

Awers i rewers fuzji jądrowej w cywilizacyjnym kontekście

Observe and reverse of thermonuclear fusion in the context of civilization

Marek Bielski

Wybór w styczniu nowego roku najciekawszych wydarzeń roku minionego ma już swoją długą tradycję. Jest on odpowiedzią poszczególnych redakcji – reprezentujących różne gatunki mass mediów – na zainteresowanie ze strony odbiorców.

Rok 2022 obfitował w wiele faktów z różnych dziedzin, także i tych związanych z nauką i techniką. Dla redaktorów *Science* był to przede wszystkim rok rozpoczęcia Misji Kosmicznego Teleskopu Webba (JWST), na którą wydatkowano ponad 10 mld dol. Taka lista jest wyborem kolegów redakcyjnych. Oczywiście można też stworzyć własną listę, na której oprócz istnego wysypu fotografii z teleskopu Jamesa Webba, pozwalających nam lepiej poznać wszechświat oraz startu kosmicznej misji Artemis, w czym mieli udział polscy naukowcy i inżynierowie, czy sukcesu eksperymentu w ramach misji DART, dotyczącego obrony Ziemi przed asteroidą – znajdują się szczegółowe ustalenia dotyczące SARS-CoV-2 i te związane z uprawą nasion tzw. wieloletniego ryżu, a ponadto dokonania w dziedzinie genetyki, transplantologii, nie mówiąc szerzej już o informatyce oraz sztucznej inteligencji.

Z kolei np. na promowaną m.in. przez National Geographic tym razem listę wyjątkowych wydarzeń znajdujących swój finał w roku 2023 – trafiło pierwsze na świecie głębokie składowisko zużytego paliwa jądrowego, wytypowane po 30 latach poszukiwań i zlokalizowane w Olkiluoto w Finlandii. Składa się na nie sieć tuneli znajdujących się 400 m pod ziemią.

Przytaczam powyższe przykłady, aby wykazać, że trudno jest stosować jedną miarę spełniającą kryterium obiektywności – jeśli to w ogóle możliwe – wobec tak różnorodnej tematyki. Jednak wśród rozlicznych wydarzeń roku 2022 z dziedziny nauki i techniki, które będą jeszcze długo analizowane i dyskutowane, szczególną uwagę zwróciły bez wątpienia te dotyczące fizyki plazmy. Związane są one z ponownie wzbudzonymi nadziejami, iż szybszy postęp prac nad urzeczywistnieniem pomysłu wykorzystywania fizyki termojądrowej do celów sensu stricto gospodarczych – w tym wypadku do wytwarzania energii elektrycznej na drodze fuzji termojądrowej – będzie mógł zostać jednak urzeczywistniony.

Swoistym paradoksem jest aktualna sytuacja, w której próba odniesienia się do przyszłości energetyki fuzyjnej wymaga najpierw ustosunkowania się do istotnych szczegółów widzianych

w perspektywie historycznej. A te szczególne następnie należy widzieć w szerszym kontekście zarówno celów naukowych, ściśle badawczych, jak i wynikających z bieżących potrzeb i aktualnego stanu energetyki w świecie. Rola energetyki w kształtowaniu oblicza cywilizacji była i jest ogromna oraz bezsporna. A w przeszłości jej funkcja w gospodarce będzie tym większa, im zagrożenia ze strony niedoboru surowców (wszystkich rodzajów kopalin, w tym i tzw. pierwiastków ziem rzadkich) będą narastać. W efekcie niedobory będą komplikować sytuację gospodarczą, powodując spowolnione tempo wzrostu gospodarczego. A w wypadku braku zastosowania optymalnego technicznego rozwiązania gospodarce będzie grozić krach, wywołany globalnym kryzysem energetycznym.

Obecnie systemy energetyczne w sensie dosłownym odpowiadają za permanentną pracę światowej gospodarki, gwarantując nam jednocześnie komfort codziennej egzystencji. Współczesna cywilizacja techniczna została oparta na fundamencie rozległego spektrum możliwości elektryki, co jest konstatacją na pewno nie odkrywczą, a wręcz banalną. Może dlatego owa myśl nie jest poddawana rozbirowi na czynniki pierwsze i nie podlega naukowej refleksji, co pozostawia spore pole dla aktywności różnego rodzaju lobby, z politycznym i gospodarczym włącznie.

Tymczasem kształt, charakter i tempo rozwoju cywilizacji ludzkiej jest mocno i nierozzerwalnie zdeterminowane przez rodzaj użytkowanych technologii energetycznych. Mając tę konstatację na uwadze, musimy zdawać sobie sprawę, że współczesna elektroenergetyka koniecznie – obok spojrzenia *sensu stricto* – wymaga też spojrzenia *sensu largo*. A wielopoziomowego, wręcz holistycznego „historyczno-futurologicznego” oglądu wymaga dlatego, że zarówno tradycyjne techniki i technologie już wykorzystywane w praktyce gospodarczej oraz te aktualnie usprawniane, a także nowo opracowywane teraz projekty (vide: pomysł „mikroenergetyki jądrowej”, w tym m.in. wysokotemperaturowego reaktora jądrowego chłodzonego gazem – HTGR) pozwalają nam na stosowanie różnego rodzaju form transformacji energii, z różnym zresztą skutkiem, także ekologicznym i ekonomicznym.

Nawet kiedy uznamy, że dysponujemy i wykorzystujemy najlepszy w konkretnych uwarunkowaniach danego kraju mix technologii odpowiedzialny za generowanie energii, nie możemy być pewni gwarancji bezpieczeństwa jej dostaw. Niezależnie od aktualnych

i niekwestionowanych dobrodziejstw korzystania z najbardziej nawet efektywnego w praktyce gospodarczej energetycznego mixu, zarówno w skali państw i regionów (zakładając owocną współpracę międzynarodową) tylko wypracowanie i następnie zastosowanie najoptymalniejszych rozwiązań dotyczących w pełni ekologicznej metody generowania energii, może doprowadzić do wyrugowania z naszego słownika pojęcia „kryzysu energetycznego”. I oczywiście, nie ma to nic wspólnego z odwiecznym marzeniem „szalonych wynalazców” spod znaku *perpetuum mobile*, którego nawet „czwarta generacja” nie będzie miała dla nas zupełnie nic do zaoferowania, chociażby z tego powodu, że już powstanie pierwszej, musiałoby graniczyć z cudem. W odróżnieniu np. od czwartej generacji reaktorów jądrowych. Przepraszam za swoisty sarkazm, ale tylko projekty oparte na naukowych przesłankach mogą liczyć na sukces. A tu najlepszy marketing i public relations nie sprawi, że projekt zostanie wdrożony i efektywnie wykorzystany.

