



## Fuzja – kawałek Słońca na Ziemi

M. Lisak<sup>1</sup>, J. Zaleśny<sup>2</sup>, A. Galkowski<sup>2</sup>,  
S. Marczyński<sup>3</sup>, P. Berczyński<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Uniwersytet Technologiczny Chalmers, Göteborg, Szwecja  
<sup>2</sup>Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, Warszawa  
<sup>3</sup>Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

### Streszczenie

Fuzja termojądrowa jest źródłem energii Słońca i gwiazd. Wykorzystanie reakcji termojądrowych jako pożytecznego źródła energii na Ziemi jest wyzwaniem dla naukowców i inżynierów od wielu lat. Jesteśmy obecnie świadkami narodzin nowej technologii, umożliwiającej stworzenie praktycznie nieograniczonego i bezpiecznego źródła energii dla zaspokojenia potrzeb energetycznych ludzkości.

### Wstęp

W procesach syntezy termojądrowej zachodzącej we wnętrzach gwiazd uwalniane są ogromne ilości energii. Energia wytwarzana we wnętrzu naszej gwiazdy – Słońca – od miliardów lat dociera w postaci promieniowania do Ziemi, gdzie ulega przetworzeniu w wyniku skomplikowanych procesów fizycznych, chemicznych i geologicznych w inne formy energii. Od czasów, gdy na Ziemi powstało życie, w przetwarzanie słonecznej energii włączyły się także procesy biologiczne. Przetworzona energia słoneczna kumulowała się m.in. w postaci paliw kopalnych, bez których nie może dziś funkcjonować nasza cywilizacja. Wlewając benzynę do baku samochodu raczej nie zaprzątamy sobie głowy myślą, że choć pośrednio, to korzystamy w istocie z termojądrowej energii Słońca. Paliwa kopalne wykorzystujemy jednak w tempie nieporównanie szybszym, niż one powstawały. W przyszłości prawdopodobnie już nie tak odległej (szacowanej na kilkadziesiąt lat) nastąpi moment, gdy paliwa kopalne wyczerpią się. Jaki będzie więc świat naszych dzieci i wnuków? Czy będzie to świat kryzysu energetycznego i koniec cywilizacji w formie, jaką obecnie znamy? Zależy to w dużej mierze od tego, czy do tego krytycznego momentu my, jako ludzkość, opanujemy proces kontrolowanej syntezy termojądrowej. Elektrownia termojądrowa stanowiłaby malutki „kawałek Słońca na Ziemi”, uwalniając nas od zależności od paliw kopalnych. Podkreślić też trzeba, że w przeciwieństwie do większości obecnych technologii pozyskiwania energii, technologie energetyki termojądrowej będą „czyste”, tzn. bezpieczne dla człowieka i jego naturalnego środowiska. Wynika to po prostu z fizyki procesów zachodzących w tokamakach i stellaratorach – urządzeniach do otrzymywania energii termojądrowej w sposób kontrolowany. (Międzynarodowe słowo *tokamak* jest akronimem pochodzącym z języka rosyjskiego od słów „toroidalna komora magnetyczna”, zaś słowo *stellarator* utworzono od łacińskiego słowa *stella* – gwiazda. Poniżej często podajemy angielską wersję danego terminu, gdyż język ten stał się obec-

