

LASER – NARZĘDZIE DO BADAŃ NAUKOWYCH I OPRACOWYWANIA NOWYCH TECHNOLOGII

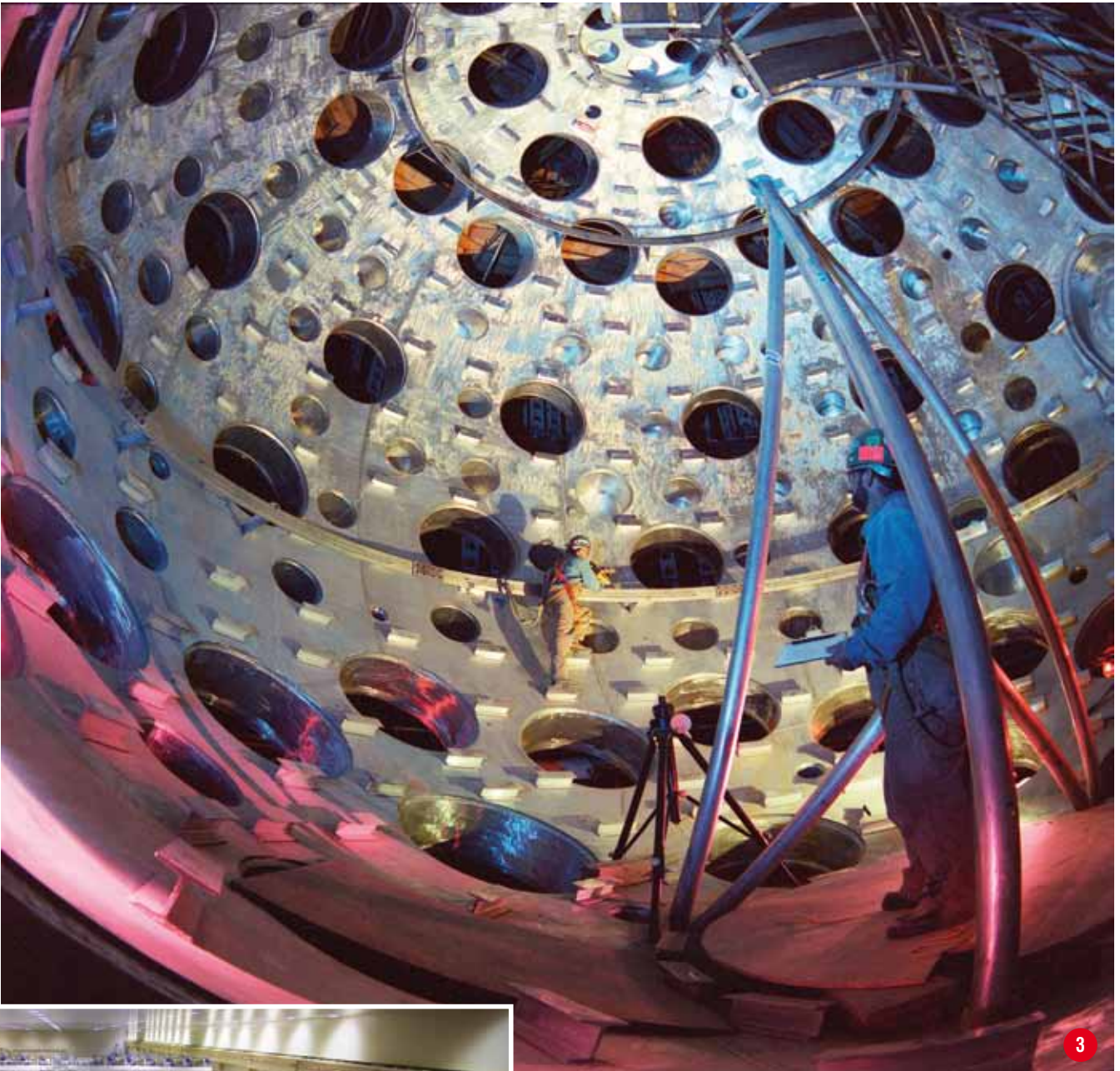
W Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM) w Warszawie prowadzone są od wielu lat badania plazmy wytwarzanej laserem, oddziaływań laserów dużej mocy z materią, w tym badania związane z opanowaniem efektywnej laserowej syntezy (fuzji) termojądrowej, która ma być w przyszłości źródłem taniej i bezpiecznej energii.

