

REWOLUCJA ENERGETYCZNA CORAZ BLIŻEJ



Sukcesy Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w badaniach nad fuzją jądrową

Energia, z jakiej obecnie korzystamy, pochodzi z paliw kopalnych, reakcji jądrowej lub odnawialnych źródeł energii. Choć globalne zapotrzebowanie na energię rośnie z roku na rok, to jednak nie kwestia zwiększonego jej zapotrzebowania stanowi wyzwanie dla przemysłu energetycznego. Kluczowy jest sposób wytwarzania energii elektrycznej, który nie będzie związany z emisją gazów cieplarnianych do atmosfery i nie wpłynie niekorzystnie na środowisko naturalne. Rozwiązaniem może być fuzja jądrowa. Badania dowodzą, że to właśnie ta metoda zapewni bezpieczną, bezemisyjną i praktycznie nieograniczoną energię dla przyszłych pokoleń.

Reakcja fuzji jądrowej to proces odwrotny do rozszczepienia wykorzystywanego w energetyce jądrowej. Polega na łączeniu się jąder lekkich atomów w jedno cięższe, uwalniając przy tym ogromne ilości energii. Ten typ reakcji jest źródłem energii gwiazd, w tym Słońca.

Przeprowadzenie kontrolowanej reakcji fuzji jądrowej jest obecnie możliwe w eksperymentalnych reaktorach termojądrowych, w których paliwo podgrzewane jest do ekstremalnie wysokich temperatur 100–150 mln st. C. Atomy stają się wtedy jonami (tworzą plazmę) i mają na tyle dużą energię, że mogą zbliżyć się do siebie i połączyć w procesie fuzji.

Reakcją, którą najłatwiej przeprowadzić w warunkach ziemskich, jest synteza dwóch izotopów wodoru: deuteru (D) i trytu (T). Na naszej planecie znajdują się znaczne zasoby deuteru – występuje w wodzie morskiej, tryt natomiast może być wytwarzany w samym reaktorze w wyniku reakcji litu (będącego elementem konstrukcyjnym reaktora) z neutronami. Lit jest metalem lekkim występującym w skorupie ziemskiej i w wodzie morskiej.

Pomimo że na Ziemi trudno jest uzyskać warunki podobne do tych panujących na Słońcu, gdzie plazma utrzymywana jest siłami grawitacji, naukowcom udało się opracować dwie metody:

- zamknięcie plazmy w pułapce wytwarzającej silne pola magnetyczne – tę metodę stosuje się w urządzeniach typu tokamak i stellarator – fuzja magnetyczna;
- skupienie silnej wiązki promieniowania laserowego (pośrednio lub bezpośrednio) na kapsułce zawierającej paliwo – fuzja laserowa (inercyjna).

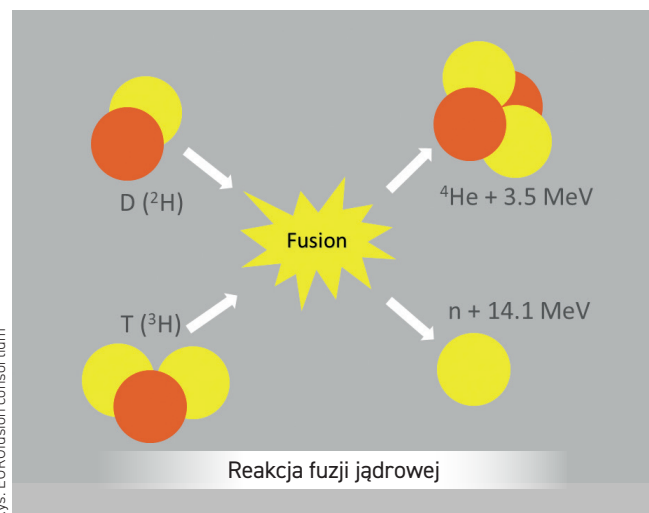
IFPiLM – lider i koordynator badań fuzyjnych w Polsce

Badania nad opanowaniem fuzji jądrowej prowadzone są na całym świecie od wielu dekad. Liderem i krajowym koordynatorem prac badawczych w zakresie fizyki plazmy i rozwoju technologii fuzji jądrowej jest Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy im. Sylwestra Kaliskiego (IFPiLM) w Warszawie (www.ifpilm.pl). Od 2014 r. Instytut zarządza w Polsce europejskim programem konsorcjum EUROfusion, który realizują jednostki skupione w Centrum naukowo-przemysłowym Nowe Technologie Energetyczne – CeNTE. W ramach Instytutu działalność prowadzi także Krajowy Punkt Kontaktowy Euratom-Fusion wspierający i propagujący badania fuzyjne w Polsce.

