

# Przyszłość światowej energetyki - kontrolowana fuzja termojądrowa

Rozmowa z prof. **ANDRZEJEM GAŁKOWSKIM**,  
dyrektorem Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

**E**rnest Rutherford zwykł mawiać, że cała nauka dzieli się na fizykę i zbieranie znaczków. Nawet jeśli powyższy osąd potraktować wyłącznie w kategorii błyskotliwego bon mot trudno negować, iż fizyka jest dyscypliną naukową sytuowaną bardzo wysoko w panteonie nauki?

O miejscu danej dyscypliny naukowej w świadomości społecznej decyduje bardzo wiele czynników. Najważniejszym czynnikiem powinien być ten o charakterze czysto intelektualnym, jeśli mamy na myśli obszar tak zwanych badań podstawowych. Albert Einstein zwracał uwagę, że to, co nazywamy fizyką, obejmuje całą grupę nauk przyrodniczych, opierających swe teorie na pomiarach, a idee, hipotezy i twierdzenia, jakie owe nauki formułują, dają się przedstawić za pomocą równań matematycznych. Ale nie tylko przecież fizyce nadaje się tak wysoki status. Należy też wymienić matematykę, którą zwykło się od dawno i dość powszechnie nazywać królową nauk. Zatem cytowane często anegdoty o wybitnych naukowcach i ich poglądach na naukę pełnią swoistą i ważną bez wątpienia rolę popularyzatorską, ale rzeczywistą miarą oceny fizyki jest sprawdzalny doświadczalnie wkład tej dyscypliny wiedzy w rozwój intelektualny ludzkości i postęp cywilizacyjny. Podstawowym celem fizyki jest to, aby dzięki niej lepiej rozumieć Wszechświat, czyli to wszystko, co nas otacza. I dzięki temu poznać prawa rządzące Wszechświatem w skali makro i mikro. Jest to fundamentalna fizyka, podstawowa, mające bezsprzecznie ogromne znaczenie dla kultury. Wzbogaca nasze dziedzictwo duchowe. To jest to pierwsze zadanie fizyki – zrozumieć wszechświat i w ten sposób zaspo-



Fot. Kasia Guzik

## Prof. ANDRZEJ GAŁKOWSKI

Inżynier fizyk, naukowiec, menedżer. Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (Wydział Chemii i Fizyki Technicznej – specjalność fizyka techniczna), którą ukończył z wyróżnieniem w 1974 r., otrzymując w konkursie Rektora WAT I nagrodę za najlepszą pracę magisterską. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 1981 r. na WAT. (W latach 1982-85 studiował także matematykę na UW).

W 1996 r. habilitował się w Instytucie Problemów Jądrowych na podstawie rozprawy, w której wyprowadził uogólnione równanie Taylora opisujące stany zrelaksowane plazmy gorącej z makroskopowymi przepływami. Prowadził badania naukowe w renomowanych ośrodkach naukowych w Wielkiej Brytanii

i USA (m.in. w JET Joint Undertaking (laboratorium Wspólnoty EURATOM oraz na Jackson State University). Był członkiem zespołu badawczego w ŚCO Cyfronet Instytutu Energii Atomowej. Autor wielu publikacji z dziedziny fizyki oraz organizator międzynarodowych konferencji naukowych.

Od 1976 r. pracuje w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, gdzie zajmuje się teorią i modelowaniem utrzymywania plazmy w zamkniętych pułapkach magnetycznych oraz procesami transportu w plazmie namagnetyzowanej. Przez wiele lat pełnił funkcję zastępcy dyrektora ds. naukowych, a od roku 2010 jest dyrektorem naczelnym tego instytutu.

Prof. Andrzej Gałkowski w latach 2004-2011 koordynował prace Asocjacji Euratom-

IFPiLM – konsorcjum 11 instytucji naukowych w Polsce prowadzących prace badawczo-rozwojowe na rzecz europejskiego programu syntezy jądrowej oraz międzynarodowego programu ITER. W latach był członkiem Komitetu Doradczego Komisji Europejskiej (CCE-FU) ds. programu syntezy jądrowej Wspólnoty EURATOM, a w latach 2005-2013 był członkiem Komitetu Koordynującego Porozumienia EFDA (European Fusion Development Agreement). Członek Sekcji Fizyki Plazmy Polskiego Towarzystwa Fizycznego oraz Polskiego Towarzystwa Matematycznego. Jest członkiem rad programowych i redakcyjnych czasopism naukowych (m.in. Nukleoniki).

koić ciekawość ludzką i jednocześnie wzbogacić intelekt człowieka. Mam taką nadzieję, iż fizyka potrafi doskonalić umiejętności człowieka, ucząc nas mądrego patrzenia na świat. Większość teorii dotyczących fundamentalnej fizyki można nazwać dziełami sztuki. Pod względem zarówno intelektualnym, jak i estetycznym są to arcydzieła.

***Richard Feynman, znany ze swych celnych, ale i szokujących powiedzeń, miał chyba rację mówiąc: physics is like sex: sure, it may give some practical results, but that's not why we do it. Żyjemy jednak w świecie, w którym dość bezwzględnie oczekuje się od naukowców praktycznych efektów realizowanych przez nich pasji poznawczych!***

Tak było zawsze, nie tylko obecnie. Jeśli spojrzymy na historię ludzkości widać wyraźnie, iż fizyka stworzyła całą ludzką technikę, będąc i jej źródłem, i jednocześnie esencją. Wielkie teorie fizyczne stały się później początkiem powstania i rozwoju nowych technologii, pozostając wciąż wielkimi dziełami intelektualnymi wzbogacającymi kulturę ogólnoludzką. Natomiast ich zastosowanie stanowi wymierną, bo pragmatyczną nobilitację fizyki, jako nauki podstawowej. I przed fizyką współczesną też stoi zadanie tworzenia podstaw techniki. Jest to drugi wielki cel fizyki, który wiąże się z pierwszym, a sprowadza się właśnie do powstania nowych technologii. Sprawdzeniem słuszności teorii jest to, że coś działa w oparciu o nią. Wszystkie technologie, gdzieś u swych podstaw, muszą sięgać fizyki. W efekcie fundamentalne teorie nie służą wyłącznie zaspokojeniu ciekawości i potrzeby intelektualnej i estetycznej, ale i temu, aby maksymalnie ułatwić człowiekowi bytowanie w świecie. I w tym momencie zaczyna się już fizyka stosowana. A to co nazywamy fizyką stosowaną jest niczym innym jak stworzeniem podstaw technologii, czy wręcz już samej technologii wykorzystywanej na skalę przemysłową.