APETYT ENERGETYCZNY

Zużycie energii elektrycznej w gospodarstwach domowych w Polsce w 2021 r. wzrosło o 0,4%, a liczba odbiorców o 1,2% (w momencie przygotowywania artykułu GUS nie ogłosił jeszcze danych z 2022 r.). Wzrosty wydają się nam nieduże, ale nic bardziej mylnego. Roczne średnie zużycie energii elektrycznej dla jednej osoby wynosi ok. 1250 kWh. Według wycień GUS średnie zużycie energii elektrycznej w naszym kraju na 1 m² powierzchni użytkowej mieszkania w mieście kształtuje się w ostatnich latach na poziomie ok. 29 kWh rocznie, zaś na wsi 26,55 kWh. Jednocześnie z badań i danych GUS wynika, że średnie zużycie energii elektrycznej w gospodarstwie domowym na wsi jest ... większe o ponad 30%, niż zużycie w mieście. Za ciągłe zwiększanie się popytu na energię odpowiada prosta zależność: postępująca urbanizacja, rozwój przemysłu i transportu oraz wciąż rosnący współczynnik dynamiki demograficznej. Zwiększa się liczba ludności świata, a więc proporcjonalnie rosną też jej potrzeby energetyczne. Acz rok 2022 w Polsce był rokiem, w którym urodziło się najmniej dzieci (porównując z urodzeniami w kolejnych latach od 1945 r. do 2021 r.), jednak liczba ludności świata wciąż nieprzerwanie rośnie. A ubiegły rok był rokiem rekordowej populacji na naszej planecie.

Okazuje się, że nawet jeśli w większości korzystamy z urządzeń energooszczędnych to kryzys energetyczny i tak zaledwie odsuwamy tylko w czasie. Stąd jedyną realną możliwością zmiany tej patowej sytuacji jest nowa technologia pozbawiona cech, które należy uznać w praktyce eksploatacyjnej za wady. Vide – dotychczas wykorzystywane technologie, aby unaocznić sobie skalę poruszanej tematyki wystarczy sięgnąć do akademickiego podręcznika, (np. nowego wydania „Technologii energetycznych” prof. Tadeusza Chmielniaka, opublikowanego przez PWN pod kątem oceny ich mocnych i także słabych stron).

Nic dziwnego, że tyle nadziei budzi właśnie reakcja syntezy termojądrowej, która byłaby powszechnie wykorzystana do celów generowania energii elektrycznej¹.

INTRYGUJĄCE PYTANIA

Przed wielu laty, współodkrywca promieniowania neutronowego plazmy wysokotemperaturowej, Lew Arcymowicz, jeden z pionierów badań nad syntezą jądrową, dr honoris causa Uniwersytetu Warszawskiego, m.in. członek honorowy Szwedzkiej Akademii Nauk oraz Amerykańskiej Akademii Sztuki i Nauki, na pytanie: kiedy powstanie pierwsza elektrownia termojądrowa odpowiedział: *Dokładnie wtedy, kiedy ludzkość będzie jej potrzebować. Czyżby*

właśnie teraz ten czas nadszedł? Nie jest to – wraz ze wszystkimi implikacjami – bynajmniej retoryczne pytanie. A na taki, a nie inny stan rzeczy złożyło się bardzo wiele przyczyn².

NOWA ERA ENERGETYKI?

Czym się ona ma różnić od poprzednich? I czy ma nią właśnie być energia termojądrowa? W dziale „Co piszą inni” w *Wiadomościach Elektrotechnicznych* w numerze 12 z 2022 r., został opublikowany – w opracowaniu redakcyjnym Konrada Wolińskiego – interesujący tekst, pod wymownym i napawającym optymizmem tytułem „Era energetyki termojądrowej może być bliższa niż się wydaje”, którego autorem jest T. Overton. Autor dokonuje w nim podsumowania stanu badań nad syntezą jądrową. Na tej podstawie prognozuje kolejne etapy związane z realizowanymi w świecie programami badawczymi. W efekcie czego – zdaniem Autora – zwiększa się prawdopodobieństwo, iż już może niebawem nastąpi ten długo wyczekiwany moment wykorzystania technologii fuzji termojądrowej do pozyskiwania energii użytecznej gospodarczo.

Autor w przystępny sposób, ale bez uproszczeń, które mogą stworzyć nieporozumienia, omawia wiele skomplikowanych kwestii na podstawie zgromadzonych w wyniku prac nad fuzją faktów. Czytelnie opisuje podstawy reakcji fuzji jądrowej, ciekawie referuje obecnie prowadzone prace i nakreśla obszar, stojący przed badaczami potencjalnych wyzwań w sferze badawczej oraz technologicznej.

Jednocześnie korzysta z przysługującego mu prawa wyboru zagadnień, jakie zdecydował się przedstawić, pomijając tym samym inne. Ma do tego pełne prawo, nawet bez konieczności podawania przyczyn, dla których tak uczynił. W ten sposób w przygotowanym przez siebie przeglądzie dotyczącym badań i projektów fuzyjnych automatycznie dokonał jednak gradacji prezentowanych problemów, tworząc hierarchię stopnia ich ważności.

