



Drugie wynalezienie ognia

Synteza termojądrowa pozwala istnieć gwiazdom.
Właśnie udało się postawić ważny krok na drodze
do opanowania tego źródła energii.

U góry: fragment instalacji National Ignition Facility w Lawrence Livermore National Laboratory;
obok: złota tulejka, wewnątrz której przeprowadzono udaną fuzję termojądrową.



© LLNL

PRZEMEK BERG

To było niezwykle osiągnięcie słynnego kalifornijskiego instytutu naukowego Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Za pomocą urządzenia badawczego, noszącego tajemniczą nazwę National Ignition Facility (w wolnym tłumaczeniu Narodowa Instalacja Zapłonu), 192 wiązki potężnego lasera skupiono na miliardowy ułamek sekundy we wnętrzu prawie centymetrowego pojemnika-cylinderka ze złota, w którym znajdowała się mniejsza od ziarna pieprzu kapsuła z mieszaniną izotopów wodoru, deuteru i trytu (deuter, oprócz protonu jak wodór, ma jeszcze w jądrze neutron, a tryt – dwa neutrony).

Po silnym podgrzaniu i zagęszczeniu tej mieszaniny doszło do reakcji syntezy termojądrowej, w wyniku której jądra izotopów wodoru połączyły się, generując następnie szybko cząstki alfa (jądra helu) i neutrony.

Co najważniejsze – ilość energii uzyskanej w wyniku tej przemiany po raz pierwszy była większa niż ilość energii zużytej na podgrzanie i kompresję mieszaniny deuteru i trytu w kapsule (jednak bez uwzględnienia energii niezbędnej do działania całego urządzenia). Przełomowa próba miała miejsce we wrześniu ub.r., a teraz ogłoszono ją światu jako news w najważniejszych czasopiśmie naukowych – „Nature”, „Science” i „Physical Review Letters”.

Energia czysta i tania

Synteza termojądrowa, zwana też fuzją jądrową, czyli łączenie jąder lekkich pierwiastków – w szczególności izotopów wodoru – w wyniku czego powstają wysokoenergetyczne cząstki (neutrony i cząstki alfa w przypadku syntezy D+T), jest dość dobrze znana. Reakcja ta jest podstawą istnienia gwiazd.

W ich wnętrzach materia osiąga tak dużą gęstość oraz tak wysoką temperaturę, że może zachodzić cykl reakcji syntezy lekkich jąder prowadzący do produkcji coraz cięższych jąder, aż do żelaza. Ten proces pozwala gwiazdom istnieć, ponieważ gęsta i gorąca materia grzana w ich wnętrzu produktami reakcji syntezy utrzymywana jest ciśnieniem grawitacyjnym warstw zewnętrznych. Dzięki reakcjom syntezy termojądrowej gwiazdy mogą więc trwać przez miliardy lat i emitować w przestrzeń ogromne ilości energii.

Ale fuzja jądrowa jest też znana na Ziemi, i to od kilkudziesięciu lat, ponieważ wykorzystuje się ją w bombach wodorowych (termojądrowych), czyli najsilniejszej broni, jaką człowiek był w stanie wytworzyć i której, na szczęście, jeszcze nigdy nie użył poza testami. Bomby wo-

dorowe są znacznie silniejsze od zwykłych bomb atomowych (jądrowych), w których wykorzystuje się inną reakcję jądrową, a mianowicie łańcuchowego rozszczepienia ciężkich pierwiastków. Chociaż więc potrafimy wykorzystać fuzję jądrową do stworzenia bomby dającej niezwykle silny wybuch, to jednak nie potrafimy zaprząć tego zjawiska fizycznego do reakcji kontrolowanej, czyli takiej, by proces łączenia jąder był ciągły i przewidywalny, a przede wszystkim, by ilość energii uzyskanej w syntezie przewyższała swoją wartością energię włożoną w jej zainicjowanie i podtrzymywanie.