Naukowcy z IFPiLM są zaangażowani w wiele międzynarodowych projektów oraz biorą udział w eksperymentach na urządzeniach fuzyjnych w wiodących ośrodkach naukowych na całym świecie.

Przełomowe wyniki w dziedzinie fuzji jądrowej

Rok 2022 przyniósł dwa przełomowe wyniki w dziedzinie fuzji jądrowej. Pierwszy ogłoszony 9 lutego dotyczył rekordowego osiągnięcia europejskich, w tym polskich, naukowców na tokamaku JET (Joint European Torus) w Culham koło Oksfordu w Wielkiej Brytanii, a drugi ogłoszony 13 grudnia przez amerykańskich na-





EUROfusion



TOKAMAK



Istnieje wiele podejść do przeprowadzenia syntezy jądrowej na Ziemi. Najbardziej rozwiniętą koncepcją jest tokamak, który wykorzystuje silne pole magnetyczne do utrzymania plazmy.

JAK TO DZIAŁA?



PALIWO REAKCJI SYNTEZY JĄDROWEJ

Paliwo reakcji - deuter i tryt - jest wprowadzane do komory reaktora.



PLAZMA

Paliwo jest podgrzewane do około 150 milionów stopni Celsjusza i zmienia się z gazu w plazmę.



KOMORA PRÓŻNIOWA

Do utrzymania plazmy służy komora próżniowa w kształcie pierścienia.



POLE MAGNETYCZNE

Cewki magnetyczne wytwarzają pole, które utrzymuje i kształtuje plazmę, utrzymując ją z dala od ścian komory.



USUWANIE CIEPŁA I CZĄSTEK

Przez odprowadzanie cząstek i ciepła usuwany jest główny produkt reakcji syntezy jądrowej - hel.

SYSTEMY POMIAROWE

Systemy mierzą i monitorują właściwości plazmy, w tym jej gęstość i temperaturę.

SYSTEMY GRZANIA PLAZMY

Systemy ogrzewają plazmę za pomocą prądu elektrycznego, silnych wiązek cząstek i fal radiowych.

