

Mgr Jacek KUCIŃSKI

Od przeszło trzydziestu lat trwa wydzieranie przyrodzie tajemnicy energii gwiazd. Samo zjawisko syntezy termojądrowej zostało już dość dobrze poznane, a nawet powtórzone w warunkach ziemskich, lecz, niestety, dodatni bilans energetyczny uzyskano jedynie w bombie termojądrowej.

Wykorzystanie reakcji syntezy do produkcji energii elektrycznej jest niezmiernie trudne. Gorąca plazma wytwarzana w urządzeniach laboratoryjnych staje się przy ogrzewaniu coraz bardziej niestabilna uciekając z coraz zmyślniej konstruowanych pułapek magnetycznych. Nie oznacza to jednak, że nie ma postępu w tej dziedzinie. W ubiegłym roku rozeszła się sensacyjna wiadomość, że w Lawrence Livermore National Laboratory (USA) osiągnięto wartość iloczynu gęstości i czasu utrzymania plazmy deuterowej (D-D) rzędu $2 \cdot 10^{20}$ s/m³, przy temperaturze około 10 mln K. Jest to wynik jedynie nieznacznie gorszy od osławionego „breakeven” (breakeven — z ang. przełamanie — oznacza wydzielenie się z plazmy energii większej niż potrzeba do jej wytworzenia i utrzymania). Lecz uzyskanie dodatniego bilansu energetycznego to jeszcze nie koniec problemów. Kolejny etap to opracowanie nowych technologii związanych z budową reaktora termojądrowego.

Podstawową zaletą reaktorów termojądrowych byłaby możliwość korzystania z praktycznie nieograniczonych zasobów paliwa. Opanowanie syntezy D-D pozwoliłoby na spalanie deuteru, stanowiącego około 0,016% wody morskiej. Biorąc pod uwagę masę wody zawartej w oceanach (10²¹ kg), fakt, że przy syntezie 1 kg deuteru wydziela się około 100 TJ energii (z 1 kg węgla zaledwie 7 kJ, a z uranu praktycznie 70 MJ) oraz przyjmując światowe zużycie energii elektrycznej równe 10 000 TWh/rok łatwo obliczyć, iż deuteru wystarczyłoby na 10 miliardów lat. Liczby tej nie zmienia istotnie uwzględnienie stałego wzrostu zapotrzebowania na energię ani współczynnika sprawności hipotetycznej elektrowni termojądrowej (około 10%). Gdyby wykorzystać warstwę wody do głębokości 1 m i tak zasoby deuteru wystarczyłyby na wiele milionów lat. Sprawa jest o tyle istotna, że światowe zasoby węgla, ropy naftowej oraz uranu mogą wystarczyć jeszcze na kilkadziesiąt do stu kilkudziesięciu lat. Ograniczenia energochłonności przemysłu i odkrywanie nowych złóż nie ratują sytuacji. Natomiast stosowanie reaktorów powielających paliwo jądrowe jest dość kosztowne i niebezpieczne (produkcja plutonu).

1 milion dżuli — 1 MJ jest to energia potrzebna do ogrzania około 3 litrów wody od temperatury pokojowej do temperatury wrzenia.

Jeden człowiek w kraju uprzemysłowionym potrzebuje średnio 1 kW energii elektrycznej. Aby produkować 1 kW przez jeden dzień, trzeba spalić około 10 kg węgla lub 6,6 kg ropy naftowej.

Temperatura zapłonu plazmy deuterowo-trytowej (D-T) jest prawie dziesięć razy niższa niż temperatura zapłonu plazmy deuterowej, dlatego od niej rozpocznie się prawdopodobnie komercyjne wykorzystanie syntezy termojądrowej. W tym przypadku problemem jest jednak produkcja dostatecznej ilości trytu. W stanie naturalnym kilka atomów trytu przypada na 10¹⁸ atomów wodoru, a koszt jego produkcji w reaktorze jądrowym sięga 20 mln dolarów za kilogram. Dodatkowym utrudnieniem jest silna aktywność trytu.

Najczęściej rozważane koncepcje reaktorów termojądrowych bazują na magnetycznym utrzymaniu plazmy (urządzenia typu tokamak) lub też na utrzymaniu bezwładnościowym (implozja laserowa).