Opracowywane są również zastosowania laserów do modyfikacji materiałów, w tym materiałów stosowanych w technologii układów termojądrowych typu tokamak. Większość badań laserowo-plazmowych realizowanych w IFPiLM jest wykonywana we współpracy z ośrodkami europejskimi w ramach projektów wspieranych przez Unię Europejską. Instytut jest najważniejszą w Polsce jednostką badawczą zajmującą się badaniami gorącej plazmy i fuzji termojądrowej.

Opanowanie kontrolowanej syntezy termojądrowej ma doprowadzić do uzyskania nowego, praktycznie niewyczerpalnego źródła energii bezpiecznego dla ludności i środowiska. Jest to obecnie jedno z najważniejszych zadań światowej nauki i technologii ze względu na wzrastające potrzeby energetyczne świata i różne wady obecnie wykorzystywanych źródeł energii. Opracowywane są dwa warianty efektywnego opanowania fuzji: z wykorzystaniem magnetycznego utrzymania plazmy w układach

typu tokamak i stellarator (ang. *Magnetic Confinement Fusion – MCF*) i w układach z inercyjnym utrzymaniem plazmy – głównie za pomocą laserów (ang. *Inertial Confinement Fusion – ICF*). Produkcja energii fuzji opiera się na wykorzystaniu energii syntezy jąder izotopów wodoru – deuteru i trytu. Reakcja ta może wydajnie zachodzić w rzadkiej, wysokotemperaturowej plazmie odpowiednio długo utrzymywanej przed rozpadem za pomocą pola magnetycznego, lub w gęstej gorącej i krótko żyjącej plazmie generowanej laserem. Deuter znajduje się w dużych ilościach w wodzie, a tryt uzyskuje się z reakcji neutronów z litem – pierwiastkiem szeroko rozpowszechnionym w skorupie ziemskiej. W przeciwieństwie do klasycznej energetyki jądrowej energetyka termojądrowa nie skutkuje produkcją dużej ilości długożyciowych odpadów radioaktywnych i możliwością katastro-





3



2

1. Widok laboratorium NIF w Narodowym Laboratorium im. Lawrence'a w Livermore (St. Zjedn. Am. Płn.)
NIF image gallery

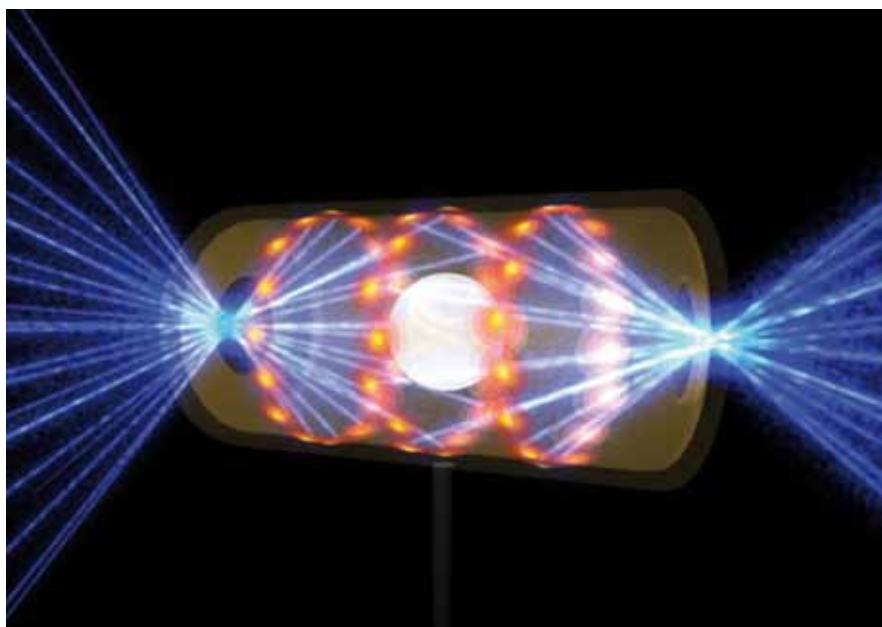
2. Część systemu wielkiego laser NIF w LLNL w Livermore w St. Zjedn. Am. Płn.
NIF image gallery