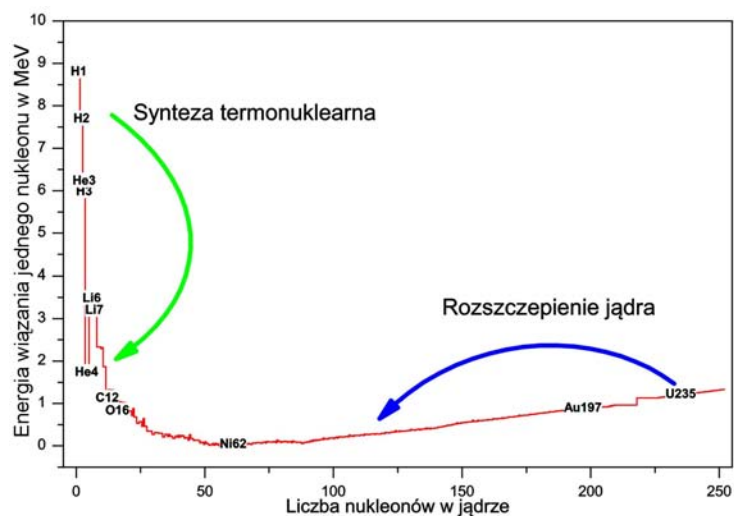
nie językiem nauki.) Fuzja termojądrowa, reakcja termojądrowa, synteza termojądrowa, fuzja jądrowa (nazwy te często używane są zamiennie) – polega na tym, że jądra atomowe lżejszych pierwiastków (np. wodoru lub izotopów wodoru) łączą się (stąd słowo – *fuzja*, ang. *fusion*) tworząc cięższe jądra atomowe (np. jądra helu, ang. *helium*). We wnętrzu Słońca proces ten zachodzi w ekstremalnie wysokiej temperaturze i pod ogromnym ciśnieniem (właśnie dzięki tej wysokiej temperaturze w nazwie pojawia się często przedrostek *termo*). Paliwem w reaktorach termojądrowych są izotopy wodoru, które można względnie łatwo i praktycznie w nieograniczony sposób pozyskiwać, np. z wody morskiej. Użycie jako paliwa deuteru (ang. *deuterium*) (jednego z izotopów wodoru) łącznie z pewną ilością innego pierwiastka – litu (ang. *lithium*) w celu pozyskiwania – trytu (ang. *tritium*) (innego ciężkiego izotopu wodoru) mogłoby dostarczyć energii wystarczającej na tysiące lat. Fuzja termojądrowa jest więc zasadniczo odmiennym procesem fizycznym niż reakcje rozszczepiania ciężkich jąder wykorzystywane do uzyskiwania energii w obecnych elektrowniach atomowych (reakcja rozszczepiania po angielsku zwie się *fission*). Elektrownie atomowe często określa się też mianem elektrowni jądrowych. Należy podkreślić, że mimo podobnych nazw elektrownie jądrowe i elektrownie termojądrowe to zasadniczo różne technologie oparte na całkowicie różnych procesach fizycznych. Od około 40 lat naukowcy pracują nad metodami opanowania kontrolowanego procesu syntezy termojądrowej w warunkach ziemskich. Intensywne prace rozpoczęły się w końcu lat 70. Przyświeca im wizja otrzymywania taniej i bezpieczniejszej energii. Okazało się to jednak trudnym i długodystansowym zadaniem. Niezaprzeczalne korzyści, jakie jednak mogą być osiągnięte w przypadku opanowania fuzji, takie jak uzyskanie bezpiecznego dla środowiska naturalnego i praktycznie „wiecznego” źródła energii, zlikwidowanie widma kryzysu energetycznego, uniezależnienie się od dostawców paliw kopalnych, a zatem wzrost energetycznego bezpieczeństwa narodowego powodują, że program rozwoju badań i technologii w celu opanowania fuzji termojądrowej jest ważnym, choć o długofalowej perspektywie, składnikiem strategii energetycznej wielu państw oraz Unii Europejskiej.

Zakończone sukcesem pozyskiwanie energii z fuzji termojądrowej na skalę przemysłową (bardzo prawdopodobne w połowie bieżącego stulecia) zmieni zasadniczo sposób zaopatrywania społeczeństw w energię elektryczną. Elektrownie termojądrowe zastąpią obecne elektrownie jądrowe oparte na rozszczepianiu jąder ciężkich pierwiastków (takich jak np. uran) oraz elektrownie oparte na spalaniu paliw kopalnych. Bezpieczeństwo elektrowni opartych na fuzji wynika m.in. stąd, że jednorazowo znajduje się w nich bardzo mała ilość paliwa termojądrowego. Eliminuje to możliwość powstania procesów prowadzących do katastrof. Podczas procesu syntezy uwalniane są wprawdzie neutrony, które mogą powodować aktywację materiałów użytych do budowy reaktora. Nie jest to jednak problem tego samego rzędu, co kłopoty z odpadami promieniotwórczymi.

czymi w elektrowniach opartych na rozszczepieniu i można go zminimalizować poprzez właściwy dobór materiałów do budowy reaktora termojądrowego.