W tokamakach plazma o gęstości 10²⁰—10²² cząstek/m³ i temperaturze około miliarda kelwinów (odpowiada to ciśnieniu 30—300 atmosfer) powinna być utrzymana przez kilka sekund. Wymaga to stosowania potężnych cewek nadprzewodzących działających w temperaturze ciekłego helu lub azotu.

W przypadku utrzymania bezwładnościowego mielibyśmy do czynienia z mikrowybuchami pastylek paliwa oświetlonych silnym światłem laserowym lub strumieniami cząstek naładowanych.

Pastyłka taka to, w najprostszej wersji, szklana kulka o średnicy kilku milimetrów wypełniona mieszaniną deuteru i trytu pod wysokim ciśnieniem. Krótki czas utrzymania plazmy w tym przypadku (około 100 ns) powoduje, że moce chwilowe dochodziłyby do 200 TW. Ogólne zasady odbioru energii są w obu typach reaktorów podobne. Komora paliwowa zawierająca gorącą plazmę otoczona jest grubym, wielowarstwowym płaszczem. Ma on izolować termicznie układ, powielać tryt i odbierać energię niesioną przez neutrony.

Elementem pracującym w najtrudniejszych warunkach byłaby pierwsza ścianka komory, narażona na działanie tzw. wiatru plazmowego (jony, neutrony, elektrony, promieniowanie X). Dla zabezpieczenia jej przed uszkodzeniem planuje się zwilżanie komory ciągłym strumieniem ciekłego litu, który byłby jednocześnie dodatkowym źródłem trytu (${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T} + 4,8 \text{ MeV}$).

Cały płaszcz, łącznie z nadprzewodzącymi magnesami, byłby narażony na wyjątkowo silny strumień neutronów. Jego wartość szacuje się na 10¹⁸ neutronów/m²s. Tak silne promieniowanie prowadzi do zmian mechanicznych materiału i uszkodzeń sieci krystalicznej, a nawet powoduje zmiany jego składu chemicznego. Wymaga to opracowania nowych stopów o nie spotykanych dotąd właściwościach.

Silna aktywność wzbudzona elementów reaktora może uniemożliwić przeprowadzenie remontów i napraw. Dlatego przyjmuje się, że reaktor powinien być zdolny do niezawodnej pracy przez 25—30 lat. Do wymiany elementów, które nie mają szans na tak długą pracę, przewiduje się użycie wyspecjalizowanych robotów. Po wyłączeniu reaktora zanik wzbudzonej aktywności będzie trwał około 100 lat.

Cały reaktor musi być otoczony dodatkową osłoną (tzw. osłoną biologiczną). Powinna ona wytrzymać trzęsienie ziemi, upadek nań samolotu etc. Symulacje wybuchu reaktora termojądrowego, łącznie ze zniszczeniem osłony biologicznej, wykazały, że także w tym przypadku byłby on mniej groźny dla ludności niż reaktor jądrowy. Tryt ma wprawdzie czas połowicznego rozpadu (T_f) równy 12 lat, ale półokres przebywania trytu w organizmie człowieka spada, po związaniu z tlenem, do $T_b = 12$ dni. Odpowiednie czasy dla izotopów emitowanych z reaktora jądrowego wynoszą przykładowo: dla jodu ${}^{131}\text{J} - T_f = 8$ dni i $T_b = 7,6$ dni, dla cesu ${}^{134}\text{Cs} - T_f = 840$ dni i $T_b = 65$ dni, a dla strontu ${}^{90}\text{Sr} - T_f = 10$ tys. dni i $T_b = 5700$ dni, aktywność zaś samego jodu jest milion razy większa niż aktywność trytu zgromadzonego w reaktorze jądrowym tej samej mocy.

