

BADANIA TERMOJĄDROWE W POLSCE: CZĘŚĆ 1.

Thermonuclear Research in Poland: part 1.

Andrzej Gałkowski, Monika Kubkowska

Streszczenie: Przedstawiona została panorama badań termojądrowych w Polsce, na tle badań we Wspólnocie EURATOM i na całym świecie. We wstępie przedstawiono genezę tych badań i ich początki. Przedstawiona została rola Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie jako organizatora i koordynatora tych badań oraz reprezentanta Polski w europejskim konsorcjum EUROfusion. Na gruncie krajowym realizatorem programu jest Centrum naukowo-przemysłowe Nowe Technologie Energetyczne (CeNTE), skupiające 16 podmiotów: instytutów badawczych, instytutów PAN, uczelni oraz Wrocławski Park Technologiczny. W drugiej części artykułu zostaną przedstawione dokonania CeNTE będące wkładem Polski do europejskiego i światowego programu opanowania fuzji jądrowej na potrzeby energetyki termojądrowej – jako nowego, wydajnego, bezpiecznego dla społeczeństwa i przyjaznego dla środowiska źródła energii elektrycznej.

Abstract: The authors presented an overview of thermonuclear research in Poland in comparison with the research performed in the EURATOM Community and all over the world. The introduction depicts the origin of these studies and their beginnings. The role of the Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion in Warsaw was presented as the organizer and coordinator of this research and the Polish representative in the European consortium EUROfusion. On the national level, the scientific and industrial Centre New Energy Technologies (CeNET) implements the program through bringing together 16 entities, namely research institutes, institutes of the Polish Academy of Sciences, universities and the Wrocław Technology Park. The second part of the article will be devoted to the achievements of CeNET as Poland's contribution to the European and global program to contain nuclear fusion for the purposes of thermonuclear energy as a new and efficient source of electricity that is safe for society and environmentally friendly.

Słowa kluczowe: fuzja jądrowa, fizyka plazmy, energetyka termojądrowa, W7-X, JET, ITER, CeNTE

Keywords: nuclear fusion, plasma physics, thermonuclear energy, W7-X, JET, ITER, CeNTE

Wstęp – geneza i cele badań nad energetyką termojądrową na świecie i w Polsce

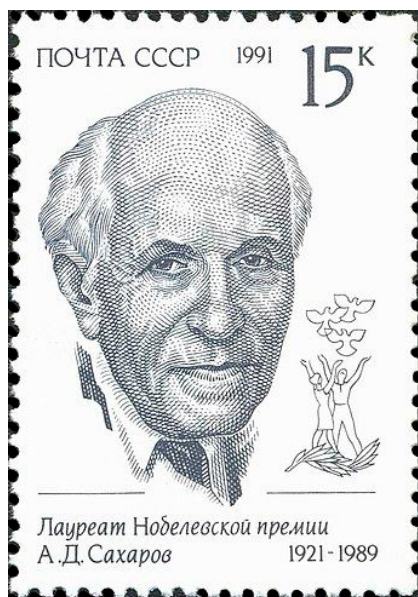
Wybitny astrofizyk Arthur Stanley Eddington jako pierwszy, już w 1920 r., wysunął hipotezę mówiącą, że źródłem energii Słońca jest reakcja termojądrowa. W roku 1938 niemiecki fizyk Hans Bethe opisał sześć reakcji termojądrowych wykorzystujących m.in. wodór, które jego zdaniem miały zachodzić na Słońcu i być źródłem jego energii. Nikt wówczas nawet nie myślał o wykorzystaniu tego zjawiska do celów praktycznych. Możliwość przeprowadzenia reakcji termojądrowej na Ziemi, od czasów opisanego jej przez Bethego, za co w 1967 r. dostał Nagrodę Nobla, wydawała się początkowo nie do zrealizowania. Podczas II wojny światowej naukowcy pracowali głównie nad procesami rozczepienia jąder uranu, aby następnie reakcję tę wykorzystać do celów militarnych. Dopiero w 1941 r. Tokutaro Hagiwara z Uniwersytetu w Kyoto przedstawił pomysł zainicjowania syntezy termojądrowej przez wybuch bomby atomowej. Wtedy to badania nad syntezą termojądrową, choć z niskim priorytetem, zostały włączone do „Projektu Manhattan”. Pracami nad wykorzystaniem zjawiska fuzji termojądrowej, początkowo do budowy bomby wodorowej, zajmował się m.in. amerykański fizyk jądrowy Edward Teller. W połowie 1944 r. stanął on na czele grupy naukowców,

którzy mieli za zadanie opracowanie sposobu praktycznego wykorzystania reakcji syntezy lekkich jąder. Człowiekiem, który wniósł duży wkład do prac, nad budową bomby wodorowej był polski matematyk, Stanisław Ulam. Jego prace teoretyczne i współpraca z Tellerem zaowocowały tym, że w kwietniu 1951 r. przystąpiono do właściwych prac nad projektowaniem i testowaniem bomb wodorowych.

Koncepcje urządzeń do przeprowadzenia kontrolowanej reakcji termojądrowej pojawiły się na początku lat 50. ubiegłego wieku i były utrzymywane w tajemnicy ze względu na to, że w czasach zimnej wojny państwa uczestniczące w tych badaniach miały nadzieję na zdobycie przewagi ekonomicznej nad przeciwnikiem zza żelaznej kurtyny.

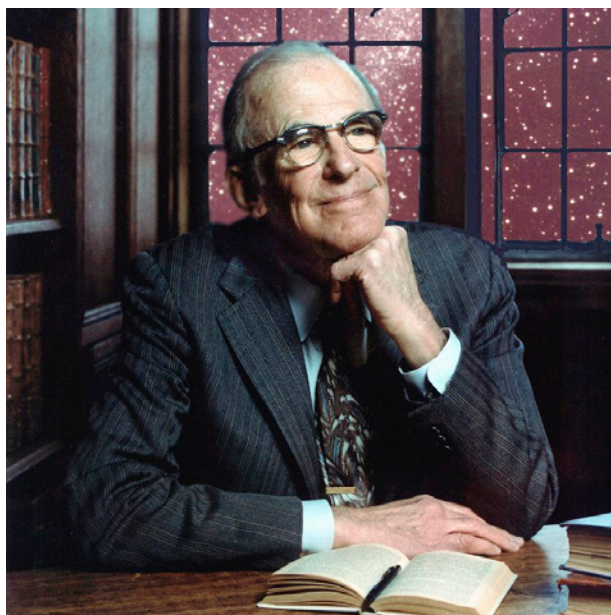
Jednym z pierwszych pomysłów był tokamak (z ros. Toroidalna Kamiera s Magnitnymi Katuszkami). Twórcy tej idei – Igor Tamm i Andriej Sacharow – zainspirowani listem Olega Ławrentiewa, żołnierza Armii Czerwonej, wpadli na pomysł zamknięcia plazmy w pułapce magnetycznej o kształcie torusa, w którym płynący prąd miałby podgrzewać zjonizowany gaz. Drugim urządzeniem, które byłoby w stanie utrzymać rozgrzaną do milionów stopni plazmę, był stellarator,