### Podstawy

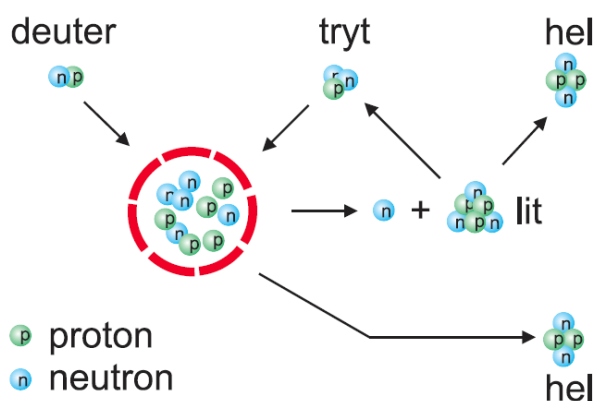
W procesie fuzji dwa lżejsze jądra atomowe „zlewają się” w jedno cięższe jądro atomowe. Okazuje się przy tym, że końcowa masa utworzonego cięższego jądra jest mniejsza niż suma mas lżejszych jąder przed reakcją. Ten „defekt masy” (różnica masy końcowej i sumy mas początkowych) odpowiedzialny jest za „powstawanie” energii w procesie fuzji termojądrowej. Następuje „zamiana masy na energię”. Mówiąc dokładniej, defektowi masy  $m$  odpowiada uwolnienie energii  $E$  w ilości opisanej sławnym wzorem Einsteina  $E = mc^2$ , gdzie  $c$  jest prędkością światła w próżni. Ze względu na olbrzymią wartość  $c$  równą  $3 \cdot 10^8$  m/s nawet małe defekty masy prowadzą do uzyskania dużych ilości energii. Defekt masy wynika z uwzględnienia energii wiązania (ang. *binding energy*) lżejszych jąder w nowo utworzonym cięższym jądrze. Zależność energii wiązania od liczby nukleonów (protonów lub neutronów) w jądrze przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Energia wiązania nukleonu w różnych jądrach atomowych. Na osi pionowej podano energię wiązania nukleonu; na osi poziomej liczbę nukleonów w jądrze

Najbardziej wydajną reakcją jest reakcja pomiędzy deuterem D (1 proton i 1 neutron) oraz trytem T (1 proton i 2 neutrony) – dwoma izotopami wodoru (1 proton) (patrz rys. 2). Zasadniczym produktem reakcji jest jądro helu. Oprócz niego powstają również neutrony oraz duże ilości uwolnionej energii. Jeden gram paliwa trytowo-deuterowego w elektrowni termojądrowej mógłby dostarczyć 90 tysięcy kilowatogodzin energii – odpowiada to spaleniu 11 ton węgla w klasycznej elektrowni. Paliwo dla fuzji jest tanie i jednorodnie rozmieszczone

na Ziemi. Woda morska zawiera deuter w praktycznie niewyczerpalnych ilościach. Tryt, który jest radioaktywnym gazem o krótkim czasie połowicznego rozpadu – 12,3 roku, nie występuje w naturze na Ziemi. Może jednak być wytwarzany w elektrowni fuzyjnej z litu, który obficie występuje na Ziemi w ilościach wystarczających dla zapewnienia pracy elektrowni na setki lat. Innymi możliwościami rozpatrywanymi do wykorzystania w elektrowniach opartych na syntezie termojądrowej są reakcje deuteru z deuterem D-D oraz deuteru z izotopem helu D- $^3\text{He}$ .



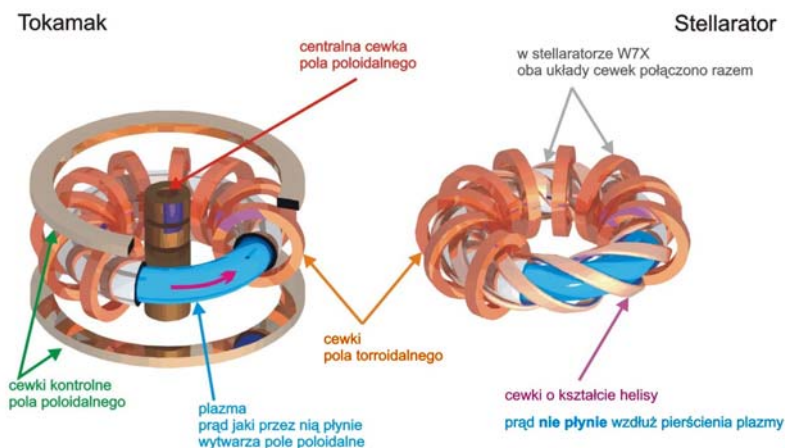
Rys. 2. Reakcja syntezy jądrowej deuteru z trytem