3. Wnętrze komory eksperymentalnej, w której laser NIF inicjuje fuzję D-T w tarczach sferycznych zawierających mieszaninę deuteru i trytu.
NIF image gallery.

falnego rozprzestrzenienia się materiałów radioaktywnych.

W konwencjonalnej metodzie ICF produkcja energii fuzji następuje w wyniku fuzji jąder deuteru i trytu w plazmie skompresyjowanej do gigantycznych gęstości w centrum mikro obszaru z użyciem lasera wielowiązkowego albo promieniowania X generowanego takim laserem. Energia jest produkowana w ciągu małego ułamka sekundy. Obecnie energia fuzji generowana impulsem największego lasera NIF w St. Zjedn. Am. Płn. jest jeszcze bardzo mała. Niezbędna jest dalsza optymalizacja procesu kompresji laserowej i zbudowanie repetytywnego lasera dużej mocy o dużo większej wydajności energetycznej.

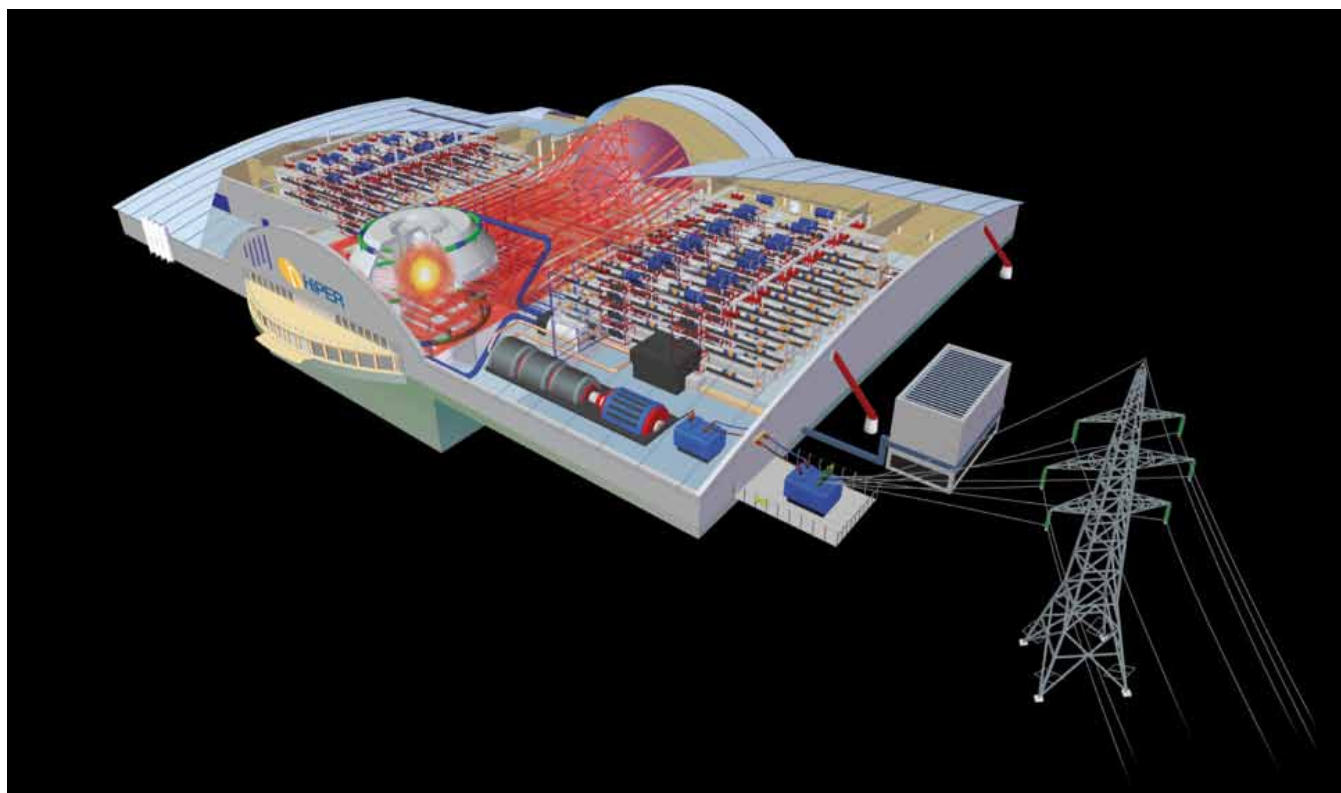
W nowszej metodzie ICF stosowane będą około 10 razy mniejsze lasery



