model fizyczny (tzw. model RMHD) oprócz efektów magneto hydrodynamicznych uwzględnia niestacjonarną jonizację termiczną i transport promieniowania w przybliżeniu dyfuzyjnym. Wykorzystuje on w ostatniej wersji zmodyfikowaną niejawną wersję metody cząstek swobodnych. Za jego pomocą symulowano różne eksperymenty prowadzone w FIAN oraz na Uniwersytecie Cornell w Stanach Zjednoczonych.

Przeprowadzono też symulację propagacji fali zapłonu termojądrowego w kanale Z-pinch. W modelu uwzględniono kinetykę reakcji termojądrowych w mieszaninie DT o zmiennej zawartości trytu. Przyjęto opis transportu cząstek alfa w przybliżeniu dyfuzyjnym. Symulacje pokazały interesujące efekty niesymetrycznej propagacji fali „spalania” termojądrowego.



Rys. 1 - Rozkład temperatury elektronicznej dla czasu: a) $t = 4 \mu s$; b) $t = 9 \mu s$; c) $t = 10 \mu s$
Contours of electron temperature: a) for $t = 4 \mu s$; b) for $t = 9 \mu s$; c) for $t = 10 \mu s$
Źródło IFPiLM



Rys. 2 - Rozkład gęstości dla czasu: a) $t = 4 \mu s$; b) $t = 9 \mu s$; c) $t = 10 \mu s$
Contours of number density profiles: a) for $t = 4 \mu s$; b) for $t = 9 \mu s$; c) for $t = 10 \mu s$
Źródło IFPiLM

In cooperation with the (Lebedev) Physics Institute AN (FIAN) in Russia the team from IFPiLM undertook modelling dynamics of highly ionized and strongly radiating plasma generated in experiments with exploding wires and X-pinch system (crossed fine wires). Physical model (so called RMHD model) apart from magnetohydrodynamic effects also includes non-stationary thermal ionization and radiation transport in diffusion approximation. In its last version it takes advantage of modified implicit version of free point method. With the help of this code some experiments in FIAN and in the Cornell University in the USA have been simulated

Simulations of the propagation of the thermonuclear burn wave in Z-pinch channel has also been carried out. Kinetics of the thermonuclear reactions in DT mixture with changeable amount of T has also been included in this model. Description of alpha particle transport in diffusion approximation has been assumed. The simulations have shown interesting effects of non-symmetric propagation of thermonuclear burn wave.

BUDOWA I ZASTOSOWANIA UKŁADÓW DO GENERACJI
IMPULSÓW PRĄDOWYCH WIELKIEJ MOCY.
LABORATORIUM SYMULOWANYCH WYŁADOWAŃ ATMOSFERYCZNYCH

PULSED POWER SYSTEMS: CONSTRUCTING AND IMPLEMENTING.
LIGHTNING TEST LABORATORY

Prace związane z badaniami dotyczącymi wykorzystania układów elektrycznych wytwarzających impulsy elektryczne wielkiej mocy w IFPiLM podjęto w latach osiemdziesiątych dwudziestego wieku. W roku 1986 uruchomiono największy układ OMEGA-6 o parametrach: napięcie - do 800 kV, prąd - do 100 kA, czas trwania impulsu - 20 ns i moc - do 100 GW. Na początku lat dziewięćdziesiątych przekształcenia struktury Instytutu oraz rezygnacja z programu badawczego związanego z wykorzystaniem intensywnych wiązek elektronów i jonów dla celów syntezy termojądrowej spowodowało zamknięcie tego kierunku.

Podstawowym układem uruchomionym w latach dziewięćdziesiątych i eksploatowanym do dziś jest układ PF-1000 pozwalający na uzyskanie impulsów prądowych rzędu kilku milionów amperów, co pozwala na prowadzenie eksperymentów w obszarze badania plazmy o parametrach termojądrowych. Na rysunku 1 przedstawiono widok ogólny wybranych zespołów.

W IFPiLM w 1994 roku zostało zorganizowane Laboratorium Symulowanych Wyładowań Atmosferycznych (Lightning Test Laboratory). Podstawowy zakres badań to weryfikacja poziomu odporności statków powietrznych i ich wyposażenia oraz innych urządzeń np. OPGW (Optical Grounding Wire) na skutki wyładowania piorunowego w zakresie oddziaływania silnoprądowych impulsów symulujących wyładowania atmosferyczne.



Rys. 1 - Samolot Sky-truck podczas testów pośrednich
The plane Sky-truck during the test
Źródło IFPiLM

The work connected with high power electric generators was started in the eighties of the twentieth century. In 1986, the biggest OMEGA-6 system was put into operation. Its parameters were: voltage up to 800 kV, current - up to 100 kA, impulse time - 20 ns and power - up to 100 GW. At the beginning of the nineties that direction of research was abandoned due to the changes of the infrastructure and policy of the institute (giving up the research with intense electron and ion beams in thermonuclear fusion).

In nineties, the basic infrastructure component PF-1000 started its work and it is still in operation now. It allows performing experiments with thermonuclear plasma. In the picture you can see the overview of the components that are used in the experiments.

Lightning Test Laboratory was established at the Institute of Plasma Physics in 1994 to test susceptibility airplanes and other flying objects to heavy current impulses that simulate natural lightning strokes.

Wyposażenie laboratorium umożliwia przeprowadzenie:

- badania skutków bezpośrednich wyładowań piorunowych,
- wyznaczenie wartości indukowanych sygnałów (napięć i prądów) w wybranych urządzeniach i obwodach badanego obiektu,
- potwierdzenie poziomu odporności na narażenia indukowane wyładowaniem atmosferycznym dla wyposażenia statków powietrznych, w oparciu o procedury opisane w normie EUROCAE ED-14C/RTCA DO-160D rozdział 22.

Laboratorium posiada akredytację PCA Nr AB 107 w wyżej opisanym zakresie badań.

Zestaw generatorów prądowych do badania skutków wyładowania piorunowego przedstawiono na rysunku 2.

Układ ten umożliwia wytwarzanie sekwencji impulsów prądowych (A+B+C) lub (D+B+C).

The laboratory has completed the equipment required to:

- Test the fuselage with directly applied lightning current.
- Determine induced voltage and current at selected subcomponents and circuits within the object under test.
- Confirm an assumed vulnerability-level of flying objects and their equipment to transients induced by lightning stroke, according to EUROCAE ED-14C/RTCA DO-160D Standard, chapter 22.

The laboratory has been accredited by PCA, and awarded a certificate number #AB 107 to perform these tests and investigations.

Generator of heavy -current impulses set up to simulate the direct lightning stroke is presented in Fig. 2.

An impulse current, which contains A+B+C, or D+B+C components required to simulate the natural lightning, can be produced by a proper choice of the generator components and their switching sequence.