***Na pytanie, które odkrycie lub wynalazek chciałby zobaczyć za swojego życia, Stephen Hawking odpowiedział, że życzyłby sobie, aby jak najszybciej synteza jądrowa stała się źródłem energii wykorzystywanej do celów gospodarczych. Podkreślając że właśnie energia powstała w wyniku fuzji jądrowej będzie stanowić jej niewyczerpane źródło, nie emitując zanieczyszczeń i nie przyczyniając się do efektu globalnego ocieplenia. Z tego wynika, że ten wybitny fizyk przywiązuje szczególnie dużą wagę do badań nad reakcją syntezy jądrowej.***

Jedną z zagadek, które przez lata intrygowała uczonych, było pochodzenie energii Słońca. Przed dziewięcioma dziesięcioleciem zaczęto wysuwać przypuszczenia, że źródłem energii Słońca, jak i wielu innych gwiazd, nie jest bynajmniej spalanie węgla czy grawitacja, lecz synteza wodoru, prowadząca w kilku etapach do powstania helu. Reakcją taką umożliwia bardzo wysokie ciśnienie i bardzo wysoka temperatura panująca wewnątrz Słońca. Odkrycie i zrozumienie tego procesu zawdzięczamy badaczom z różnych krajów, takim jak Oliphant, Atkinson, Jeans, Houtermans, Gamow, czy Bethe. W 1938 r. Hans Bethe, wspólnie z Charlesem Critchfieldem, podali wzór mogącej przebiegać w Słońcu termojądrowej reakcji łączenia protonów. Nad nami pracuje reaktor termojądrowy o niewyobrażalnej mocy, jakim jest Słońce. Źródłem energii słonecznej jest bowiem reakcja przemiany wodoru w hel. Hel był pierwszym pierwiastkiem, który odkryto nie na Ziemi, ale w widmie Słońca. Warto przypomnieć, iż początkowo sądzono,

że spalanie helu jest źródłem energii, jaka dociera do naszej Ziemi ze Słońca. Oczywiście dziś wiemy, że jest przecież dokładnie na odwrót – to właśnie w wyniku przebiegu procesu spalania o charakterze termojądrowym, zachodzącego wewnątrz Słońca, wytwarzany jest hel, który występuje także na Ziemi, jako domieszka gazu ziemnego.

***Niestety źródło tej „życiodajnej energii” w rękach człowieka posłużyło dziełu zniszczenia!***

Prace atomistów w USA i ZSRR były finansowane przez rządy tych krajów. Ciekawe jest też prześledzenie wątku pierwszych badań nad bronią jądrową nie tylko w odniesieniu do tych dwóch państw, ale także w Niemczech, gdzie podczas II wojny światowej takie prace również były prowadzone. Faktycznie, badania nad technicznymi możliwościami rozszczepienia jądra atomowego nabrały priorytetowego znaczenia i ogromnego przyspieszenia w związku z militarnymi programami stworzenia broni masowego rażenia. Zanim stworzono bombę termojądrową, zwaną też bombą wodorową lub bombą H, najpierw skonstruowano bombę atomową, wykorzystującą energię wydzielaną podczas reakcji rozszczepiania ciężkich pierwiastków (uranu, plutonu). W następnej kolejności – przy zastosowaniu reakcji fuzji termojądrowej – zbudowano bombę termojądrową, czyli działającą na wodorze, to znaczy na jego izotopach. I dokonano tego stosunkowo szybko. Prace uczonych amerykańskich nad pierwszą bombą wodorową, zwaną również superbombą, trwały dwa lata. Pierwszą taką reakcję termojądrową na Ziemi udało się przeprowadzić uczonym amerykańskim z ośrodka badań atomowych w Los Alamos. Próbnym wybuch miał miejsce na wyspie Elugelab (Wyspy Marshalla) w dniu 1 listopada 1952 roku. Ale już dziewięć miesięcy później Rosjanie dokonali udanej eksplozji bomby wodorowej na poligonie w Semipalatyńsku łamiąc tym samym monopol amerykański na tego rodzaju broń, dużo groźniejszą w skutkach od bomby atomowej zrzuconej na Hiroszimę i Nagasaki.

Poznanie tajemnicy fuzji jądrowej, która wówczas posłużyła wyłącznie do destrukcji – mam na myśli bombę H – obecnie może zostać wykorzystane w celach pokojowych. Może służyć do gospodarczego rozwoju ludzkości jeszcze skuteczniej i z większym pożytkiem, niż zaprzęgnięcie rozszczepienia jąder ciężkich do wytwarzania energii elektrycznej, co już się dzieje w setkach reaktorów elektrowni atomowych, odkąd posiadliśmy umiejętność przeprowadzania kontrolowanej reakcji rozszczepienia. Ten typ reakcji polega na rozszczepieniu jąder uranu (lżejsze produkty rozszczepienia unoszą uwolnioną energię w postaci energii kinetycznej), będzie też stosowany w pracy reaktorów IV generacji. Ale jednak o wiele bardziej interesującą z punktu widzenia prowadzenia procesu optymalnej konwersji energii jest reakcja syntezy termojądrowej, zachodzącej z udziałem najlżejszych jąder, czyli wodoru i jego izotopów, jakim są deuter (proton + neutron, symbol chemiczny D) oraz tryt (proton + 2 neutrony, symbol chemiczny T). W laboratoriach najczęściej są badane przebiegi reakcji deuter + deuter i deuter + tryt, dające odpowiednio hel-3 + neutron (lub tryt + proton), i hel-4 + neutron. Doświadczenia te mają oczywiście na celu opanowanie w sposób kontrolowany syntezy jądrowej, zwanej też fuzją jądrową. Należy zdać sobie sprawę z tego, iż wydajność energetyczna reakcji fuzji jądrowej jest wielokrotnie wyższa niż reakcja rozszczepienia jąder, a ta z kolei jest o wiele bardziej wydajna od reakcji chemicznych, jakie zachodzą w konwencjonalnych elektrowniach.

***W niedawno wydanej monografii „Energetyka jądrowa w Polsce” w rozdziale dotyczącym energetyki termojądrowej, którego jest Pan autorem, przywołuje Pan odpowiedź Lwa Arcymowicza, jednego z pionierów badań nad fuzją jądrową na pytanie kiedy zostanie zbudowana pierwsza elektrownia termojądrowa: „Dokładnie wtedy kiedy ludzkość będzie jej potrzebować”. Czy ten czas właśnie nadchodzi?***

Jestem w pełni przekonany co do tego, że ten czas nadchodzi właśnie teraz.

### ***Dlaczego w tym momencie?***

Na taki stan rzeczy składa się wiele przyczyn, postaram się zasygnalizować niektóre z nich. Truizmem jest stwierdzenie, iż bez energii nie ma rozwoju. Ale wszystkie kraje świata już teraz napotykać na poważną barierę rozwoju z powodu trudności w dostępie do źródeł energii. Zasoby surowców kopalnych, pomimo wciąż nowych odkryć, nie pokrywają wystarczająco wciąż rosnących potrzeb gospodarki światowej. Z roku na rok zapasy światowych złóż kopalnych się kurczą, a ich ceny wciąż rosną. Nie może być inaczej skoro są one nieodnawialne. A skoro w świecie istnieje skończona ilość zasobów kopalnych, kiedyś musi ich zabraknąć. Szacuje się, że ropy naftowej i gazu, przy tak intensywnej eksploatacji złóż, wystarczy ludzkości na półwiecze, a węgla i uranu najprawdopodobniej na dłużej, bo na ponad sto lat. Oczywiście różne szacunki różnią się między sobą, co jednak w niczym nie zmienia faktu, że w pewnym momencie nasze ziemskie zasoby energetyczne wyczerpią się definitywnie.