Rys. 4. Widok kapsułki cylindrycznej (hohlraum target), do której wprowadzane są wiązki lasera NIF produkujące miękkie promieniowanie X w oddziaływaniu z wewnętrznymi ściankami tej kapsuły. To promieniowanie powoduje kompresję i fuzję mieszaniny D-T w sferycznej mikrotarczy. NIF image gallery.

nii i w kilku krajach Unii Europejskiej. W UE realizowany jest obecnie program HiPER (ang. *European High Power Laser Energy Research facility*), którego celem jest opracowanie koncepcji fizycznej i konstrukcji technicznej systemu laserowego do sprawdzenia efektywności fuzji laserowej w wersji FI albo SI. Laser HiPER będzie wykorzystywany także do badań w różnych dziedzinach nauki, w medycynie i do przygotowania nowych technologii.

W Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy realizowane są w szerokiej współpracy europejskiej zarówno badania dotyczące plazmy i fuzji jądrowej oraz rozwoju technologii w układach typu tokamak i stellarator (fuzja MCF), jak i prace dotyczące plazmy i fuzji jądrowej w układach z laserami wielkiej mocy (fuzja ICF). W niniejszej pracy przedstawiona będzie syntetycznie działalność IFPiLM w zakresie badań dotyczących plazmy i fuzji laserowej.



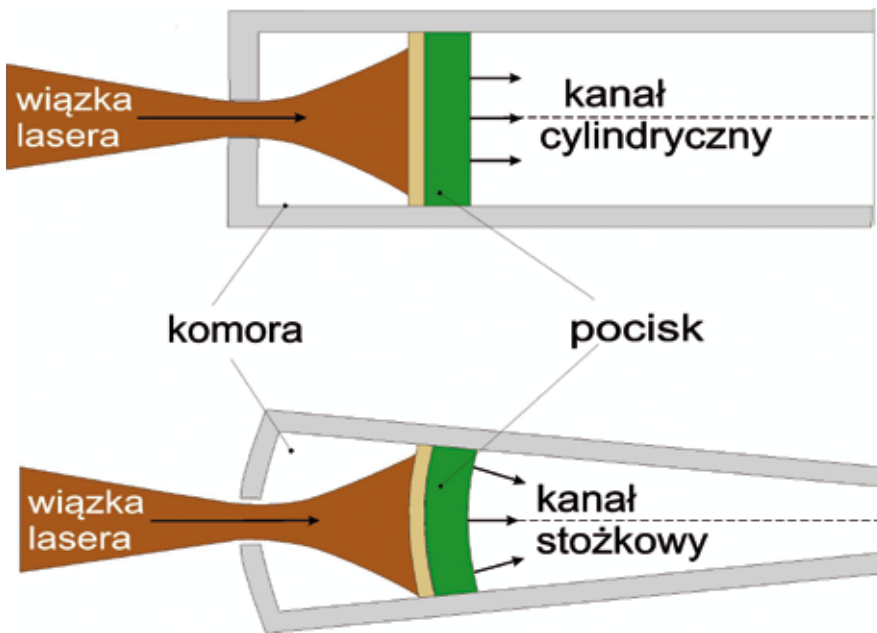
Rys. 5. Schemat projektowanego europejskiego systemu laserowego HiPER do demonstracji efektywności fuzji laserowej w wersji FI albo SI.