k którego koncepcję opracował Lyman Spitzer. Pierwsze urządzenie tego typu zostało wybudowane w 1951 r. w Princeton Plasma Physics Laboratory w Stanach Zjednoczonych. Zmiana w rozwoju badań nad kontrolowaną syntezą jądrową nastąpiła w 1956 r., kiedy to podczas wizyty w Wielkiej Brytanii Igor Kurczatow wygłosił wykład na temat fuzji jądrowej i osiągnięć fizyków radzieckich w jej opanowaniu, zapoczątkowując jednocześnie międzynarodową wymianę doświadczeń w tej dziedzinie.



Fot. 1. Andrej Sakharov (1921-1989) na znaczku wydanym w ZSRR w roku 1991 (fot. Wikipedia)

Photo 1. Andrei Sakharov (1921-1989) on the USSR stamp issued in 1991 (photo: Wikipedia)



Fot. 2. Lyman Spitzer (1914-1997; fot. Wikipedia)

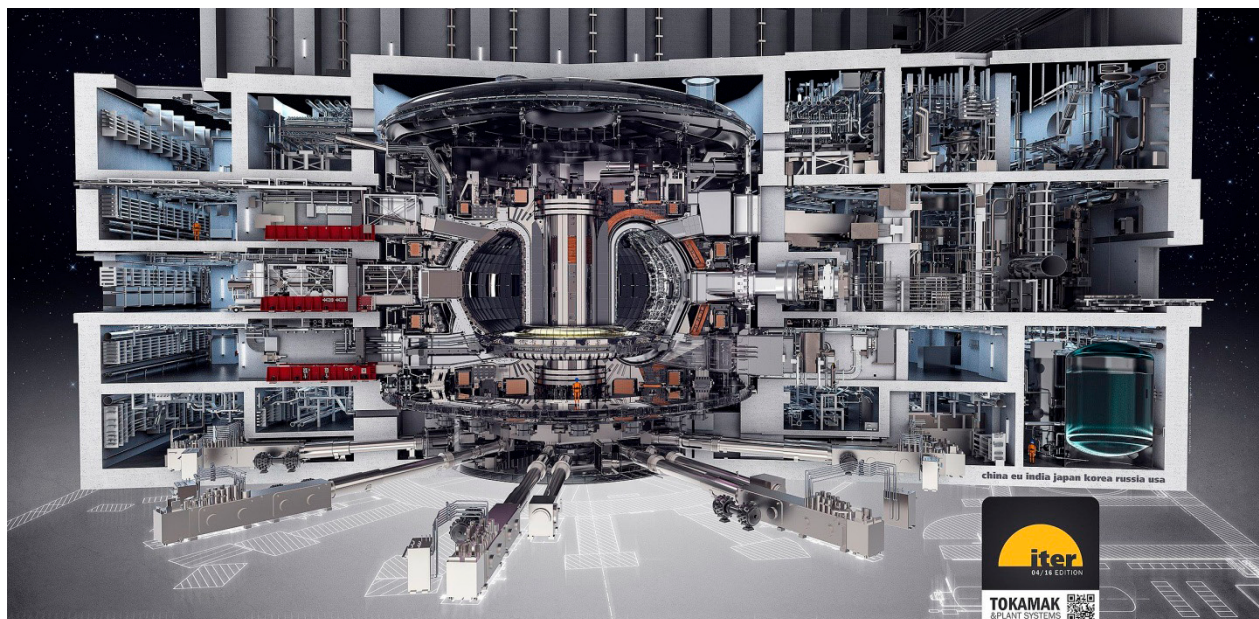
Photo 2. Lyman Spitzer (1914-1997; photo: Wikipedia)

29 lipca 1957 r. została powołana do życia Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, która jako agenda ONZ miała za zadanie organizowanie i nadzorowanie prac nad pokojowym wykorzystaniem energii atomowej. Na konferencji „Atom dla pokoju”, która odbyła się w Genewie w roku 1958, badania nad pokojowym wykorzystaniem fuzji na potrzeby energetyki zostały we wszystkich krajach zgodnie odtajnione i od tego czasu zaczęła się era międzynarodowej współpracy w tym zakresie.

Należy zaznaczyć, że podstawowym zadaniem zarówno tokamaka, jak i stellaratora było i jest uwolnienie większej ilości energii, niż jest do niego dostarczone, co wiąże się z odpowiednio długim czasem utrzymania plazmy, aby duża liczba cząsteczek deuteru i trytu zdążyła ze sobą przereagować. Przełomem były wyniki uzyskane na radzieckim tokamaku T-3 (potwierdzone przez naukowców brytyjskich), co światu zostało ogłoszone w roku 1968, na konferencji w Nowosybirsku. W 1978 r. ruszyła w Wielkiej Brytanii budowa tokamaka JET (Joint European Torus), największego istniejącego obecnie, eksperymentalnego urządzenia tego typu. JET osiągnął wytyczone mu cele, a środowiska europejskie doprowadziły do powstania w 1999 r. organizacji EFDA (European Fusion Development Agreement), która miała za zadanie koordynację europejskich działań w dziedzinie badań nad fuzją jądrową.

Szereg eksperymentów przeprowadzonych w latach osiemdziesiątych minionego wieku pokazało, że aby uzyskać dodatni bilans energetyczny, konieczne jest zbudowanie reaktora znacznie większego niż JET. W roku 1985, na spotkaniu w Genewie, Michaił Gorbaczow zaproponował ówczesnemu prezydentowi Stanów Zjednoczonych, Ronaldowi Reaganowi, opanowanie fuzji termojądrowej do celów pokojowych we wspólnym przedsięwzięciu polegającym na wybudowaniu doświadczalnego reaktora International Thermonuclear Experimental Reaktor (ITER, z łac. droga). Rok później osiągnięto porozumienie na ten temat, z udziałem Wspólnoty Euratom, Japonii i Stanów Zjednoczonych (w późniejszym czasie do projektu dołączyła także Korea Południowa, Indie i Chiny). Obecnie śmiało można powiedzieć, że ludzkość jest bardzo blisko ujarzżenia niewyczerpalnego źródła energii użytecznej (energii o niskiej entropii), jakim jest energia termojądrowa. W Europie w 2013 r. została opracowana „Mapa Drogowa fuzji” (uaktualniona w 2018 r.), która określa kamienie milowe niezbędne na drodze do osiągnięcia tego ambitnego, ale i realnego celu, jakim jest uruchomienie pierwszej elektrowni termojądrowej.

