



Potęga wyobraźni

Z dr. hab. inż. **ANDRZEJEM GAŁKOWSKIM**, dyrektorem Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie, rozmawia Marek Bielski

Energetyka konwencjonalna oparta o węgiel czy gaz jest „limitowana w czasie”, co nie wróży nic dobrego dla jej przyszłości.

Niestety paliwa kopalne zużywamy w tempie miliony razy większym od tempa, w jakim natura je wytwarzała. A to oznacza, że wcześniej lub później zasoby węgla, ropy naftowej i gazu wyczerpią się definitywnie. A wcześniej paliwa te staną się nieopłacalne z ekonomicznego punktu widzenia i z uwagi na ograniczenia nakładane na emisję dwutlenku węgla.

Czy w odsunięciu w czasie widma kryzysu energetycznego pomoże nam energetyka jądrowa?

Z jednego kilograma pierwiastków rozszczepialnych można uwolnić dużo więcej energii niż z jednego kilograma paliw spalanych w konwencjonalnych elektrowniach. Z tym że należy pamiętać, iż zasoby naturalnego uranu też są ograniczone. Energetyka jądrowa widzi swoją przyszłość w zastosowaniu paliw innych niż uran. Takim paliwem może być tor, który nie jest materiałem rozszczepialnym, ale może być przetworzony na uran 233, a ten może już być paliwem w reaktorze jądrowym. Tor jest rozpowszechniony w przyrodzie bardziej niż uran. Szczególnie duże zasoby tego pierwiastka są w Indiach, które

prowadzą prace badawcze nad jego wykorzystaniem. Takie prace prowadzą także Rosjanie, wspólnie z Amerykanami. Inny kierunek to reaktory na neutronach prędkich, w tym reaktory powielające.

Trwają prace nad reaktorami jądrowymi IV generacji. Istnieje wiele rozwiązań, które mogą sobie poradzić z problemem ograniczonej dostępności uranu 235. Istnieje jednak paliwo, które jest, praktycznie rzecz biorąc, nieograniczone. Tym paliwem jest deuter-tryt (dwa ciężkie izotopy wodoru). Paliwo to jest wielokrotnie bardziej wydajne niż uran, a ponadto zasoby deuteru i litu (z którego wytwarza się tryt) są ogromne. Jedynym problemem jest to, że nadal nie wiemy, jak zbudować elektrownię termojądrową.

Przyszłość energetyki należy zatem upatrywać w pracy reaktorów działających w oparciu o zasadę kontrolowanej fuzji termojądrowej?

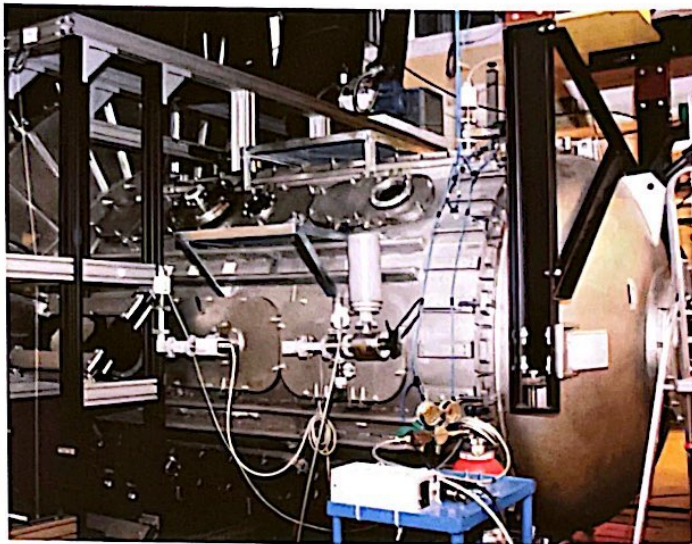
Tak uważam. Atutem elektrowni termojądrowej, w porównaniu z elektrowniami spalającymi paliwa kopalne, jest to, że nie emituje gazów cieplarnianych. Odpadami radioaktywnymi jest jedynie złom z konstrukcji elektrowni, aktywowanej neutronami syntezy przez okres jej eksploatacji. Będą to jednak odpady względnie krótkożyłowe, wymagające utylizacji przez setki lat, w porównaniu z tysiącami