Rys. 2 - Podstawowe generatory wykorzystywane podczas testów „direct” – a) składowej „A” i „D”, b) składowej „B”, c) składowej „C”, w d) podczas testów „indirect” – składowa „A” i „H”
Basic generators during 'direct' test - a) components 'A' and 'D', b) component 'B', c) component 'C', w d) during 'indirect' test – components 'A' and 'H'

Źródło IFPiLM

BADANIA PLAZMY WYTWARZANEJ LASEREM
I LASEROWEJ FUZJI TERMOJĄDROWEJ

STUDY OF LASER-PRODUCED PLASMA
AND LASER FUSION

BADANIA I ZASTOSOWANIA ODDZIAŁYWAŃ LASER-MATERIA PRZY MAŁYCH INTENSYWNOŚCIACH LASERA

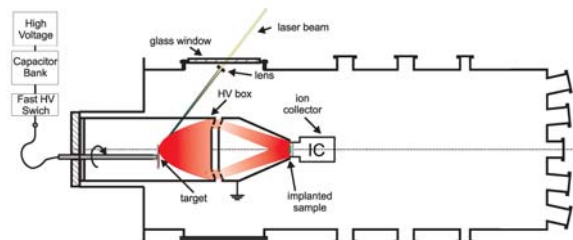
Oddział Plamy Laserowej w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy we współpracy z innymi zespołami realizuje badania fizyki plazmy laserowej oraz badania i zastosowania oddziaływań laser-materia (włączając optymalizację syntezy z inercyjnym utrzymaniem plazmy – ICF). Badania oddziaływań laser-materia przy bardzo dużych intensywnościach w części dotyczącej ICF w ramach projektu HiPER, badania hydrodynamiki strumieni plazmy („jetów”) i napędzania makrocząstek impulsem laserowym oraz zastosowania lasera małej mocy do usuwania tzw. kodepozytu z elementów tokamaka są opisane w innych paragrafach. W tym paragrafie przedstawiono prace dotyczące optymalizacji laserowego źródła jonów dla modyfikacji własności materiałów, w szczególności dla technologii implantacji jonów. Ważnymi zaletami laserowego źródła jonów są: stabilność pracy, możliwość selekcji jonów, implantowanie jonów w sposób zaprogramowany i łatwość budowy zautomatyzowanego implantatora jonów.

Zespół z IFPiLM opracował oryginalną, nowatorską metodę wytwarzania nanokryształów w materiałach półprzewodnikowych stosując implantację jonową z użyciem laserowego źródła jonów. W badaniach tej metody wykorzystywano repetytywny laser neodymowy, próżniową komorę plazmową i diagnostyki jonowe (kolektory jonów i elektrostatyczny analizator energii jonów (Rys. 1 i 2). Zarówno przygotowanie jak i optymalizacja tego zestawu napotykały różne techniczne utrudnienia. Szczególne problemy stwarzały: depozycja na powierzchni próbki drobin i atomów z tarczy naświetlanej laserem oraz konstrukcja

STUDY AND APPLICATIONS OF LASER-MATTER INTERACTION AT LOW LASER INTENSITIES

The research programme on laser-matter interaction, laser-plasma physics and application (including inertial confinement fusion research - ICF) has been accomplished at the Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion by the Division of Laser Plasma (DLP) in collaboration with foreign teams. Some of these studies are described in separate Sections: 1) laser-matter interaction at ultra high laser intensities related partially to ICF within HiPER project, 2) hydrodynamics of laser-driven plasma jets and microparticle acceleration and also 3) laser-induced codeposit removal from tokamak in-vessel components. This Section presents the work on optimisation of laser-ion source (LIS) for modification of surface properties – in particular for ion implantation technology. The very important LIS advantages, having been applied in the IPPLM are as follows: reliability, ion species selection, implanting multiple ions in a programmable sequence, and integrated laser micromachining.

What is worth emphasising is that the IPPLM group has developed a unique, new technique of laser-induced ion implantation into semiconductor materials for fabrication of nanocrystals. The repetitive Neodymium glass laser system, vacuum interaction chamber, the ion diagnostic devices (ion charge collectors and an electrostatic ion energy analyser) are used for measurements (Figs. 1 and 2). The preparation and optimisation of this method encountered various technical difficulties. Among others, there had been serious problems with a deposition on the sample surface, the debris and neutrals evaporated from



Rys. 1 - Schemat zestawu eksperymentalnego dla laserowej implantacji jonów z elektrostatycznym układem przyspieszającym i ogniskującym strumień jonów
Scheme of the experimental arrangement prepared for implantation of laser-produced ions with the system accelerating and focusing these ions
Źródło IFPiLM

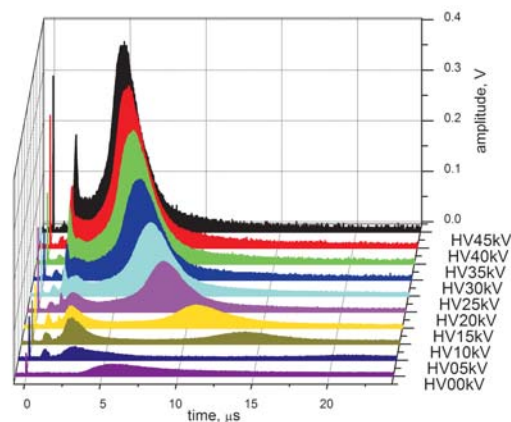


Rys. 2 - Fotografia zestawu eksperymentalnego
Photography of the experimental arrangement
Źródło IFPiLM

efektywnego systemu dla dodatkowego przyspieszania jonów. Trudności te zostały rozwiązane w wyniku zastosowania oryginalnego systemu dla przyspieszania (Rys. 3) i odchylenia strumienia jonów z selekcją jonów przewidzianych do implantacji realizowaną za pomocą napięcia bramkującego. System ten umożliwia kontrolę parametrów strumienia jonów w szerokim zakresie energii i gęstości prądu jonów.

Badania własności próbek przygotowanych w IFPiLM wykonywane są w Środkowo-Wschodnim Uniwersytecie Technologicznym (METU) w Ankarze oraz w Uniwersytecie w Messynie. Przy tego typu eksperymentach wykorzystuje się różnorodne metody stosowane w badaniach materiałowych (metody: PL, spektrometria Ramana i XPS) próbek bezpośrednio po implantacji i próbek po wygrzewaniu w różnych temperaturach (Rys. 4). Badania te są realizowane dla próbek implantowanych jonami laserowymi bez dodatkowego przyspieszania jak również dla próbek implantowanych jonami przyspieszonymi bramkowanym polem elektrycznym. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów potwierdziły możliwość stosowania jonów produkowanych laserem jako nową technologię przy modyfikowaniu materiałów półprzewodnikowych i do produkcji nanokryształów.