Są trzy metody związane z reakcją syntezy termojądrowej w związku z powstawaniem plazmy i utrzymaniem stanu jej wzbudzenia. Pierwszą formę utrzymania plazmy w gwiazdach wynalazła sama natura. Jest to typ pułapowania grawitacyjnego. Tu sama natura ma patent na ten rodzaj postępowania i bynajmniej nie udostępnia swojej licencji nawet najbardziej zdolnym przedstawicielom *homo faber*. Utrzymanie plazmy w gwiazdach jest wynikiem siły ciężkości, prowadzącej do wywołania wysokiego ciśnienia. Rodzaj pułapowania grawitacyjnego nie jest do wykorzystania w warunkach ziemskich. Pozostaje więc liczyć wyłącznie na inżynierską inwencję i techniczną kreatywność.

Stąd konieczność skonstruowania specjalnej pułapki typu magnetycznego, co wiąże się z koniecznością wytworzenia silnego pola magnetycznego. Można też sięgnąć po rodzaj innej techniki syntezy termojądrowej, jaką dawałoby wykorzystanie możliwości, wynikającej z tzw. metody bezwładnościowej, zwanej też inercyjną.

Autor ma oczywiście pełne prawo uznać, iż pewne kwestie są w tej chwili mniej lub wręcz w ogóle nieistotne. Rzecz jednak w tym, że T. Overton oparł swoją analizę na podstawie wyłącznie jednego tylko rodzaju technologii związanej z prowadzonymi badaniami fuzyjnymi (tokamaki, stellatory), co ewidentnie pozostawia czytelnika w sytuacji niekomfortowej, tworząc poznawczą lukę w wyniku braku informacji w jego tekście, co do całości prezentowanej w tym przeglądowym artykule tematyki. Acz pewnym usprawiedliwieniem dla Autora może być fakt, że wtedy kiedy przygotowywał swój artykuł przeglądowy nie ogłoszono wyników

² „Przyszłość światowej energetyki – kontrolowana fuzja termojądrowa”. [Z prof. Andrzejem Gałkowskim, dyrektorem IFPiLM rozmawiał Marek Bielski]. *Magazyn Energetyki Jądrowej „ProAtom”* nr 4-5/2014 (<https://www.ifpilm.pl/dla-mediow/media-o-nas/500-proatm-wydanie-specjalne>).

¹ Marek Bielski. 2014. Fuzja wielkiej nadziei. *Przegląd Techniczny*, 24.

przeprowadzonego w USA, przy użyciu laserów eksperymentu, ocenionego jako przełomowy dla tego rodzaju badań naukowych.

I dlatego tekst T. Overtona wymaga – w mojej opinii – koniecznie glosy. Tym bardziej, że jego Autor skupił swoją uwagę wyłącznie na jednej metodzie, tej związanej z utrzymywaniem plazmy w polu magnetycznym (tokamaki i stellaratory). Dość powszechnie uważa się, że tokamaki są tymi urządzeniami, które najlepiej rokują na przyszłość. Dopiero na drugiej pozycji w tym nieformalnym rankingu sytuowane są stellaratory. Tak się złożyło, że badania na tokamakach, jak i stellaratorach wyróżniły się w 2022 r. szczególnie cennymi wynikami. I uznano je za kolejny znaczący postęp w tej dziedzinie. W tekście T. Overtona rola stellaratorów nie została niestety zreferowana.

POLSKI WĄTEK

Korzystając z prawa glosy, należy zasygnalizować wkład w rozwój fuzji jądrowej polskich naukowców. Dokonania badaczy polskich na tym polu z racji na ich wysoki merytoryczny poziom są godne podkreślenia i odnotowania. Tym bardziej, że badania nad fuzją jądrową w naszym kraju nie wyróżniają się skalą finansowania w stosunku do innych dziedzin nauki polskiej – nawiasem także dość skąpo wspieranych finansowo z budżetu. A środowisko fizyków fuzyjnych w Polsce środki na realizację badań od wielu lat pozyskuje głównie z funduszy unijnych, w wyniku aktywnego uczestnictwa w projektach międzynarodowych.

Nie tylko z powodu tego kontekstu związanego z tzw. dotacjami na naukę, ale przede wszystkim z racji czysto merytorycznych, czyli poziomu naukowego osiągniętych wyników warto w obszarze badań fuzyjnych w tym momencie przynajmniej zasygnalizować polski wątek związany z powyższą tematyką³.

Naukowcy z Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej (IFPiLM) w Warszawie, pracując w międzynarodowych zespołach, współprojektują eksperymenty, czuwają nad ich prawidłowym przebiegiem oraz poddają wyniki precyzyjnym analizom. Są fizykami specjalizującymi się m.in. w analizie i interpretacji danych rejestrowanych za pomocą różnego rodzaju diagnostyk. I ta specjalizacja stanowi na obecnym etapie rozwoju badań nad fuzją termojądrową bardzo istotną składową prac już sensu stricto eksperymentalnych.

Fizycy z IFPiLM badali m.in. zachowania zanieczyszczeń plazmy w celu ich kontroli i minimalizowania akumulacji. Brali udział w projektowaniu i przygotowaniu nowoczesnych typów detektorów do diagnostyki miękkiego promieniowania rentgenowskiego w Joint European Torus (JET), znajdujący się w Center for Fusion Energy w Culham w Anglii. Urządzenie to jest obecnie największym i najbardziej zaawansowanym tokamakem na świecie. W latach 2019-2020 poczyniono zaawansowane przygotowania do eksperymentów, które miały na celu utrzymanie wysokiej wydajności syntezy jądrowej przez dłuższy czas. Tokamak JET został zaprojektowany do badań syntezy jądrowej w warunkach zbliżonych do potrzebnych w przyszłej elektrowni. I jako jedyny może funkcjonować i działać z mieszaną paliwową deuter – tryt. A taka właśnie mieszanka jest planowana do wykorzystania do komercyjnej energii termojądrowej.