lat potrzebnymi na utylizację odpadów radioaktywnych z elektrowni jądrowej. W reaktorze wykorzystującym reakcję fuzji jądrowej jest niemożliwy niekontrolowany wzrost energii, nawet gdyby w wyniku błędu ludzkiego lub uszkodzeń w instalacji nastąpiła awaria. Zjawisko fuzji jądrowej jest dobrze znane fizykom. Problemem jest stworzenie reaktora, w którym energia fuzji doprowadzi do powstania gorącej pary napędzającej turbiny generatora prądu elektrycznego. Obecnie to jest bardziej problem technologiczny, a mniej fizyczny.

Jednak nawet cząstkowa wiedza wystarczyła, aby się nią posłużyć w celach destrukcji.

Tak. Mówiąc o reaktorze termojądrowym, mamy na myśli kontrolowane uwalnianie się energii fuzji jądrowej. Znacznie prostsze okazało się zbudowanie urządzenia, w którym reakcje fuzji zachodzą gwałtownie, w sposób niekontrolowany. Mam na myśli bombę termojądrową (bombę H), drugi koniec kija atomowego. Amerykanie skonstruowali ją w dwa lata, Rosjanie w niewiele dłuższym czasie. Bomby H były tak potężne, że w latach 50. XX w. zupełnie realna była groźba zniszczenia cywilizacji ludzkiej wskutek wymiany salw termojądrowych przez USA i Związek Radziecki.

Z drugiej strony wiele osób, m.in. Edward Teller, twórca amerykańskiej bomby H,



Koncentrator plazmowy typu plasma focus PF1000U w IFPiLM.



Układ pomiarowy do badania promieniowania rentgenowskiego emitowanego z plazmy w stellaratorze W7-X w Greifswaldzie (Niemcy). Układ przygotowany w IFPiLM do wspólnych badań w ramach projektu EUROfusion.

uważało, że broń termojądrowa przyczyniła się do zachowania pokoju, gdyż nikt nie odważył się pierwszy jej użyć. Z tego punktu widzenia nawet broń termojądrowa miała swoją pozytywną stronę. Faktem jest, że pokój w skali globalnej został zachowany.

Dlatego teraz naukowcy chcą skopiować słoneczną technologię na gospodarczy użytek?

Wszystkie państwa świata napotykają na poważną barierę rozwoju z powodu trudności w dostępie do źródeł energii. Zwłaszcza te, które jak Japonia i Korea Południowa, nie mają na swoim terytorium bogatych złóż paliw kopalnych. Dlatego chcemy naśladować i przeprowadzić reakcję, która naturalnie i samorzutnie dokonuje się w Słońcu. Celem prac prowadzonych w dziedzinie fizyki plazmy i fuzji termojądrowej jest opracowanie metody konwersji energii z jądrowej w elektryczną przyjaznej dla środowiska naturalnego, bezpiecznej i praktycznie nieograniczonej (jeśli chodzi o dostępność paliwa). Nie bez znaczenia jest również to, że paliwo to jest dostępne wszędzie, a więc uniknie się problemów politycznych.

Kontrolowana fuzja jądrowa jako potencjalnie niewyczerpalne źródło energii działa na wyobraźnię!

Dotychczasowe eksperymenty w tokamakach JET (Wspólnota Euratom) i TFTR (USA) udowodniły, że uzyskanie energii użytecznej na drodze fuzji jądrowej lekkich jąder jest możliwe. W eksperymentach z deuterem i trytem uzyskano w JET 16 MW mocy fuzji jądrowej, a w TFTR 11 MW. Tokamaki wydają się być urządzeniami stwarzającymi największą szansę na zrealizowanie programu otrzymywania użytecznej energii z fuzji jądrowej.