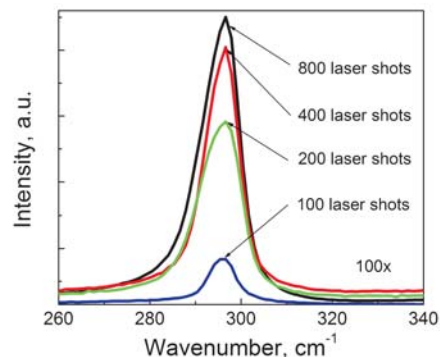
W Oddziale Plazmy Laserowej modernizowane są układy diagnostyczne do badania własności plazmy laserowej, w szczególności diagnostyki promieniowania X i jonów emitowanych z plazmy. Zmodernizowany trzy-kadrowy interferometr dla pomiarów rozkładów koncentracji plazmy jest stosowany do badań opisanych w Sekcji dotyczącej badań generowanych laserem strumieni plazmowych i laserowej akceleracji folii.



Rys. 3 - Sygnały jonowe zarejestrowane dla wzrastających potencjałów przyspieszających w zakresie od 0 do 45 kV. Wraz z napięciem wzrasta liczba i prędkość jonów
Ion collector signals recorded for different accelerating potentials in the range of 0 – 45 kV.

A number and a velocity of ions increase with increasing potential

Źródło IFPiLM



Rys. 4 - Widma Ramana dla próbek SiO₂ zaimplantowanych germanem (temperatury wygrzewania próbek: 600°C).

Na podstawie kształtów widm oszacowano rozmiary nanokryształów: 5 – 10 nm
Raman spectra for samples of SiO₂ implanted with germanium (annealing temperature: 600°C).
The dimensions of nanocrystals estimated on the basis of shapes of spectra: 5 – 10 nm

Źródło IFPiLM

the laser-irradiated target and construction of an efficient ion acceleration system. They were managed to be solved by an application of the original system for acceleration (Fig. 3) and deflection of ion stream simultaneously with selection of appropriate ions by fast gating the supplied voltage. The usage of such a system enables control of the ion stream parameters in wide ranges of energy and ion current density.

Moreover, investigations of properties of the samples prepared in IPPLM are carried out in Middle-East Technology University in Ankara and in Messina University with the use of different material diagnostic methods (PL and Raman spectra as well as the XPS method) for as-implanted materials and after annealing in different temperatures (Fig. 4). These investigations are performed for samples implanted without ion acceleration and also for samples implanted with ions additionally accelerated in pulsed (gated) electric field. The results of these experiments confirm that the laser-induced ion implantation can be considered as a new technique for modification of semiconductor materials and for nanocrystal formation.

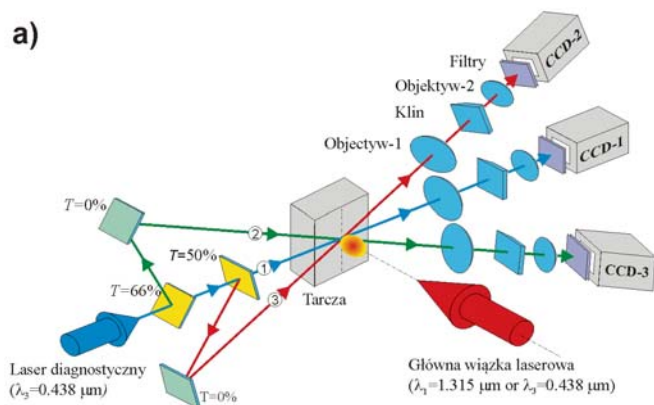
The DLP activity includes also development of advanced diagnostic methods for measurement of X-ray and ion emissions from laser-produced plasmas. A modernised three-frame interferometric system applied for observation of dynamics of the laser-produced plasma jets and laser accelerated thin foils is mentioned in another Section.

BADANIA GENERACJI STRUMIENI PLAZMOWYCH ORAZ NAPĘDZANIA MAKROCZĄSTEK ZA POMOCĄ LASERA PALS W PRADZE (REP. CZESKA)

Badania wytwarzania strumieni plazmowych oraz napędzania makrocząstek za pomocą lasera prowadzone są w laboratorium PALS (Prague Asterix Laser System) w Pradze w ramach projektów LASERLAB i HiPER we współpracy z naukowcami z Czech (Instytut Fizyki Plazmy Czeskiej Akademii Nauk w Pradze), Francji (Centrum Zastosowań Laserów Dużej Mocy w Bordeaux) oraz Rosji (Instytut Fizyki im. Lebedieva w Moskwie). Główną diagnostyką stosowaną w eksperymentach na PALS jest trzy kadrowy układ interferometryczny, pokazany na rys. 1. Wspólne eksperymentalne i teoretyczne badania obejmują wytwarzanie strumieni plazmowych poprzez oddziaływanie rozogniskowanej wiązki lasera PALS z płaską tarczą masywną, formowanie strumieni za pomocą stożkowo ukształtowanych cienkich folii oraz wytwarzanie strumieni za pomocą cylindrycznego przewodzącego kanału. Wytwarzanie strumieni przy użyciu przewodzącego kanału nie wymaga stosowania lasera o wysokiej energii, ponieważ efektywność tej metody zależy od intensywności lasera i parametrów kanału. Wyniki tych badań mogą być wykorzystane zarówno dla realizacji syntezy laserowej (ICF) jak

STUDY OF LASER-DRIVEN PLASMA JETS GENERATION AND MACRO- PARTICLE ACCELERATION USING PALS LASER IN PRAGUE (CZECH REPUBLIC)

The studies of laser-driven plasma jets generation and macroparticle acceleration are carried out at the PALS laboratory in Prague in the framework of LASERLAB and HiPER projects in cooperation with scientists from the Czech Republic (IPP ASCR-Prague), France (CELIAB-Bordeaux) and Russia (Lebedev PI-Moscow). The main diagnostic applied in the PALS experiments is the three-frame interferometric system shown in Fig.1. The common experimental and theoretical studies of plasma jet generation include investigation of the jet production at interaction of a defocused PALS laser beam with a planar massive target, and of the jet formation by using conically shaped thin foils or cylindrical guiding channels. The jet production by using a guiding channel does not necessarily need high laser energy, as the efficiency of jet formation is determined mainly by the laser intensity and channel parameters. The results of these studies can be exploited both for ICF (Inertial Confinement Fusion) and also in astrophysics. The plasma jets generated by a laser beam on a flat massive target make it possible to simulate in a simple way various astrophysical phenomena, such as protostellar jets and



Rys. 1 - Trzy-kadrowy interferometr a) schemat optyczny oraz b) widok układu rejestracji interferometru
 3-frame interferometer a) optical scheme and b) the view of the registration system of the interferometer