do wstępnej kompresji plazmy D-T. Zapłon inicjowany będzie lokalnie impulsem prędkich elektronów lub jonów (ang. *electron/proton fast ignitor – FI*) przyspieszanych dodatkowym, bardzo krótkim, intensywnym impulsem laserowym. Inny nowy wariant ICF zakłada inicjowanie sferycznego zapłonu wstępnie skompresyjowanej plazmy D-T przez dodatkową sfe-

ryczną falę uderzeniową także wzbudzaną dodatkowym intensywnym impulsem laserowym (ang. *shock ignition – SI*). W tych opcjach zyskuje się nie tylko na wielkości lasera, ale także na uproszczeniu procesu kompresji.

Programy dotyczące wykorzystania fuzji laserowej do produkcji energii są realizowane w St. Zjedn. Am. Płn., w Japo-

IFPiLM jako jedyny polski instytut realizuje we współpracy z ośrodkami europejskimi zadania objęte projektem HiPER dotyczące optymalizacji wariantu syntezy laserowej z tzw. protonowym szybkim zapłonem i wariantu fuzji inicjowanej silną falą uderzeniową. W ramach Asocjacji EURATOM-IFPiLM działa 11 ośrodków naukowych realizujących różne projekty



Rys. 6. Konceptcja laserowego akceleratora LICPA w wersji cylindrycznej i stożkowej. Tarcza foliowa jest przyspieszana w wyniku odrzutu wywołanego działaniem lasera i dodatkowo ciśnieniem plazmy laserowej gromadzonej w komorze przed tarczą foliową. Foto IFPiLM

dotyczące fuzji w wersji MCF. W ramach programu Asocjacji EURATOM – IFPiLM dotyczącego fuzji z magnetycznym utrzymanie plazmy (MCF) IFPiLM także, jako jedyny instytut w Polsce, realizował do końca roku 2013 projekt dotyczący fuzji laserowej (ICF). Od 2014 roku projekt ten jest kontynuowany w ramach konsorcjum EUROfusion po reorganizacji programu fuzji MCF w Europie.

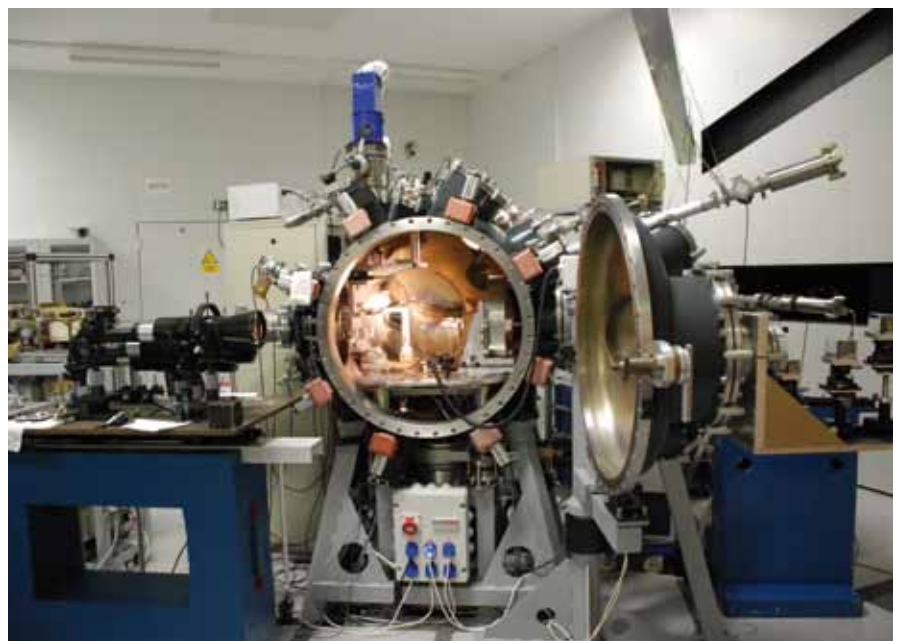
Obok prac bezpośrednio związanych z opanowaniem efektywnej fuzji laserowej, w IFPiLM realizowane są badania oddziaływań laserów dużej mocy z materią dotyczące fizyki plazmy laserowej oraz zastosowania laserów do modyfikacji materiałów, w tym materiałów wykorzystywanych w technologii układów termojądrowych typu tokamak. Większość tych prac jest wykonywana we współpracy z ośrodkami europejskimi w ramach projektów wspieranych przez Unię Europejską, takich jak projekty konsorcjum LaserLab-Europe, Programu Europejskiej Fundacji Nauki (ESF) – COST Actions. Wspólne eksperymenty są realizowane głównie w zagranicznych laboratoriach, przede wszystkim w Ośrodku Badawczym PALS w Pradze (Rep. Czeska).