Ponadto postępuje dewastacja środowiska naturalnego, które jest skażone wskutek nadmiernej emisji dwutlenku węgla (i innych gazów cieplarnianych) w wyniku eksploatacji elektrowni opalanych węglem, ropą naftową i gazem. Są to dwie główne przyczyny, z racji których można sformułować pogląd, iż przyszłość energetyki jądrowej będzie uzależniona od pracy reaktorów funkcjonujących w oparciu o zasadę kontrolowanej fuzji termojądrowej. Chociaż zasoby uranu w świecie wydają się stosunkowo bogate, to jednak i one się kiedyś wyczerpią. Nie będzie natomiast trudności z pozyskaniem paliwa dla elektrowni termojądrowych. Na Ziemi dysponujemy nimi w ilości praktycznie nieograniczonej. Dość powiedzieć, że w 1 m<sup>3</sup> wody morskiej znajduje się 30 g deuteru. A słone wody morskie pokrywają bez mała trzy czwarte Ziemi. Z kolei tryt uzyskuje się w reakcji z litem. Ten ostatni występuje w prawie wszystkich formacjach skalnych. Mając na względzie to, iż wydajność reakcji termojądrowej jest o wiele razy wyższa niż reakcji opartej na rozszczepieniu jąder, powiedzenie, że ilość paliwa w tym wypadku jest praktycznie nieograniczona ma swoje uzasadnienie.

Dodatkowym walorem elektrowni termojądrowych jest fakt, że nie będą one emitować szkodliwych gazów, nie będzie też problemów ze składowaniem odpadów radioaktywnych, które w czasie bieżącej eksploatacji elektrowni nie powstają; radioaktywny będzie złom konstrukcji reaktora wycofanego z użytku, jednak czas potrzebny na utylizację tego złomu będzie względnie krótki. I inna kwestia, także bardzo istotna: w reaktorze wykorzystującym reakcję fuzji jądrowej nie może dojść do niekontrolowanego wzrostu energii, nawet gdyby awaria nastąpiła w wyniku błędu ludzkiego lub uszkodzeń w instalacji. Zatem możemy tu mówić o inherentnym bezpieczeństwie pracy elektrowni termojądrowej.

***Ale kraje Unii Europejskiej nie za lat 50, czy 100, ale już dziś są w szczególnie trudnej sytuacji energetycznej!***

W chwili obecnej ponad 50% potrzebnej energii państwa członkowskie UE importują spoza swojego terytorium, głównie w postaci ropy naftowej i gazu. Szacuje się, że za piętnaście lat import ten wzrośnie do 70%. Trudna sytuacja na rynku paliw pogłębi się, tym bardziej, że w ciągu najbliższych lat w Chinach i Indiach, oraz innych krajach rozwijających się, zużycie energii elektrycznej ulegnie podwojeniu. Dlatego już teraz trzeba postawić pytanie: co dalej? I owo pytanie nie może pozostać bez odpowiedzi!

***Jedyna nadzieja jest taka, że pojawią się nowe wysokosprawne technologie.***

Pomysł na energetykę węglową, czy gazową ma ograniczony horyzont czasowy. Także pomysł na energetykę jądrową, o ile nie zostaną w niedalekiej przyszłości wdrożone technologie umożliwiające powielanie paliwa.

***Zatem największe nadzieje rozbudza kontrolowana fuzja jądrowa mogąca stanowić potencjalnie niewyczerpalne źródło energii!***

Jest bardzo duże prawdopodobieństwo, że tak się właśnie stanie. Eksperymenty przeprowadzane w tokamakach JET i TFTR wykazały, że uzyskanie energii użytecznej na drodze fuzji jądrowej lekkich jąder jest możliwe. Na razie w JET osiągnięto 16 MW, a w TFTR zaś 11 MW. Tokamaki wydają się być tymi urządzeniami, które stwarzają największą szansę na zrealizowanie programu otrzymywania energii użytecznej z reakcji fuzji jądrowej.

***Jednak czas od odkrycia i opisu reakcji syntezy termojądrowej do wdrożenia odpowiedniej technologii pozwalającej na użytkowe wykorzystywanie uwalnianej w wyniku reakcji energii wydłuży się...***

Okres niespełna dwudziestu lat od odkrycia zjawiska fizycznego do momentu powstania technologii i jej zastosowania, to jest ten czas w którym udało się – mówiąc skrótowo – wykorzystać atom na potrzeby energetycznego zasilania maszyn, urządzeń, obiektów. I gdy w latach pięćdziesiątych minionego stulecia zaczęto się zajmować fuzją jądrową, biorąc pod uwagę także to, że realna jest opcja wykorzystania syntezy jądrowej jako źródła energii użytecznej, czyli w tym wypadku elektrycznej, także wydawało się, że mniej więcej tyle samo czasu potrzeba, żeby tego dokonać. Były to – jak pokazało życie – przewidywanie zdecydowanie zbyt optymistyczne.

***Stopień trudności okazał się więc o wiele większy niż sądzono, ale chyba także i ostateczny pożytek dla ludzkości będzie też odpowiednio proporcjonalny do skali trudności, a więc w o wiele większym wymiarze, niż ma to miejsce w przypadku korzystania z energetyki jądrowej opartej o reakcję rozszczepienia?***

Rzeczywiście. Dotyczy to zarówno wymiaru ekonomicznego jak i ekologicznego. Tym bardziej, że kwestie stanowiące aktualnie w obszarze syntezy termojądrowej powód opóźnień w jej przemysłowym zastosowaniu – jeśli uda się je rozwiązać – będą w efekcie dodatkową, dużą zaletą tego sposobu konwersji energii. Pamiętajmy, że elektrowni termojądrowej nigdy nie będzie groziło to, co spowodowało wybuch w Three Mile Island w USA, czy Czarnobylu na Ukrainie.

***Wydaje się, że jeśli pierwotne przewidywania co do terminu przemysłowego opracowania technologii – sformułowane***



**na zasadzie analogii z powstaniem energetyki jądrowej – nie okazały się trafne, należy bezwzględnie zintensyfikować prowadzone prace. Czy takie przyspieszenie prac badawczych ma obecnie miejsce?**

Coraz więcej państw i środowisk naukowych, instytutów badawczych i uczelni jest zaangażowanych w programy badawcze związane z energetyką termojądrową. Owe programy są nadzwyczaj złożone od strony naukowej i czysto technicznej i wymagają olbrzymich nakładów finansowych. Właśnie teraz wchodzi one w kolejny etap. Jest to faza badań o szczególnym znaczeniu dla powodzenia zaprzęgnięcia fuzji termojądrowej do zagwarantowania ludzkości praktycznie nieograniczonego w czasie dostępu do korzystania z energii.