Źródło IFPILM

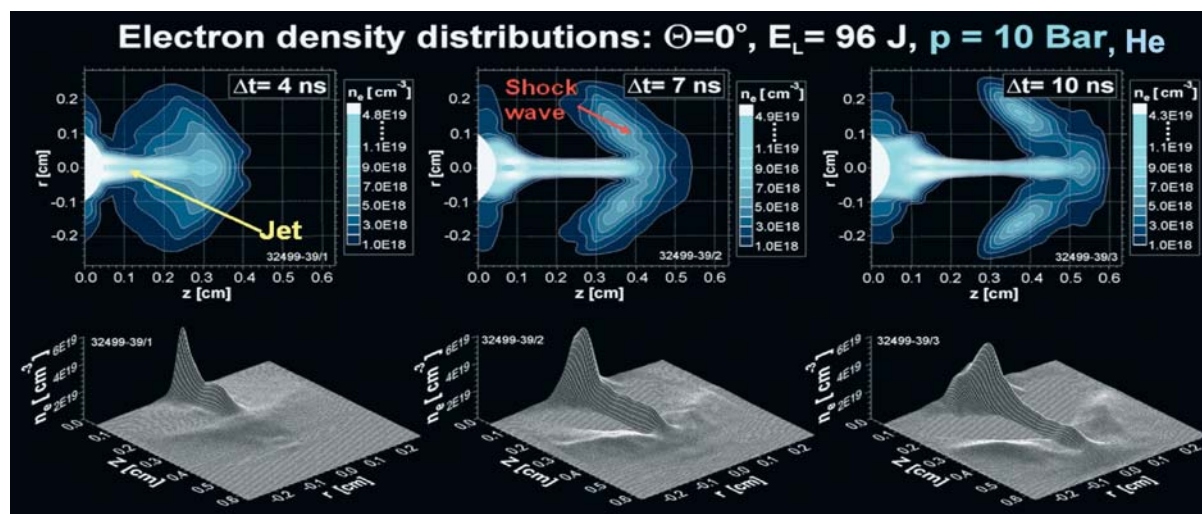
również w astrofizyce. Strumienie plazmowe wytwarzane wiązką laserową z płaskich tarcz masywnych stwarzają możliwości prostego symulowania różnych zjawisk astrofizycznych takich jak protogwiazdy (protostellars) czyli strumieni plazmowych w kosmosie i ich oddziaływań z otaczającym gazem międzygwiazdowym. Przykład takich laboratoryjnych symulacji wykonanych na PALS jest pokazany na rys. 2.

W ostatnich eksperymentach na PALS realizowanych przez zespół z IFPiLM badane i testowane są nowe metody ablacyjno-ciśnieniowego laserowego napędzania cienkich folii oraz formowania strumieni plazmowych, a mianowicie: Reverse Acceleration Scheme (RAS) Cavity Pressure Acceleration Scheme (CPAS) oraz Laser Induced Cavity Pressure Acceleration scheme (LICPA). W odróżnieniu od klasycznego, ablacyjnego sposobu napędzania makrocząstki w tych metodach do przyspieszania cienkich folii wykorzystywane jest wysokie ciśnienie plazmy ablacyjnej, co umożliwiając nowe wyrafinowane konstrukcje tarcz podwójnych.

their interaction with ambient interstellar gas. An example of such a laboratory simulation performed at PALS is shown in Fig. 2.

In the recent experiments at PALS several new ablation-pressure methods of foil acceleration and plasma jet formation have been developed and tested by the IPPLM team, namely the Reverse Acceleration Scheme (RAS), the Cavity Pressure Acceleration Scheme (CPAS), and the Laser Induced Cavity Pressure Acceleration scheme (LICPA).

For acceleration of thin foils we have designed some unique, sophisticated double laser targets, that made it possible to exploit more efficiently the ablation plasma pressure (the RAS method), which is in contrast to the classical ablation method of macroparticle acceleration.



Rys. 2 - Sekwencja rozkładów koncentracji elektronowej strumienia plazmowego oddziaływującego z otaczającym gazem, symulująca oddziaływanie strumienia plazmowego w kosmosie (protostellar) z materią międzygwiazdową

A sequence of electron density distributions of the plasma jet – ambient gas interaction, which simulates the interaction of protostellar jets with interstellar matter

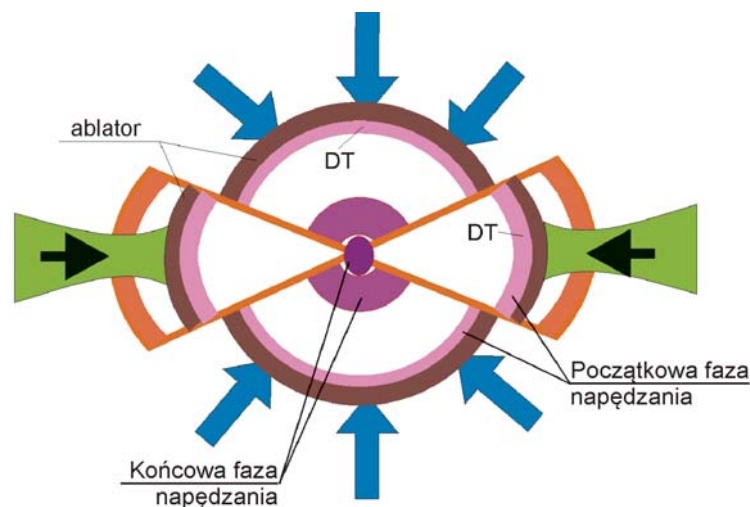
Źródło IFPiLM

W celu polepszenia absorpcji promieniowania laserowego i zwiększenia efektywności akceleracji makrocząstki podwójne tarcze laserowe zostały zmodyfikowane poprzez wyposażenie ich w komory ciśnieniowe (metody CPAS oraz LICPA). Folia jest wtedy przyspieszana zarówno przez plazmę ablacyjną generowaną przez wiązkę laserową wewnątrz komory tarczy, jak i wysokie ciśnienie indukowane wewnątrz komory, co stanowi ważny dodatkowy czynnik akceleracji folii. Taki sposób przyspieszania umożliwia znaczące zwiększenie efektywności konwersji zaabsorbowanej energii lasera w energię kinetyczną folii i prowadzi do wyraźnie lepszych wartości podstawowych parametrów: (i) napędzanej folii w przypadku metody CPAS oraz (ii) strumieni plazmowych wytwarzanych metodą LICPA.

Koncepcja zastosowania metody LICPA do realizacji ICF poprzez szybki zapłon („impact fast ignition”), przedstawiona jest na rys. 3.

In order to further improve absorption of laser radiation and increase the efficiency of macroparticle acceleration the double targets have been modified by providing them with a cavity (the CPAS and LICPA methods). The foil is then accelerated by the ablative plasma generated by the laser beam inside the target cavity, the pressure induced inside the cavity representing an important additional factor of acceleration. Such an accelerating scheme enables to enhance significantly the efficiency of conversion of the absorbed laser energy into the kinetic energy of the flyer target and leads to considerably better values of basic parameters of both the accelerated foil (the CPAS method) and the generated plasma streams (the LICPA method).

The concept of LICPA application at impact ignition ICF is illustrated in Fig. 3.



