



Kraków, 10 września 2025

Kluczowy układ diagnostyczny reaktora ITER bliski realizacji

We Wszechświecie reakcja fuzji termojądrowej jest powszechna: to źródło energii gwiazd. W warunkach ziemskich produkcja energii za jej pomocą jest jednak wyjątkowo trudna z uwagi na problemy z efektywnym utrzymaniem plazmy emitującej znaczne ilości energii. Krytyczne znaczenie ma tu wiedza o aktualnym stanie plazmy oraz mocy wydzielanej w reakcjach jądrowych. We właśnie powstającym reaktorze termojądrowym ITER wiedzę tę będzie dostarczał wyrafinowany układ diagnostyki strumieni neutronów prędkich.

Budowany od kilkunastu lat eksperymentalny reaktor ITER stanowi kamień milowy w rozwoju energetyki termojądrowej: ma być pierwszym urządzeniem wykorzystującym fuzję jądrową, zdolnym wytworzyć kilkunastokrotnie więcej mocy, niż będzie wymagane do jego działania. Krytycznie ważny element układu diagnostyki plazmy w tym reaktorze – wysokorozdzielczy spektrometr neutronowy HRNS (High Resolution Neutron Spectrometer) – został właśnie zaprezentowany na łamach czasopisma „Fusion Engineering and Design”. Projekt spektrometru jest wspólnym dziełem fizyków i inżynierów z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, Uniwersytetu w Uppsali i Istituto per la Scienza e Tecnologia dei Plasmi w Mediolanie, rozwijanym w ścisłej współpracy z ITER Organization.

„Zaprojektowany przez nas spektrometr pozwala mierzyć – w pełnym zakresie mocy syntezy jądrowej przewidzianym dla reaktora ITER – zarówno liczbę, jak i energie neutronów emitowanych przez plazmę. Zdobywamy w ten sposób informację o proporcjach między deuterem a trytem, izotopami wodoru łączącymi się ze sobą we wnętrzu komory reakcyjnej”, mówi dr inż. Jan Dankowski (IFJ PAN), pierwszy autor artykułu opisującego spektrometr. Precyzuje następnie: „Pomiar populacji neutronów prędkich pochodzących z dwóch dominujących reakcji w plazmie jest bezpośrednim wskaźnikiem składu paliwa, temperatury jonów i jakości spalania. W ITER i przyszłych reaktorach będzie to jedno z kluczowych narzędzi do kontroli i optymalizacji pracy reaktora. Brak tej informacji oznaczałoby w praktyce utratę jednego z najważniejszych narzędzi diagnostycznych plazmy, co znacznie utrudniłoby zarówno badania naukowe w reaktorze ITER, jak i bezpieczną eksploatację przyszłych reaktorów energetycznych”.

Energetykę termojądrową śmiało można określić mianem „zielonej”. Energia ma tu być wytwarzana podobnie jak we wnętrzach gwiazd, czyli w reakcjach syntezy jądrowych, z których najbardziej obiecującą wydaje się fuzja izotopów wodoru (deuteru i trytu) w hel. Co istotne, deuter występuje w ziemskich oceanach w ogromnych ilościach, a trytu nie potrzeba wiele i może on być w przyszłości wytwarzany w samym reaktorze (przy bombardowaniu neutronami łatwiej dostępnego litu). Ponadto reakcja fuzji nie ma charakteru łańcuchowego, nie może więc doprowadzić do eksplozji i rozprzyszczenia dużych ilości wysoce szkodliwych materiałów radioaktywnych. Ryzyko skażenia otoczenia pozostaje więc minimalne i ogranicza się głównie do samych elementów konstrukcyjnych reaktora. Niestety, mimo ogromnego potencjału energetyka termojądrowa pozostaje w fazie badań i rozwoju. Praktyczne wdrożenie może nastąpić w perspektywie kilkunastu lat, gdy powstanie tokamak DEMO – pomost między reaktorami eksperymentalnymi a elektrownią termojądrową.