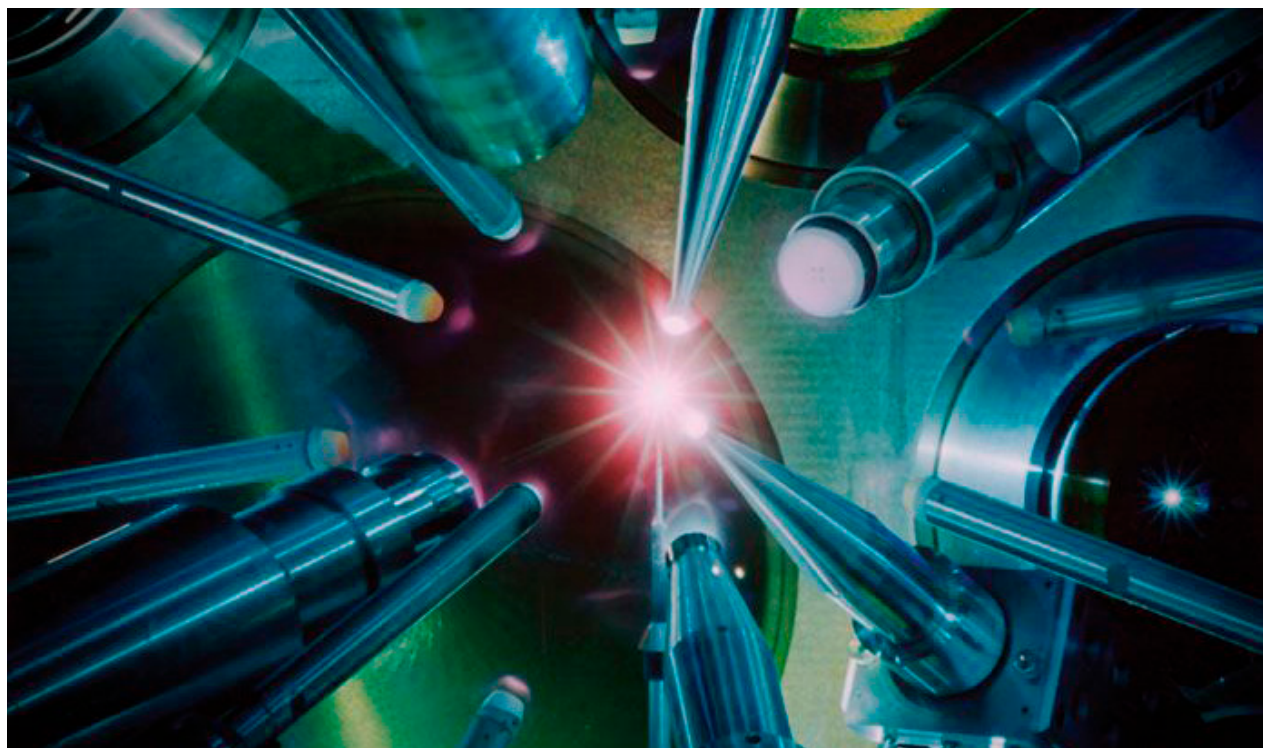
Omawiana dotychczas metoda dotyczyła fuzji magnetycznej (MCF – Magnetic Confinement Fusion),



Fot. 3. Termojądrowy reaktor badawczy ITER (fot. Wikipedia)
Photo 3. Thermonuclear Experimental Reactor ITER (photo: Wikipedia)

a więc plazmy utrzymywanej w pułapkach magnetycznych. W latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku naukowcy Nikołaj Basow i John Dawson zwrócili uwagę na możliwość wykorzystania laserów do nagrzewania plazmy w bardzo krótkim czasie. Pierwszy raz tzw. mikrosyntezę przeprowadzono w 1970 r. w Związku Radzieckim. Od tamtej pory prace nad laserową fuzją termojądrową prowadzone były także w innych

ośrodkach naukowych na całym świecie, w tym również w Polsce. Energia w fuzji laserowej (z ang. ICF – Inertial Confinement Fusion) wyzwana jest poprzez zogniskowanie na deuterowo-trytowym celu (tarczy) wiązek laserów impulsowych o dużej mocy. Przełomem w rozwoju badań nad laserową fuzją inercyjną była propozycja zastosowania tzw. szybkiego zapłonu paliwa deuterowo-trytowego, sferycznie skompri-



Fot. 4. National Ignition Facility (fot. Lawrence Livermore National Laboratory)
Photo 4. National Ignition Facility (photo: Lawrence Livermore National Laboratory)

mowanego impulsem laserowym. Metoda ta polega na nielokalnym zapłonie wstępnie skompresowanej plazmy deuterowo-trytowej, jeszcze przed rozwinięciem się niestabilności hydrodynamicznych, przez dodatkowe dostarczenie energii za pomocą impulsu innego lasera wielkiej mocy, bądź też impulsu szybkich elektronów lub jonów przyspieszanych takim laserem (bądź też za pomocą fali uderzeniowej generowanej także impulsem laserowym). Te idee syntezy termojądrowej przez wiele lat były intensywnie rozwijane i studiowane, co w obecnych czasach zaowocowało powstaniem projektów, mających na celu budowę wielkich instalacji laserowych. I tak we Francji istnieje projekt LMJ (Laser Mégajoule), a w Stanach Zjednoczonych projekt NIF (National Ignition Facility).

Te nowoczesne systemy laserowe, obok wykorzystania ich do sprawdzenia wydajności syntezy inercyjnej, będą miały także zastosowanie do badań oddziaływań intensywnego promieniowania laserowego z materią w innych dziedzinach nauki i techniki, takich jak: fizyka relatywistyczna, fizyka materii w stanach ekstremalnych, astrofizyka, terapia nowotworowa i inne.