Większość energii uwolnionej w reakcjach fuzji unoszona jest przez szybkie neutrony, pozostała przez cząstki alfa (tzn. jądra helu  $^4\text{He}$ ). Płaszcz otaczający reaktor fuzyjny spowolnia neutrony, zamieniając ich energię na ciepło. Uzyskane ciepło może być użyte do generacji elektryczności w konwencjonalny sposób, np. w turbinie parowej. Fuzja (łączenie się jąder atomowych) może zajść tylko wówczas, gdy jądra znajdują się blisko siebie. Jądra atomowe mają jednak elektryczny ładunek dodatni i dlatego odpychają się siłami elektrycznymi. Konieczne jest więc podgrzanie gazowego paliwa do tak wysokiej temperatury, aby podczas zderzeń jądra miały wystarczającą energię kinetyczną, by przewyciężyć elektryczne odpychanie i zbliżyć się na odległość umożliwiającą łączenie się lżejszych jąder w cięższe. Podczas ogrzewania paliwa atomy gazu jonizują się, tzn. tracą elektrony otaczające jądra atomowe. Powstaje mieszanina dodatnio naładowanych jąder i ujemnie naładowanych elektronów zwana – dla odróżnienia od niezjonizowanego gazu – *plazmą*. Plazma, choć makroskopowo obojętna elektrycznie (ponieważ zawiera równe ilości ładunków dodatnich i ujemnych) zachowuje się bardzo odmiennie od zwykłego gazu. Plazma nazywana jest czasem czwartym stanem materii. To określenie pochodzi stąd, że jak wiadomo, wzrost temperatury powoduje przechodzenie substancji ze stanu stałego najpierw w ciecz, potem w gaz, a następnie w plazmę. Reakcje syntezy

termojądrowej zachodzą w plazmie. Plazmę charakteryzuje długozasięgowe elektryczne (tzw. kulombowskie) oddziaływanie tworzących ją cząstek, co jest przyczyną wielu zjawisk kolektywnych, niespotykanych w niezjonizowanym gazie. Mimo, że w ziemskich warunkach plazma jest raczej wyjątkowym stanem materii (błyskawice, świetlówki, ekrany telewizorów plazmowych), to według niektórych szacunków aż 99% obserwowanej materii we Wszechświecie występuje w postaci plazmy (nie uwzględnia się w tych szacunkach tajemniczej „ciemnej materii” – dającej znać o swoim istnieniu tylko przez grawitację, ani jeszcze bardziej tajemniczej „ciemnej energii” – jak na razie potrzebnej tylko kosmologom). Zachowanie plazmy jest tak ciekawe, różnorodne, pełne „efektów nieliniowych”, czasem nieoczekiwane (zwłaszcza w obecności pól magnetycznych), że *fizyka plazmy* wyodrębniła się w samodzielny kierunek badań o znaczeniu zarówno utylitarnym, jak i podstawowym.

### **Magnetyczne uwięzienie plazmy**

Aby proces syntezy termojądrowej zachodził wystarczająco efektywnie, należy podgrzać plazmę do temperatury ponad 100 milionów stopni i utrzymywać ją w tym stanie na tyle długo, by znacząca liczba jąder izotopów wodoru uczestniczyła w reakcjach. Oczywiście w przypadku tak gorącej plazmy „naczynie” utrzymujące plazmę musi być dość nietypowe. Żadne materiały nie wytrzymałyby takiej temperatury, gdyż same zamieniłyby się w plazmę. Plazma jest jednak mieszaniną elektrycznie naładowanych cząstek, a takie cząstki podlegają wpływowi pola magnetycznego. Pole magnetyczne można zatem wykorzystać do kontrolowania i ograniczania plazmy. Naładowana cząstka porusza się po krzywej śrubowej nawijającej się wzdłuż kierunku linii pola magnetycznego. Aby więc utrzymać cząstki w ograniczonym obszarze przestrzeni linie pola magnetycznego muszą tworzyć zamknięte pętle. Pożądaną konfigurację pola magnetycznego można otrzymać zestawiając cewki wytwarzające pole magnetyczne w okrąg tak by utworzyły torus – powierzchnię podobną do nadmuchianej opony. Linie pola magnetycznego zamknięte są wewnątrz torusa. W takim prostym toroidalnym polu wiele cząstek jest jednak traconych na skutek występowania tzw. zjawiska dryfu (dodatkowej składowej prędkości cząstek prostopadłej do linii pola magnetycznego) spowodowanego gradientem i krzywizną pola. Rozwiązaniem kompensującym dryf cząstek jest zastosowanie dodatkowego tzw. poloidalnego pola magnetycznego. W tokamakach poloidalną składową pola generuje wzbudzany w plazmie przepływ prądu. W stellaratorach toroidalne i poloidalne pole uzyskuje się przez zastosowanie w specjalny sposób ukształtowanych cewek (ang. *helical coils*), rys. 3. W stellaratorach nie ma więc makroskopowego przepływu prądu elektrycznego w plazmie.