Tokamak to jedna strona fuzyjnego medalu, stellarator druga. W kierowanym

przez pana instytucję są prowadzone oba kierunki badań. Z jakim skutkiem?

Obecnie żaden pojedynczy instytut, a nawet cały kraj, nie może osiągnąć celu, o którym mówimy. Kolejny krok na tej drodze, to międzynarodowy program ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). ITER jest obecnie największym, po Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, programem naukowym na świecie, w którym zaangażowanych jest siedem potęg: Wspólnota Euratom (ok. 50% udziału), Chiny, Rosja, Japonia, USA, Korea Południowa oraz Indie. Celem jest zbudowanie tokamaka, na bazie którego ma zostać stworzona przyszła generacja reaktorów fuzyjnych o mocy rzędu gigawatów.

Instytut, którym kieruję, bierze udział w tym programie od 2004 r., kiedy Polska została członkiem Wspólnoty Euratom. ITER nie jest jedynym programem związanym z fuzją jądrową realizowanym przez Wspólnotę Euratom. Cała społeczność naukowa Wspólnoty połączyła swoje siły w Konsorcjum EUROfusion, które oprócz ITER-a ma w swojej agendzie badania na tokamakach JET w Anglii, ASDEX Upgrade w Niemczech, WEST (dawniej Tore-Supra) we Francji, FTU we Włoszech i na nowym stellaratorze Wendelstein 7-X (W7-X) w Greifswaldzie koło Rostocku. Wymieniłem tylko te, które są w kręgu zainteresowania naukowców z IFPiLM. Ale nie tylko IFPiLM bierze udział w europejskim (i światowym) programie fuzji jądrowej. Oprócz nas także dziewięć innych zespołów z polskich instytutów badawczych, instytutów PAN i uczelnianych bierze udział w tym programie. Z tym że nasz udział jest największy i z tego powodu Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nam powierzyło rolę koordynatora krajowego i reprezentanta Polski w konsorcjum EUROfusion.

Jeśli pyta Pan o efekty tych badań, to ograniczę się do kilku przykładów

z ostatnich lat. Na tokamaku JET zainstalowany został detektor promieniowania rentgenowskiego typu GEM (Gas Emission Multiplier). Technologię detektorów tego typu rozwijamy nadal. Obecnie pracujemy nad systemem dwuwymiarowej tomografii z zastosowaniem detektorów GEM dla tokamaka WEST we Francji. Dla stellaratora W7-X zbudowany został układ diagnostyczny PHA (Pulse Height Analysis) z zastosowaniem analizy impulsów z chłodzonego detektora półprzewodnikowego w reżimie zliczania kwantów. Układ ten został już zainstalowany w porcie stellaratora Wendelstein 7-X. Sam stellarator został uruchomiony w maju 2014 r., a pierwsza plazma została osiągnięta jesienią 2015 r. i w tym czasie została także uruchomiona, jako jedna z nielicznych, diagnostyka PHA. Polska społeczność fuzji jądrowej pokłada duże nadzieje w rozwoju współpracy z Instytutem Maxa Plancka w Greifswaldzie.

Może mniej spektakularne, ale bardzo istotne, są nasze badania prowadzone za pomocą komputerów. Modelujemy dynamikę plazmy w istniejących urządzeniach oraz w urządzeniach, które będą uruchomione w przyszłości – w tokamaku ITER i demonstracyjnej elektrowni termojądrowej DEMO. Badania te służą lepszemu zrozumieniu zjawisk fizycznych oraz optymalizacji tych urządzeń.

Wielce wymownym jest fakt, że niedawno zainicjowanie kolejnego etapu programu badań Wendelstein 7-X w Greifswaldzie odbyło się uroczystie w obecności najwyższych władz państwowych Niemiec.