ENERGIA

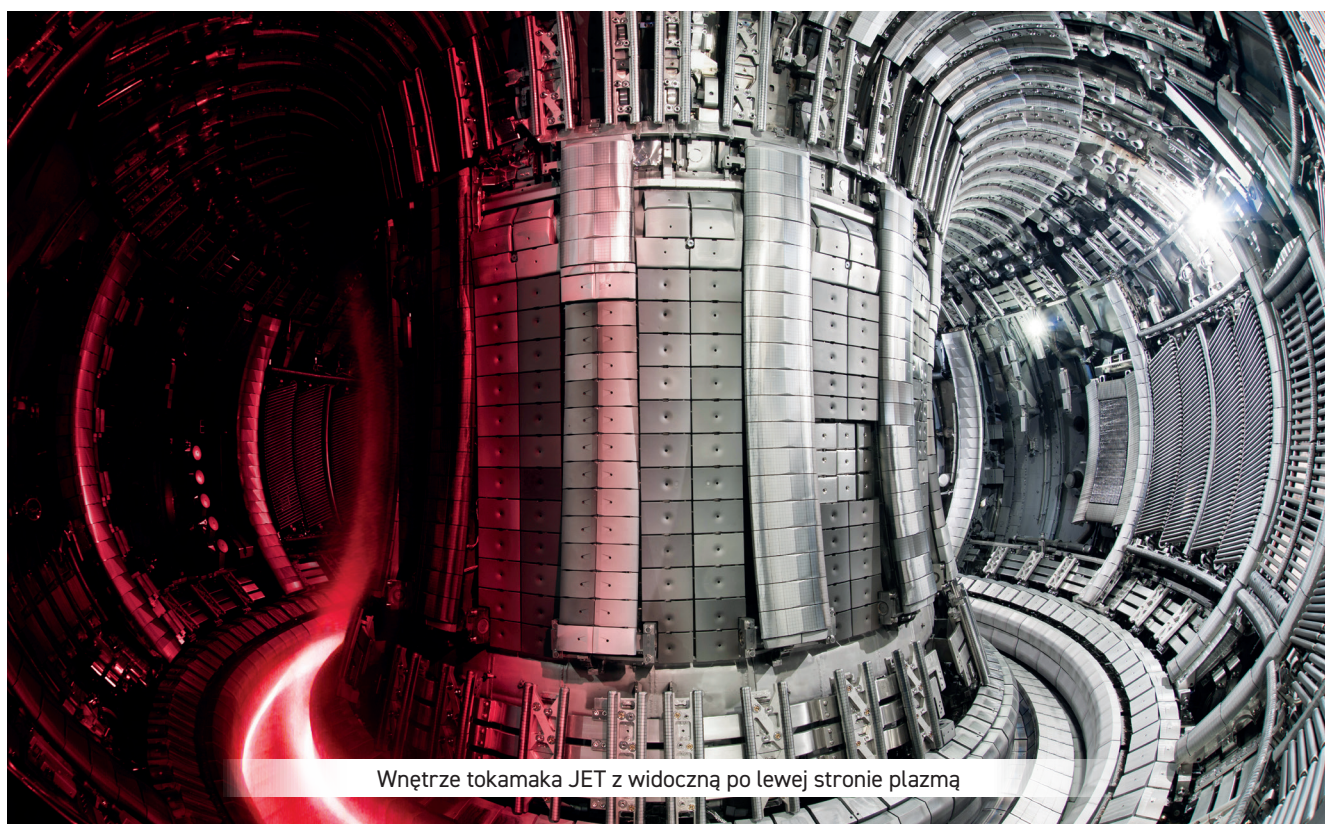
Energia jest uwalniana, gdy dwa atomy łączą się w nowy, cięższy atom. Plazma, w której co sekundę zachodzą miliony reakcji syntezy jądrowej, produkuje ogromną ilość energii z mniej niż grama paliwa termojądrowego.



This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.

www.euro-fusion.org

Prace realizowane w ramach projektu międzynarodowego współfinansowanego ze środków programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pn. „PMW”.



Wnętrze tokamaka JET z widoczną po lewej stronie plazmą

Fot. UKAEA

ukowców informował o uzyskaniu dodatniego bilansu energetycznego w procesie laserowej fuzji jądrowej.

1. Udział IFPiLM w rekordowych badaniach na tokamaku JET

Największym działającym na świecie urządzeniem, w którym może być przeprowadzona kontrolowana reakcja fuzji jądrowej, zdolnym do pracy z mieszaniną paliwa deuteru i trytu (D-T), jest tokamak JET w Wielkiej Brytanii. Podczas kampanii eksperymentalnej (DTE2) na tym urządzeniu ustanowiony został nowy rekord energii uzyskanej z syntezy jądrowej. W grudniu 2021 r. udało się uzyskać 59 megadżuli energii w stanie stacjonarnym trwającym 5 sekund, co jest wynikiem niemal trzykrotnie wyższym od dotychczasowego rekordu z 1997 r. W samym centrum plazmy uzyskano temperaturę 150 mln st. C, czyli dziesięciokrotnie wyższą niż temperatura panująca w jądrze Słońca. Wygenerowanie takiej energii wymagało 0,17 mg paliwa termojądrowego – około 0,1 mg trytu i 0,07 mg deuteru. Dla porównania, paliwa kopalne wymagałyby 10 milionów razy więcej paliwa do wytworzenia tej samej ilości energii (1,06 kg gazu ziemnego lub 3,9 kg węgla brunatnego).