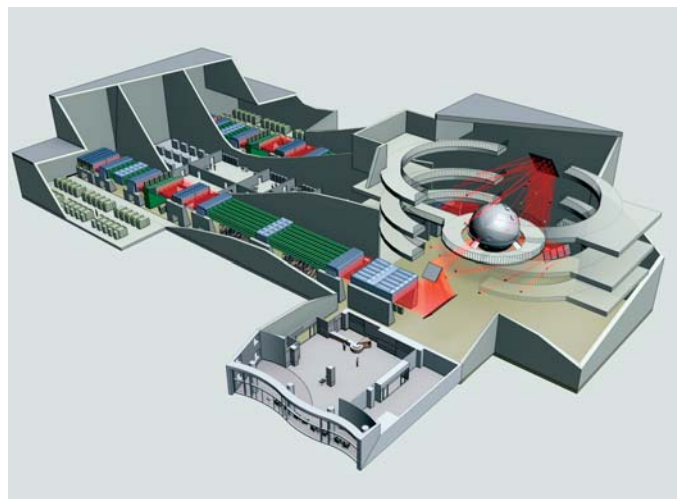
Rys. 3 - Proponowany schemat realizacji ICF poprzez szybki zapłon (impact fast ignition) wykorzystujący metodę LICPA

A plausible scheme of impact ignition fusion using LICPA

Źródło IFPILM

BADANIA W RAMACH EUROPEJSKIEGO PROJEKTU HIPER DOTYCZĄCEGO BUDOWY UKŁADU DLA DEMONSTRACJI EFEKTYWNEJ FUZJI LASEROWEJ

Projekt HiPER (**H**igh **P**ower Laser **E**nergy **R**esearch facility) to ogólnoeuropejskie przedsięwzięcie mające na celu stworzenie ośrodka badań nad laserową fuzją termojądrową z inercyjnym utrzymaniem plazmy. Zadaniem ośrodka ma być eksperymentalne zademonstrowanie możliwości wytwarzania tą metodą znaczących ilości energii. Przyjmuje się, że w odróżnieniu od podejścia przyjętego w niedawno otwartym amerykańskim ośrodku National Ignition Facility podstawowym mechanizmem zapłonu paliwa termojądrowego w układzie HiPER będzie tzw. szybki zapłon. Istotą tego podejścia jest wstępna kompresja kuleczek paliwa termojądrowego przy użyciu wielowiązkowego lasera o impulsie nanosekundowym, a następnie punktowa inicjacja fuzji termojądrowej przy użyciu intensywniej wiązki lasera o impulsie pikosekundowym. Zadaniem układu HiPER będzie przebadanie tego mechanizmu zapłonu i zoptymalizowanie go w takim stopniu, aby można było na nim oprzeć program budowy energetycznego reaktora termojądrowego. Układ HiPER stanowić będzie także unikalne narzędzie do prowadzenia międzynarodowych badań podstawowych nad zjawiskami fizycznymi w warunkach ekstremalnych. Układ HiPER został wpisany w 2006 roku na europejską listę przyszłych wielkich urządzeń badawczych (European Roadmap of Future Research Infrastructures), a w 2008 roku konsorcjum powołane do budowy tego układu uzyskało grant w ramach Siódmego Programu Ramowego Unii Europejskiej. Konsorcjum składa się z 26 instytucji z 9 państw będących członkami UE,



Rys. 1 - Artystyczna wizja przyszłego ośrodka HiPER do badań nad fuzją termojądrową z inercyjnym utrzymaniem plazmy

Artist's view of the future HiPER inertial fusion facility

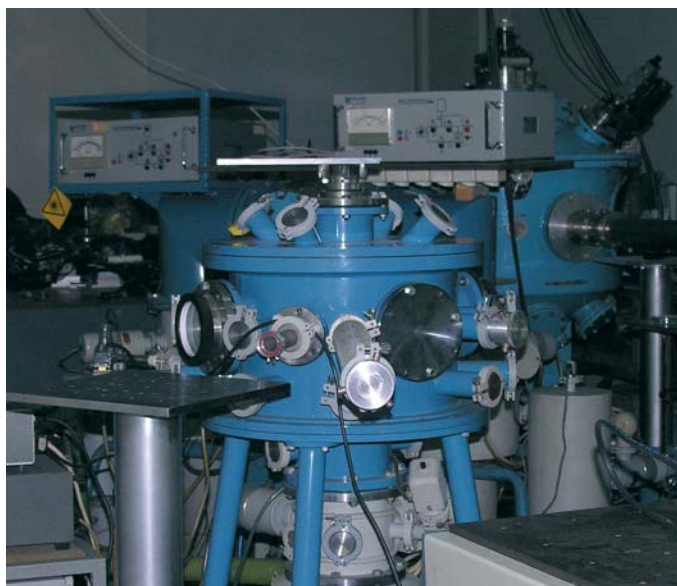
Źródło: HiPER

STUDY WITHIN THE EUROPEAN PROJECT HIPER TO DEMONSTRATE LASER FUSION FEASIBILITY

The HiPER project is an all-European effort to create a **H**igh **P**ower Laser **E**nergy **R**esearch facility designed to demonstrate significant energy production from inertial confinement fusion. In contrast to the National Ignition Facility in the US this facility would be based on the "fast ignition" approach, where a nanosecond laser pulse is used to compress a fuel pellet, which is then locally heated and "ignited" by a picosecond laser pulse. The objective of the HiPER project is to explore and optimize this approach and pave the way for the development of the fusion reactor programme. It would also offer an internationally unique capability in the science of extreme conditions. The HiPER facility was included in the European Roadmap of Future Research Infrastructures in 2006, and in 2008 the HiPER consortium received EU funding within the Seventh Framework Programme. The consortium consists of 26 institutions from 9 EU nations, with the UK's Science and Technology Facilities Council acting as a coordinator. The project is now in a 3-year Preparatory Phase, which would be followed in 2011 by a Technology Development Phase and then a Construction Phase. The HiPER project has already proven to be a big success, providing an excellent platform for collaboration between European states in the domain of high-power laser technology, high-intensity laser-matter interactions, inertial confinement fusion modelling, and science at extreme conditions.

przy czym brytyjska komisja Science and Technology Facilities Council pełni w nim rolę koordynatora. Projekt HiPER jest obecnie w 3-letniej fazie przygotowawczej (Preparatory Phase), która w 2011 przejdzie w fazę prac rozwojowych (Technology Development Phase), po której ma nastąpić budowa układu (Construction Phase). Projekt HiPER już obecnie jest uznawany za bardzo udaną inicjatywę, stał się bowiem doskonałą platformą ogólnoeuropejskiej współpracy w dziedzinie technologii laserów wielkiej mocy, badań nad oddziaływaniem intensywnych impulsów laserowych z materią, modelowania komputerowego fuzji z utrzymaniem inercyjnym, a także badań nad zachowaniem materii w warunkach ekstremalnych.