Zaproszony przez partnerów niemieckich uczestniczyłem we wspomnianym wydarzeniu, ponieważ współpraca instytutu przy badaniach z wykorzystaniem tego urządzenia jest jednym z naszych

40 lat z fuzją termojądrową

priorytetów badawczych. I mam też świadomość wagi, jaką przywiązują najwyższe władze państwowe nie tylko Niemiec czy Francji, ale i innych krajów UE, do realizacji tego typu programów. Mamy wieloletnią, bardzo owocną współpracę z ośrodkami naukowymi m.in. w Anglii, Niemczech, Francji, Włoszech i w Czechach. W ostatnim czasie nawiązujemy współpracę z ośrodkami plazmowymi w Japonii i Chinach.

Nasz instytut ma także swój udział w rozwoju alternatywnego kierunku – fuzji jądrowej z inercyjnym utrzymywaniem plazmy wytwarzanej za pomocą laserów. Fizycy z IFPiLM, zajmujący się plazmą laserową, wraz z naukowcami z Czech, Francji i Włoch przeprowadzili niedawno pionierskie badania w zakresie fizyki plazmy laserowej, wykorzystując przy tym unikatową aparaturę (kriostat helowy). Pierwsze eksperymenty zakończyły się sukcesem, potwierdzając możliwość uzyskania wiązki wysokoenergetycznych protonów z gorącej plazmy wodorowej.

Nie mogę nie wspomnieć o trzecim obszarze naszej aktywności naukowej. Są to silniki (sterowniki) plazmowe, wykorzystywane do korygowania orbit małych satelitów. W ostatnim czasie, w ramach projektu KLIMT została zaprojektowana, skonstruowana i uruchomiona III wersja prototypowa plazmowego silnika Halla do zastosowań w misjach kosmicznych. Temat ten tylko sygnalizuję, ponieważ był on już omawiany na łamach *Przeglądu Technicznego*. W ostatniej edycji plebiscytu czytelnicy przyznali dr. Jackowi Kurzyni, kierującemu tymi badaniami, tytuł „Złotego Inżyniera”.

Uważamy, że jesteśmy równorzędnymi partnerami dla naukowców w Europie i na świecie. Jednocześnie zdajemy sobie sprawę z tego, że udział naszych naukowców w programach międzynarodowych za granicą jest dodatkową gwarancją prowadzenia badań na najwyższym światowym poziomie.

Środowisko fizyków plazmy może mieć satysfakcję, iż podczas II Kongresu Elektryki Polskiej oraz XXV Kongresu Techniki Polskiej mocno akcentowano konieczność i wagę prac badawczych nad kontrolowaną fuzją jądrową.

Reprezentanci środowiska naukowo-technicznego biorący udział w tych ważnych wydarzeniach dysponują rozległą wiedzą o kierunkach pracach badawczych, mających przeciwdziałać kryzysowi energetycznemu, i sami często w tych badaniach uczestniczą. Mają więc świadomość, że właśnie kontrolowana synteza jądrowa może okazać się jedynym sposobem na zagwarantowanie nieograniczonego dostępu do energii. W przeciwnym razie, wcześniej czy później, kryzys energetyczny nadejdzie.

Dziękuję za rozmowę.

Reakcje syntezy jąder izotopów wodoru – deuteru (D) i trytu (T) są źródłem energii, która w określonych warunkach może mieć zastosowanie praktyczne. Na podstawie analiz teoretycznych i zastosowań fuzji w broni termojądrowej przewidywano, że kontrolowana fuzja może być w przyszłości źródłem taniej energii elektrycznej, bezpiecznej dla ludności i środowiska.

Pod koniec lat 70. minionego wieku w Wojskowej Akademii Technicznej zostały utworzone przez komendanta tej uczelni, gen. prof. Sylwestra Kaliskiego, zespoły naukowe do badań plazmy i zjawisk związanych z syntezą (fuzją) termojądrową w gorącej plazmie. W tym czasie w Polsce badania plazmy prowadzono – w wąskim zakresie – tylko w Instytucie Badań Jądrowych (IBJ).