**Można się zatem pokusić o stwierdzenie – na dodatek posługując się przytoczoną już wyżej opinią Hawkinga – że nie ma aktualnie ważniejszego tematu poznawczego, naukowego i gospodarczego, niż prace na rzecz kontrolowanej syntezy termojądrowej?**

Tak kategorycznie tego bym nie ujmował. Naszym celem – a mam tu na myśli nie tylko nasz Instytut, ale całą międzynarodową społeczność uczonych zajmujących się fuzją termojądrową – nie jest dążenie, w wypadku przemysłowego powodzenia naszego programu, do monopolu na energetycznym rynku. Pragniemy natomiast dostarczyć do tego pakietu energetycznego – w którym teraz znajduje się energetyka jądrowa, odnawialna, czy energetyka oparta na węglu, gazie i ropie naftowej – jeszcze jeden element, który w przyszłości może się okazać jednak najbardziej perspektywiczny, długofalowy, spośród tych wszystkich, przed chwilą wymienionych, a to oznacza, że gra jest war-

ta świeczki. Zatem warto jest poświęcić nawet kolejne kilkadziesiąt lat po to, aby pokolenia, które po nas przyjdą, miały zapewniony dostęp do energii. Mówiąc wprost – aby nie doszło do sytuacji, że nasza cywilizacja kończy się z powodu braku energii. Ludzkość nie ma tu wyboru. Skoro poszukujemy dla ludzkości takiego rodzaju konwersji energii, dzięki któremu oddalone zostanie już bezpowrotnie widmo kryzysu energetycznego, bezwzględnie musimy oczywiście zintensyfikować badania prowadzące do wykorzystania energii uwalniającej się w wyniku przebiegu reakcji fuzji termojądrowej. Jestem przekonany iż dzień, w którym uda się wykorzystać już posiadaną wiedzę teoretyczną i zdobyte podczas eksperymentów laboratoryjnych doświadczenie do zbudowania pierwszego reaktora termojądrowego, na pewno będzie przełomem naukowym i gospodarczym o ogromnym znaczeniu dla ludzkości.

**W wypadku energetyki jądrowej polegającej na rozszczepieniu jąder prace nad pokojowym wykorzystaniem mogły się szybciej posuwać, dzięki równoległej realizacji programów wojskowych?**

Nie wiązałbym tych kwestii tak mocno, aczkolwiek jest oczywiste, że wiele technologii i materiałów opracowanych na potrzeby militarne znajdowało później szerokie zastosowanie cywilne. Przed 60 laty prezydent Eisenhower na Zgromadzeniu Ogólnym ONZ powiedział, że należy zabrać broń jądrową z rąk żołnierzy i włożyć w ręce tych, którzy potrafią zaadaptować atom do celów pokojowych. Te słowa zapoczątkowały nowy kierunek w polityce, nazwany „Atom for Peace” (Atom dla pokoju).

**Badania w dziedzinie nuklearnej wymagają dużych nakładów finansowych.**



Fot. Kasia Guzik

Bliski przyjaciel przywódcy Indii Nehru, hinduski fizyk Homi Jehangir Bhabha, zwany ojcem indyjskiego programu jądrowego, rzekł już przed półwieczem na jednej z konferencji naukowych, że *nie ma paliwa tak kosztownego, jak brak paliwa*.

***Odwrotnością tego stwierdzenia byłoby powiedzenie, iż najtańszą energią może być wyłącznie taka, której się nie używa!***

Z punktu widzenia człowieka wysoka efektywność ekonomiczna korzystania z energii związana jest z wydajnością procesu jej konwersji. Idzie tu o maksymalny stopień efektywności procesu konwersji energii. I tu właśnie koncepcja związana z fuzją termojądrową – w wypadku jej zrealizowania w celach użytkowych na potrzeby energetyczne ludzkości – rysuje się jako potencjalnie niewyczerpalne źródło energii. Ilość energii wydzielanej w procesie syntezy termojądrowej jest bardzo duża. W reakcji deuteru z trytem uwalnia się łącznie 17,6 MeV energii, z czego 80% w postaci energii kinetycznej wyemitowanego neutronu, zaś 20% w postaci energii kinetycznej wytworzonego jądra helu. Wystarczy policzyć, że do zasilenia elektrowni termojądrowej o mocy 1000 MWe, wytwarzającej rocznie 800 GWh energii elektrycznej, potrzeba 257 kg paliwa rocznie, aby się przekonać, jak można byłoby rozwiązać wiele problemów gospodarczych na świecie, gdyby udało się naśladować reakcje dziejące się w Słońcu. Najbardziej przydatna do korzystania na ziemi jest fuzja ciężkich izotopów wodoru, czyli deuteru i trytu, a to dlatego, że ta reakcja ma największy przekrój czynny przy relatywnie niskich (ale ciągle bardzo wysokich) temperaturach. Można obzwożowo porównać to tak, że jeśli elektrownia jądrowa działająca w oparciu o reakcję rozszczepienia jąder, potrzebuje na wytworzenie danej ilości energii elektrycznej z paliwa uranowego, które można dostarczyć samochodem ciężarowym, w wypadku powodzenia programu stworzenia elektrowni termojądrowej, ilość paliwa potrzebna do wytworzenia tej samej ilości energii elektrycznej miałaby już objętość wiele razy mniejszą, która bez trudu zmieściłaby się nawet w furgonetcie.

Aby jednak to, o czym mówimy, nad czym pracujemy i o czym marzymy, stało się realną rzeczywistością trzeba opanować proces syntezy termojądrowej, w sposób powtarzalny i kontrolowany.

### **Stworzyć Słońce na Ziemi?**

Metaforycznie mówiąc właśnie tak, a fizycznie chcemy naśladować i przeprowadzić reakcję, która naturalnie, samorzutnie dokonuje się w Słońcu. Synteza jądrowa jest źródłem promieniowania słonecznego i tak będzie dopóty Słońce z czerwonego olbrzyma nie zamieni się w tzw. białego karła, a następnie czarnego karła. Czas studzenia białego karła do postaci czarnego szacowany jest na czas o wiele dłuższy niż obecny wiek naszego Wszechświata. Z perspektywy naszej i milionów pokoleń po nas chwila, kiedy to nastąpi, jest odległa od nas o czas niewyobrażalnie długi. My powinniśmy zająć się tym, w jaki sposób można wykorzystać, tu na Ziemi, reakcję zachodzącą w Słońcu. Powtórzenie reakcji zachodzących w Słońcu ma służyć nam, na Ziemi.

***Współcześnie jesteśmy świadkami „sprowadzenia kawałka słońca” na Ziemię!***

Dzięki nauce nie są to już mity dawnych starożytnych cywilizacji, ale realne, chociaż wciąż napotykać na przeszkody dokonania człowieka. Nie jest łatwym zadaniem powtórzyć w wa-

runkach laboratoryjnych reakcję dziejącą się dzięki splotowi specyficznych warunków w naturze. Temperatura wewnątrz Słońca wynosi 17 000 000°C, czyli jest to temperatura rzędu 10 milionów kelwinów. Temperatura, która jest optymalna dla reakcji DT, to 100–200 mln kelwinów.

***Sprawą na dziś jest jak skutecznie będziemy „modelować plazmę”?***

Plazma stanowi nie tylko bardzo nietypowy, ale i niezwykle trudny do badania stan materii. Właściwości tego specyficznego z punktu widzenia fizyki stanu materii są na tyle intrygujące i zaskakujące, że potoczne określenie plazmy jako czwartego stanu materii wydaje się być uzasadnione. Należy stworzyć warunki sprzyjające temu, aby część energii wydzielanej podczas reakcji syntezy jądrowej mogła służyć do grzania plazmy, w wyniku czego reakcja będzie miała charakter samopodtrzymującej.

