

# O katalizie mionowej i reaktorze termojądrowym

Dr Stanisław MRÓWCZYŃSKI

**Rozwiązanie zadania F 244.** Jeśli pręt porusza się z prędkością  $v$ , to ciecz jako nieściśliwa powinna przepływać w kierunku przeciwnym między prętem a ściankami rury z prędkością  $u$  taką, że

$$\pi r^2 v = \pi (R^2 - r^2) u.$$

Otrzymujemy stąd

$$u = v \frac{r^2}{R^2 - r^2}.$$

Prędkość cieczy  $u$  przyjmujemy za jednakową wszędzie, z wyjątkiem niewielkich obszarów wokół końców pręta. Jednakże jeśli długość pręta  $l \gg r$ , to wkład tych obszarów do całkowitej energii układu możemy zaniedbać. Na podstawie prawa zachowania energii przy wznoszeniu pręta na wysokość  $h$  otrzymujemy

$$\rho_2 \pi r^2 l \frac{v^2}{2} + \rho_1 \pi (R^2 - r^2) l \frac{u^2}{2} = (\rho_1 - \rho_2) \pi r^2 l g h.$$

Z ostatnich dwóch równań otrzymujemy

$$v = \left[ \frac{2gh(1 - \rho_2/\rho_1)}{\rho_2/\rho_1 + r^2/(R^2 - r^2)} \right]^{1/2},$$

a stąd przyspieszenie

$$a = \frac{v^2}{2h} = g \frac{1 - \rho_2/\rho_1}{\rho_2/\rho_1 + r^2/(R^2 - r^2)}.$$

Jednym z najważniejszych problemów, przed którymi stoi nasza cywilizacja, jest problem nowych źródeł energii. Istnieją uzasadnione obawy, że tradycyjne źródła energii, takie jak ropa naftowa czy węgiel, ulegną szybkiemu wyczerpaniu, zanim jednak to nastąpi, dalszy rozwój energetyki wykorzystującej te źródła doprowadzi do dewastacji środowiska naturalnego. Również energetyka jądrowa, choć niezwykle efektywna, niesie ze sobą liczne zagrożenia. Duże nadzieje wiąże się z możliwością wykorzystania reakcji syntezy lekkich jąder atomowych do produkcji energii.

Synteza jądra atomowego z dwóch jąder lżejszych może nastąpić, gdy zbliżymy je na odległość, przy której zaczynają działać przyciągające siły jądrowe, to znaczy na odległość rzędu  $10^{-12}$  cm. Jądra atomowe mają jednak dodatnie ładunki elektryczne i odpychają się na odległościach przekraczających zasięg sił jądrowych. Wynika stąd, że mogą się połączyć tylko takie dwa jądra, które podczas zderzenia mają energię kinetyczną (w układzie ich środka masy) większą niż energia odpychania elektrostatycznego w odległości  $10^{-12}$  cm. Energia ta jest rzędu 0,1 MeV i aby uzyskać gaz tak szybkich jąder, należy podgrzać go do astronomicznej temperatury rzędu miliarda stopni — jak pamiętamy — temperatura gazu jest proporcjonalna do średniej energii kinetycznej cząstek. Jest to pierwsza poważna trudność przy budowie reaktora termojądrowego. Aby uzyskać energię w procesie syntezy, należy najpierw dostarczyć ogromną jej ilość potrzebną do podgrzania materii „paliwa”. Zwykle jest to mieszanina deuteru i trytu. Przy temperaturach, o których mowa, materia nie jest zbudowana z atomów, lecz tworzy tzw. plazmę — gaz jąder atomowych i elektronów powstałych przy jonizacji atomów. Druga trudność wiąże się z utrzymaniem plazmy, która po ogrzaniu zaczyna się rozprzestrzeniać na wszystkie strony i jądra nie mają dość czasu, by łączyć się w pary i wyzwalać energię. Zgodnie z tzw. kryterium Lawsona wyprodukowanie energii jest możliwe, gdy gęstość plazmy  $n$  i czas jej utrzymania  $\tau$  spełniają nierówność

$$n\tau \geq 3 \cdot 10^4 \text{ cząstek} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-3}$$

(dla procesu z wykorzystaniem deuteru i trytu).