Rys. 3. Konfiguracje pola magnetycznego w tokamaku i stellaratorze

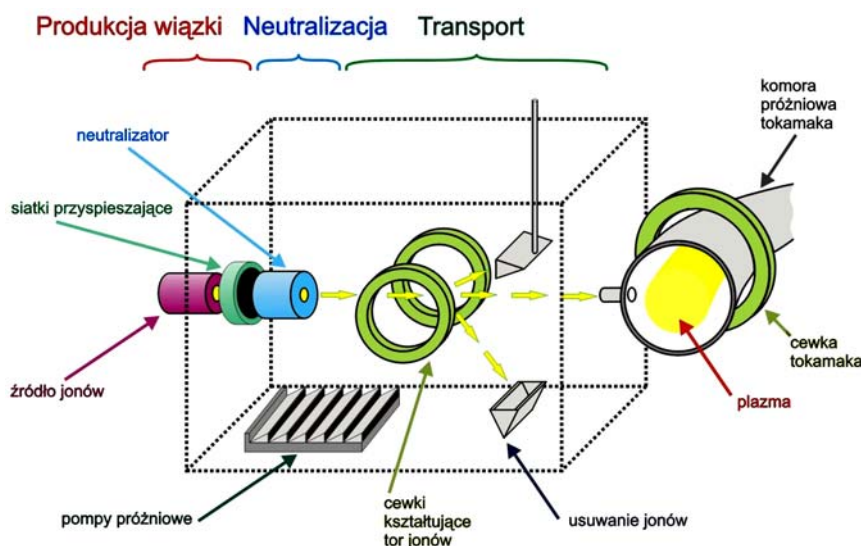
W obecnie realizowanych planach dotyczących rozwoju energetyki termojądrowej zdecydowano się na rozwiązania oparte głównie na tokamakach. Największym już istniejącym tokamakiem jest JET (ang. *Joint European Torus*). Większy promień jego komory plazmowej wynosi 2,96 m, mniejszy 1,25 m. Toroidalne pole magnetyczne ma wartość 3,5 T, a wzbudzany w plazmie prąd 7 MA. W tokamakach i stellaratorach mamy do czynienia z największym znanym nam gradientem temperatury we Wszechświecie. Od przeszło 100 milionów stopni w centralnej części komory do kilkuset stopni przy ściankach. Patrząc od centrum ku ścianom komory, do pierwszego kontaktu plazmy ze stałym materiałem dochodzi na tzw. limiterze (ang. *limiter* – ogranicznik). Limiter wykonany jest przeważnie z węgla. Musi on wytrzymać bombardowanie wysokoenergetycznymi cząstkami plazmy (jonów, neutronów, elektronów, a także promieniowania elektromagnetycznego). Wszystkie te czynniki rozgrzewają jego powierzchnię, niszczą ją (erodują), zanieczyszczając tym samym plazmę. W celu oczyszczenia plazmy stosuje się specjalną konfigurację pola magnetycznego zwaną dywertorem (ang. *divertor* – „odwracający kierunek”). W konfiguracji tej wewnętrzny obszar plazmy uwięziony jest przez pole magnetyczne, którego linie pola są zamknięte. Natomiast w obszarze zewnętrznym (bliższym ściankom) linie pola magnetycznego są otwarte. Granicę między tymi dwoma obszarami stanowi tzw. separatorysa (ang. *separatrix* utworzone od słowa *separate* – rozdzielać) – ostatnia powierzchnia utworzona z zamkniętych linii pola magnetycznego. Cząstki plazmy, przekraczające w wyniku dryfu separatoryse, kierowane są na tzw. płyty dywertora. Są one zazwyczaj odsunięte od plazmy dalej niż limiter. Plazma podczas podążania ku płytom – początkowo bardzo gorąca i o małej gęstości – wypromieniowuje część energii zanim osiągnie powierzchnię płyt dywertora. Dzięki temu ochładza się i zagęszcza. W ten sposób

minimalizowana jest energia przekazywana płytom dywertora, co w efekcie daje również mniejszą erozję płyt. Po neutralizacji cząstek plazmy na płytach dywertora powstały w ten sposób neutralny gaz oraz zanieczyszczenia zostają wypompowane z komory tokamaka.

### Grzanie plazmy

Niezbędnym warunkiem do przeprowadzenia syntezy jądrowej jest bardzo wysoka temperatura jonów. Wysoka temperatura oznacza dużą energię kinetyczną jonów. Energia ta musi być na tyle duża, aby podczas zderzeń jony znalazły się na tyle blisko siebie, by mimo wzajemnego elektrycznego odpychania mogło dojść do fuzji (gdy odległość między jonami jest mała, wzrasta prawdopodobieństwo połączenia jąder w wyniku tzw. efektu tunelowego).