Instytucją reprezentującą Polskę w projekcie HiPER jest IFPiLM. Instytut uczestniczy w trzech programach objętych tym projektem (tzw. Work Packages): 1) Programie analizy warunków dla zainicjowania fuzji termojądrowej (The Requirements Analysis for Fusion Programme); 2) Programie doświadczalnych badań nad fuzją inercyjną (The Fusion Experimental Programme); 3) Programie badań podstawowych (The Fundamental Science Programme). W ramach pierwszego programu zadaniem IFPiLM jest określenie właściwych parametrów wiązek laserowych oraz optymalnej geometrii tarczy dla schematów zapłonu alternatywnych w stosunku do szybkiego zapłonu za pośrednictwem wiązek elektronów. Głównym kandydatem jest tu tzw. szybki zapłon protonowy, w którym faktyczny impuls inicjujący punktowo fuzję ma postać wiązki protonów wytworzonej w oddziaływaniu impulsu laserowego z tarczą stałą. Takie podejście jest obiecujące, ponieważ laserowo wytworzone wiązki protonów znacznie łatwiej dają się ogniskować i zapewniają lepszy transfer energii do paliwa niż wiązki elektro-



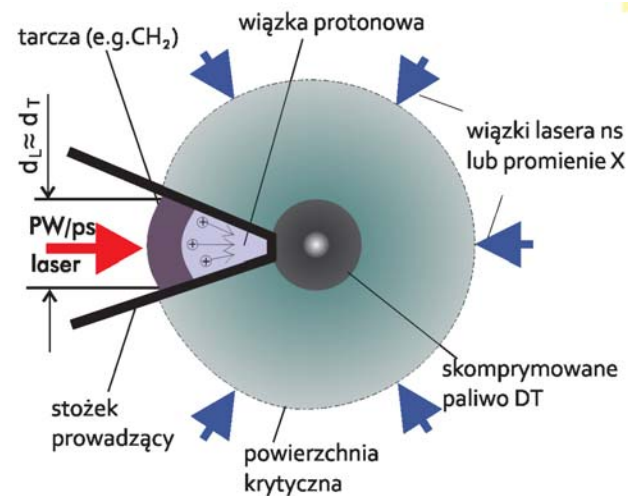
Rys. 2 - Komora doświadczalna w IFPiLM do badań nad laserową akceleracją protonów oraz badań podstawowych
Experimental chamber for laser driven proton acceleration
and fundamental science experiments at IPPLM
Źródło IFPiLM

The Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion is representing Poland in the HiPER project. The IPPLM participates in three programmes within this project (the so called Work Packages): 1) The Requirements Analysis for Fusion Programme; 2) The Fusion Experimental Programme; and 3) The Fundamental Science Programme. Within the Requirements Analysis for Fusion Programme the responsibility of the IPPLM is to define laser parameters and the best target geometry for ignition schemes that might be an alternative to fast ignition via laser generated electron beams.

The main candidate is the proton fast ignition, in which the actual pulse igniting the thermonuclear fuel consists of protons accelerated (via laser interaction) with a solid target. Such an approach is very promising because of a much better beam collimation and the energy deposition in the case of protons, as compared to electrons, but some work is still required to achieve proton beams of the required quality. This work requires a construction of Particle-in-Cell computer codes for simulation of laser driven proton acceleration on various targets, a careful analysis of the parameter space via computer simulations, and theoretical analysis. As an alternative, the so called "shock ignition" mechanism is considered, in which the compressed pellet is ignited by a carefully profiled short pulse of concentric character. The contribution of the IPPLM to the Fusion Experimental Programme is to plan and conduct experiments validating the computer simulation results for alternative ignition schemes, with emphasis on the proton fast ignition and the shock ignition. The IPPLM team has conducted such experiments at PALS Laboratory

nów, choć kwestia wytworzenia wiązek o odpowiednim, bardzo dużym natężeniu wymaga jeszcze dalszych badań. W ramach tego programu tworzone są zaawansowane programy komputerowe do kinetycznych symulacji plazmy w procesie akceleracji protonów przy oddziaływaniu lasera z różnymi tarczami, prowadzone są wielkoskalowe symulacje komputerowe w celu zbadania optymalnych parametrów fizycznych układów stosowanych przy akceleracji, a także analizy teoretyczne. Oprócz zapłonu protonowego rozważa się także tzw. „zapłon udarowy”, polegający na wykorzystaniu jednoczesnego krótkotrwałego impulsu koncentrycznych wiązek laserowych. W ramach programu doświadczeń nad fuzją inercyjną zadaniem IFPiLM jest planowanie i realizacja doświadczeń weryfikujących wyniki uzyskane z symulacji komputerowych dla rozmaitych schematów zapłonu plazmy, z naciskiem na zapłon protonowy i zapłon udarowy. Zespół IFPiLM realizował takie doświadczenia w laboratoriach PALS (Republika Czeska) i LULI (Ecole Polytechnique, Francja) - pełniąc rolę inicjatora i koordynatora prac międzynarodowych zespołów doświadczalnych - a także uczestniczył w doświadczeniu przeprowadzonym w Rutherford Appleton Laboratory (Wielka Brytania). Zadaniem IFPiLM, w ramach programu badań podstawowych jest zidentyfikowanie tych obszarów badań, w których układ HiPER oferuje unikalne możliwości, ze szczególnym uwzględnieniem fizyki jądrowej i astrofizyki laboratoryjnej, a także określenie parametrów układu najlepiej odpowiadających potrzebom takich badań. Prowadzone są w tym celu badania teoretyczne, symulacje komputerowe i szeroko zakrojone analizy literaturowe. Projektuje się także pilotażowe doświadczenia na już istniejących układach laserowych wielkiej mocy.

(Czech Republic) and LULI (Ecole Polytechnique, France) - where it played the role of an initiator and a coordinator of an international experimental effort - and participated in a joint experiment in the Rutherford Appleton Laboratory (UK). The contribution of the IFPiLM to the Fundamental Science Programme is to identify the areas of fundamental research where the HiPER facility would offer unique benefits, with particular emphasis on the nuclear physics and the laboratory astrophysics, and to define the relevant facility specifications necessary to carry the related research. This is done via theoretical analysis, computer simulations and extensive literature searches, as well as planning for exploratory experiments at the existing laser facilities.



Rys. 3 - Schemat koncepcyjny szybkiego zapłonu skompresowanej kuleczki paliwa DT przy użyciu wiązki protonów wytworzonych na skutek oddziaływania pikosekundowego impulsu laserowego z tarczą umieszczoną wewnątrz stożka prowadzącego
Conceptual illustration of the fast ignition of a compressed DT fuel pellet with the proton beam produced by a picosecond laser pulse incident on a curved target placed inside a guiding cone
Źródło IFPiLM