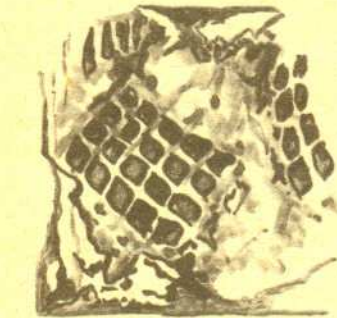
Jak widzieliśmy, trudności energetyki termojądrowej spowodowane są istnieniem ładunków elektrycznych jąder atomowych. Gdyby choć jedno z dwóch jąder, które chcemy połączyć, było elektrycznie neutralne, to siły elektryczne nie przeciwdziałałyby temu połączeniu i synteza mogłaby zająć bez żadnej dodatkowej energii. Wtedy nie byłoby żadnych problemów związanych z podgrzewaniem plazmy i jej utrzymaniem. Neutralne jądra nie istnieją, wiemy jednak, że jeśli cząstkę o jednostkowym ładunku ujemnym połączyć z cząstką o jednostkowym ładunku dodatnim, to całość będzie neutralna, tak jak atom wodoru zbudowany z dodatnio naładowanego protonu i ujemnego elektronu. Atomy nie nadają się jednak do naszych celów, gdyż ich promień jest rzędu  $10^{-8}$  cm, co oznacza, że bez przeciwdziałania sił elektrycznych atomy można zbliżyć do siebie tylko na odległość tego rzędu, nie zaś  $10^{-12}$  cm. Z mechaniki kwantowej, opisującej zjawiska w świecie atomowym, wiemy, że promień atomu jest odwrotnie proporcjonalny do masy elektronu, jeśliby więc elektron w atomie zamienić na cząstkę o takim samym, ujemnym ładunku, lecz dużo cięższą, to mielibyśmy „małe” atomy, które rozwiązałyby nasze energetyczne problemy.

Takie cząstki istnieją, nazywane są mionami (oznacza się je grecką literą  $\mu$ ), są 207 razy cięższe od elektronu, lecz w odróżnieniu od elektronów są niestabilne — rozpadają się po czasie rzędu  $10^{-6}$  sekundy od narodzin. Równie krótki jest żywot wspomnianych „małych” atomów mionowych, jednak szanse zbudowania reaktora z syntezą termojądrową „na zimno” wydają się całkiem realne, o czym opowiem poniżej.

Jak często w nauce bywa — wszystko zaczyna się od zagadkowego eksperymentu. Tak było i tutaj. Najpierw zaskakujące rezultaty doświadczeń, a później — piękna idea.

Počas badania cząstek elementarnych z użyciem tzw. komory pęcherzykowej, wypełnionej ciekłym wodorem, a służącej do rejestracji torów cząstek, zauważono dziwne zjawisko. Niektóre miony pochodzące z rozpadów innych cząstek elementarnych, zwanych pionami, podróżowały w komorze aż do zatrzymania, by następnie rozpocząć jeszcze jedną krótką podróż, tym razem ze ściśle ustaloną energią początkową, równą 5,4 MeV. Co powtórnie wprawiło miony w ruch? Kluczem do rozwiązania zagadki stała się obserwacja, że energia 5,4 MeV równa jest energii wydzielającej się przy połączeniu jądra wodoru, tzn. protonu (oznaczanego literą  $p$ ), z jądrem deuteru ( $D$ ) i utworzeniem jądra helu ( ${}^3\text{He}$ ). Teraz wszystko było jasne. Mion kończy swą pierwotną podróż w komorze wytworzeniem atomu mionowego, składającego się z protonu i mionu. Następnie powstaje molekula zbudowana z atomu deuteru i atomu mionowego ( $\mu D$ ). W wodorze istnieje bowiem zawsze pewna domieszka deuteru. Molekula kończy swój żywot w momencie zlania się protonu z jądrem deuteru w jądro helu. Wytworzoną nadwyżkę energii zabiera mion w postaci swej energii kinetycznej. Opisane zjawisko nazwano katalizą mionową reakcji jądrowych, gdyż tak, jak w przypadku katalizatorów znanych z reakcji chemicznych, mion inicjuje reakcję syntezy jąder, lecz sam nie podlega przemianom.