Używa się kilku sposobów (technik) podgrzewania plazmy. Jedną z możliwości, typową w przypadku tokamaków, jest wykorzystanie prądów elektrycznych wytwarzanych w plazmie. Niedogodnością tej metody jest to, że opór elektryczny plazmy drastycznie spada w miarę jak plazma staje się coraz bardziej gorąca. Dlatego metoda ta ograniczona jest tylko do uzyskiwania temperatur rzędu 10 milionów stopni. Jest to jednak o rząd wielkości za mało, by uzyskać warunki odpowiednie dla fuzji. Inną możliwością jest użycie bardzo szybkich cząstek neutralnych, które zostają wstrzyknięte do plazmy. W plazmie cząstki te jonizują się i krążą setki razy dookoła torusa, spowalniane stopniowo w wyniku kolizji z cząstkami plazmy. Energia przekazana podczas tych kolizji rozgrzewa plazmę. Technika ta nazywa się z angielska NBI (ang. *Neutral Beam Injection*) i jest schematycznie przedstawiona na rys. 4.



Rys. 4. Grzanie plazmy techniką NBI

Trzecią metodą jest podgrzewanie plazmy za pomocą fal elektromagnetycznych. Fale elektromagnetyczne o pewnych dopasowanych częstościach są absorbowane przez cząstki plazmy, a przekazana im energia rozprawiana jest dalej wśród innych cząstek plazmy poprzez zderzenia. Warunkiem pochłaniania energii fali elektromagnetycznej przez cząstki plazmy jest zgodność częstości fali z częstością ruchu kołowego jonów i elektronów w polu magnetycznym. W tokamakach częstości ruchu kołowego jonów wynoszą od 10 do 100 MHz, a dużo niższych od nich elektronów od 60 do 150 GHz. Technikę tę określa się jako ECRH/ICRH (ang. *Electron / Ion Cyclotron Resonance Heating*).

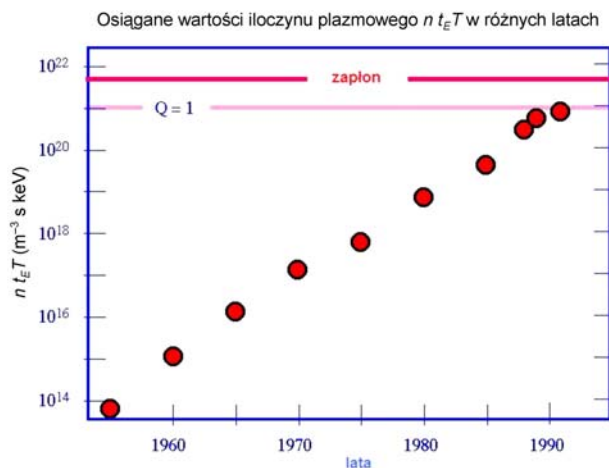
### Warunki zapłonu plazmy

Współczynnik wzmocnienia  $Q$  definiuje się jako stosunek mocy wytworzonej w wyniku reakcji termojądrowych do całkowitej mocy dostarczonej z zewnątrz do grzania plazmy. Dwie wartości parametru  $Q$  mają szczególnie istotne znaczenie w badaniach nad kontrolowaną reakcją termojądrową. Pierwsza z nich to  $Q = 1$  oznaczająca osiągnięcie progu użyteczności reaktora (po angielsku stan ten określa się jako *break even* – czyli stan zrównoważony). Druga z wartości, tzw. próg zapłonu (ang. *ignition*) zostanie osiągnięta wówczas, gdy zewnętrzne systemy grzania zostaną wyłączone i ciepło pochodzące wyłącznie od reakcji termojądrowych będzie wystarczające, by utrzymać wysoką temperaturę potrzebną do podtrzymywania reakcji. Odpowiada to nieskończonej wartości  $Q$ . Warunkiem koniecznym do zapłonu i utrzymania reakcji syntezy w plazmie jest spełnienie warunku Lawsona, który podaje, że iloczyn utworzony z trzech liczb: gęstości jonów w plazmie  $n$ , czasu uwięzienia plazmy  $t_E$  oraz temperatury jonów  $T$  musi przewyższyć wartość  $50 \times 10^{20}$  keV/m<sup>3</sup>. Warunek ten jest spełniony np. dla gęstości jonów rzędu  $2-3 \times 10^{19}$  m<sup>-3</sup>, czasu uwięzienia rzędu 1-2 s oraz temperatury jonów rzędu 20 keV (równoważnie około 200 milionów stopni). Każda z tych wartości z osobna została już osiągnięta eksperymentalnie. Niestety nie wszystkie jednocześnie. Dlatego ich iloczyn nie spełnił jeszcze kryterium Lawsona. W ciągu ostatnich 40 lat iloczyn  $n t_E T$  wzrósł jednak około 10 000 razy! Najbardziej zbliżono się do kryterium Lawsona w tokamaku JET wykorzystywanym w ramach projektu Unii Europejskiej. Iloczyn gęstości, czasu i temperatury był tylko o czynnik 5 mniejszy od kryterium Lawsona. Postęp, jaki osiągnięto w ciągu tych 40 lat, został przedstawiony na wykresie obrazującym zależność iloczynu  $n t_E T$  od czasu, rys. 5. Wartość iloczynu wzrosła już na tyle, że przekroczono próg użyteczności (współczynnik wzmocnienia  $Q = 1$ , tzn. moc wytworzona w reaktorze przekroczyła moc dostarczoną z zewnątrz).