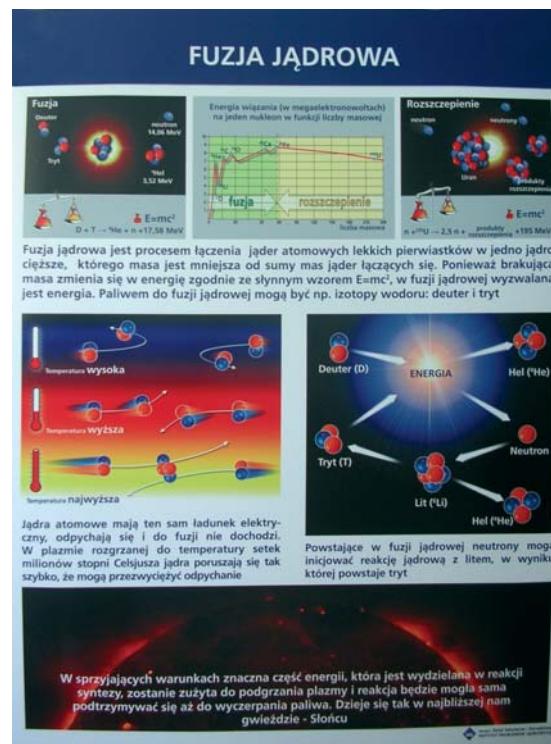
EDUKACJA I INFORMACJA PUBLICZNA

EDUCATION AND PUBLIC INFORMATION

Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy przykłada dużą wagę do edukacji. Wielką troską instytutu jest wprowadzenie wykładów z fizyki plazmy i fuzji jądrowej do polskich uniwersytetów i uczelni wyższych na kierunkach fizyki teoretycznej i stosowanej. W całej Europie naukowcy zajmujący się fizyką plazmy mają świadomość konieczności wykształcenia nowego pokolenia naukowców celem zapewnienia kontynuacji pokoleniowej w badaniach nad fuzją jądrową. Z tą myślą powstał europejski projekt Fusenet, którego zadaniem jest opracowanie spójnego programu edukacji w zakresie fizyki fuzji w Europie na wszystkich etapach edukacji, począwszy od szkół średnich aż po uczelnie wyższe na poziomach: licencjackim, magisterskim oraz doktoranckim. Instytut IPPLM jest jednym z 36 członków-założycieli i jedynym polskim ośrodkiem naukowym uczestniczącym w projekcie. Od momentu powstania, czyli od roku 2008 aktywnie realizuje zadania projektu. Projekt Fusenet działa przy wsparciu Komisji Europejskiej. Strona internetowa projektu: www.fusenet.eu

Jednym z zadań Fusenetu jest organizowanie szkół letnich z zakresu fuzji jądrowej. Polska Asocjacja Euratom-IPPLM razem z Asocjacjami: czeską i węgierską od dziesięciu lat corocznie organizuje tygodniową letnią szkołę z fizyki plazmy i fuzji jądrowej w Kudowie Zdroju. Szkoła przeznaczona jest dla studentów studiów magisterskich i doktoranckich kierunków uniwersyteckich z fizyki oraz kierunków inżynierskich studiów politechnicznych. Wykłady prowadzone są przez wybitnych specjalistów z dziedziny fizyki i technologii plazmy. Tematyka wykładów to przede wszystkim teoretyczne podstawy fuzji jądrowej i fizyki plazmy, magnetyczne i inercyjne utrzymanie plazmy, nowe technologie w służbie energetyki termojądrowej oraz metody diagnostyczne fizyki plazmy. Corocznie szkoła kształci około 40 młodych adeptów nauki z różnych krajów Unii Europejskiej oraz spoza Europy.

Polska Asocjacja IPPLM podjęła szereg działań celem popularyzacji fuzji jądrowej w społeczeństwie, w szczególności



Rys. 1 - Planska z wystawy w IPPLM
A poster from the exposition in IPPLM
Źródło IPPLM

The IPPLM's continuous concern is education. It does its best to introduce education in plasma physics and fusion at physics departments in Polish universities. All fusion community in Europe is aware of the importance of educating new generations of scientists so as to ensure continuation of fusion research in future. Keeping that in mind, a Fusenet project was initiated. Its aim is to elaborate a mutual programme of fusion education in Europe, especially at Universities: Bachelor, Master and PhD levels, but also in High Schools. The IPPLM institute is one of 36 founding members (the only Polish institution that is involved in the project) and from 2008 has actively participated in its programme. Fusenet received a support from the European Committee. The website of the project is www.fusenet.eu

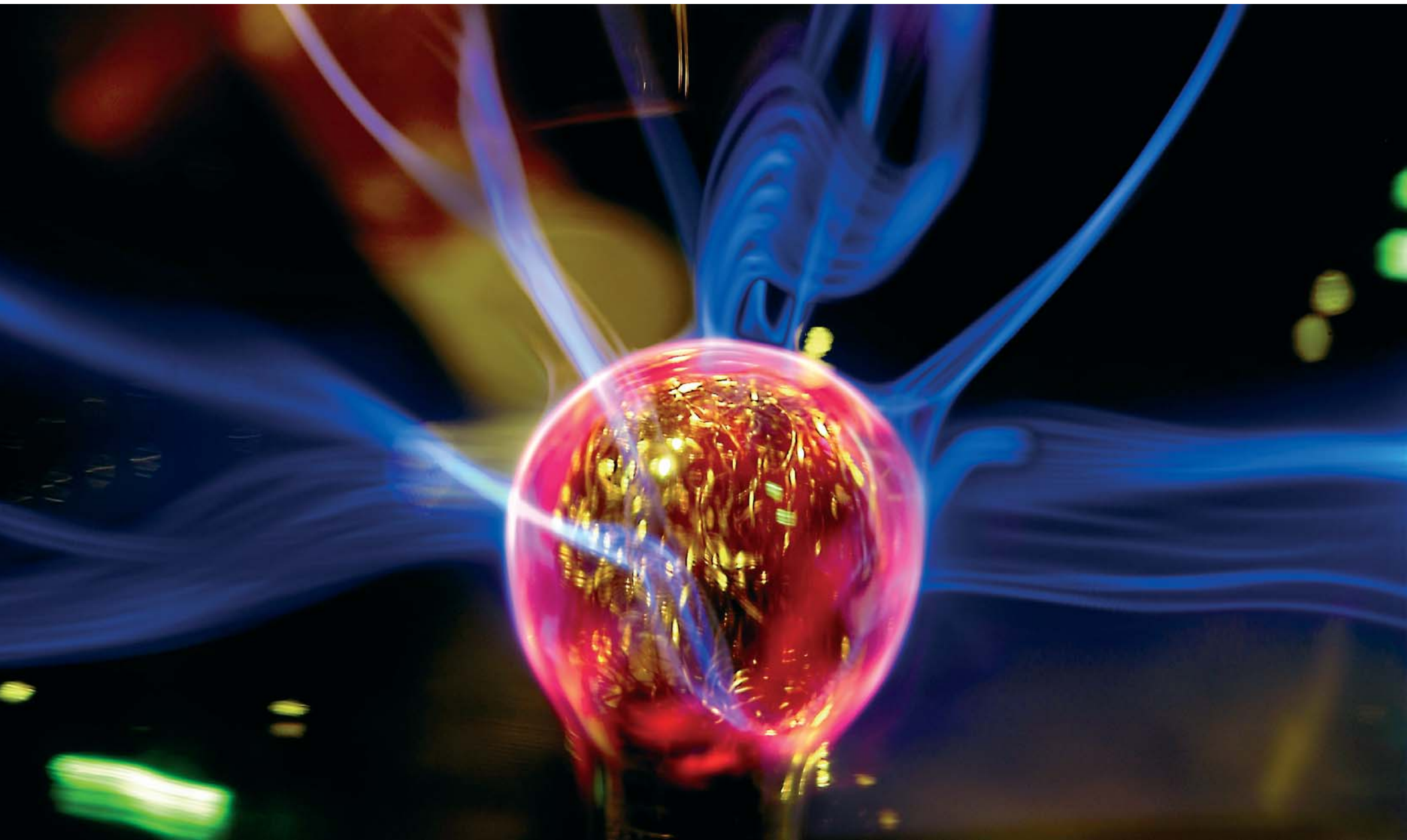
One of the objectives of the Fusenet project is coordinating Fusion Summer Schools. The Polish Euratom-IPPLM Association together with Czech and Hungarian Associations annually organise Kudowa Plasma Physics Summer School. The school weekly programme is dedicated to the students of physics or technology departments at universities, both Master and PhD levels. The lectures are given by world's best specialists in the field. The topics are: Fusion energy, Fusion Technology, Magnetic Confinement, Inertial Confinement, Plasma Diagnostic Techniques. Each year, about forty prospective fusion scientists attend the school. The majority of them come from Europe but there are some from India, Pakistan and other countries.