Osiągnięcie, o którym mowa, to efekt wieloletnich badań naukowców z konsorcjum EUROfusion – 4800 ekspertów, studentów i pracowników z całej Europy współfinansowanych przez Komisję Europejską, w tym także polskich naukowców z Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy.

Pracownicy z IFPiLM intensywnie uczestniczą w badaniach na tokamaku JET od 2005 r. Ich wkład dotyczy m.in.:

- zaprojektowania i przygotowania nowoczesnych detektorów do diagnostyki miękkiego promieniowania rentgenowskiego,
- analizy i interpretacji danych eksperymentalnych rejestrowanych za pomocą różnych diagnostyk,

- badań zachowania zanieczyszczeń plazmy w celu ich kontroli i minimalizowania akumulacji,
- pomiarów produktów reakcji syntezy jądrowej (neutronów i szybkich jonów helu),
- kalibracji systemu diagnostyk neutronowych w JET dla energii 14 MeV,
- wykonania licznych rekonstrukcji tomograficznego promieniowania plazmy na podstawie danych bolometrycznych,
- rozwoju i zastosowania metod numerycznych w badaniach plazmy.

Zdobyte doświadczenie podczas kampanii eksperymentalnej DTE2 jest ważnym krokiem na drodze do pozyskania nowego źródła energii. Ustanowiony rekord jest osiągnięciem przełomowym, ponieważ po raz pierwszy pokazuje, że możliwe jest utrzymanie stabilnej plazmy i wyprodukowanie dużych ilości energii z syntezy jądrowej przy użyciu tej samej mieszanki paliwowej, która będzie stosowana w tokamaku nowej generacji ITER budowanym na południu Francji w Cadarache oraz w przyszłych elektrowniach termojądrowych.

2. Sukces amerykańskich naukowców

W grudniu 2022 r. świat obiegła informacja, że amerykańscy naukowcy z National Ignition Facility (NIF) w Lawrence Livermore National Laboratory uzyskali dodatni bilans energetyczny w procesie laserowej fuzji jądrowej.

To przełomowe osiągnięcie naukowe stanowi milowy krok w pracach badawczych nad inercyjną fuzją jądrową, gdzie przy wykorzystaniu silnych wiązek promieniowania laserowego można wystarczająco precyzyjnie skompresować paliwo termojądrowe, aby wydajność procesu syntezy była jak największa.

DLACZEGO ŚWIAT INWESTUJE W ENERGIĘ TERMOJĄDROWĄ?



NISKOEMISYJNA, NIE PRODUKUJE CO₂

- ✓ Przewiduje się, że do 2040 roku planeta będzie zużywać dwa razy więcej energii elektrycznej.
- ✓ Energia termojądrowa może zapewnić niezawodną, ciągłą energię elektryczną bez emisji gazów cieplarnianych.



OGÓLNODOSTĘPNA

- ✓ Zapasy paliwa do syntezy jądrowej wystarczą na wiele dziesiątek tysięcy lat.
- ✓ Deuter jest pozyskiwany z niewielkich ilości wody.
- ✓ Trypt będzie produkowany w urządzeniach termojądrowych z litu, którego jest dużo na ziemi.



BEZPIECZNA

- ✓ Wyzwaniem fuzji jest podtrzymywanie, a nie powstrzymywanie reakcji.
- ✓ W przeciwieństwie do tradycyjnego rozszczepienia jądrowego fuzja nie może wywołać niekontrolowanych reakcji łańcuchowych.
- ✓ Napromieniowane części reaktora mogą być przetwarzane przy użyciu technologii już z powodzeniem stosowanej na całym świecie.



WYDAJNA

- ✓ Kilkaset kilogramów paliwa termojądrowego mogłoby zasilać dużą elektrownię przez cały rok.
- ✓ Deuter znajdujący się w wannie z wodą, po połączeniu z trytem, zapewni zużycie energii jednej osobie przez 60 lat.