W ostatnich latach w IFPiLM prowadzono badania oddziaływań laser-materia w ramach wyżej wymienionych projektów, głównie w zakresie: poznawania mechanizmów laserowego przyspieszania jonów i makrocząstek (teoria i eksperymenty) oraz laserowej generacji strumie-

ni plazmowych i ich stosowania do symulacji zjawisk astrofizycznych. W IFPiLM opracowano oryginalną koncepcję laserowej akceleracji jonów i makrocząstek zwaną LICPA (ang. *Laser-Induced Cavity Pressure Acceleration*) znacznie bardziej wydajną od klasycznej metody bezpośredniego przyspieszania laserem oddziaływującym na folię. Nowa metoda została zademonstrowana w kilku eksperymentach wykonanych w O. B. PALS w Pradze w ramach międzynarodowych projektów konsorcjum LaserLab-Europe. Efek-

tywność tej metody potwierdzono także w wyniku symulacji numerycznych. Analizowano też możliwość wykorzystania tej metody w fuzji laserowej w opcji „szybkiego zapłonu”. Badania laserowej generacji strumieni plazmowych wykonano także w ramach projektów LaserLab-Europe w laboratorium w Pradze. Bardzo przydatna okazała się w tych eksperymentach trójkadrowa interferometria stosowana do badania ewolucji strumieni plazmowych. Powyższe badania oddziaływań laser-materia owocują cennymi wynikami potwierdzanymi publikacjami w renomowanych czasopismach naukowych i prezentacjami na ważnych konferencjach międzynarodowych.

W IFPiLM przeprowadzono modernizację Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego. Projekt ten obejmował opracowanie i budowę aparatury do badania plazmy laserowej oraz modernizację pomieszczeń laboratoryjnych. Laboratorium zostało wyposażone w próżniową komorę plazmową oraz w nowoczesne układy do pomiaru parametrów plazmy wytwarzanej laserem wielkiej mocy (10 TW w 40 fs). Zbudowano następujące urządzenia: polaro-interferometr, spektrometr i szybką kamerę do pomiaru promieniowania rentgenowskiego oraz dwa jonowe spektrometry masowe. Laser wielkiej mocy (10 TW w 40 fs) został wcześniej zakupiony z wykorzystaniem funduszy z projektu HiPER i krajowych środków na naukę.