***Współcześnie uczeni biorą zatem udział w wyścigu, jak zastawić na plazmę skuteczną pułapkę?***

Jakby to nie zabrzmiało, ale właśnie tak. A raczej jak ją najpierw wytworzyć i sterować polem magnetycznym, czyli zamknąć ją w pułapce magnetycznej.

***Wśród ekspertów trwa wciąż dyskusja na temat tego, w jakim kierunku mają być rozwijane badania nad energetyką termojądrową, bowiem sposobów na zainicjowanie reakcji termojądrowej jest kilka!***

Jak wcześniej wspomniałem temperatura, która jest optymalna dla reakcji DT, to 100–200 mln kelwinów, a w takiej temperaturze materia jest w stanie plazmy (zjonizowanego gazu) i powinna być uwięziona w niematerialnej pułapce, np. polu magnetycznym o specjalnej konfiguracji. Z bardzo zasadniczych rozważań wynika, że zamknięta pułapka magnetyczna musi mieć kształt torusa i dlatego urządzenia termojądrowe (ich komory z plazmą) mają kształt obwarzanka.

Drugą z dwóch podstawowych koncepcji przeprowadzenia w sposób kontrolowany fuzji jądrowej jest zbudowanie elektrowni termojądrowej działającej na zasadzie mikro wybuchów inicjowanych laserem. Chodzi o tzw. uwięzienie inercyjne, w którym kulka składająca się z deuteru i trytu jest „zgniatana” promieniami lasera o wielkiej mocy. Każdy wybuch ma określoną moc. O ile jest dość łatwo doprowadzić do wybuchu w bombie, która ma ogromną moc, o tyle trudniej zrobić to samo w mikro kuleczce o bardzo małej objętości, gdzie z kolei proces musi zachodzić z dużą częstotliwością – 10 razy na sekundę. Plazma jak każdy gorący gaz ma skłonność do rozpraszania się i stygnięcia, co powoduje oczywiście spadek liczby reakcji syntezy termojądrowej. W gwiazdzie ta naturalna skłonność jest wystarczająca skutecznie kompensowana przez siłę grawitacji, co wynika z ogromnej masy gwiazd.

***Podstawowym warunkiem i jednocześnie trudnością wykorzystania energii fuzji termojądrowej jest więc trwałe uwięzienie plazmy, a poprzez to zmuszenie do permanentnej aktywności?***

Uwięzienie to ważny warunek, ale oczywiście nie jedyny. Istota eksperymentu na skalę laboratoryjną polega na stworzeniu takich warunków, aby móc wytworzyć plazmę. Co jak wiadomo wiąże się ze spełnieniem określonych wymogów związanych ze specyfiką stanu materii zwanej plazmą. W plazmie o bar-



Fot. Kasia Guzik

dzo wysokiej temperaturze ruch jonów i elektronów doprowadza do licznych zderzeń pomiędzy cząstkami. Owe zderzenia muszą być na tyle liczne i odpowiednio silne, aby wywołać reakcję fuzji. Jednak, aby tak się stało, trzeba stworzyć odpowiednie warunki dla przebiegu reakcji i trwania jej przez wystarczająco długi czas. Te szczególne warunki dotyczą zarówno zakresu temperatury plazmy, jak i odpowiedniej jej gęstości oraz czasu jej uwięzienia. W centrum Słońca panują idealne warunki do powstania czwartego stanu materii i reakcji fuzji izotopów wodoru. Plazma we wnętrzu Słońca ma temperaturę rzędu  $10^7$  K, a jej gęstość dochodzi do  $100 \text{ kg/dm}^3$ .

**Natura nie potrzebowała od nas, Ziemi, licencji na przeprowadzenie reakcji syntezy jądrowej.**

Odwrotnie, to my naśladujemy naturę, próbujemy poznać i wydrzeć jej tajemnice. Zazwyczaj prędzej, czy później to się udaje, jak to wynika z dotychczasowej historii nauki. Poszukiwanie odpowiedzi wymaga od naukowca z jednej strony pokory, z drugiej – konsekwencji.

**Zatem wszystko zależy od tego, jak skuteczną pułapkę uda się skonstruować, ale żaden materiał z którego zbuduje się jej ściany nie wytrzyma tak wysokich temperatur?**

Z tego wynika, po pierwsze, że program kontrolowanej fuzji jądrowej wymaga ścisłego współdziałania naukowców reprezentujących wiele dziedzin wiedzy, w tym i inżynierii materiałowej. Wiele możemy sobie obiecywać po nanotechnologiach. A po drugie, po to właśnie – między innymi – przeprowadza się doświadczenia w zakresie teorii i modelowania plazmy i materiałów, projektuje nowe materiały, prowadzi badania eksperymentalne zachowań plazmy, czemu służą też diagnostyki opracowane także w naszym Instytucie, aby utrzymać plazmę w odpowiedniej odległości od ścian urządzenia i nie do-

prowadzić do przedwczesnej erozji materiałów pierwszej ściany reaktora.

**Rozumiem, że w takim razie trzeba najpierw określić, później stworzyć takie optymalne warunki, aby w efekcie otrzymać dodatni bilans energetyczny? Tymczasem w Wikipedii można przeczytać, że „Obecnie (2011 rok), ludzkość potrafi wywoływać reakcję termojądrową w bombach termojądrowych oraz na niewielką skalę w urządzeniach badawczych. Do tej pory w żadnym eksperymencie nie udało się uzyskać dodatniego bilansu energetycznego. Pierwszym urządzeniem mającym to osiągnąć jest tokamak budowany w ramach projektu ITER na wzór działającego obecnie mniejszego JET”. Czy powyższy internetowy tekst jest dezinformacją skoro już w 1991 r. można było przeczytać w Gazecie Wyborczej, że „Po raz pierwszy w historii fizyki uzyskano w kontrolowanej reakcji termojądrowej więcej energii niż zużyto na wykonanie eksperymentu. Kontrolowaną reakcję termojądrową z dodatnim bilansem energii przeprowadzili europejscy uczeni w eksperymentalnym termojądrowym reaktorze JET w Oxfordshire (płd. Anglia). Reakcję udało się utrzymać tylko przez kilka sekund, uzyskując ok. megawata energii”. Czy mogę prosić o komentarz?**

W pierwszym tekście (z Wikipedii) jest zawarta prawda, ale nie cała, w drugim (z GW) jest nieścisłość. Stan, w którym plazma wydziela tyle energii z fuzji, ile energii doprowadza się do plazmy, aby podtrzymać jej temperaturę rzędu 100-200 mln kelwinów, nazywany jest z angielskiego *break-even* (termin wzięty z dziedziny finansów i księgowości – nie ma zysku, nie ma strat). Po polsku nazywa się to stanem zrównoważonym. Zapłon (ang. *ignition*) następuje wtedy, gdy do plazmy nie trzeba już dodawać energii, aby podtrzymać jej temperaturę (plazma sama się podgrzewa). Ta definicja dotyczy fuzji magne-



tycznej (tokamaki i stellaratory), w wypadku fuzji laserowej definicja jest inna.