Ponadto specjaliści IFPiLM uczestniczyli w pomiarach produktów reakcji syntezy jądrowej, czyli neutronów i szybkich jonów helu, zwanych również cząstkami alfa. W ramach przygotowali do kampanii Deuter – Tryt uczestniczyli w kalibracji systemu diagnostyk neutronowych w JET dla energii 14 MeV. Wykonali liczne rekonstrukcje tomograficzne promieniowania plazmy na podsta-

wie danych biometrycznych. Zajmowali się także rozwojem i zastosowaniem programów numerycznych, modelujących procesy fizyczne w celu ekstrapolacji uzyskanych wyników i przewidywań dla plazmy DT i tokamaka ITER. Dzięki ogromnemu doświadczeniu w pilotażu plazmy, naukowcy z IFPiLM pełnili z powodzeniem także funkcje lidera sesji eksperymentalnej w JET.

Europejskie konsorcjum EUROfusion, w którym aktywnie uczestniczą polscy naukowcy, poinformowało, iż pracujący nad fuzją w największym na świecie obiekcie syntezy jądrowej – tokamaku JET w Culham w Wielkiej Brytanii – badacze wytworzyli stabilną plazmę, uzyskując 59 megadżuli energii⁴. Ustanowiony rekord określany jest jako ewidentny wynik przełomowy, gdyż po raz pierwszy w dziejach badania fizyki plazmy zostaliśmy utwierdzeni w przekonaniu, że możliwe jest utrzymanie stabilnej plazmy i wyprodukowanie dużych ilości energii z syntezy jądrowej. I co jest ważne, stało się to przy użyciu tej samej mieszanki paliwowej, która właśnie będzie stosowana w międzynarodowym eksperymencie ITER. A zatem mieszaną mogącą być wykorzystywaną w przyszłych elektrowniach termojądrowych.

Podkreślano, że w historii dotychczasowych wysiłków uczonych uzyskanie takich wyników stanowi nader ważny krok ku praktycznemu wykorzystaniu syntezy termojądrowej. Dlatego nic dziwnego, iż ogłoszony podczas specjalnej konferencji prasowej wynik wzbudził duże zainteresowanie nie tylko środowisk naukowych, ale i opinii publicznej⁵.

Kolejne osiągnięcia w minionym roku zdobyli naukowcy uczestniczący w programie badawczym, pracując na innym niż tokamak urządzeniu. W tym wypadku chodzi o stellarator Wendelstein W7-X, znajdujący się w Greifswald w Niemczech w pobliżu granicy z Polską, a w badaniach na tym urządzeniu biorą udział także polscy naukowcy. Uzyskano właśnie temperaturę dwukrotnie wyższą niż temperatura jądra Słońca. Wyniki badań osiągnięte w stellaratorze W7-X jednoznacznie wskazują, że i ten rodzaj urządzenia fuzyjnego może stać się też kluczowym w dążeniu do realizacji idei budowy elektrowni termojądrowej.

TERMOJĄDROWE SPEKTRUM

Z racji na istotną wagę tematu kontrolowanej fuzji jądrowej należy odnieść się do poruszanych przez Autora kwestii i podjąć próbę uściślenia niektórych opinii, ale przede wszystkim uzupełnić ten bardzo wartościowy poznawczo tekst o zagadnienia przez Autora pominięte. A także oczywiście koniecznie uzupełnić o informację, której Autor nie mógł zaprezentować, gdyż ograniczył ramy czasowe omawianego tematu, referując osiągnięcia naukowców wyłącznie z rokiem 2021, a wydarzenia, jakie chcemy przedstawić dotyczą przede wszystkim już 2022 r.

Autor przywoływanego tekstu w numerze WE 12 z roku minionego skoncentrował się w swym przeglądzie na potencjale tkwiącym w tokamakach i nie wspomniał o nadziejach związanych ze stellaratorami, pozostawiając oprócz nich bez komentarza także jeszcze jedną technologię związaną z syntezą termojądrową. Do tej pory faktycznie nie cieszyła się ona – poza niewielkim gronem specjalistów – szerszym zainteresowaniem opinii publicznej. Chodzi o fuzję inercyjną wywołaną dzięki laserom. Tak było aż do momentu, kiedy w grudniu 2022 r. ogłoszono, że naukowcy pracujący nad projektem badawczym związanym z inercyjnym zapłonem fuzyjnym w Stanach Zjednoczonych, osiągnęli rezultaty mogące mieć istotne znaczenie dla postępu dalszych badań, a w konsekwencji rozwoju technologii fuzyjnych służących produkowaniu energii elektrycznej.

³ Marek Bielski. 2017. 40 lat badań fuzji jądrowej. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 1. tenże: Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy – 40 lat badań dla zrównoważonego rozwoju. *Postępy Techniki Jądrowej* 2016. 3

⁴ Anna Bielska. 2022. W poszukiwaniu świętego Graala fizyki. *Przeгляд Techniczny*. 5.

⁵ „Polacy budują ITER”. *PT*. 11/2019.

LASER WCHODZI DO GRY

Proces fuzji ma miejsce, gdy jądra lekkich atomów (takich jak wodór) pokonują opór elektryczny, który je rozdziela, pozwalając im zbliżyć się na tyle, aby aktywować silne oddziaływanie jądrowe, które spaja je razem, tworząc cięższe pierwiastki (takie jak hel). Aby umożliwić tę fuzję, paliwo jest podgrzewane do bardzo wysokich temperatur, tworząc plazmę – chmurę naładowanych jonów – w której zachodzą reakcje syntezy jądrowej. Podczas reakcji syntezy jądrowej uwalnianych jest kilka rodzajów cząstek – w tym cząstki „alfa”, które oddziałują z otaczającą plazmą i dalej ją podgrzewają. A tak podgrzana plazma uwalnia następnie coraz więcej cząstek „alfa” w samopodtrzymującej się reakcji – procesie określanym jako zapłon.

Prekursorem rozpoczęcia badań nad użyciem lasera do wytworzenia fuzji jądrowej był John Hopkin Nuckolls, który jako jeden z pierwszych badaczy podjął się zadania opracowania inercyjnej koncepcji przeprowadzania syntezy jądrowej przy użyciu lasera.⁶ Praca nad zagadnieniami laserowej kompresji materii do bardzo dużej gęstości (zastosowania termojądrowe) przyniosła mu w 1981 r. nagrodę im. Jamesa Clerka Maxwella.