Rys. 7. Stanowisko eksperymentalne przy laserze PALS (Praga, Rep. Czeska) z aparaturą pomiarową przygotowaną w IFPiLM. Foto IFPiLM



Rys. 8. Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy (LLWM). Na pierwszym planie laser 10 TW na drugim – stanowiska eksperymentalne. Fot. IFPiLM

W zmodernizowanym laboratorium prowadzone są badania fizyki oddziaływań lasera wielkiej mocy z różnymi tarczami i badania dotyczące optymalizacji fuzji laserowej – głównie w ramach współpracy międzynarodowej. Z nowej infrastruktury korzystać będą także zespoły zajmujące się zastosowaniami oddziaływań laser-materia do badań w zakresie fizyki relatywistycznej, atomowej i molekularnej, mikrobiologii, medycyny i w innych dziedzinach. Dzięki tej inwestycji powstało nowoczesne laboratorium badawcze umożliwia-

jące, oprócz prowadzenia badań naukowych w różnych dziedzinach z wykorzystaniem lasera wielkiej mocy, rozwój nowoczesnych metod pomiarowych i przygotowywanie kadr naukowych do dalszego rozwoju tych badań.

Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie jest stosunkowo małym ośrodkiem badawczym, ale dzięki dużym osiągnięciom naukowym w ważnym obszarze badawczym dotyczącym oddziaływań laser-materia i fuzji laserowej zajmuje ważne miejsce wśród

polskich jednostek badawczych. W Warszawie instytut współpracuje naukowo w powyższym zakresie badań z Instytutem Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Instytutem Fizyki Politechniki Warszawskiej oraz z Instytutem Optoelektroniki WAT. Współpraca z tymi instytutami dotyczy także kształcenia studentów i doktorantów.

Instytut od lat organizuje lub współorganizuje cyklicznie międzynarodowe konferencje dotyczące badań i zastosowań plazmy (ang. *PLASMA – Research and Applications of Plasmas*), a także organizuje w Kudowie letnie międzynarodowe szkoły dla młodych naukowców dotyczące badań syntezy termojądrowej (ang. *Kudowa Summer School „Towards fusion energy”*). Programy tych spotkań obejmują też badania plazmy i fuzji laserowej.

Ważnym rezultatem działalności Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy jest umocnienie pozycji Polski w obszarze europejskich badań wykorzystujących lasery dużej mocy (także w aspekcie syntezy laserowej). Będzie to sprzyjać włączaniu innych polskich laboratoriów naukowych i specjalistycznych przedsiębiorstw technologicznych do realizacji europejskich programów badań wykorzystujących lasery wielkiej mocy oraz do przygotowania elementów infrastruktury HiPER.

Jerzy Wołowski

ABSTRACT

A many years' research programme on plasma produced by various lasers, accomplished at the Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion (IPPLM) in collaboration with foreign teams, is directed towards studies of laser-produced plasma physics, a high-power laser-matter interaction and study of processes related to laser fusion (inertial confinement fusion ICF). The laser-plasma group in IPPLM participates in international projects, such as consortium Laserlab- Europe, Euratom "keep in touch" activity, ESF projects (e.g. COST actions) and HiPER Project (European High Power laser Energy Research facility). The scope of activity of the IPPLM includes also development and applications of advanced diagnostics for laser-produced plasmas.

A classical laser fusion is realised when a spherical shell of cryogenic deuterium and tritium (DT) ice is spherically imploded by a laser pulse to achieve high central temperatures and high areal densities. Ignition of compressed fuel occurs when the energy of DT fusion energy exceeds all the energy losses. The National Ignition Facility in Livermore Laboratory (USA) is expected to achieve a thermonuclear ignition I near future.

In the so called fast ignition option (FI) the target is firstly compressed to a uniform density. The ignition is initiated by an intense electron or proton stream accelerated by a high power laser pulse laser. The HiPER Project concerns the study and realization, of a high-energy laser facility for demonstration of energy production via laser fusion (fast ignition and shock ignition approaches).

The IPPLM institute represents Poland in the HiPER project participating in studies and optimization of proton fast ignition and shock ignition fusion as well as contributing to the fundamental science programme.

In the frame of Mazovia regional project named "Develop and Modernize High Power Laser Laboratory in IPPLM" the modern scientific equipment was purchased and built. The institute will be capable of intensifying its laser-matter interaction and fusion related research within international projects.

The Institute offers its expertise and know-how in areas, in particular: development of measuring methods and technologies: development and applications of advanced diagnostics methods, laser-induced surface technology and analysis (e.g. LIBS)