Głównym ośrodkiem w kraju, który zajmuje się badaniami związanymi z fizyką plazmy i fuzją jądrową jest Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie (IFPiLM). IFPiLM powstał w roku 1976 jako jednostka badawczo-rozwojowa podległa ówczesnemu Ministerstwu Nauki, Szkolnictwa Wyższego i Techniki. W latach 1987-1992 podlegał ministrowi obrony, a w latach 1993-2000 prezesowi Państwowej Agencji Atomistyki. Od roku 2001 Instytut podlegał ministrowi gospodarki, a następnie ministrowi rozwoju. Obecnie nadzór nad Instytutem sprawuje minister właściwy ds. energii. Należy podkreślić, że badania w tym obszarze zaczęły się wcześniej, przed powstaniem IFPiLM, w ówczesnym Instytucie Badań Jądrowych (IBJ) i w Wojskowej Akademii Technicznej. Badania rozpoczęte w IBJ kontynuowane są do dzisiaj w Narodowym Centrum Badań Jądrowych.

W historii IFPiLM i badań w nim prowadzonych należy wyróżnić trzy okresy – do roku 1990, od roku 1991 do roku 2004 i od roku 2005 do dzisiaj. W tym pierwszym okresie Instytut prowadził badania dotyczące układów typu *plasma focus* – PF (we współpracy z IBJ), oddziaływania promieniowania laserowego z materią oraz kompresji plazmy za pomocą klasycznych materiałów wybuchowych. We współpracy z Instytutem Fizyki im. Lebedewa w Moskwie prowadzone były wówczas prace dotyczące sferycznej kompresji plazmy za pomocą strumieni promieniowania laserowego. W drugiej połowie lat 90. IFPiLM współpracował też z Instytutem Energii Atomowej im. Kurczatowa. Współpraca dotyczyła rozwoju diagnostyk (interfero-

metrii laserowej, spektroskopii rentgenowskiej, spektrometrii neutronów, spektroskopii widzialnej i VUV) dla radzieckiego tokamaka T-15 (wówczas w budowie). Instytut zajmował się też rozwojem laserów na ciele stałym i laserów gazowych oraz systemami do generacji wiązek jonów i wiązek elektronów.

Drugi okres w historii Instytutu rozpoczął się w roku 1991, co zbieгло się z przemianami politycznymi w Polsce. Zmiany organizacyjne w IFPiLM i polityczne w kraju spowodowały, że od tego roku zakres działania Instytutu został zawężony do badania fizyki plazmy w układach typu *plasma focus* (PF) oraz badania oddziaływania promieniowania laserowego z materią. Nadal rozwijane były systemy laserowe na szkłe neodymowym, systemy zasilania dużej mocy oraz diagnostyki zjawisk w plazmie wysokotemperaturowej o krótkiej skali czasu i względnie małej (w porównaniu z plazmą w tokamakach i stellaratorach) skali przestrzennej (chodzi o skale charakterystyczne dla plazmy laserowej i plazmy w układach PF).

Badania w dziedzinie fuzji termojądrowej nabrały w Polsce większego rozmachu w roku 2004 wraz z przystąpieniem Polski do Europejskiej Wspólnoty Energii Atomowej – Euratom. Celem tej organizacji jest europejska współpraca w dziedzinie rozwoju technologii jądrowych. Wejście polskich instytucji naukowych w struktury Euratomu stało się wielką szansą dla naukowców polskich w zakresie dostępu do europejskich urzędzeń i ośrodków badawczych oraz funduszy przeznaczonych na wspieranie badań. Wiele polskich jednostek naukowych zaangażowanych jest w międzynarodowe projekty zarówno związane z syntezą wykorzystującą magnetyczne utrzymanie plazmy (MCF), jak i z fuzją laserową (ICF). Udział w tych badaniach daje polskiej nauce szansę na wzmocnienie swojej pozycji w Europie i na świecie.

Rola fuzji jądrowej w krajowych i unijnych projektach naukowo-badawczych dotyczących nowych źródeł energii

Międzynarodowa Agencja Energii prognozuje, że do roku 2030 światowe potrzeby energetyczne wzrosną o 50%, a rosnące zapotrzebowanie będzie zaspokajane głównie poprzez uzyskiwanie energii ze spalania paliw kopalnych, co wpływa niekorzystnie na środowiska naturalne i powoduje zmiany klimatyczne. Konieczność ograniczenia spalania paliw kopalnych w zestawieniu ze wzrostem zapotrzebowania na energię niezbędną do tego, aby miliardy ludzi wyprowadzić ze stanu ubóstwa, jest ogromnym wyzwaniem. Nie istnieje proste rozwiązanie tej kwestii. Światowa odpowiedź na ten problem musi obejmować rozwój i wdrożenie pakietu zupełnie nowych

lub ulepszonych sposobów na zmniejszenie zużycia energii, bądź znalezienie nowych źródeł dostarczających energię użyteczną w sposób bezpieczny dla środowiska.

Przewiduje się, że w drugiej połowie obecnego stulecia zapotrzebowanie na energię elektryczną osiągnie poziom 10 TW mocy, z czego większość będzie musiała być uzyskiwana ze źródeł bezemisyjnych (chodzi o emisję dwutlenku węgla – CO_2). Międzynarodowa Agencja Energii w Paryżu prognozuje, że do 2024 r. moc odnawialnych źródeł energii użytecznej wzrośnie do poziomu 3,7 TW, w porównaniu z 2,5 TW w roku 2018. Globalne zapotrzebowanie na energię wzrośnie do roku 2040 dwukrotnie, w porównaniu z rokiem 2015 – z 21 tys. TWh w roku 2015 do ponad 40 tys. TWh w roku 2040. (W Polsce: 220 TWh w roku 2050, obecnie 148 TWh). Ale to nie jest tylko kwestia zwiększonego zapotrzebowania na energię i niezależności energetycznej – to jest także kwestia takiego sposobu wytwarzania energii elektrycznej, który nie jest związany z emisją do atmosfery gazów cieplarnianych (obecnie 1/3 emisji dwutlenku węgla przypada na elektrownie opalane węglem). Długoterminowym celem porozumień klimatycznych (protokół z Kioto, Porozumienie Paryskie) jest utrzymanie wzrostu średniej temperatury na świecie istotnie niższego niż 2°C powyżej poziomu sprzed epoki przemysłowej. Do 2050 r. należy obniżyć emisję dwutlenku węgla do poziomu 550 ppm – tylko dwa razy większego od poziomu emisji przed początkiem ery przemysłowej (zgodnie z porozumieniem paryskim do roku 2030 globalne zużycie węgla musi spaść o 80% w porównaniu z poziomem z roku 2010). To oznacza, że do tego czasu trzeba zbudować elektrownie (nieemitujące CO_2) o łącznej mocy 20 TW (moc produkowana obecnie to 13 TW). Według amerykańskiego Departamentu Energii nie istnieje jeszcze technologia, która samodzielnie może spełnić takie wymagania.