Naukowcy z National Ignition Facility (NIF) w Lawrence Livermore National Laboratory w Stanach Zjednoczonych, przeprowadzając – już 8 sierpnia 2021 r. – za pomocą laserów eksperyment syntezy jądrowej w tzw. uwięzieniu bezwładnościowym, osiągnęli wynik – w opinii Eda Mosesa, zastępcy dyrektora NIF i Photon Science – świadczący o znaczącym potencjale tej metody. Osiągnięta wtedy wydajność energetyczna była znacznie większa, niż energia zdeponowana w gorącym punkcie przez implozję, podczas wcześniej przeprowadzanych w tym laboratorium tego typu eksperymentów. W takich doświadczeniach odtwarza się przez ułamek sekundy ekstremalne – panujące dotychczas tylko w jądrze Słońca – warunki, osiągając analogiczne charakterystyki przebiegu reakcji w zakresie osiąganego temperatury i wytworzonego ciśnienia.

Eksperyment z 8 sierpnia 2021 r.: (...) był możliwy dzięki skupieniu światła laserowego z NIF – urządzenia wielkości trzech boisk piłkarskich – na celu wielkości kulki, który wytwarza gorący punkt o średnicy ludzkiego włosa, generując ponad 10 miliardów watów mocy syntezy jądrowej przez 100 bilionowych części sekundy. O wynikach oficjalnie poinformowało opinię publiczną kierownictwo Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) 18 sierpnia 2021 r.

W tym eksperymencie osiągnięto wydajność ponad 1,3 MJ, przekraczając próg 1 MJ, który wg naukowców jest wymagany do rozpoczęcia zapłonu syntezy jądrowej. Uznano ów wynik za bardzo istotny dla dalszej realizacji projektu badawczego i zdwojono wysiłki, aby usprawnić stosowaną technologię.

Naszą uwagę ogniskuje obecnie kolejny eksperyment z tej serii, jaki rozpoczęli o godz. 1 w nocy, a zakończyli wczesnym raniem 5 grudnia 2022 r. naukowcy z National Ignition Facility (NIF) w Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Eksperymenty tego rodzaju odbywały się już wcześniej wielokrotnie w tym znanym badawczym amerykańskim ośrodku naukowym. I w tym sensie z racji ich powtarzalności można mówić o pewnej już rutynie, wynikającej z powtarzalności określonych ściśle procedur postępowania. Taka sugestia nie oddaje jednak skali skomplikowania i specyfiki przeprowadzanych doświadczeń. Każdy oczywiście, kto był nawet tylko obserwatorem, choćby czynności justowania lasera nie koniecznie tak wysokiej mocy, jak podczas testów w NIF

– LLNL w Kalifornii ma tego bezsprzecznie świadomość⁷. Skala tego ostatniego eksperymentu wymagała korzystania z doświadczenia oraz indywidualnego zaprojektowania eksperymentu, który skumulował by energię wiązki 192 wysokoenergetycznych laserów, skupionych na jednym celu. Jest nim kapsuła wielkości przysłowiowego „ziarnka pieprzu”.

W tym miejscu należy przywołać opinię osoby, która porównała kapsułkę z owym ziarnkiem pieprzu. Podczas specjalnie zwołanej konferencji prasowej, a autorką owego porównania była dr Jill Hruby, podsekretarz ds. energii jądrowej USA. Stwierdziła ona, że: *poniedziałek 5 grudnia 2022 był ważnym dniem dla nauki (...) Podczas eksperymentu 192 wysokoenergetyczne lasery skupiły się na celu wielkości ziarna pieprzu, podgrzewając kapsułę deuteru i trytu do ponad 3 mln stopni Celsjusza, chwilowo symulując warunki wewnątrz gwiazdy, osiągając zapłon*. Następnie podsekretarz ds. energii jądrowej dodała znamienne zdanie: *Zrobiliśmy pierwsze niepewne kroki w kierunku czystego źródła energii, które może zrewolucjonizować świat*.

Pierwsze eksperymenty z udziałem laserów datują się już na lata 60. XX w. Jednak trzeba było aż ponad pół wieku, aby podczas tego typu eksperymentu uzyskać rekordowy wynik, który sprawił, że wśród liderów fuzji termojądrowej obok tokamaków, czy stellatorów mogła pojawić się także technika laserowa równie potencjalnie dobrze rokująca dla przyszłości energetyki termojądrowej.

W NIF konsekwentnie od samego początku powołania laboratorium dąży się do doskonalenia tej technologii. W przeciwnym razie trudno byłoby liczyć na postęp w tej dziedzinie. Co oczywiście wiąże się także z proporcjonalnym do skali badań ich finansowaniem. Budżet roczny tego amerykańskiego ośrodka zajmującego się laserową fuzją termojądrową oscyluje w granicach kwoty, którą my w Polsce chcemy przeznaczyć na... budowę pierwszej w kraju elektrowni jądrowej.

TECHNOLOGIA WIELKIEJ SZANSY?

Celem współczesnych badań naukowych jest w przeważającej mierze zapewnienie podstaw naukowych dla różnych komercyjnych zastosowań. I nie inaczej jest w przypadku badań poświęconych reakcji syntezy jądrowej. Kierunek poszukiwań jest jednoznaczny. Tworzy się zaawansowane warianty modelowania komputerowego i odczytywania danych eksperymentalnych. Już we wrześniu 2013 r. ogłoszono, że w NIF udało się po raz pierwszy uzyskać dodatni bilans energetyczny, co zostało sprawdzone i następnie zakwestionowane. Nie trudno zauważyć, że obecnie konferencje prasowe z udziałem polityków odpowiedzialnych za rozwój badań naukowych i wdrożenie najnowszych rozwiązań technologicznych zwoływane są dopiero co najmniej po tygodniu od momentu zakończenia eksperymentu. Tak jak w USA, wcześniej postąpiono w Anglii, ogłaszając rekordowe wyniki osiągnięte w największym aktualnie tokamaku na świecie JET, zlokalizowanym w Culham. A wszystko po to, aby uniknąć popełnienia błędu i ogłoszenia błędnych rezultatów badań. Wiadomo, że pomyłki nie uwiarygodniają pracy naukowców. Wręcz przeciwnie. Tworzą atmosferę podejrzeń, że wyniki zostały celowo sprokurowane, aby np. zdobyć przedłużenie finansowania cyklu badań.