Jądra izotopów wodoru tworzą plazmę, która jako elektrycznie naładowana może być utrzymywana przez pole magnetyczne we wnętrzu toroidalnej komory próżniowej reaktora w izolacji od ścian (takie reaktory nazywa się tokamakami). Obecnie plazma ta musi być dodatkowo podgrzewana,

aby osiągnąć temperaturę rzędu 150 milionów kelwinów, gwarantującą właściwy przebieg reakcji. Powstające w trakcie fuzji wysokoenergetyczne neutrony jako elektrycznie obojętne ulatują ku ścianom tokamaka, umożliwiając odebranie większości wyprodukowanej energii (i docelowo produkując tryt w zderzeniach z litem).

Dla wydajności przyszłych reaktorów termojądrowych fundamentalne znaczenie ma jądro helu powstające w reakcji syntezy deuteru i trytu. Obdarzone dużą energią i elektrycznie naładowane, pozostając w polu magnetycznym tokamaka wewnątrz plazmy ma za zadanie oddać swoją energię w kolizjach z jądrami deuteru i trytu, by w rezultacie podnieść energię paliwa termojądrowego. Proces ten pozwoliłby zredukować wydatki energetyczne związane z zewnętrznym podgrzewaniem plazmy. Reaktor ITER – wznoszony w Cadarache we Francji od 2007 roku przy budżecie obecnie przekraczającym 20 miliardów dolarów i z uruchomieniem planowanym na połowę przyszłej dekad – jeszcze nie będzie wykorzystywał jąder helu jako głównego źródła podgrzewania plazmy. Mimo tego ograniczenia, ma on wytwarzać nawet do dziesięciu razy więcej energii od zużytej, docelowo osiągając moc 500 megawatów.

Spektrometr HRNS zostanie zainstalowany za otaczającą komorę tokamaka ITER grubą, betonową ścianą ochronną, przy otworze kilkucentymetrowej średnicy, tak by możliwa była rejestracja neutronów powstających w samym centrum plazmy. W zależności od aktualnej mocy reaktora, ich strumień będzie się zmieniał radykalnie, osiągając nawet setki milionów cząstek na centymetr kwadratowy na sekundę. W czasie pomiaru HRNS będzie zdolny do analizy widma neutronowego pochodzącego z reakcji deuteru z deuterem (neutrony o energii 2.5 megaelektronowoltów) oraz deuteru z trytem (neutrony o energii 14 megaelektronowoltów).

Aby zapewnić działanie spektrometru HRNS w pełnym zakresie warunków przewidywanych w reaktorze ITER, musiał on zostać podzielony na cztery niezależne systemy detekcji. Każdy z nich jest w istocie osobnym spektrometrem, działającym na odmiennych zasadach i przeznaczonym dla innego zakresu intensywności strumienia neutronów. Fizycy z IFJ PAN pracują nad rozwojem pierwszego systemu, o nazwie TPR (Thin-foil Proton Recoil). Neutrony wybijają tu z cienkiej folii polietylenowej protony, których kąt rozpraszania zależy od energii neutronu; za samą detekcję protonów odpowiada niemal 100 detektorów krzemowych. Drugi podzespół to spektrometr NDD (Neutron Diamond Detector), gdzie neutrony są rejestrowane przez matrycę kilkunastu detektorów diamentowych. Dwa ostatnie podzespoły, FTOF (Forward Time-of-Flight) i BTOF (Backscattering Time-of-Flight), mierzą czasy przelotu neutronów i na podstawie tak wyznaczonych prędkości oszacowują ich energię kinetyczną, przy czym FTOF analizuje neutrony zachowujące kierunek ruchu zbliżony do pierwotnego, a BTOF rozproszone pod dużymi kątami.

„HRNS zaprojektowano do pomiaru neutronów, nie oznacza to jednak, że nie będzie on rejestrował innych rodzajów promieniowania. W praktyce wiele innych cząstek, od fotonów promieniowania gamma po cząstki pochodzące z interakcji neutronów z elementami reaktora, a nawet z częściami naszego spektrometru, będzie produkowało sygnał w części aktywnej detektora. Wszystko to powoduje, że mierzone widmo ma wyjątkowo złożoną strukturę. Aby właściwie interpretować dane i wyciągać z nich wiarygodną informację o ilościach deuteru i trytu, musimy doskonale rozumieć pochodzenie tego bogatego szumu”, podkreśla prof. dr hab. Marek Scholz (IFJ PAN).