Istotnym elementem pakietu energetycznego w przyszłości będzie fuzja jądrowa, która jest w stanie zapewnić dostatecznie duże ilości energii elektrycznej (praktycznie nieograniczone), przy tym będzie źródłem bezpiecznym, dostępnym w każdym punkcie kuli ziemskiej i niepowodującym emisji gazów cieplarnianych do atmosfery.

Tokamaki JET (w Europie) i TFTR (w USA) pokazały, że produkcja energii na drodze syntezy lekkich jąder jest możliwa (osiągnięto moc 16 MW w JET i 11 MW w TFTR). Pytanie jest tylko takie: czy i kiedy jesteśmy w stanie opracować technologię, która pozwoli produkować energię elektryczną z syntezy na skalę przemysłową, a energetyka termojądrowa będzie ekonomicznie opłacalna?

21 listopada 2006 r. zostało w Paryżu podpisane porozumienie dotyczące projektu ITER – budowy i eksploatacji eksperymentalnego reaktora termojądrowego kolejnej generacji. Udziałowcami projektu ITER, jak już to zostało wcześniej wspomniane, są: Unia Europejska, Japonia, USA, Rosja, Chiny, Indie i Korea Południowa. Siedmiu partnerów zdecydowało, że ITER zlokalizowany będzie w Cadarache, małej miejscowości na południu Francji, w pobliżu Aix-en-Provence. ITER będzie kolejnym krokiem na drodze do opanowania nowego źródła uwolnionej energii – syntezy lekkich jąder.

Celem projektu ITER jest zademonstrowanie naukowej i technicznej realności fuzji jądrowej jako źródła energii użytecznej do celów pokojowych. Urządzenie powinno osiągnąć stan intensywnego spalania paliwa deuterowo-trytowego, ze współczynnikiem wzmocnienia co najmniej 10 w warunkach pracy impulsowej (indukcyjne wzbudzenie prądu w plazmie), oraz stan kwazistacjonarny z nieindukcyjnym wzbudzeniem prądu i współczynnikiem wzmocnienia 5. Nie wyklucza się osiągnięcia stanu zapłonu. Z technicznego punktu widzenia przetestowane zostaną komponenty reaktora, w tym cewki nadprzewodnikowe, systemy zdalnej obsługi oraz systemy odprowadzania energii i masy (popiołu helowego) z przestrzeni reaktora. W Europie uruchomiony jest jeden tokamak z cewkami nadprzewodnikowymi (WEST, wcześniejszy Tore Supra, w Cadarache, Francja). Trzy inne tokamaki badające stany kwazistacjonarne w urządzeniach z cewkami nadprzewodnikowymi zostały zbudowane w krajach azjatyckich (JT-60SA w Japonii, SST-1 w Indiach, EAST w Chinach i KSTAR w Korei).

Środek ciężkości badań i rozwoju w zakresie fuzji przesunął się obecnie z badań fizyki plazmy (bardzo gorącego gazu), w której następuje reakcja fuzji, w kierunku technologii niezbędnych do działania elektrowni, a także do opracowania materiałów odpornych na ekstremalne warunki panujące we wnętrzu reaktora. W związku z tym następny zaplanowany krok to budowa Międzynarodowego Urządzenia do Badania Materiałów (IFMIF – International Fusion Materials Irradiation Facility).

Oczekuje się, że ITER będzie generował co najmniej 500 MW mocy pochodzącej z procesu fuzji. W roku 2008 Wspólnota Euratom wspólnie z partnerami porozumienia z roku 2006, rozpoczęły jego budowę we Francji. Niedawno UE i Japonia zgodziły się co do tego, że należy rozpocząć realizację ostatniej fazy badań i rozwoju oraz projektu inżynierskiego urządzenia IFMIF. Konstrukcja ITER-a powinna zająć jeszcze około 5 lat, a urządzenia IFMIF 10 lat. (Wspólnota Euratom zamierza zbudować w krótszym czasie mniejsze urządzenie DONES, służące do tego samego celu – charak-

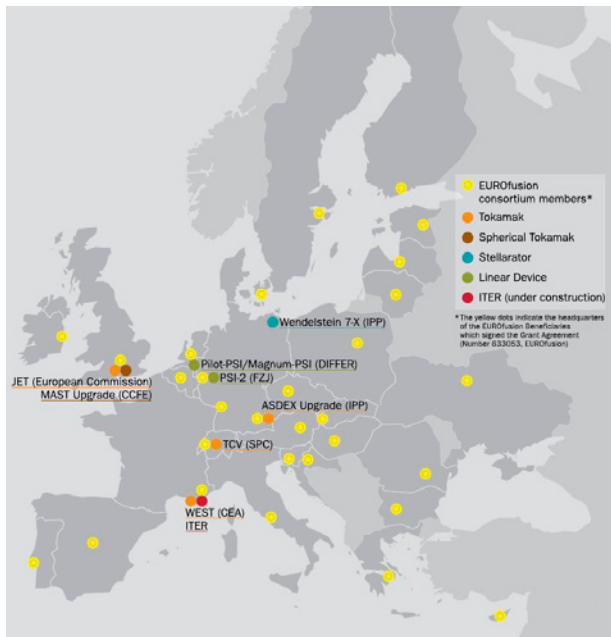
teryzacji materiałów dla fuzji). Po otrzymaniu pierwszych wyników z obu tych urządzeń (szacuje się, że nastąpi to po mniej więcej ośmiu latach ich działania), będzie możliwe rozpoczęcie budowy pierwszej prototypowej elektrowni termojądrowej DEMO.

Organizacja europejskich badań w dziedzinie fuzji jądrowej

Celem badań naukowych i prac badawczo-rozwojowych oraz wdrożeniowych w obszarze fuzji jest doprowadzenie do zbudowania reaktora zdolnego do ciągłego podtrzymywania reakcji fuzji jądrowej. Osiągnięcie tego celu stworzy zupełnie nową perspektywę dla rozwoju energetyki.

Program fuzji jądrowej Wspólnoty Euratom ma cztery główne filary:

1. Międzynarodowy projekt ITER (co znaczy droga po łacinie) powiązany z programem BA (Broader Approach). Głównym udziałowcem jest Wspólnota Euratom (45%). Budżet programu to 25 mld € na 30 lat.
2. Program BA (Broader Approach) z kolei to udział Wspólnoty Euratom w przedsięwzięciach naukowych i technicznych na terenie Japonii (modernizacja tokamaka JT-60U, budowa ośrodka analiz i studiów w Rokkasho oraz budowa urządzenia IFMIF).
3. Projekt JET (Joint European Torus) – przedsięwzięcie europejskie. JET to największy obecnie na świecie tokamak eksperymentalny i jedyny, który może pracować na mieszaninie deuteru i trytu (pozostałe korzystają z czystego deuteru lub wodoru).