Kontrolowana synteza termojądrowa byłaby dla nas zbawienna, ponieważ raz na zawsze uniezależniłaby ludzkość od problemów energetycznych. Ujarmiona reakcja syntezy to praktycznie niewyczerpywalne źródło taniej i czystszej energii; deuteru mamy tyle, ile dusza zapagnie (ten trwały izotop powszechnie występuje w wodzie morskiej), tryt można uzyskać w wyniku bombardowania jąder litu neutronami (lit występuje w dużych ilościach w skałach), poza tym cała reakcja produkuje małe ilości odpadów radioaktywnych, jest bezpieczna – o wiele łatwiej ją przerwać niż jądrową reakcję łańcuchową w klasycznych elektrowniach atomowych – i znacznie bardziej wydajna.

Problem w tym, że wciąż nie potrafimy realizować kontrolowanej reakcji syntezy z dużą efektywnością. Umiemy inicjować reakcje termojądrowe w laboratoriach, ale ogromnym energetycznym nakładem, który przewyższa znacznie energię uzyskaną z tej reakcji. Tymczasem, by tworzyć siłownie termojądrowe, proporcje te trzeba odwrócić. Zadanie to próbuje rozwiązać wiele instytutów i ośrodków naukowych na całym świecie. Są to jedne z najdroższych i najbardziej zaawansowanych badań fizycznych w historii. Nie będnę wcale przesadą stwierdzenie, że opanowanie syntezy termojądrowej stanie się dla ludzkości drugim wynalezieniem ognia.

60 lat badań

Po raz pierwszy pomysł, by opanować i wykorzystać nie do celów wojskowych reakcję syntezy jądrowej, zrodził się w głowach fizyków jądrowych pracujących w ZSRR w latach 50. ubiegłego wieku; było to już w okresie udanych prób konstrukcji bomb wodorowych w USA i ZSRR. Pionierami tej idei były takie fizyczne sławy, jak Igor Tamm i Andriej Sacharow; opracowali oni nawet koncepcję urządzenia, w którym zjawisko fuzji termojądrowej można by kontrolować. To tokamak, czyli komora w kształcie torusa (obwarzanka), w którym deuterowo-trytowa plazma

(a więc zjonizowana mieszanina DT) utrzymywana jest polami magnetycznymi. Pierwotnie zakładano grzanie tej plazmy prądem indukowanym przez gigantyczny transformator. Pola magnetyczne izolują plazmę od ścianek toroidalnej komory po to, by się nie schładzała. Układy tokamak zaczęto budować i badać w ZSRR w drugiej połowie lat 50.

– *Wkrótce jednak* – tłumaczy Jerzy Wołowski, profesor w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie, głównego polskiego ośrodka naukowego zajmującego się tymi zagadnieniami – *okazało się, że podgrzewanie plazmy prądem jest niewystarczające do osiągnięcia i podtrzymywania reakcji syntezy, dlatego dzisiaj jako głównego źródła grzania w tokamakach używa się mikrofal i strumieni cząstek obojętnych, czyli atomów. Tokamaków jest wiele na świecie, a największym obecnie jest europejski układ „JET” działający w Anglii.*

Tokamaki są najważniejszymi układami termojądrowymi, w których gorąca plazma jest utrzymywana polami magnetycznymi. I to tę metodę obecnie najbardziej się rozwija, z nią też uczeni wiążą największe nadzieje. Dlatego w Cadarache we Francji powstaje prototypowy reaktor fuzyjny o nazwie ▶

REKLAMA

**Prywatna Klinika Rehabilitacyjna
CHOROBY KREGOŚŁUPA,
NARZĄDÓW RUCHU I GŁOWY**
Krojanty – Dwór k. Chojnic
tel. (052) 398-56-56
fax (052) 398-56-06
www.krojanty.com.pl
klinika@krojanty.com.pl

LECZYMY:

■ wypadnięcia dysków, chroniczne zespoły bólowe kregosłupa i głowy, powikłania choroby zwyrodnieniowej kregosłupa, następstwa i powikłania urazów układu kostnego, więzadeł i stawów, migrenowe bóle głowy