Stan *break-even* (współczynnik wzmocnienia  $Q$ , czyli stosunek energii włożonej do plazmy do energii uwolnionej w wyniku reakcji fuzji, równy jest jeden w tym stanie), ma znaczenie czysto symboliczne. To, można rzec, jest pewien próg psychologiczny. W reaktorze współczynnik wzmocnienia musi być dużo większy, gdyż są jeszcze straty. Docelowo trzeba dążyć do osiągnięcia stanu zapłonu ( $Q =$  nieskończoność, gdy energia włożona jest równa zeru). ITER nie ma tak ambitnego celu, ale próba będzie podjęta. W tokamaku ITER współczynnik wzmocnienia ma być rzędu 100.

W nocie z GW nieścisłość polega na tym, że mówi się o energii zużytej na wykonanie eksperymentu, a nie o energii doprowadzonej do plazmy. Ta pierwsza jest dużo większa, gdyż po drodze są straty, a poza tym energia potrzebna jest nie tylko do nagrzania plazmy, ale także do zasilania magnesów i głównego transformatora (nie mówiąc o setce innych urządzeń). Ale nawet gdyby to poprawić, to na JET nie osiągnięto stanu *break-even* ( $Q$  było równe 0,7, a więc prawie 1). Ze względu na symboliczne, a nie naukowe, znaczenie tego stanu nikt nie starał się pobić rekordu i osiągnąć  $Q = 1$ . W prasie popularnej ten właśnie stan ( $Q$  równe lub większe od 1) określa się stanem, w którym więcej uzyskano niż włożono. I takiego stanu, w plazmie DT, jeszcze nigdy nie osiągnięto.

Natomiast w plazmie DD, na której wykonuje się większość eksperymentów (tylko JET ma urządzenia do posługiwania się radioaktywnym trytem), uzyskano stan (w roku 1997), który po przeliczeniu na DT daje  $Q = 1,25$ . To było na japońskim tokamaku JT-60U. W sensie naukowym uzyskano więc stan, o który pisze się w artykułach prasowych upowszechniających wiedzę na temat syntezy jądrowej. Naszym ostatecznym sukcesem i przyszłym energetycznym eldorado byłby oczywiście jednak stan zapłonu,  $Q =$  nieskończoność, a przynajmniej stan w którym  $Q =$  kilkaset, a zatem wielokrotność, przy której będzie można myśleć o elektrowni, a nie tylko o urządzeniu badawczym. W kontekście tych doniesień prasowych należy przypomnieć, że eksperymenty przeprowadzane w tokamakach JET i TFTR wykazały, że uzyskanie energii użytecznej na drodze fuzji jądrowej lekkich jąder jest możliwe. Na razie w JET osiągnięto 16 MW, a w TFTR zaś 11 MW.

Warto w tym miejscu powiedzieć, że jak wynika z podanych informacji, w USA, na układzie NIF (ang. *National Ignition Facility*) udało się niedawno osiągnąć tzw. *scientific break-even*. Otwiera to drogę do rewitalizacji europejskiego programu laserowej fuzji jądrowej. W programie europejskim, o akronimie HiPER (ang. *the European High Power Laser Energy Research facility*), inaczej niż w programie amerykańskim zapłon ma być osiągnięty na drodze wzbudzenia fali uderzeniowej, która „zapali” paliwo termojądrowe ściśnięte wcześniej do dużych gęstości za pomocą kompresji laserowej. W programie amerykańskim zapłon ma nastąpić w wyniku oświetlenia paliwa intensywnym promieniowaniem rentgenowskim otrzymanym w wyniku transformacji promieniowania laserowego w promienie X. Jeszcze inną koncepcją, zwaną szybkim zapłonem, badają Japończycy.

**Przywołuje Pan Profesor tokamaki, a jak przeczytałem w Pańskim artykule w „Przeglądzie Technicznym”, w stellaratorach nie istnieje konieczność stałego podtrzymywania prądu w plazmie?**

Wszystkie typy i rodzaje urządzeń zaprojektowanych do przeprowadzania eksperymentów związanych z fuzją termojądrową mają swoje mocniejsze i słabsze strony. Podobnie jak to ma miejsce w urządzeniach dla energetyki jądrowej, czy konwencjonalnej. Reaktor termojądrowy będzie urządzeniem pracującym w sposób ciągły, co faktycznie oznacza, że w wypadku tokamaka pozostaje do rozwiązania kwestia podtrzymywania prądu w plazmie. Problem ten nie występuje w stellaratorze. Koncepcja stellaratora była – chronologicznie rzecz ujmując – koncepcją wcześniejszą. Została opracowana w USA przez Lymana Spitzera. W Europie działa w tej chwili tylko jedno urządzenie typu stellarator (w Hiszpanii). Największym urządzeniem typu stellarator, budowanym obecnie na naszym kontynencie, będzie stellarator Wendelstein 7-X (W7-X). Znaczenie projektu W7-X jest związane także z tym, że będzie to drugie w Europie urządzenie fuzyjne z cewkami nadprzewodnikowymi (pierwszym jest tokamak Tore Supra we Francji) oraz z aktywnym chłodzeniem komory, co pozwoli na kwasi-stacjonarną pracę urządzenia. Koncepcja ta (stellaratora) jest intensywnie badana w Japonii. Zatem nie powiedziano tu ostatniego słowa, ale obecnie koncepcja tokamaka jest o wiele bardziej zaawansowana technologicznie. I to właśnie ona stała się najpierw podstawą konstrukcji JETA, a obecnie ITERa. Według tej koncepcji zbudowane są też urządzenia Tore Supra we Francji, ASDEX i TEXTOR w Niemczech, FTU we Włoszech, MAST w Wielkiej Brytanii, ISTTOK w Portugalii, COMPASS w Czechach. Tokamaki wydają się być tymi urządzeniami, które stwarzają największą szansę na zrealizowanie programu otrzymywania energii użytecznej.

**I nad tym, aby w przyszłości ziścił się m.in. projekt elektrowni z reaktorem termojądrowym pracują też naukowcy z kierowanego przez Pana Profesora Instytutu?**

Naukowcy w wielu krajach świata, w tym w Polsce, zajmują się problematyką termojądrową.

W naszym Instytucie – o czym jednoznacznie mówi już sama jego nazwa – zajmujemy się przede wszystkim zagadnieniami z obszaru fizyki plazmy, w tym fuzji jądrowej: zarówno magnetycznej, jak i laserowej. Specyfika nie tylko tej dyscypliny, którą uprawiamy, ale generalnie całej nauki, wymaga aktywnej współpracy z ośrodkami badawczymi w wielu krajach.

**Słyszałem, iż rzadko się zdarza w warszawskiej siedzibie Instytutu, iż obecni są bez wyjątku wszyscy pracownicy i to nie tylko z powodu urlopów, czy zwolnień lekarskich, a z racji zaangażowania w badania prowadzone poza krajem?**

Rzeczywiście często się zdarza taka sytuacja, acz przy dzisiejszych możliwościach korzystania z elektronicznej komunikacji osobista absencja nie stanowi większego problemu w funkcjonowaniu Instytutu. Tym bardziej że nasi naukowcy nie jadą do innych ośrodków w celach rekreacyjnych, lecz pracują w oparciu o wcześniej przygotowane grafiki eksperymentów laboratoryjnych. A nasza współpraca dotyczy instytutów badawczych w wielu krajach. Należy tu wymienić takie państwa, jak Wielka Brytania, Czechy, Francja, Niemcy, Włochy, Rosja, Portugalia. W ciągu minionych 37 lat istnienia Instytutu ta współpraca ma nieprzerwanie miejsce, a w ostatnich latach osiągnęła jeszcze większą intensywność.