W reakcji deuteru z trytem (D-T) powstają naładowane elektrycznie cząstki alfa o energii 3,5 MeV. Są one „uwięzione” przez pole magnetyczne w tokamaku. Te wysokoenergetyczne (szybkie) cząstki alfa poprzez kolizje z pozostałymi cząstkami plazmy dodatkowo rozgrzewają plazmę. Grzanie spowodowane cząstkami alfa prawdopodobnie umożliwi utrzymanie plazmy w stanie stacjo-



namym, gdy tylko próg zapłonu zostanie osiągnięty i zewnętrzne źródła energii zostaną odłączone.



Rys. 5. Ewolucja czasowa iloczynu  $n t_E T$

W reakcji D-T wraz z cząstkami alfa wytwarzane są również obojętne elektrycznie neutrony o energii 14,1 MeV. W przeciwieństwie do obdarzonych ładunkiem elektrycznym cząstek alfa neutrony natychmiast opuszczają komorę tokamaka, gdyż nie mogą być uwięzione w polu magnetycznym. Neutrony te nie są jednak tracone, ale w dwojaki sposób wykorzystywane w reaktorze. Po pierwsze, w reakcji z litem zawartym w osłonie reaktora wytwarzają tryt. Tryt ten (wraz z deuterem uzyskanym np. z wody morskiej) może być następnie użyty jako paliwo w reaktorze. Po drugie, spowalniane w osłonie reaktora neutrony oddają swą energię, wytwarzając ciepło, które jest następnie transportowane na zewnątrz reaktora poprzez odpowiednie systemy chłodzenia i może być wykorzystane do napędzania klasycznych turbin wytwarzających prąd elektryczny.

### Fuzja a środowisko

Dążenie do opanowania kontrolowanej syntezy termojądrowej nie wynika jedynie z przyczyn technologicznych i ekonomicznych. Przewidzenie energetyki z paliw kopalnych i obecnych elektrowni jądrowych na energetykę termojądrową może istotnie przyczynić się do złagodzenia zagrożeń dla naturalnego środowiska człowieka. Fuzja jest bowiem bardzo bezpiecznym i czystym źródłem energii. Sporo problemów związanych z wytwarzaniem energii termojądrowej musi zostać jeszcze rozstrzygnięte, zanim energetyka termojądrowa rozwinię się na skalę komercyjną.

W reakcjach termojądrowych oprócz cząstek alfa (czyli jąder helu) powstają również wysokoenergetyczne neutrony. Ściany komory zawierającej plazmę są stale bombardowane i penetrowane przez neutrony. Prowadzi to do mechanicznej degradacji wewnętrznych ścian tokamaka i do promieniotwórczej aktywacji materiału, z którego są wykonane. Aktywacja wynika z reakcji jąder atomów ściany (żelazo, chrom i inne) z neutronami. Neutrony są wylapywane tworząc radioaktywne izotopy. Dlatego materiały, z których tworzone są ściany komory reaktora muszą spełniać warunek, aby po reakcji z neutronami ich radioaktywność w czasie około stu lat spadła poniżej naturalnego promieniotwórczego tła. Wybór właściwych materiałów jest więc bardzo istotny. Uwzględniać należy również pewne specyficzne domieszki (zanieczyszczenia) w użytych materiałach. Zanik aktywności zależy bowiem bardzo silnie od zastosowanego składu. Na przykład srebro, występujące powszechnie jako domieszka w prawie wszystkich stalach nierdzewnych ma bardzo długi czas zaniku aktywności promieniotwórczej. Innym przykładem jest molibden, który wykazuje dość szybki spadek początkowej aktywności. Aktywność jego stabilizuje się jednak na wysokim poziomie i trwa około miliona lat. Bardzo szybkimi zanikami aktywności (około 100 lat) wykazują się natomiast takie materiały jak wanad, chrom i żelazo.