Nie mniej istotna jest znajomość pozostałych parametrów eksploatacyjnych. Z uwagi na ograniczony dostęp do systemu pomiarowego w trakcie pracy tokamaka, naukowcy muszą wiedzieć, jak interpretować napływające dane. Jest to szczególnie ważne w sytuacji, gdy w trakcie cyklu badawczego część detektorów któregoś z podzespołów lub nawet cały podzespół ulegną uszkodzeniu. Krytycznie ważne było także zaprojektowanie elementów osłaniających, tak aby ani neutrony strumienia, ani wzbudzone przez nie części aparatury nie zakłócały pracy podukładów elektronicznych bądź innych urządzeń pomiarowych działających w pobliżu całego spektrometru.

„Projekt spektrometru HRNS wymagał przeprowadzenia ogromnej liczby obliczeń numerycznych, nie tylko związanych bezpośrednio z pomiarami neutronów. Grupa z naszego instytutu odpowiadała między innymi za obliczenia Monte Carlo umożliwiające zoptymalizowanie osłon radiacyjnych spektrometru HRNS poprzez pokazanie, jak przebiega transport neutronów oraz promieniowania gamma w otoczeniu oraz w poszczególnych elementach całego układu. Równie ważnym punktem było policzenie aktywności promieniotwórczej poszczególnych elementów spektrometru HRNS.

To wiedza gwarantująca zarówno właściwe funkcjonowanie urządzenia, jak i bezpieczeństwo obsługującego je personelu”, zauważa dr hab. inż. Urszula Wiącek, kierownik Zakładu Fizyki Transportu Promieniowania IFJ PAN.

Naukowcy spodziewają się, że prototyp wysokorozdzielczego spektrometru neutronowego dla reaktora fuzyjnego ITER powstanie w ciągu dwóch lat. Prace nad urządzeniem zostały sfinansowane ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz ITER Organization.

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie prowadzi badania podstawowe i aplikacyjne w obszarze fizyki oraz nauk pokrewnych. Główna część działalności naukowej Instytutu koncentruje się na badaniu struktury materii, w tym własności oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po cząstki elementarne. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek, obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN prowadzi też cztery akredytowane laboratoria badawcze i pomiarowe. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fizykę fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Corocznie Instytut jest organizatorem lub współorganizatorem wielu międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych oraz szeregu seminariów i innych spotkań naukowych. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość”, któremu, na lata 2012-2017, nadany został status Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW). Wiele projektów i przedsięwzięć realizowanych przez Instytut jest wpisanych na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej (PMIB). Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”. W kategoryzacji MEiN Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w obszarze nauk fizycznych.

KONTAKT:

dr inż. **Jan Dankowski**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628419
email: jan.dankowski@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Development and performance of the thin-foil proton recoil spectrometer for ITER plasma diagnostics”
J. Dankowski, J. Bielecki, J. Błądek, S. Conroy, B. Coriton, G. Croci, D. Dworaka, G. Ericsson, J. Eriksson, A. Wójcik-Gargula, A. Hjalmarsson, A. Jardin, R. Kantor, A. Kovalev, K. Król, A. Kulińska, A. Kurowski, G. Mariano, R. Mehrara, D. Morawski, M. Rebai, M. Scholz, F. Scioscioli, M. Tardocchi, G. Tracz, M. Turzański, U. Wiącek
Fusion Engineering and Design, 2025, 219, 115263
DOI: [10.1016/j.fusengdes.2025.115263](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2025.115263)

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.ifj.edu.pl/>
Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

<http://press.ifj.edu.pl/>
Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ250910b_fot01s.jpg **HR:** http://press.ifj.edu.pl/news/2025/09/10/IFJ250910b_fot01.jpg
Montaż układu diagnostyk neutronowych w laboratorium Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. (Źródło: IFJ PAN)

IFJ250910b_fot02s.jpg **HR:** http://press.ifj.edu.pl/news/2025/09/10/IFJ250910b_fot02.jpg
Wysokorozdzielczy spektrometr neutronowy HRNS; zaznaczone na żółto elementy konstrukcyjne otaczają układ TPR zaprojektowany w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. U dołu położenie spektrometru HRNS (kolor zielony) względem ściany ochronnej tokamaka (czerwony) i jego komory fuzyjnej (niebieski). (Źródło: IFJ PAN, ITER Organization)