The Euratom-IPPLM Association has initiated some activities in order to introduce fusion related knowledge in society, especially among young people in Secondary and High Schools. In 2007, a project 'Fusion at school and in society' had been worked out and initiated. It has been carried out for over three years. There are about a hundred science teachers from all over the country, who have direct contact with the researchers from the institute. They created a 'first chain' of a network, and through the contact with other teachers in their regions and

Rys. 2 - Kula plazmowa - eksponat wystawy europejskiej Fusion Expo

Plasma ball - an element of Fusion Expo

Źródło ITER



wśród młodzieży – gimnazjalnej i licealnej. W roku 2007 został opracowany i wdrożony do realizacji projekt pod nazwą „Fuzja w szkole i społeczeństwie” mający na celu współpracę z nauczycielami fizyki i nauk przyrodniczych na terenie całego kraju (jedyne tego rodzaju w Europie). Do projektu należy ponad stu nauczycieli z całego kraju. Nauczyciele ci przekazują informacje innym nauczycielom i uczniom ze swojego regionu. Poprzez taką sprawnie działającą siatkę, naukowcy z instytutu mają możliwość kontaktu (bezpośredniego i pośredniego) z audytorium przekraczającym tysiąc osób. Materiały propagujące fuzję, w języku angielskim z EFDA oraz w języku polskim, które zostały napisane przez naukowców z instytutu lub przetłumaczone, są regularnie, kilka razy w roku, wysyłane do uczestników projektu. Nauczyciele w szkołach przekazują wiedzę z fizyki jądrowej w zakresie dopasowanym do możliwości swoich uczniów. Organizowane są konkursy dla młodzieży – trzyetapowe: szkolne, rejonowe i ogólnokrajowe. Laureaci konkursów rejonowych wraz ze swoimi nauczycielami uczestniczą w corocznym, ogólnopolskim spotkaniu szkoleniowym, na którym mają możliwość poszerzenia wiedzy oraz wizyty w krajowych instytucjach naukowych. W poprzednich latach spotkania takie były organizowane w: IFPiLM (2008), Opatowie Świętokrzyskim (2009), Dobczycach koło Krakowa (2010). W roku 2011 planowane jest zwiedzanie IFPiLM oraz konferencja w Łodzi. Uczniowie-laureaci konkursu ogólnopolskiego wraz ze swoimi nauczycielami, w nagrodę wyjeżdżają na szkolenia do instytutów fizyki plazmy za granicę. Do tej pory odbyły się dwa szkolenia w Oksfordzie (w latach 2009 i 2010), na których 82 uczestników miało okazję wysłuchać wykładów, obejrzeć tokamaki JET i MAST oraz zwiedzić laboratoria naukowo-badawcze na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Oksfordzie oraz w Rutherford Appleton Laboratory. W roku 2011 planowany jest wyjazd około 60 uczniów i nauczycieli do Greifswaldu. Program obejmuje, oprócz wykładów, zwiedzanie Uniwersytetu Maxa Plancka oraz stellaratora Wendelstein 7-X, który jest aktualnie budowany.

Instytut IFPiLM jest współorganizatorem wystawy „Fusion Expo” na terenie Polski. Wystawa została opracowana przez Komisję Europejską i prezentuje program badawczy fuzji jądrowej w Europie i na świecie. Przeznaczona jest dla szerokiego grona odbiorców: dzieci z ostatnich klas szkoły podstawowej, młodzież gimnazjalną i licealną oraz dla całego społeczeństwa. Do tej pory gościła już w 8 największych miastach w Polsce: Gdańsku, Poznaniu, Krakowie, Warszawie, Koszalinie, Szczecinie, Łodzi i Katowicach.

Na uwagę zasługuje duże zaangażowanie naukowców z IFPiLM w przedsięwzięciach promujących naukę i wiedzę. W organizowanych w Warszawie piknikach naukowych tradycyjnie bierze udział grupa z IFPiLM prezentując zainteresowanym zagadnienia związane z fizyką plazmy i fuzją jądrową oraz udostępniając materiały promocyjne.

their students, they spread the information and thus multiply the audience. Fusion materials: brochures, leaflets (in English, from EFDA and in Polish, written by the scientists from the institute or translated from scientific sources) are regularly, few times a year, sent to the participants of the project. The teachers use the materials in their work with students. We organise competition for students at three levels: school, regional and national. The best ones from the regional together with their teachers participate in annual training meeting, where they have opportunities to learn about fusion and visit Polish scientific institutions. In the previous years, the meetings were organised: in the IPPLM institute (2008), in Opatów Świętokrzyski (2009), in Dobczyce (2010) and in 2011 the teachers' meeting is planned in Łódź. The winners of the national competition together with their teachers, as a reward, participate in the training visit in scientific institutes abroad. Up to now, there were two such visits in Oxford (2009 and 2010). The 82 participants had opportunity to listen to lectures, see the tokamaks JET and MAST and visit labs in the Physics Department of Oxford University and in the Rutherford Appleton Laboratory. In 2011, similar visit will be organized to Greifswald in Germany to see the Wendelstein 7-X stellarator, just before being assembled.

The IPPLM coordinates Fusion Expo in Poland. The Expo was designed by the European Committee and presents global and European fusion research. It is dedicated to wide range of audience; from teenagers in Primary School, through Secondary and High School students and also for adults. The European Fusion Expo has already been shown in eight big cities in Poland: Gdańsk, Poznań, Kraków, Warszawa, Koszalin, Szczecin, Łódź and Katowice.

The involvement of the institute researchers in public related activities promoting science is worth mentioning here. Habitually, a group from the IPPLM takes part in scientific picnics in Warsaw distributing materials and presenting issues connected with plasma physics and fusion to the audience.