Naukowcy chcą dowiedzieć się więcej o zachowaniu plazmy, patrząc pod kątem możliwości poprawy wydajności obecnych urządzeń, jak i tych przeznaczonych dla przyszłych urządzeń wykorzystywanych w elektrowniach termojądrowych. Chodzi

⁶ Jerzy Wołowski. 2015. Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy – 40 lat badań dla przyszłości (okładka PT – justacja lasera 10 TW w IFPiLM w Warszawie). Przegląd Techniczny, 25.

⁷ John Nuckolls, Lowell Wood, Albert Thiessen, George Zimmerman. Laser compression of matter to super high densities: thermonuclear applications. Nature. 239 (5368): 139-142. (15 września 1972).

o wiedzę, jak zachowuje się gorące, turbulentne „paliwo plazmowe”. Czy faktycznie wyniki eksperymentów przeprowadzanych w 2022 r. przez uczonych europejskich i amerykańskich są realną szansą na szybsze urzeczywistnienie idei wykorzystania kontrolowanej fuzji jądrowej do generowania energii elektrycznej?

Koncentrowanie uwagi decydentów politycznych i gospodarczych oraz opinii publicznej na bieżącej sytuacji związanej z aktualnymi konfliktami zbrojnymi na świecie jest niezbędne do adekwatnej reakcji na bieżące wydarzenia. Jednak aktualna sytuacja polityczna i gospodarcza nie zawsze sprzyja podejmowaniu decyzji zmierzających do zwiększania potencjału badawczego ośrodków naukowych, pracujących na rzecz rozwiązania realnych problemów ekologicznego generowania energii. Obecne wyniki badawcze są wiarygodną podstawą do wyrażenia poglądu, że wzrosło prawdopodobieństwo, iż fuzja jądrowa może stanowić nowe, niezmiernie istotne dla gospodarki długoterminowe źródło energii elektrycznej począwszy – być może – już od drugiej połowy XXI stulecia.

CO STOI NA PRZESZKODZIE?

Fuzja termojądrowa uwalnia cztery, a nawet i pięć razy więcej energii niż podczas procesu jego odwrotności, czyli rozszczepienia stosowanego w elektrowniach jądrowych – o czym można przeczytać nawet w internetowych mediach. Powołać się też można na Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (IAEA). Jednak chyba wszyscy zdają sobie sprawę, że nad procesem uwalniania się tej gigantycznej energii należy zapanować w stopniu odpowiednim do zadań, jakie sobie założyliśmy. A w sferze praktyki w kontekście metody laserowej zarówno samo zainicjowanie reakcji, jak i kontrola jej przebiegu okazała się jednak niezwykle trudna technicznie. Przez dekady niewiele w tej mierze osiągnięto, głównie z powodu niewystarczającej mocy laserów potrzebnych do rozpoczęcia samej reakcji fuzji. Dopiero w 2015 r. osiągnięto jedną trzecią tej granicy. Dopiero potem postęp przyspieszył. W sierpniu 2022 r. badacze z NIF ogłosili, że udało im się osiągnąć odpowiednią moc laserów i zainicjować fuzję. Niestety inicjacja nie przyniosła wówczas efektu osiągnięcia nadwyżki energii.

Szacuje się, że dla celów jakie stawiają sobie naukowcy, myśląc o komercyjnym wykorzystaniu energii termojądrowej przy użyciu laserów, sama wydajność reakcji musi być co najmniej kilkadziesiąt razy większa, niż ta osiągnięta aktualnie. Także szybkość, z jaką laser strzela w kapsułkę, musi być o rząd wielkości większa. Osiągnięcie większej wydajności inercyjnego procesu syntezy jest tylko jednym z warunków do tego, aby przekształcać wyprodukowaną energię w użyteczną energię elektryczną. Większość aktualnie proponowanych rozwiązań opiera się na idei owinięcia całej instalacji „kocem” pochłaniającym wyrzucane neutrony w celu umożliwienia energii cieplnej napędzanie łopatek turbiny parowej. Ten sam problem występuje przy technice z zamknięciem magnetycznym, a więc dotyczy tokamaków, a zatem i projektu ITER.

Ponadto obecnie w NIF dokonuje się strzałów laserowych w eksperymentach fuzyjnych nie częściej niż jeden raz w ciągu miesiąca. A po każdym strzale technicy przeprojektowują eksperymenty, gdyż należy skorygować optykę laserów uszkodzaną podczas użytkowania. Aktualnie koszty eksploatacji i konserwacji inercyjnego reaktora termojądrowego są oceniane jako bardzo wysokie. A same kapsułki kosztują setki tysięcy dolarów. Na ich wykonanie i przygotowanie do eksperymentów potrzeba wielu miesięcy. Technologia jest niestety jeszcze na tak wczesnym etapie rozwoju, iż trudno aktualnie dokonać szacunków, dotyczących komercyjnej opłacalności elektrowni termojądrowej.

CZASU UBYWA

Prognozowanie jest zadaniem wyjątkowo trudnym, bowiem dotyczy przyszłości, jak z błyskotliwą ironią celnie zauważył Niels Born. Pamiętając jednocześnie, iż w latach 50. minionego wieku wypowiediano m.in. opinie, że uzyskiwana w elektrowniach jądrowych energia będzie tak niewyobrażalnie tania, że nie będzie się opłacało nawet montować liczników mierzących jej zużycie. Należy zawsze więc nie tyle ograniczać wyobraźnię i hamować nadmierny optymizm nie tylko polityków, czy dziennikarzy – ale także ekspertów.

Jedyną drogą prowadzącą do progresu – w przypadku „fuzji wielkiej nadziei” jest stworzenie możliwości materialnych. Bez wydatnego zwiększenia finansowania badań nad fuzją termojądrową trudno spodziewać się osiągnięcia końcowego sukcesu w postaci nowego typu elektrowni.