Współpraca, obejmująca także inne jednostki naukowe w Polsce tworzące tzw. Asocjację Euratom-IFPiLM, dotyczy zarówno projektowania, budowy oraz instalacji aparatury, jak i oczywiście prowadzenia badań na urządzeniach Wspólnoty Euratom. Obejmuje ona, między innymi, udział w budowie stellaratora W7-X i przygotowanie diagnostyk dla tego układu, czy badania plazmowe i materiałowe w tokamakach JET, ASDEX UG, TEXTOR, Tore Supra, ISTTOK, COMPASS.

Udział uczonych polskich w programie Wendelstein 7-X jest postrzegany jako spełniający bardzo pożyteczną rolę integrującą jednostki naukowe wchodzące w skład polskiej Asocjacji Euratom. Zaangażowanie polskich grup w pracach nad W7-X dotyczy udziału w montażu części stellaratora w jedno urządzenie, opracowania systemów do badań diagnostycznych promieniowania rentgenowskiego, monitorowania węgla i tlenu, badań w zakresie diagnostyk neutronowych i mikrofalowych oraz podejmowania przez naukowców polskich analiz numerycznych dotyczących wytrzymałości konstrukcji. Ważnym partnerem, zarówno dla IFPiLM, jak 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).

W pracach badawczych na JET bierze udział nie mniej niż 16 oddelegowanych pracowników naukowych polskiej Asocjacji. Wykonują oni projekty związane z diagnostyką aktywności neutronowej, promieniowania rentgenowskiego, spektroskopii promieniowania w zakresie ultrafioletu próżniowego (VUV), polarymetrii, oraz budują gazowy detektor do spektrometrii rentgenowskiej. Asocjacja Euratom-IFPiLM bierze ponadto bardzo czynny udział w badaniach nowych technologii dla JET. Warto zaznaczyć, że praca w ramach projektu JET, tak jak i w ramach innych projektów, integruje polską społeczność fizyczną ze środowiskami krajów UE oraz wielu krajów spoza naszego kontynentu.

### ***A czy bywało i bywa tak, że jest też odwrotnie i to obcokrajowcy przyjeżdżają do Polski?***

Oczywiście, długa byłaby lista naukowców zagranicznych reprezentujących różne ośrodki badawcze, którzy u nas prowadzili i nadal prowadzą wspólne badania. Na przestrzeni 37 lat działalności Instytutu była to całkiem liczna grupa osób. Innym widocznym znakiem naszej aktywności na polu międzynarodowym była organizowana niedawno przez nasz Instytut konferencja naukowa „PLASMA-2013”, w której uczestniczyło ponad 150 naukowców z czołowych instytucji naukowych wielu krajów świata, czy też współorganizowane przez nasz Instytut i Asocjację Euratom-IFPiLM międzynarodowe sympozja poświęcone plazmie, w tym między innymi Workshop on *Plasma Edge Theory in Fusion Devices*, który odbył się po raz czternasty w swojej historii, tym razem w Polsce, w Krakowie. Co dwa lata organizujemy, wraz z Międzynarodowym Centrum Gęstej Plazmy Namagnetyzowanej (ICDMP), Letnią Szkołą Fizyki Plazmy w Kudowie Zdroju. Jako przykład podaję tylko ostatnie wydarzenia.

***W oficjalnej ocenie Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego Pański Instytut ma kategorię A, a w swojej grupie wspólnej oceny, liczącej 10 jednostek badawczych, obejmującej także NCBJ i IChTJ, został sklasyfikowany w ogólnopolskim ministerialnym rankingu na czołowym, bo trzecim miejscu w kraju.***

Cieszy tak wysoka ocena naszej pracy i konkretnych jej wyników, tym bardziej, że jest ona formułowana w oparciu o ściśle określone kryteria.

### ***Przełomem dla badań IFPiLM było przystąpienie Instytutu do programu fuzji jądrowej Wspólnoty Euratom?***

Niewątpliwie tak. Ale należy pamiętać, że ten niezwykle ważny dla naszego Instytutu fakt przyjęcia do programu mógł nastąpić dzięki naszym wcześniejszym dokonaniom i konkretnym osiągnięciom w dziedzinach stanowiących przedmiot badań środowisk naukowych skonsolidowanych wokół tego programu. Przystąpienia Polski do Wspólnot Europejskich, w szczególności do Europejskiej Wspólnoty Energii Atomowej (Euratom), otworzyło Instytutowi zupełnie nową perspektywę i stworzyło wielokierunkowe możliwości udziału w europejskim programie fuzji jądrowej (EPFJ) będącym – jak ocenia to społeczność uczonych – modelowym przykładem Europejskiej Przerzestrieni Badawczej.

Znaczenie Instytutu w obszarze fizyki plazmy i fuzji jądrowej zostało w pełni docenione i uznane przez europejskie gremia zarządzające EPFJ oraz przez Rząd RP, co znalazło wyraz w powierzeniu właśnie nam zadania koordynacji wszystkich prac, jakie na rzecz EPFJ oraz projektu ITER są prowadzone w Polsce. Została utworzona Asocjacja Euratom-IFPiLM grupująca krajowe ośrodki naukowe uczestniczące w programie badań nad fuzją.

### ***W nauce liczy się przede wszystkim intelekt, ale musi on być wsparty odpowiednim instrumentarium mającym mocne oparcie w nowoczesnej bazie laboratoryjnej?***

Na nasz naukowy dorobek składa się praca kilku zespołów naukowych Instytutu, prowadzących badania naukowe w wielu dziedzinach związanych z fizyką plazmy i fuzją jądrową, począwszy od tych, które są prowadzone od momentu utworzenia Instytutu, badań układów plasma focus i oddziaływania promieniowania laserowego z materią. Wysoka pozycja naukowa IFPiLM możliwa była dzięki osiągnięciom wyników prac teoretycznych i eksperymentów w dziedzinie badań nad fuzją jądrową i fizyką plazmy, gromadzonym przez cały okres działalności naszego Instytutu, tj. od roku 1976, w którym Instytut powstał, a nawet wcześniej.

Pod żadnym względem nie czujemy się gorzej, niż nasi partnerzy, np. z krajów gospodarczo bardziej od nas rozwiniętych. Co nie jest równoznaczne ze stwierdzeniem, że obecny stan naszej infrastruktury laboratoryjnej należy już traktować jako optymalny. Nie mamy u siebie – i oczywiście mieć nie będziemy – tych urządzeń, których budowa wykracza poza możliwości nawet najbardziej bogatego kraju, jeśli chciałyby one działać samodzielnie. Dlatego państwa świata podejmują wspólny wysiłek finansowy, czego widocznym znakiem jest ITER, chociaż na przykład Korea Południowa jest zdeterminowana co do tego, aby samodzielnie podjąć bardzo ambitny program w dziedzinie fuzji jądrowej, łącznie ze zbudowaniem prototypu elektrowni termojądrowej.