Odkrycie katalizy mionowej wzbudziło duże nadzieje związane z energetyką termojądrową. Rozpoczęto gruntowne badania, których rezultaty okazały się jednak mało zachęcające. Wyjaśniło się, że średnio tylko jeden mion na sześć inicjuje syntezę dwóch jąder deuteru w ciągu swego krótkiego życia. To zaś przekreślało energetyczne zastosowanie katalizy mionowej.



**Rozwiązanie zadania M 505.** Prawdopodobieństwo wygranej 4:0 wynosi  $p^4$ ; 4:1 —  $4p^3q$ ,  $q = 1 - p$  (ostatnia piłka wygrała, trzy pozostałe wygrała i jedną przegrała można rozmieścić na 4 sposoby); 4:2 —  $\binom{6}{2} p^4 q^2 = 10p^4 q^2$ . Jeśli żadna z wymienionych możliwości nie miała miejsca, to gra się „na przewagę”. Wtedy po 6 piłkach mamy wynik 3:3, następnie —  $n$  komunikatów „przewaga — równowaga” ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ), wreszcie — „przewaga — koniec”. Prawdopodobieństwo takiego zdarzenia wynosi

$$\binom{6}{n} p^3 q^3 (2pq)^n p^2;$$

$2pq$  bierze się stąd, że przewagę może mieć zarówno jeden, jak i drugi gracz. Sumując względem  $n$  otrzymujemy

$$p^2 q^3 \sum_{n=0}^{\infty} \binom{6}{n} (2pq)^n = \frac{1}{1 - 2pq}$$

Ostatecznie, szukane prawdopodobieństwo wynosi

$$p^2 q^3 \frac{1}{1 - 2pq}$$

$$= \frac{p^2 q^3}{1 - 2pq}$$

$$= \frac{p^2 q^3}{1 - 2pq}$$

$$= \frac{p^2 q^3}{1 - 2pq}$$



Rozwiązanie zadania F 245. Zmiana pędu wybranego elementu objętości cieczy w ciągu krótkiej chwili czasu  $\Delta t$  wynosi:

$$\rho S_2 v_2 \Delta t v_2 - \rho S_1 v_1 \Delta t v_1 = (S_1 p_1 - S_2 p_2 - F) \Delta t,$$

gdzie np.  $\rho S_1 v_1 \Delta t$  jest masą cieczy przechodzącej przez  $S_1$  w ciągu czasu  $\Delta t$ ;  $F$  to wartość siły, z jaką rura działa na ciecz (i ciecz na rurę).  
Mamy więc

$$F = S_1 p_1 - S_2 p_2 + \rho S_1 v_1^2 \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right).$$

Z zasady zachowania energii wynika równość

$$(*) \quad \rho_1 S_1 v_1 \Delta t - \rho_2 S_2 v_2 \Delta t = \frac{\Delta m v_1^2}{2} - \frac{\Delta m v_2^2}{2} + \Delta Q.$$

Lewa część równania oznacza pracę sił ciśnienia wykonaną nad interesującym nas elementem objętości, prawa to suma zmiany energii kinetycznej oraz ilości ciepła wydzielającego się w czasie  $\Delta t$ . Dla nieściślej cieczy mamy ponadto

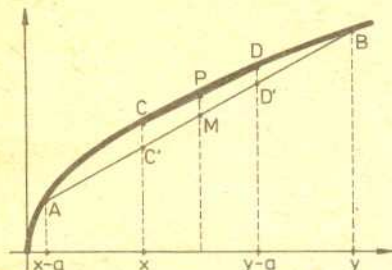
$$\Delta m = \rho S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = \rho S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t,$$

a stąd i z (\*)

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = S_1 v_1 \left[ (\rho_1 - \rho_2) + \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left( \frac{S_1^2}{S_2^2} - 1 \right) \right].$$



Rozwiązanie zadania M 507. Funkcja  $f(x) = x^p$  jest wklęsła, gdy  $0 < p < 1$  (ponieważ np.  $f'(x) = px^{p-1}$  jest nierosnąca).