W tej chwili – jak twierdzą media – w zasięgu możliwości uczniów szkoły średniej jest stworzenie domowego fuzera. Można nawet na swoje domowe potrzeby zbudować reaktor termojądrowy IEC⁸. Bracia Wright w sposób bezsprzeczny udowodnili całemu światu, że przedmioty cięższe od powietrza, ale o odpowiedniej konstrukcji i po zaopatrzeniu ich w napęd – mogą latać. Na kolejne przełomowe osiągnięcia lotnictwa przyszło nam jednak czekać sporo lat. Dla każdego następnego pokolenia czasu, aby dokonać przełomowego odkrycia zostaje coraz mniej. I chociaż odkrywane są nowe złoża kopalin, to niezależnie od tego pozytywnego faktu i zasobów pokładów, owe zasoby w skali świata stają się coraz mniejsze. A powodem dlaczego tak się dzieje? Powód jest prozaiczny. Nie możemy ogłosić zaprzestania ich wydobycia i nieprzerwanie z nich korzystamy, aby zaspokoić w skali całego świata nasz permanentny energetyczny głód.

DALEKO CZY BLISKO?

Czy opinia, którą przywołuje T. Overton i przytacza na początku swego artykułu „Era energetyki termojądrowej może być bliższa niż się wydaje” i nazywa dowcipem, ma jakąkolwiek rację bytu? Potwierdzoną we wciąż przedłużających się badaniach bez osiągnięcia finalnego rezultatu? W wersji podanej przez T. Overtona brzmi owa anegdota następująco: (...) *o syntezie termojądrowej mówi się, iż do tego aby można ją było wykorzystywać brakuje nam 30 lat... i zawsze będzie to 30 lat.*

Podsumowując ową anegdotę osobistą uwagą, mogę powiedzieć, że po raz pierwszy usłyszałem ją z ust ministra nauki, prof. Michała Kleibera. Uczestnicząc w konferencji prasowej w siedzibie resortu przy ul. Wspólnej w Warszawie w 2001 r., zadałem panu ministrowi pytanie o fuzję jądrową i prognozowany termin wprzęgnięcia jej w komercyjny proces generowania energii elektrycznej. Wtedy jednak wspomniano o 50 latach. Widać więc, że w roku 2023 już nawet treść anegdoty dostosowała się do tempa osiągnięć naukowych. Odstępując już od uszczypliwych żartów, należy uświadomić sobie ogromną skalę trudności, jakie stoją przed naukowcami i technnikami. Rzeczywistą skalę trudności unaoczniają szczegółowe raporty z przeprowadzanych eksperymentów. Warto się zapoznać też z procesem prawidłowego odczytania uzyskanych wyników. A osiągnięte wyniki są już zasadniczą wytyczną do podejmowania kolejnych eksperymentów. Czy będą one prowadziły konsekwentnie do udanej próby zbudowania elektrowni termojądrowej w postaci obiektu demonstracyjnego, a w następnym etapie termojądrowej elektrowni komercyjnej? Przywoływany tu T. Overton w tekście – do którego po raz kolejny się odwołujemy

⁸ Domowy reaktor termojądrowy IEC stworzony przez ucznia szkoły średniej, Williama Jacka. 1 lutego 2010 r., zdjęcie przesłane na portal Facebook przez Williama Jacka.

napisał: (...) Jednak poczynione ostatnio postępy w nauce i technologii mogą potencjalnie pozwolić na wprowadzenie do sieci pierwszej energii pochodzącej z fuzji jądrowej już w latach 40. XXI w. Przy czym T. Overton, sugerując w przypadku energetyki termojądrowej powyższy przedział czasowy – a więc lata 40. naszego wieku, odwołuje się do amerykańskich doświadczeń związanych z tempem budowy komercyjnych elektrowni jądrowych w USA, budowanych w modelu publiczno-prywatnym. I zaznaczył, że nie należy spodziewać się budowy pierwszych komercyjnych elektrowni termojądrowych przed rokiem 2050, przy czym zakłada, że będzie to po ok. 20 latach od uruchomienia ITER. Ponadto zakłada, że najprawdopodobniej energia z tej elektrowni będzie początkowo droższa niż z tradycyjnych źródeł. W grę jednak będzie wchodził efekt skali. Podobna sytuacja już miała miejsce m.in. przy wdrażaniu tzw. energetyki odnawialnej.

MOC ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

W wyniku fuzji deuteru z trytem otrzymujemy cząstki o dużej energii kinetycznej: neutrony (14,029 MeV) oraz cząstki alfa (3,561 MeV). W przyszłej elektrowni termojądrowej zachodząca reakcja fuzji powinna być samopodtrzymująca. A zatem reaktor powinien charakteryzować się wysokim współczynnikiem sprawności $Q > 15$. Brak ładunku elektrycznego powoduje, że powstałe neutrony uciekają z obszaru pola magnetycznego, natomiast cząstki „alfa” mające ładunki elektryczne, mogą nadal być pułapkowane w polach magnetycznych, gdzie powinny oddawać swoją energię paliwu: jądrom deuteru i trytu, podtrzymując plazmę w temperaturze umożliwiającej zajście fuzji. Dla fizyków jądrowych jest to już abecadło. Są to informacje wyjściowe (oczywiście nie jedyne) w obszarze danych podstawowych (zamieszczone na stronie internetowej Zakładu Transportu Energii Termojądrowej Polskiej Akademii Nauk).