W pierwszej siódemce

W nowym Zespole Fizyki Jądrowej (ZFJ) w WAT już w 1973 r. uzyskano efekt fuzji jąder deuteru w wyniku oddziaływania impulsu nowo zbudowanego lasera neodymowego z próbką zawierającą deuter. Był to siódmy na świecie eksperyment tego rodzaju.

W tym okresie w ZFJ badano fuzję w plazmie generowanej wyladowaniem silno-prądowym w układzie *plasma focus* PF150 zbudowanym w IBJ dla WAT. (Przed 1976 r., w innych nowoutworzonych zespołach badawczych w WAT, budowano lasery impulsowe do grzania plazmy w różnych konfiguracjach oraz rozpoczęto teoretyczne i eksperymentalne badania inicjowania fuzji materiałem wybuchowym). W efekcie dużego zainteresowania środowiska fizyków polskich tą tematyką badawczą zaistniała potrzeba powołania nowego instytutu naukowego.

1 stycznia 1976 r., w wyniku połączenia zespołów pracujących w WAT, z inicjatywy prof. Sylwestra Kaliskiego powstał w Warszawie Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM). Instytut podporządkowano Ministerstwu Nauki, Szkolnictwa Wyższego i Techniki. Pierwszym dyrektorem został prof. S. Kaliski, wówczas kierownik ministerstwa.

Sukces nagrodzony

W latach 70. i 80. XX w. w IFPiLM badano głównie plazmę wytwarzaną laserem i wspólnie z IBJ (później IPJ) plazmę w układach typu *plasma focus*. Przez

kilka lat sprawdzano też idee profesora Kaliskiego dotyczące kompresji plazmy za pomocą wybuchu konwencjonalnego oraz kombinowane warianty fuzji jądrowej: dogrzewanie impulsem laserowym plazmy w układzie *plasma focus* i plazmy skompresyjowanej wybuchem oraz grzanie takim impulsem plazmy w silnym polu magnetycznym. Prace te dostarczyły wiele oryginalnych wyników naukowych, ale nie potwierdziły potrzeby dalszych badań w większej skali w celu sprawdzenia przyszłych zastosowań energetycznych. Wyniki badań fuzji laserowej i fuzji w układzie *plasma focus* zostały wyróżnione zespołowymi Nagrodami Państwowymi I stopnia. Po śmierci prof. Kaliskiego, we wrześniu 1978 r. nowym dyrektorem Instytutu został jego zastępca, doc. inż. Sławomir Denus.

Do badania plazmy wytwarzanej laserem, oprócz lasera neodymowego zastosowanego do demonstracji fuzji DD w 1973 r., w następnych latach wykorzystywano też inne lasery: zakupiony we Francji laser QL oraz lasery zbudowane w WAT i w IFPiLM – laser na dwutlenku węgla oraz czterowiązkowy laser neodymowy (w różnych wariantach). Badania takiej plazmy prowadzono także w ramach współpracy w Instytucie Fizycznym (FIAN) w Moskwie kierowanym przez prof. N.G. Basowa, laureata nagrody Nobla. Do badania plazmy laserowej zbudowano w IFPiLM nowoczesne układy diagnostyczne. Kontynuowano badania plazmy w układach *plasma focus* we współpracy z IBJ (IPJ), doskonaląc jednocześnie metody pomiarowe.

W latach 80. w IFPiLM rozpoczęto przygotowania kilku układów diagnostycznych dla tokamaka T15 budowanego w Moskwie. Prace te przerwano po kilku latach z powodu wstrzymania budowy tego układu.

W 1987 r. IFPiLM podporządkowano Ministerstwu Obrony Narodowej. Przez kilka lat Instytut był reorganizowany, co oznaczało ograniczenie badań plazmowych i rozwijanie prac w zakresie optoelektroniki. W tym okresie dyrektorem Instytutu