Geometrycznie oznacza to, że odcinek łączący dwa punkty wykresu funkcji, leży pod jej wykresem. Przekształcamy nierówność do postaci

$$\frac{1}{2} (y^p + (x-a)^p) < \frac{1}{2} (x^p + (y-a)^p).$$

Jest ona równoważna temu, że punkt  $P$  na rysunku (środek odcinka  $CD$ ) leży nie niżej niż  $M$  (środek  $AB$ , a także  $C'D'$ ), co wynika stąd, że  $f$  jest wklęsła, zatem  $C$  leży nie niżej, niż  $C'$  (odpowiednio  $D$  — nie niżej niż  $D'$ ).

Rachunek jest bardzo prosty. Miony powstają z rozpadów pionów, których masa wynosi 140 MeV. Zgodnie z ogłoszoną przez teorię względności równoważnością masy i energii na wytworzenie sześciu pionów potrzeba co najmniej (w rzeczywistości dużo więcej)  $6 \times 140 \text{ MeV} = 840 \text{ MeV}$ . Z tych 840 MeV otrzymujemy w rezultacie syntezy deuteronów zaledwie kilka MeV. Bilans energii jest więc mocno ujemny, tzn. więcej energii należy włożyć niż można otrzymać. Z przytoczonych obliczeń wynika, że jeden mion w ciągu swego życia powinien inicjować średnio kilkaset reakcji syntezy, nie zaś jedną szóstą, aby proces mógł mieć zastosowanie w energetyce. W tym momencie wydawało się, że kataliza mionowa pozostanie ciekawostką bez żadnego praktycznego znaczenia.

Badania katalizy prowadzono jednak dalej w celu czysto naukowym. I gdy o możliwych zastosowaniach katalizy prawie zapomniano, nastąpił przełom. W jednym z eksperymentów, w którym wykorzystywano komorę dyfuzyjną zamiast pęcherzykowej, zauważono, że jeden mion inicjuje średnio dużo więcej niż 1/6 reakcji syntezy, co było w sprzeczności z rezultatami poprzednich doświadczeń. Początkowo uważano to za błąd eksperymentalny i doświadczenie wielokrotnie powtórzono. Gdy upewniono się, że o błędzie mowy być nie może, zaczęto porównywać eksperymenty i stwierdzono, że jedyna istotna różnica polegała na tym, iż temperatura deuteru w komorze dyfuzyjnej była o około 200 K wyższa niż w komorze pęcherzykowej. Ta różnica wydawała się jednak zupełnie bez znaczenia, gdyż 200 K to zmiana energii o  $10^{-2}$  eV, podczas gdy reakcje syntezy prowadzą do zmian rzędu  $10^6$  eV. Powstały jednak podejrzenia, że istotną rolę odgrywa poprzedzające syntezę formowanie się molekuly mionowej. Proces ten może silnie zależeć od temperatury, jeśli molekula ma tzw. poziom rezonansowy (o czym poniżej) o energii rzędu  $10^{-2}$  eV. Dla sprawdzenia tej hipotezy przeprowadzono eksperyment, w którym badano efektywność syntezy deuteru katalizowanej mionami w zależności od temperatury. Okazało się, że proces katalizy istotnie zależy od temperatury deuteru. W obszarze temperatur od  $-200^\circ\text{C}$  do  $+100^\circ\text{C}$  szybkość reakcji syntezy wzrosła dziesięciokrotnie. Teraz nie było już wątpliwości — molekula mionowa  $D\mu D$  ma poziom rezonansowy.

Co to są poziomy rezonansowe i dlaczego są tak istotne dla omawianego procesu? Oddziaływanie między cząstkami może prowadzić do powstania stanów związanych. Masa takiego stanu jest mniejsza od sumy mas składników, tzn. energia wiążąca składniki jest ujemna. Stany związane to atomy, molekuly, jądra atomowe itd. Pewne układy mogą jednak być w specyficznym krótkożyłowym stanie, zwanym rezonansowym lub wirtualnym, w którym energia wiązania jest dodatnia, lecz składniki trzymają się razem. Dodatniość energii sprawia, że składniki po pewnym czasie rozlatują się i energia wiązania zamienia się w ich energię kinetyczną.