Wykorzystanie reakcji D-T jest, jak wspomniano, jedynie pierwszym krokiem w rozwoju energetyki termojądrowej. Następnym krokiem powinno być opanowanie reakcji D-D zapewniającej pełną wystarczalność paliwową świata. Jednak najlepszym rozwiązaniem byłoby opanowanie reakcji D-³He, której produktami są jedynie cząstki naładowane. Pozwoliłoby to na rezygnację z drogiej i trudnych w wykonaniu płaszczy powielających paliwo i osłon biologicznych. Energia elektryczna mogłaby być odbierana, podobnie jak w generatorach MHD (magnetohydrodynamicznych), bezpośrednio z plazmy z wydajnością bliską 90%, a niewielkie promieniowanie emitowane z plazmy i mała aktywność wzbudzona umożliwiłyby konserwację i remonty reaktora w trakcie jego użytkowania. Na przeszkodzie stoi tylko niezwykle mała ilość ³He na Ziemi. Ostatnio pojawiła się jednak nadzieja na przewyżczenie tej bariery. Otóż, badając próbki skał księżycowych dostarczonych przez misję Apollo stwierdzono występowanie w nich bardzo dużych ilości ³He. Jeszcze większe zasoby odkryto w atmosferze Jowisza. Opracowano nawet operację mającą dostarczyć hel z Księżyca za pomocą statku kosmicznego typu Columbia oraz program „Daedalus” przewidujący przywiezienie helu z Jowisza za pomocą rakiety bezzałogowej. Oszacowano, że dostarczenie z powierzchni Księżyca 1 kg helu, łącznie z jego obróbką, wymaga wydatkowania około 2400 GJ energii, podczas gdy w reakcji syntezy wydzieliłoby się 650 tys. GJ.

Tymczasem pracujące obecnie w laboratoriach urządzenia termojądrowe różnymi drogami zbliżają się do „breakeven”. Pozwalają one także na przeprowadzenie wielu badań testujących, lecz nie dysponują dostatecznymi strumieniami neutronów i jonów, aby możliwe było badanie materiałów przeznaczonych do budowy pierwszej ścianki przyszłych reaktorów termojądrowych. Warunków takich nie zapewniają także akceleratory czy reaktory jądrowe. Badania te można by natomiast prowadzić za pomocą impulsowych układów plazmowych, znacznie tańszych i o znacznie mniejszych wymiarach, ale pozwalających uzyskiwać ekstremalne warunki na

niewielkich powierzchniach. Jest to szansa dla krajów mniej zamożnych, nie mogących pozwolić sobie na kosztowne eksperymenty. Inną szansą dla tych krajów jest wspólna budowa jednego, dużego układu. Takie właśnie rozwiązanie przyjęły kraje EWG, partycypując proporcjonalnie do swoich możliwości finansowych w budowie tokamaka JET. Następcą układu JET ma być tokamak NET (Next European Tokamak) o parametrach zbliżonych do przyszłych reaktorów termojądrowych, lecz nie mający płaszcza powielającego tryt. Na rok 2010 planuje się uruchomienie reaktora mocy zerowej DEMO.

Koło Matematyczne Liceum Ogólnokształcącego w Działdowie zamierza zorganizować w czasie wakacji letnich w 1988 roku

I WAKACYJNA SESJA MATEMATYCZNA

dla uczniów szkół średnich. W programie sesji znajdują się referaty przygotowane przez jej uczestników oraz zaproszonych gości. Przewiduje się udział delegacji szkół średnich w składzie: opiekun i 3 uczniów. Planowany czas trwania imprezy: 5 dni.

Zgłoszenia zainteresowanych szkół prosimy przesyłać w ciągu miesiąca od ukazania się niniejszego numeru „Delfy” na adres organizatorów:

Liceum Ogólnokształcące w Działdowie
Pracownia Matematyki

ul. Grunwaldzka 4, 19-200 Działdowo.

Szczegółowe informacje dotyczące przebiegu i kosztów imprezy organizatorzy prześlą bezpośrednio do zainteresowanych szkół.



Zadania

Redaguje dr Rafał SZTENCEL

W zadaniu M 492 mamy do czynienia z najprostszym procesem gałęzkowym, który może służyć za model wielu rzeczywistych procesów, między innymi jądrowej reakcji łańcuchowej. Przebieg procesu zależy w zasadniczy sposób od średniej liczby μ bezpośrednich potomków pojedynczej cząstki; mianowicie

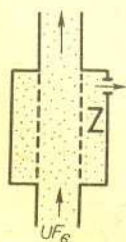
$$\mu = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot P(X_1 = k) = f'(1) \quad \text{oraz} \\ EX_n = \mu^n.$$

Ponadto dla $\mu \leq 1$ proces kończy się z prawdopodobieństwem 1, podczas gdy dla $\mu > 1$ prawdopodobieństwo q zakończenia procesu jest mniejsze od 1. Dowody powyższych faktów polecam jako kolejne (nie trudne) zadania.