Pragnę podkreślić, że dopiero udział w EPFJ spowodował, że największe i najważniejsze na świecie urządzenie fuzji jądrowej, tokamak JET (Joint European Torus) w Culham koło Oksfordu, jest także naszym tokamakiem.

### ***Jak mamy rozumieć, że to unikalne w świecie urządzenie jest – jak je Pan Dyrektor określił – „nasze”?***



Określenie „nasze” jest prawomocne z tego powodu, że JET jest własnością Wspólnoty Euratom, której jesteśmy członkiem od roku 2004. Ale mam na myśli nie tylko formalny, prawny aspekt, ale także ten rzeczywisty, przejawiający się w codziennej praktyce badawczej. Naukowcy z naszego Instytutu mają do tego tokamaka dostęp i mogą w równoprawny sposób – podobnie jak uczeni z innych państw zrzeszonych we Wspólnocie Euratom – prowadzić badania, to znaczy projektować i przeprowadzać eksperymenty. Dzięki przystąpieniu IFPiLM do europejskiego programu fuzji jądrowej jest możliwy – co już ma miejsce – stały, aktywny udział pracowników naszego Instytutu, a także uczonych z innych ośrodków w kraju, w dużych międzynarodowych projektach badawczych na rzecz fuzji jądrowej.

Od wielu lat trwa owocna współpraca z Instytutem Fizyki CzAN w Pradze polegająca na badaniu plazmy laserowej wytwarzanej za pomocą działającego tam dużego lasera jodowego w nowym Ośrodku Badawczym PALS w Pradze. Prace są realizowane przez zespół z IFPiLM, wraz z innymi zespołami, w ramach projektów sponsorowanych przez Konsorcja europejskie: wcześniej LASERNET-Europe, a obecnie LASERLAB-Europe.

Badania te były i są do dzisiaj bardzo efektywne – dostarczają wyników na poziomie międzynarodowym przyczyniając się do umocnienia pozycji naszego Instytutu wśród europejskich laboratoriów laserowo-plazmowych.

***Czy projekt ITER, będący być może jednym z największych wyzwań technologicznych w dziejach ludzkości też może też Pan nazwać „naszym projektem”?***

Jesteśmy włączeni w obszar tych zagadnień m.in. poprzez funkcjonowanie i pełnienie roli koordynatora Asocjacji Euratom. Duża część prowadzonych u nas prac jest ukierunkowana na dogłębne poznanie i w konsekwencji optymalizację procesów, które będą zachodzić w momencie uruchomienia powstającego już we Francji największego tokamaka w świecie. ITER jest też największą inwestycją naukową we współczesnym świecie. Będzie on pracował na mieszaninie deuteru i trytu. Do chwili jego zbudowania największym tokamakiem pozostanie JET, ale po jego uruchomieniu JET będzie musiał oddać palmę pierwszeństwa. W kosztach budowie tokamaka ITER partycypuje siedem światowych mocarstw (w tym UE).

***Pisze Pan w jednej ze swych publikacji, że znaczenia badań plazmowych i termojądrowych nie należy sprowadzać wyłącznie do zbudowania reaktora termojądrowego?***

Absolutnie nie można wagi tych problemów poznawczych ograniczyć li tylko i wyłącznie do kwestii zbudowania w bliższej lub dalszej przyszłości reaktora termojądrowego w oparciu o kontrolowaną fuzję jądrową. Choć wszyscy bardzo chcielibyśmy aby do tego doszło. Równie istotne jest to, jak ekstremalne warunki technologiczne, jakie stawia program tych badań, rzutują pozytywnie na inne dziedziny wiedzy, techniki i technologii. Badania nad fizyką plazmy i fuzją jądrową owocują rozwojem także innych dziedzin, począwszy od technologii generatorów silnopiędowych i wysokonapięciowych, technologie laserów dużej mocy, akceleratorów cząstek, żyrottronów, technologii próżniowych i krio-

genicznych, rentgenografii oraz rentgenolitografii, technologii optycznych i elektrooptycznych, poprzez zdalną detekcję, fotochemię, nieniszczącą metrologię, spektroskopię wysokiej rozdzielczości, po holografii, kompleks zagadnień materiałowych przy wykorzystaniu wysokich ciśnień, pól magnetycznych, wielkich prądów i prędkości wytwarzanych w urządzeniach plazmowych, a skończywszy na automatyce, robotyce i diagnostyce tzw. ultraszybkich procesów. Te dziedziny są zaangażowane do udziału w programach fuzji jądrowej, a na pewno nie wymieniałem wszystkich. Program kontrolowanej syntezy termojądrowej to wyzwanie interdyscyplinarne na miarę XXI stulecia.

Nie wspominałem jeszcze o wielu innych naszych obszarach badawczych, które zasługują nie tylko na wzmiankę, ale szersze omówienie, z racji na wagę zagadnienia i stopień zaangażowania pracowników naszego Instytutu, a które przekraczają ramy nawet dłuższego wywiadu.

***Mam nadzieję, że Pan Profesor nie odmówi i będziemy mogli je rozwinąć w kolejnej rozmowie. Skoro pozostawaliśmy w kręgu „wysokiej nauki” oraz związanych z nią prac eksperymentalnych, nie wiem czy wypada zapytać „o sprawy przyziemne”, na przykład wykonywanie przez instytut prac o charakterze czysto usługowym na potrzeby własne i zewnętrznych kontrahentów?***

Nowatorski charakter prac naukowych prowadzonych w IFPiLM wymaga od zespołów naukowców, inżynierów i techników, a w dzisiejszej dobie także elektroników i informatyków, projektowania i wykonania narzędzi, urządzeń i stanowisk badawczych do prowadzenia eksperymentów. Wiele z nich, chociażby diagnostyki, są wykonywane we własnym zakresie tj. u nas i przez nas, ale wykorzystywane są także poza naszym Instytutem. Ponadto w IFPiLM funkcjonuje laboratorium testów wysokoprądowych posiadające odpowiednie urządzenia do ich przeprowadzania. Dzięki temu wykonujemy, na zlecenia przemysłu, szereg prac, m.in. badania odpornościowe różnych urządzeń (np. helikopterów, czy urządzeń odgromowych). Nasze badania są niezbędne dla dalszego rozwoju fizyki, ale z naszych badań – co szczególnie cieszę się – korzysta szeroko rozumiany obszar nauk technicznych oraz przemysł.

***I już na koniec zapytam: rozmawialiśmy o czwartym stanie materii, a czy Pan Profesor mógłby uchylić rąbka tajemnicy w związku z piątym stanem materii.***

Tu poprzestałbym na czwartym, wyjątkowo intrygującym stanie, jakim jest plazma. Ale będąc od wielu lat orędownikiem różnych form edukacji z zakresu fizyki, zwłaszcza dla dzieci i młodzieży, zapraszam do Teatru GO, któremu patronuje Fundacja Proscenium wspólnie z naszym Instytutem, a konkretnie na warsztaty „Piąty stan materii”. Teatr GO ma siedzibę w pomieszczeniach Instytutu.

***Nauka inspiruje sztukę?***

A sztuka naukę.

***Dziękuję za rozmowę.***

Rozmawiał: **Marek Bielski**