PROWADZIMY REHABILITACJĘ:

■ po wylewach, po operacjach ortopedycznych, po złamaniach



**ZRÓB PREZENT
SWOIM RODZICOM!**
Pobyty 6, 10 lub 21 dni

► ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), budowany w ramach wielkiego światowego projektu też nazwanego ITER. Budowa będzie kosztowała ponad 10 mld euro. Jest to jedno z największych przedsięwzięć naukowych i technologicznych świata, porównywalne z budową międzynarodowej stacji kosmicznej (ISS). ITER ma być gotowy za kilka lat.

– *Zakłada się, że w nim po raz pierwszy będzie można, po jakimś czasie, przeprowadzić wydajną reakcję syntezy, w której uzyskana energia będzie większa od energii dostarczonej do plazmy* – mówi prof. Wołowski.

Laser zamiast torusa

Poza metodą opanowania syntezy w pułapkach magnetycznych na świecie realizuje się wiele eksperymentów, w których plazma DT jest ściskana do wielkich gęstości i jednocześnie grzana w skali mikro z wykorzystaniem wielkich laserów o ogromnych energiach i mocach. Jest to metoda z inercyjnym (niemagnetycznym) utrzymaniem gęstej i gorącej plazmy. Największą na świecie instalacją laserową jest wspomniany układ National Ignition Facility, działający w LLNL w Livermore.

Wielowiązkowy laser o mocy 1,8 megadżuli (0,5 kWh) generuje nanosekundowy impuls promieniowania, które w postaci 192 wiązek jest doprowadzane do wnętrza wspomnianego złotego (albo uranowego) cylindra i oddziałując z jego wewnętrznymi ściankami, generuje miękkie promieniowanie rentgenowskie. To promieniowanie ogrzewa umieszczoną wewnątrz kapsułę

z mieszaniną deuteru i trytu. Sztuką jest równomierne ogrzanie i następnie kompresja tej kapsuły; jeśli bowiem nierówności w ogrzewaniu są ledwie kilkoprocentowe, nie dojdzie do reakcji syntezy termojądrowej.

Laserowa instalacja LMJ, podobna do tej działającej w Kalifornii, powstaje w Bordeaux we Francji. Będzie uruchomiona za dwa-trzy lata. Inną metodę laserowej syntezy, zwaną *direct drive*, Amerykanie stosują w dużej instalacji w Rochester. Tam wiązki potężnego lasera są kierowane bardzo równomiernie bezpośrednio na kapsułę z plazmą deuterowo-trytową.

Co ciekawe, technologie te stworzono dla potrzeb militarnych. Gdy na świecie powstały silne ruchy sprzeciwiające się przeprowadzaniu próbnym wybuchów jądrowych i termojądrowych na Ziemi, Amerykanie i Francuzi postanowili stworzyć instalacje laserowe, które umożliwiają badanie mikroybuchów termojądrowych w skali mikro. Choć zachodzą w tak małej skali, ich fizyka jest taka sama jak przy wybuchu bomby wodorowej. Do dzisiaj zresztą znaczna część prac przy na instalacjach w Livermore i Bordeaux ma charakter wojskowy. Tylko część badań jest prowadzona dla celów cywilnych, związanych z opanowaniem syntezy jako przyszłego źródła energii.

Kto pierwszy

W Europie przez wiele lat nie prowadzono badań mikrosyntezy laserowej na szeroką skalę, ponieważ badania te kojarzono jednoznacznie z celami militarnymi. Dopiero w latach 90. XX w.,

w laboratoriach europejskich przystąpiono do badania kilku nowych metod syntezy laserowej, które nie wymagają zastosowania tak silnych laserów jak NIF i mają za cel wyłącznie badania ukierunkowane na opracowanie nowych źródeł energii. Okazało się, że laser wcale nie musi mieć mocy megadżuli i bardzo wielu wiązek, by doprowadzić do efektywnej syntezy.