POTĘGA WYOBRAŹNI

Problemem było zatem – i pozostaje do tej pory – nieodzowność podniesienia współczynnika sprawności oraz osiągnięcie odpowiedniego stopnia sterowania procesem powstałym w wyniku reakcji syntezy termojądrowej. Kontrolowana fuzja jądrowa, jeśli stanie się realnym źródłem generowania energii, będzie miała istotne znaczenie dla odmówienia trwania naszej cywilizacji, czyli stałaby się w tym wypadku *conditio sine qua non* dla ludzkiej egzystencji na Ziemi. I w takim sformułowaniu – tak miemam – nawet małej nutki patosu. Warto przywołać zaś opinię jednego z polskich profesorów fizyki, którego nazwisko – Państwo wybaczą – przemilczę, krytykującego publicznie energetykę jądrową, do czego oczywiście miał prawo, lecz zaskakuje, że do wyrażenia swego stanowiska, użył szczególnego argumentu. Otóż, trudno mu się było pogodzić z faktem, iż do zwykłego podgrzania wody, aby zamienić ją w parę, trzeba użyć energetyki jądrowej. Faktycznie. Trzymając się zaproponowanej konwencji prezentacji argumentów przez Profesora, trzeba rzec, iż trudno odmówić Mu racji, skoro zazwyczaj do tak skomplikowanej czynności z powodzeniem wystarczy najzwyklejszy czajnik. Wypowiedzi tegoż Profesora na temat energetyki termojądrowej już nie słyszałem.

Dina Genkina z Uniwersytetu Maryland i dziennikarka naukowa z *Joint Quantum Institute* spuentowała tocząca się dyskusję na temat eksperymentu, że w tym wypadku (...) *powiedzieć, że jest jeszcze dużo do zrobienia, to jest jakby nic nie powiedzieć*. Ale jednocześnie podkreśla, tak jak to uczyniło wielu ekspertów, że jest on doprawdy bardzo daleko rokujący. Na tyle, że na pewno warto koniecznie z bacznością śledzić dalszy postęp prac badawczych.

JASNA STRONA MOCY

Artykuły dotyczące prezentacji wyników badawczych pisane są językiem precyzyjnym, co słusznie uważane jest za nieodzowny i podstawowy warunek obiektywności przekazu. A zatem nie ma w nich miejsca na emocje, czy spontaniczność reakcji.

Jednak nie tak dawno, bo w pierwszej połowie minionego wieku – nawet uznane światowe naukowe autorytety nie ukrywały swoich stanów emocjonalnych. Kiedy udało się dokonać pierwszego połączenia jąder atomowych, odtwarzając proces zasilający w energię Słońce, czyli fuzję jądrową – sir Ernest Rutherford i jego asystenci, Mark Oliphant i Paul Harteck napisali o swoich naukowych dokonaniach: (...) *Byliśmy naprawdę zaskoczeni odkrywając, że bombardowanie ciężkiego wodoru jądrami deuteru daje tak potężny efekt*. Zdanie pochodzi z artykułu z roku 1934, przedstawiającego przebieg i rezultat tego rzeczywiście przełomowego dla nauki eksperymentu fizycznego XX stulecia. Należy przytoczyć więc w tym historycznym kontekście współczesną nam wypowiedź. A dotyczy ona eksperymentu, w którym uzyskano dodatni bilans energetyczny w procesie laserowej fuzji, przeprowadzonego 5 grudnia ubiegłego roku w National Ignition Facility w USA. Samopodtrzymująca się reakcja stała się w wyniku tego eksperymentu faktem dokonanym. A poproszony o komentarz na ten właśnie temat prof. Steven Cowley, dyrektor Laboratorium Fizyki Plazmy w Princeton, oznajmił: (...) *to tak, jakby ogień został rozpalony. To pierwszy kontrolowany zapłon termojądrowy, jaki kiedykolwiek widzieliśmy, i to jest spektakularne. Jest bardzo dużo pracy do wykonania, aby uzyskać komercyjną energię termojądrową za pomocą magnetycznej fuzji, ale jest całkiem pewne, że można to zrobić. Ten wynik natomiast mówi, że i synteza inercyjna może być również drogą do komercyjnej syntezy jądrowej. A nie wiedzieliśmy o tym dwa tygodnie temu*.

Zapytany o znaczenie – osiągniętych przez amerykańskich badaczy – wyników tegoż laserowego eksperymentu fuzyjnego dr inż. Marcin Rosiński, kierownik Zakładu Fizyki i Zastosowań Plazmy Laserowej w warszawskim IFPiLM odpowiedział: (...) *Wykonano obecnie mały kroczek w kierunku okiełznania natury i uzyskania czystej energii „gwiazd”, bazującej na inercyjnej syntezie jądrowej. Podobnie jak program Apollo rozwijany w USA w latach 1966–1972 napędzał różne dziedziny nauki i technologii do rozwoju, a sukcesem dla całej ludzkości było postawienie przez Neila Armstronga pierwszego kroku na księżycu w roku 1969, tak i teraz wynik uzyskany w NIF – miejmy nadzieję – stanie się kołem zamachowym do tego, że można i że warto podjąć tę ścieżkę rozwoju, by synteza jądrowa była źródłem energii dla przyszłych pokoleń*.

To jest ta „jasna strona mocy”, mająca bez wątpienia spory ładunek optymizmu. Kampania „Ufajmy nauce” nie powinna stanowić jednorazowej akcji podejmowanej przez gremia naukowców, jak tych skupionych wokół idei Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej, lecz stale obecnego przeświadczenia, iż od wyników osiągniętych w tym wypadku także przez zespoły badawcze z Polski, badań fizyków i podejmowanych prac inżynierskich zależy powodzenie naszej codziennej egzystencji zarówno tu i teraz, jak i w przyszłości. Na pewno na łamach *WE* jeszcze niejednokrotnie będzie się wracać do omówienia tych zagadnień zarówno w ujęciu chronologicznym, jak i w postaci prezentacji licznych, a ważnych szczegółów tychże eksperymentów nad fuzją jądrową. Naukowcy nie mogą tylko inicjować, ale muszą utrzymać stabilny stan plazmy przez odpowiednio długi czas i oczywiście precyzyjnie kontrolować przebieg reakcji syntezy termojądrowej. A wszystko to w jednym podstawowym celu. Jest nim opanowanie fuzji od strony technologicznej w stopniu umożliwiającym im skierowanie wyzwalającej się podczas reakcji energii na nasz codzienny pożytek – w tym wypadku otrzymywania i korzystania z czystej, taniej i praktycznie niewyczerpywalnej energii.