Fot. 5. Konsorcjum EUROfusion: rozmieszczenie laboratoriów i urządzeń (<https://www.euroforum.org/>)

Photo 5. EUROfusion consortium: layout of laboratories and equipment (<https://www.euroforum.org/>)

4. Program towarzyszący realizowany w krajach członkowskich Wspólnoty Euratom.

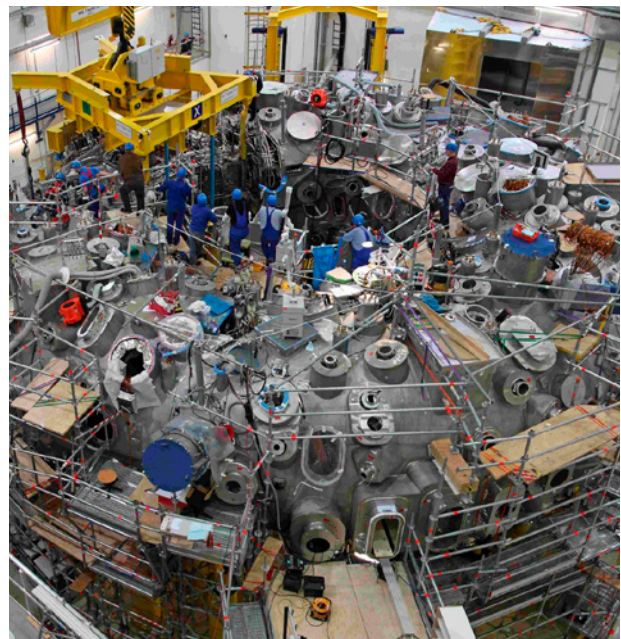
Prace na rzecz ITER-a i BA koordynuje w UE instytucja mająca osobowość prawną o nazwie F4E (Fusion for Energy) z siedzibą w Barcelonie. Pełna nazwa to The European Joint Undertaking for ITER and the Development of Fusion Energy.

Pozostałe prace koordynuje konsorcjum EUROfusion, które utrzymuje dwa ośrodki wspierające:

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

Ważną częścią programu fuzji jądrowej Wspólnoty Euratom jest projekt Wendelstein 7-X (W7-X) (IPP Greifswald, Niemcy). Projekt ten ma na celu badanie alternatywnej do tokamaka koncepcji magnetycznego utrzymania plazmy – koncepcji stellaratora, która historycznie rzecz ujmując, była koncepcją wcześniejszą.

Obie koncepcje mają swoje wady i zalety, chociaż obecnie bardziej zaawansowana jest koncepcja tokamaka, która stała się podstawą konstrukcji ITER-a i wcześniej JET-a. Według tej koncepcji zbudowane są też urządzenia WEST we Francji, ASDEX Upgrade w Niemczech, FTU we Włoszech, MAST w Wielkiej Brytanii, ISTTOK w Portugalii, COMPASS w Czechach.



Fot. 6. Stellarator Wendelstein 7-X (Max Planck Institute of Plasma Physics)

Photo 6. Wendelstein 7-X stellarator (photo: Max Planck Institute of Plasma Physics)

W Europie działało do niedawna tylko jedno urządzenie typu stellarator (TJ-II w Hiszpanii), koncepcja ta jest natomiast intensywnie badana w Japonii. Różnica między tokamakiem i stellaratorem dotyczy przede wszystkim sposobu wytworzenia pułapki magnetycznej – w stellaratorze całe pole magnetyczne wytworzone jest przez prądy płynące w cewkach zewnętrznych w stosunku do plazmy, w tokamaku jedna ze składowych pola wytwarzana jest przez prąd elektryczny płynący w samej plazmie. Prąd ten jest wzbudzany impulsową akcją transformatora, którym jest w istocie tokamak. Reaktor termojądrowy będzie urządzeniem pracującym w sposób ciągły, co oznacza, że w wypadku tokamaka do rozwiązania pozostaje problem podtrzymywania prądu w plazmie. Problem ten nie występuje w stellaratorze.

Znaczenie projektu W7-X jest związane także z tym że jest to drugie w Europie urządzenie fuzyjne z cewkami nadprzewodnikowymi (pierwszym był tokamak Tore Supra, po przebudowie nazwany WEST) oraz z aktywnym chłodzeniem komory, co pozwala na kwazistacjonarną pracę urządzenia.

Konsorcjum EUROfusion przywiązuje dużą wagę do tego projektu i zamierza podjąć prace studyjne dotyczące reaktora termojądrowego wykorzystującego koncepcję stellaratora.

Wspólnota Euratom prowadzi ponadto ograniczone badania dotyczące koncepcji fuzji laserowej, alternatywnej do koncepcji magnetycznego utrzymania plazmy. Na ten cel przeznaczane jest 1% budżetu programu na działalność określaną jako *keep-in-touch*. W roku 2008 został zainicjowany w Europie projekt HiPER o dużo większej skali. Projekt ten, obecnie zawieszony z powodu braku funduszy, nie jest częścią programu fuzji jądrowej Wspólnoty Euratom.

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 30 organizacji badawczych i uniwersytetów z 27 państw członkowskich Unii Europejskiej, Wielkiej Brytanii, Szwajcarii i Ukrainy. Przedsięwzięcie prowadzone jest jako JEDEN program europejski. Idea tzw. *European Research Area*, której utworzenie jest priorytetowym celem Programu Ramowego Horyzont 2020, została tu wcielona w życie ponad 40 lat temu.

Centrum naukowo-przemysłowe Nowe Technologie Energetyczne

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.

Przystąpienie do Programu Ramowego Wspólnoty Euratom w obszarze Fusion wiązało się z zawarciem Kontraktu Asocjacyjnego (CoA – Contract of Association), którego stronami były: Wspólnota Euratom, reprezentowana przez Komisję Europejską i instytucja krajowa koordynująca realizację prac w ramach przyjętego programu (Euratom Associate). W Polsce tą instytucją był Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy.