INNOWACYJNA

- ✓ Możliwe zastosowania w lotnictwie, oczyszczaniu środowiska oraz opiece i diagnostyce medycznej.
- ✓ Sektory technologii spin-off obejmują zaawansowane obliczenia, badania materiałowe i robotykę.
- ✓ Korzyści ekonomiczne, miejsca pracy i wiedza specjalistyczna dla rynków na całym świecie.



This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 – EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.

www.euro-fusion.org



Wzmacniacze laserowe w NIF

Fot. Damien Jemison/LLNL, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons

W eksperymencie w NIF zastosowano pośrednią metodę oświetlenia paliwa z wykorzystaniem specjalnego układu typu hohlraum, w którym znajdowała się kulka paliwowa z deuterem i trytem. Precyzja wykonania tego elementu z jednoczesnym oświetleniem go przy użyciu 192 wiązek laserowych była kluczowa dla wydajności procesu i sukcesu samozapłonu.

Otrzymany dodatni bilans zwrotny, czyli wytworzenie nadwyżki energii (3,15 MJ) uzyskanej z syntezy do energii dostarczonej przez lasery (2,05 MJ) do paliwa termojądrowego, demonstruje, że badania idą w dobrym kierunku i robiąc ten milowy krok, możemy realnie myśleć o zastosowaniu tego procesu w energetyce. Jednak, aby fuzja laserowa mogła mieć praktyczne zastosowanie, niezbędne jest prowadzenie dalszych badań i budowa bardziej wydajnych laserów o większej repetycji, tak aby częstotliwość oddziaływania z kulką paliwową mogła zachodzić częściej. Powtarzalność jest tutaj kluczowa, ponieważ nie wystarczy pojedyncze oddziaływanie, konieczna jest niemal ciągła praca, tak jak to się odbywa w konwencjonalnych reaktorach rozszczepieniowych. Aby to osiągnąć, rozwijane muszą być nowe technologie zarówno w budowie laserów, jak i materiałów, z których zbudowana jest kulka paliwowa.

Choć droga do wybudowania elektrowni termojądrowej jest nadal dość skomplikowana i przed naukowcami jeszcze dużo pracy, to przełom uzyskany w NIF pozwala z optymizmem patrzeć w przyszłość.

Rola IFPiLM w badaniach nad laserową fuzją jądrową

Wkład w badania nad energetyką termojądrową związane z koncepcją inercyjnego utrzymania plazmy mają także naukowcy z Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy. W ramach

międzynarodowych programów badają plazmę laserową m.in. w ośrodkach za granicą: w Pradze na układzie PALS, we Francji na układzie LMJ i w Wielkiej Brytanii na układzie VULCAN.

W Instytucie powstało i rozwinęło się Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy, w skład którego wchodzi femtosekundowy system laserowy wielkiej mocy Pulsar 10 TW. Prowadzone w laboratorium prace dotyczą projektowania i konstruowania nowoczesnej aparatury pomiarowej, która wykorzystywana jest także do eksperymentów w innych laboratoriach badawczych, jak również do badań oddziaływania ultraintensywnego promieniowania laserowego z materią.

IFPiLM uczestniczył także w realizacji europejskiego projektu HiPER (High Power laser Energy Research facility) obejmującego opracowanie fizycznej koncepcji i projektu technicznego infrastruktury laserowej przeznaczonej do zademonstrowania efektywnej produkcji energii w wyniku fuzji z inercyjnym utrzymaniem plazmy. Program ten zawieszono w 2013 r. z powodu braku funduszy, ale obecnie toczą się dyskusje, aby wznowić prace i uruchomić europejski projekt HiPER Plus. W rozmowach bierze udział także IFPiLM.

Podsumowanie

Zesztoroczne sukcesy osiągnięte na tokamaku JET i w NIF są bardzo obiecujące w perspektywie dalszych badań nad fuzją jądrową. Przybliżają nas do uzyskania oręża w walce z globalnym kryzysem energetycznym. Choć badania nadal wymagają ogromnych nakładów finansowych, współpracy wielu międzynarodowych zespołów i ekspertów z różnych dziedzin, to osiągnięcie celu – jakim będzie bezpieczne, wydajne i niskoemisyjne źródło energii – stanie się przełomowym wydarzeniem dla całego świata.