– *Pierwszą taką metodą jest „fast ignition”, czyli zapłon szybki* – wyjaśnia prof. Wołowski. – *Główny laser służy do wstępnego zagęszczenia plazmy, po czym następuje uderzenie impulsem drugiego lasera. Ten drugi impuls, nie zwykle krótki i intensywny, wywołuje strumień gorących elektronów o ogromnej energii, które inicjują syntezę w zagęszczonej plazmie deuterowo-trytowej.*

Jeszcze inne podejście polega na odpowiednim ukształtowaniu impulsu laserowego. Impuls wstępnie zagęszcza i podgrzewa zawartość kapsuły, po czym przybiera formę piku energetycznego, który doprowadza do generacji dodatkowej silnej fali uderzeniowej powodującej zapłon termojądrowy. Metoda ta nosi nazwę „shock ignition”.

Te nowe rozwiązania stały się podstawą europejskiego programu mikrosyntezy laserowej, o nazwie „HiPER” (European High Power laser Energy Research Facility), który jest obecnie w fazie przygotowań. Koordynatorem tych prac jest Wielka Brytania. W Polsce prace w ramach projektu HiPER są realizowane w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy.

Badacze amerykańscy z LLNL zdołali istotnie poprawić wydajność syntezy laserowej w urządzeniu National Ignition Facility i osiągnęli dodatni bilans energetyczny. W reakcji syntezy uwalniało się tyle energii, ile potrzeba do rozświetlenia na sekundę stu kilkudziesięciu żarówek o mocy 100 W. To sporo, jednak do celu wciąż droga daleka. Energia potrzebna przez miliardową część sekundy do wygenerowania impulsu laserowego w tym eksperymencie wynosiła bowiem aż 1,8 mln dżuli (czyli tyle, ile 18 tys. żarówek 100 W zużyłoby w ciągu sekundy), a więc nieporównywalnie więcej, niż udało się uzyskać z reakcji syntezy.

Mimo to osiągnięcie z Livermore uznaje się za bardzo ważne. Jest to krok milowy w badaniach laserowej mikrosyntezy. Obecnie badania nad opanowaniem kontrolowanej syntezy termojądrowej idą wieloma ścieżkami i marzenie o uzyskaniu energii fuzji efektywnie zamienianej w energię elektryczną prawdopodobnie ziści się za jakiś czas w prototypowym reaktorze-tokamaku ITER.

Polski wkład do fuzji

Warszawski Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy powstał w 1976 r. w wyniku wyłączenia z Wojskowej Akademii Technicznej czterech zespołów badawczych i połączenia ich w samodzielny cywilny instytut. IFPiLM jako jedyny w Polsce ośrodek badawczy od początku realizuje badania plazmy i syntezy termojądrowej. W Instytucie badano fizykę plazmy wytwarzanej laserami i w silnopiędowych wyładowaniach w układach typu „plasma focus”. Początkowo badano też wybuchową kompresję plazmy. W pracach tych wykorzystywano największe w Polsce lasery impulsowe zbudowane w WAT i w IFPiLM oraz układy „plasma focus” zbudowane w Instytucie Badań Jądrowych w Świerku.

Przełomowym wydarzeniem było przystąpienie Polski do wspólnoty EURATOM w styczniu 2005 r. W ramach tej wspólnoty Instytut koordynuje prace dotyczące fuzji z magnetycznym utrzymaniem plazmy w układach tokamak i stellarator. Realizowane są różne projekty dotyczące takiej fuzji w ramach szerokiej współpracy europejskiej. Od 2008 r. IFPiLM jako jedyny polski instytut uczestniczy w projekcie HiPER dotyczącym budowy w Europie infrastruktury laserowej do optymalizacji fuzji laserowej. Badania eksperymentalne w ramach tego projektu realizowane są z użyciem wielkich laserów we Francji, Anglii i Czechach.

PRZEMEK BERG