Ze względu na zasady zachowania energii i pędu składniki nie mogą w zderzeniu utworzyć stanu związanego. Potrzebne jest trzecie ciało, które zabierze nadwyżkę energii, powstałą dzięki ujemnej energii wiązania stanu związanego. Tak na przykład molekula  $H_2$ , wiążąca dwa atomy wodoru, może powstać w gazie podczas jednoczesnego zderzenia się trzech atomów wodoru. Ponieważ prawdopodobieństwo takiego zderzenia jest małe, proces powstawania molekuli  $H_2$  jest powolny. Zupełnie inną sytuację stwarza stan rezonansowy. Może on powstać w zderzeniu dwóch cząstek, jeśli tylko całkowita energia tych cząstek w układzie ich środka masy jest równa energii stanu rezonansowego.

Wróćmy do problemu katalizy mionowej. Formowanie się molekuly mionowej  $D\mu D$  w stanie związanym wymaga co najmniej trzech ciał. Jest to proces powolny i słabo zależny od temperatury. Dla powstawania molekuly w stanie rezonansowym wystarczy dwa atomy, lecz ich energia musi odpowiadać energii stanu rezonansowego. Średnia energia atomów zależy od temperatury, a więc zmieniając temperaturę zmieniamy prawdopodobieństwo tego, że dwa zderzające się atomy będą miały energię potrzebną do powstania rezonansu. Stan rezonansowy, oczywiście, po krótkim czasie ulega rozpadowi, lecz jeśli czas ten jest dłuższy od czasu potrzebnego siłom jądrowym do połączenia jąder, to krótkożyłowość rezonansu nie ma znaczenia.

Teoretyczne obliczenia potwierdziły istnienie stanu rezonansowego molekuly  $D\mu D$  z energią rzędu  $10^{-2}$  eV, znaleziona zaś teoretycznie zależność efektywności katalizy od temperatury wspaniale zgadzała się z danymi doświadczalnymi. Dalej wyjaśniło się, że molekula  $T\mu D$ , gdzie  $T$  oznacza atom trytu, również ma stan rezonansowy o energii tego samego rzędu. Przewidywano, że mion w mieszaninie deuteru i trytu o właściwej temperaturze może inicjować około 100 reakcji  $T + D \rightarrow {}^4\text{He} + n$  ( $n$  oznacza neutron). Przeprowadzone wkrótce potem eksperymenty w pełni potwierdziły te przewidywania. Ponieważ w każdej reakcji wspomnianego typu wydziela się około 18 MeV energii, jeden mion może dostarczyć energię równą 1800 MeV. Jeśli energia potrzebna do wyprodukowania mionu będzie mniejsza, a — jak pamiętamy — minimalna energia wymagana do produkcji mionu wynosi zaledwie 140 MeV, to proces syntezy jąder deuteru i trytu katalizowany mionami może służyć energetyce.

W ostatnich latach zainteresowanie katalizą mionową niezwykle wzrosło i w wielu laboratoriach na świecie prowadzi się badania eksperymentalne i teoretyczne, które koncentrują się na znalezieniu optymalnych warunków pracy przyszłego reaktora „zimnej” syntezy. Najpoważniejszym problemem jest bardzo duża ilość energii potrzebna do produkcji jednego mionu. Przy użyciu współcześnie działających urządzeń jeden mion produkowany jest za cenę około 5000 MeV energii, co w porównaniu z energią 1800 MeV, jaką może uzyskać 1 mion, daje ujemny bilans energii. Wydaje się jednak, że straty energii przy produkcji mionu można istotnie zmniejszyć. Nikt przecież dotychczas nie zastanawiał się, jak zmniejszyć energochłonność produkcji cząstek elementarnych, które służyły celom wyłącznie naukowym. Poza tym istnieją również idee zwiększenia energii otrzymywanej z jednego mionu przez wykorzystywanie neutronów, uwalnianych w reakcjach syntezy, do rozbijania jąder uranu. Wówczas energia uzyskiwana z jednego mionu wzrasta do 14 000 MeV i bilans energii jest dodatni, mimo dużych strat energii przy produkcji mionów. Ta możliwość nie jest jednak zbyt atrakcyjna, gdyż prowadzi do szeregu problemów znanych z eksploatacji działających elektrowni jądrowych.