Projekty dotyczące reaktorów termojądrowych muszą przewidywać użycie materiałów, które charakteryzują się krótkimi czasami zaniku aktywności promieniotwórczej. Takie materiały są obecnie projektowane i badane. Wymagają one oczywiście testów przeprowadzanych z neutronami w warunkach symulujących środowisko reaktora, zanim będą użyte w realnym urządzeniu. Innym z bardzo wielu problemów do rozwiązania, zanim pierwszy prąd popłynie z elektrowni termojądrowej, jest np. efektywne wytwarzanie i odzyskiwanie trytu oraz użycie go jako paliwa w reaktorze. Pracy dla naukowców i inżynierów z pewnością nie zabraknie.

### **Współpraca międzynarodowa – projekt ITER**

Wysiłek całego środowiska zajmującego się fuzją termojądrową skupił się obecnie na międzynarodowym projekcie nazywanym w skrócie ITER, od angielskiej nazwy projektu *International Thermonuclear Experimental Reactor*. W ramach projektu ITER planowane jest wybudowanie największego tokamaka na świecie. Zadaniem ITERa jest „wykazanie naukowej i technicznej wykonalności pozyskiwania energii z fuzji dla celów pokojowych” (ang. *to demonstrate the scientific and technological feasibility of fusion energy for peaceful purposes*). W szczególności ma zostać osiągnięty próg zapłonu (spełnienie kryterium Lawsona) i utrzymanie „zapalanej” trytowo-deuterowej plazmy w stanie stacjonarnym. Przetestowane mają zostać materiały i technologie związane z budową przyszłej elektrowni termojądrowej (sam ITER elektrownią jeszcze nie będzie). ITER stanie się kolejnym wielkim krokiem na drodze do zbudowania takiej elektrowni; ma wytwarzać moc 500 MW. Początkowo będzie pracował impul-

sowo (czas nieprzerwanego działania ma wynosić około 10 minut), następnie planowane jest uzyskanie stacjonarnego stanu pracy reaktora. Gotowy projekt ITER jest już sam w sobie godnym uwagi osiągnięciem. Powstał on w wyniku intensywnej międzynarodowej współpracy naukowej. Projekt został zaaprobowany i zatwierdzony przez sygnatariuszy w czerwcu 2001 roku. 21 listopada 2006 r. w Paryżu zostało podpisane dalsze porozumienie dotyczące przedsięwzięcia ITER – budowy i eksploatacji eksperymentalnego reaktora termojądrowego kolejnej generacji. Udziałowcami tego projektu są: Unia Europejska, Japonia, Stany Zjednoczone, Rosja, Chiny, Indie i Korea Płd. Tych siedmiu partnerów zdecydowało, że ITER będzie budowany w Cadarache, małej miejscowości na południu Francji, w pobliżu Aix-en-Provence.

### **Fuzja w Europie**

Europejski program w zakresie kontrolowanej syntezy termojądrowej koordynowany jest przez Komisję Europejską pod auspicjami Europejskiej Wspólnoty do Spraw Energii Atomowej (ang. *European Atomic Energy Community* w skrócie EURATOM). Program realizowany jest przez różne laboratoria na mocy kontraktów asocjacyjnych. Celem programu jest współpraca w zakresie budowy prototypu bezpiecznego dla człowieka i środowiska reaktora termojądrowego. Obecnie realizowana w ramach programu strategia, to przejście w trzech etapach od dotychczas wykonywanych eksperymentów do budowy elektrowni termojądrowej: (1) skupienie się na najbardziej zaawansowanych systemach umożliwiających przeprowadzenie kontrolowanej syntezy termojądrowej – tokamakach; (2) działalność badawcza dotycząca rozwijania atrakcyjnych koncepcji mogących przyczynić się do ulepszeń tokamaka i jego pracy; (3) rozwijanie technologii potrzebnych do budowy przyszłej elektrowni termojądrowej. Prawie 2000 naukowców i inżynierów w 20 europejskich laboratoriach pracuje obecnie w ramach projektu EURATOM. JET – największy obecnie tokamak na świecie, znajdujący się w Culham (niedaleko Oxfordu) jest sztandarowym eksperymentem w programie EURATOM. Od 2000 roku JET zarządzany jest przez EFDA (ang. *European Fusion Development Agreement*). Naukowcy brytyjscy utrzymują urządzenie w gotowości do pracy i obsługują je, natomiast eksperymenty są planowane i wykonywane przez wizytujących JET naukowców z całej Europy.

Europa jest jednym z głównych partnerów uczestniczących w budowie przyszłego reaktora ITER. Szeroko zakrojony program i jego koordynacja w ramach EURATOM zapewniły Europie wiodące miejsce w zakresie badań nad kontrolowaną syntezą termojądrową. Od 2005 roku w projekcie EURATOM uczestniczy również Polska. Krajowy Punkt Kontaktowy EURATOM mieści się w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM) w Warszawie.