Od roku 2014 Kontrakt Asocjacyjny zastąpiony został Kontraktem EUROfusion, którego stronami są: Wspólnota Euratom reprezentowana przez Komisję Europejską i Konsorcjum EUROfusion reprezentowane przez Instytut Fizyki Plazmy im. Maksa Plancka w Garching koło Monachium (z oddziałem w Greifswaldzie), w którym jest zainstalowany stellarator Wendelstein 7-X. Konsorcjum EUROfusion skupia laboratoria badawcze i uczelnie zajmujące się fuzją we wszystkich krajach Unii Europejskiej oraz w Szwajcarii i na Ukrainie. Polskie środowisko fuzji jądrowej reprezentowane jest w tym Konsorcjum przez Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, a krajową strukturą powołaną przez IFPiLM do koordynacji prac w Polsce jest Centrum naukowo-przemysłowe Nowe Technologie Energetyczne (Centrum NTE, w skrócie CeNTE).



Fot. 7. Stanowisko do badania emisji jonów z tarczy naświetlanej laserem w IFPiLM (fot. IFPiLM)

Photo 7. Stand for investigation of ion stream emitted from laser-produced plasma in the IPPLM (photo: IPPLM)



Fot. 8. Centrum naukowo-przemysłowe Nowe Technologie Energetyczne: mapa instytucji tworzących Centrum (fot. IFPiLM)
Photo 8. Scientific and Industrial Centre New Energy Technologies: chart of the institutions comprising the Centre (photo: IPPLM)

Obecnie Centrum NTE obejmuje zespoły badawcze z 9 uczelni, 4 instytutów PAN i 2 instytutów badawczych. W skład Centrum wchodzi też Spółka Wrocławski Park Technologiczny S.A. Centrum tworzą:

1. Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy im. Sylwestra Kaliskiego,
2. Narodowe Centrum Badań Jądrowych,
3. Politechnika Warszawska,
4. Uniwersytet Opolski,
5. Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie,
6. Akademia Morska w Szczecinie,
7. Uniwersytet Szczeciński,
8. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu,
9. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica,
10. Politechnika Wrocławska,
11. Politechnika Łódzka,

12. Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego PAN,
13. Instytut Chemii Bioorganicznej PAN – Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe,
14. Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych im. Włodzimierza Trzebiatowskiego Polskiej Akademii Nauk,
15. Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk „UNIPRESS”,
16. Spółka Wrocławski Park Technologiczny S.A. z siedzibą we Wrocławiu.

Ogólna charakterystyka badań termojądrowych w Polsce

Historia badań w Polsce, związanych z fuzją jądrową, sięga drugiej połowy lat sześćdziesiątych, tak więc zespoły badawcze mają już blisko czterdziestoletnie

doświadczenie w zakresie fizyki plazmy gorącej, zarówno w odniesieniu do badań eksperymentalnych, w tym rozwoju diagnostyk plazmy, jak i teorii obejmującej modelowanie komputerowe. IFPiLM uczestniczył przez pięć lat (w drugiej połowie lat osiemdziesiątych) w radzieckim programie związanym z tokamakiem T15, ale doświadczenie zdobyte wówczas zostało zaprzepaszczone wskutek odpływu kadry w związku ze zmianami organizacyjnymi w IFPiLM na początku lat 90. Doświadczenie zarówno IFPiLM, jak i NCBJ sprzed roku 2005 (IFPiLM i NCBJ były do roku 2005 jedynymi ośrodkami w kraju zajmującymi się fizyką plazmy gorącej) dotyczy procesów fizycznych w plazmie o skali czasowej i przestrzennej diametralnie różnej od tej, jaka występuje w plazmie tokamaków i stellaratorów. To pociąga za sobą zasadniczo różne techniki i technologie stosowane w badaniach eksperymentalnych. (W mniejszym stopniu dotyczy to diagnostyk jądrowych – neutronów i promieniowania gamma). Tym doświadczeniem, które zachowało ciągłość od czasu współpracy z Instytutem Energii Atomowej w Moskwie (w ramach projektu T15), jest doświadczenie dotyczące modelowania procesów transportu masy i energii w tokamakach.

W przypadku doświadczenia zdobytego przy pracy z laserami sytuacja jest inna. W IFPiLM od wielu lat prowadzone są badania zjawisk fizycznych w oddziaływaniu laser-plazma, badania optymalizacyjne laserowej syntezy termojądrowej, badania procesów hydrodynamicznych zachodzących w plazmie laserowej, badania dotyczące emisji jonów, elektronów, promieniowania X i generacji strug plazmowych.

Tak więc przystąpienie do projektów Wspólnoty Euratom było wielkim wyzwaniem dla polskich zespołów badawczych i wyzwanie to zostało podjęte głównie przez młodych pracowników nauki. Odnosnie do zakresu merytorycznego programu realizowanego obecnie w Polsce w obszarze fuzji termojądrowej, to zakres ten ukształtował się na drodze jak najlepszego dopasowania istniejącego potencjału i doświadczenia do potrzeb programu Wspólnoty Euratom. W odróżnieniu na przykład od projektu LHC, który ma na celu poznanie tajemnic natury na poziomie cząstek elementarnych, czyli zaspokojenie głodu wiedzy fizyków wysokich energii, program fuzji jądrowej ma na celu zaspokojenie głodu energetycznego ludzkości. W związku z tym obowiązuje tu podejście pragmatyczne, co oznacza, że akceptowane są projekty badawcze, które nie tylko są ciekawe z poznawczego punktu widzenia, ale i przyczyniają się do postępu na drodze (ITER to droga po łacinie) do osiągnięcia celu, jakim jest elektrownia termojądrowa. Ta okoliczność dodatkowo wpłynęła na wybór zakresu merytorycznego udziału Polski w europejskich projektach. Udział

ten cechuje szeroki zakres tematyczny – od teorii i modelowania plazmy, poprzez diagnostyki plazmy, materiały dla fuzji, do badań socjoekonomicznych.

Są jednak zagadnienia wybrane, będące wizytówką Polski w Europie. Zagadnienia te to nasz udział w projektach JET i W7-X, badania oddziaływania plazmy ze ścianą, nowe materiały dla fuzji (udział w projekcie ITER jest oddzielną kwestią).

Rozważając zakres merytoryczny programu, należy wspomnieć jeszcze o trzech zagadnieniach: efektach ubocznych realizacji programu, przygotowaniu na uczelniach kadr do realizacji tego programu oraz percepcji energetyki termojądrowej w świadomości społeczeństwa wyrażanej przez opinię publiczną.