W rzeczywistości reakcja łańcuchowa zaczyna się od wielu cząstek i prawdopodobieństwo zakończenia procesu jest bardzo małe, nawet gdy q jest bliskie 1. Liczba cząstek wzrasta w tempie wykładniczym, gdy $\mu > 1$, zatem w krótkim czasie reakcja obejmuje cały materiał rozszczepialny — i to jest właśnie eksplozja. Należy jednak zdać sobie sprawę, że taki model jest skrajnie uproszczony. Następnym stopniem komplikacji jest założenie, że czas życia cząstki jest zmienną losową. Można również osłabiać na rozmaite sposoby założenie o niezależności liczby potomków od historii procesu.

O innych zastosowaniach teorii procesów gałęzkowych można przeczytać w książce Williama Fellera *Wstęp do rachunku prawdopodobieństwa*.

R. S.



M 490. Funkcją tworzącą zmiennej losowej X przyjmującej wartości całkowite nieujemne nazywamy funkcję $f(s) = \sum_{k=0}^{\infty} s^k \cdot P(X = k)$ (funkcja f jest określona co najmniej na przedziale

$[-1, 1]$). Dane są niezależne zmienne losowe X, Y o funkcjach tworzących f, g . Znaleźć funkcję tworzącą zmiennej $X + Y$.

Rozwiązanie na str. 14

M 491. Dany jest ciąg niezależnych zmiennych losowych X_1, X_2, X_3, \dots o takiej samej funkcji tworzącej f oraz niezależna od powyższych zmienna losowa N o funkcji tworzącej u . Znaleźć funkcję tworzącą „losowej sumy” $X_1 + \dots + X_N$.

Rozwiązanie na str. 4

M 492. Rozpatrzmy populację cząstek, które po upływie czasu życia (jednakowego dla wszystkich) znikają wytwarzając nowe cząstki. Liczba „potomków” danej cząstki jest zmienną losową X , niezależną od liczby istniejących cząstek i od historii procesu. Niech f będzie funkcją tworzącą zmiennej X . Znaleźć funkcję tworzącą liczby potomków jednej cząstki w n -tym pokoleniu. Udowodnić, że prawdopodobieństwo q tego, że proces się zakończy, jest najmniejszym nieujemnym pierwiastkiem równania

$$s = f(s), \quad 0 \leq s \leq 1.$$

Rozwiązanie na str. 13

Redaguje dr Rafał STAROŃSKI

F 234. Naturalny uran jest mieszkanką dwóch izotopów o masach atomowych 235 i 238. Stosunek ich koncentracji wynosi $\alpha_0 = 0,007$. W celu zwiększenia koncentracji ^{235}U (do wartości wykorzystywanej w reaktorach) stosuje się przepływ gazowego sześćiofluorku uranu UF_6 przez małe otworki do próżni. Gaz przepuszczany jest przez rurę z porowatymi ściankami (rysunek). Po przejściu przez ściany rury gaz jest odpompowywany ze zbiornika Z. Oceń wzrost koncentracji ^{235}U w zbiorniku Z. Ile razy należy przepuścić UF_6 przez urządzenie z rysunku, aby stosunek koncentracji wzrósł do 0,05?

Rozwiązanie na str. 6

F 235. Istnieją metody wytwarzania w małych objętościach tak wysokich ciśnień, że liniowe rozmiary ciała stałego zmniejszają się 10 razy powodując m.in. wielki wzrost jego gęstości. (Można to uzyskać np. naświetlając małą próbkę uranu specjalnie zogniskowanym promieniem laserowym, co umożliwia dokonywanie mikrowybuchów jądrowych.) Ile razy krytyczna masa (i objętość) takiego supergęstego ciała jest mniejsza niż w warunkach normalnych? (Masa krytyczna jest to masa, przy której rozpoczyna się reakcja łańcuchowa rozszczepienia jąder powodowana przez pochłanianie neutronów przez jądra. W stanie krytycznym, tzn. wtedy, gdy rozpoczyna się reakcja łańcuchowa, liczba wtórnych neutronów powstających z rozszczepienia jest równa liczbie neutronów uciekających z próbki przez jej powierzchnię.)

Rozwiązanie na str. 4