Badania nad fuzją termojądrową niosą ze sobą nie tylko poszukiwanie niezawodnych i bezpiecznych źródeł energii użytecznej, ale także są to studia innowacyjne mające odniesienia do wdrożeń z obszaru super wytrzymałych materiałów czy technologii medycznych. Opracowanie nowych materiałów o bardzo dużej wytrzymałości termicznej, związane z zastosowaniem ich np. jako ścianki reaktora termojądrowego, może znaleźć również zastosowanie w lotnictwie, motoryzacji czy kosmonautyce. Ponadto technologie związane z modyfikacją powierzchni za pomocą impulsów plazmowych mogą znaleźć zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Strumienie szybkich jonów generowane laserem dużej mocy mogą znaleźć zastosowanie w hadronowej (protonowej) terapii nowotworowej.

Jeśli chodzi o przygotowanie nowych kadr, to problem wiąże się z małym zakresem, a właściwie brakiem wyspecjalizowanej edukacji w tej dziedzinie, co sprawia, że jest to słaba strona w badaniach nad energetyką termojądrową. Na polskich uniwersytetach i uczelniach wyższych nie ma obecnie w programie studiów fizyki plazmy czy technologii termojądrowych. Tematyka ta sporadycznie przewija się w organizowanych seminariach czy wykładach, jednak to nie gwarantuje rozwoju odpowiednio wykwalifikowanej kadry naukowej. Pracę w takich ośrodkach badawczych, jak Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie rozpoczynają osoby, które kończyły inne specjalizacje, co w rezultacie wpływa niekorzystnie na czas zdobywania kolejnych stopni naukowych i specjalizacji zawodowych. Pewnego rodzaju możliwością i szansą pozyskiwania pracowników są studia i staże w zagranicznych ośrodkach naukowych, jednak w tym momencie pojawia się zagrożenie odpływu na stałe kadry z kraju. Szansą na pozyskiwanie nowych pracowników stają się również uczelnie wyższe, które

są zaangażowane w projekty związane z kontrolowaną syntezą termojądrową.

Energetyka termojądrowa jest tematem mało znanym społeczeństwu. I tu pojawia się kolejny problem, z którym boryka się nie tylko ta dziedzina, ale także inne pokrewne, takie jak, chociażby energetyka atomowa. Tak naprawdę liczne protesty społeczne przeciwko budowie reaktorów jądrowych czy termojądrowych wynikają głównie z wyznawanych wartości ekologicznych połączonych z jednoczesną niewiedzą i nieuzasadnionymi obawami przed awarią. Dlatego w tym przypadku istotną rolę odgrywa informacja społeczeństwa i przedstawienie korzyści płynących z danego sposobu dostarczania energii. W przypadku energii termojądrowej należy przede wszystkim uświadomić społeczeństwu różnice pomiędzy tym rodzajem energii a energią atomową.

Energetyka termojądrowa, która może zacząć konkurować z dotychczas stosowanymi źródłami energii za około 30 lat, ma wiele zalet w porównaniu z takimi źródłami. Energetyka fuzyjna, stanowiąca kolejny etap rozwoju klasycznej energetyki jądrowej („atomowej”) będzie przyjazna dla środowiska i ludności, a w perspektywie także tańsza. Będzie ona niezależna od lokalizacji, klimatu i pory roku. Ważne są też takie czynniki jak dostępność surowców do produkcji energii z reakcji fuzji oraz minimalne zagrożenie radiacyjne w porównaniu z energetyką jądrową. Jednocześnie w procesach badawczych i rozwoju technologii dotyczących obu rodzajów energetyki jądrowej jest wiele podobieństw.

Szansą dla badań nad energetyką termojądrową na zwiększenie akceptowalności społecznej jest europejski projekt edukacyjny Fusenet (A European Fusion Education Network), w którym uczestniczy również Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy. Jest to projekt, który ma na celu kształcenie w dziedzinie fuzji termojądrowej i technologii z nią związanych, przy czym program ten dostosowany jest do kształcenia na niemal wszystkich poziomach edukacyjnych, począwszy od szkoły średniej, a skończywszy na studiach doktoranckich. Fusenet daje Polakom szansę współpracy z europejskimi laboratoriami, co z kolei umożliwia dostęp do różnych układów badawczych.

Infrastruktura badawcza

Odrębną sprawą jest aparatura używana w polskich ośrodkach naukowych do badań w dziedzinie syntezy termojądrowej. Nasz kraj nie posiada (jak dotąd) tak ogromnych urządzeń jak tokamaki czy lasery ogromnej mocy, co jest słabą stroną badań nad

kontrolowaną syntezą w Polsce, niemniej jednak w ostatnich latach sytuacja wyposażenia laboratoriów zaczyna się poprawiać, co niewątpliwie wynika z wejścia Polski do wspólnot europejskich w szczególności Wspólnoty Euratom. Ma to trzy aspekty, omówione poniżej:

Po pierwsze, podpisanie ze Wspólnotą Euratom Kontraktu Asocjacyjnego, a następnie Kontraktu EUROfusion, udostępniło badaczom polskim dostęp do wszystkich urządzeń programu badań nad fuzją tej Wspólnoty, w szczególności do tokamaka JET, który jest największym na świecie urządzeniem termojądrowym i jednym, jakie może pracować z trytem. JET jest własnością całej Wspólnoty, a więc to jest „nasz” tokamak.

Po drugie – współfinansowanie programu przez Komisję Europejską zwiększyło istotnie krajowy budżet dostępnych środków, co pozwala na modernizację i rozbudowę bazy badawczej w kraju. Z tej możliwości korzystają wszystkie ośrodki skupione w Centrum NTE.

Po trzecie – dostęp do funduszy strukturalnych UE stwarza szansę na podjęcie w kraju zadań związanych z budową i eksploatacją dużych urządzeń badawczych. Nie będą to zapewne tokamaki ani stellaratory, ani systemy fuzji laserowej, gdyż budowa takich urządzeń, o skali istotnej dla postępu badań, przekracza obecnie możliwości pojedynczego kraju (z wyjątkiem największych potęg światowych takich jak Stany Zjednoczone, Japonia, Francja, Niemcy i Wielka Brytania). Niemniej jednak jest potrzeba zbudowania urządzenia w Polsce, które będzie dla fizyków i technologów zajmujących się fuzją ośrodkiem integrującym i dającym szansę na ważne badania także w kraju. Ośrodek taki przyciągałby także naukowców z innych krajów Wspólnoty Euratom, sprzyjając w ten sposób integracji w skali europejskiej (a nawet światowej) oraz podnosząc poziom badań poprzez udział w nich ekspertów o reputacji międzynarodowej.

W drugiej części tego artykułu zostaną przedstawione osiągnięcia polskiego programu fuzji jądrowej.

*Andrzej Gałkowski,
Monika Kubkowska,
Instytut Fizyki Plazmy
i Laserowej Mikrosyntezy im. S. Kaliskiego,
Warszawa*