

Prof. dr Franciszek KACZMAREK

Otrzymywanie izotopów, a w szczególności izotopu uranu U235, jest jednym z fundamentalnych problemów fizyki i techniki jądrowej. Z roku na rok wzrasta zapotrzebowanie na wzbogacony uran; nawet kraje dysponujące sporymi zapasami paliwa tradycyjnego, jak na przykład Polska, przewidują wybudowanie w latach osiemdziesiątych elektrowni jądrowych. Ponadto izotopy znajdują interesujące zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, w praktycznej medycynie oraz w rozmaitych gałęziach gospodarki narodowej.

Typowy reaktor atomowy o mocy 1000 MW wymaga do jego „zapalenia” około 600 ton wzbogaconej rudy uranowej, a następnie zużywa jej około 200 ton rocznie. W stanie naturalnym zawartość poszukiwanego izotopu U235 wynosi zaledwie 0,75%; po wzbogaceniu rudy, co zwykle dokonuje się w wielkich instalacjach dyfuzyjnych, ruda zawiera około 3% izotopu U235.

W instalacjach tych wykorzystuje się różnicę szybkości dyfuzji izotopów U235 i U238 poprzez odpowiednie ścianki. Koszt wielkiej instalacji dyfuzyjnej, przetwarzającej 20 tys. ton rudy UF<sub>6</sub> (sześciopluorku uranu) rocznie wynosi około 2,8 miliarda dolarów, a elektrowni ją zasilającej — około 1,5 miliarda dolarów. W efekcie 1 gram uranu U235 kosztuje około 5 dolarów.

W reaktorach z ciężką wodą należy uwzględnić jeszcze niemały koszt ciężkiej wody (około 1 dolara za gram D<sub>2</sub>O). Liczby te pokazują skalę potrzeb i kosztów przy budowie siłowni jądrowych.

Jest zatem rzeczą nader oczywistą, że usilnie poszukuje się nowych, bardziej wydajnych i tańszych metod separacji izotopów. Już wiele lat temu zauważono, że światło może bardzo selektywnie wzbudzać i ewentualnie jonizować atomy określonego izotopu, znajdującego się w mieszaninie kilku innych izotopów tego samego pierwiastka. Praktyczna realizacja tej idei nie była jednak możliwa przed odkryciem laserów. Do selektywnego wzbudzenia atomów konieczna jest wiązka światła o ściśle określonej długości fali. Źródłami takich wiązek mogą być tylko lasery, a szczególnie — przestrajalny laser barwnikowy. Przymiotnik „przestrajalny” oznacza tu możliwość dowolnej (oczywiście w pewnych granicach, na ogół rzędu kilku dziesiątych  $\mu\text{m}$ ) zmiany długości fali promieniowania tego lasera.

Załóżmy, że jeden atom uranu U235 został zjonizowany światłem lasera, a następnie oddzielony od neutralnej reszty za pomocą pola elektrycznego lub magnetycznego. Energia jonizacji atomu uranu wynosi mniej niż 10 eV (dokładnie: 6,187 eV). Jeżeli dokonał tego foton z odpowiednio dobranej wiązki światła lasera, wówczas — biorąc pod uwagę stosunkowo niewielką wydajność całego urządzenia laserowego, wynoszącą zwykle  $10^{-3}$  — energia potrzebna do jonizacji światłem 1 atomu uranu wyniesie około  $10^4$  eV. W klasycznej metodzie dyfuzyjnej energia zużyta do otrzymania jednego atomu izotopu U235 wynosi 5 MeV, a więc jest około 500 razy większa. Z ekonomicznego punktu widzenia laserowa metoda separacji izotopów jest więc bardzo obiecująca.

Spośród wielu propozycji i praktycznie zrealizowanych już metod laserowej separacji izotopów, w tym artykule omówimy tylko jedną. Sądzę, że zobrazuje ona w pełni potencjalne możliwości laserów w tej dziedzinie. Będzie to dwustopniowa metoda fotojonizacji zilustrowana schematycznie na rys. 1.

Załóżmy, że mieszanina izotopów A i B (na przykład uranu) jest oświetlona wiązką światła lasera o tak precyzyjnie dobranej długości fali, albo inaczej — o takiej energii fotonu  $h\nu_1$ , że tylko atom izotopu A absorbuje energię promienistą i przechodzi w stan wzbudzony A\*. W tym przypadku różnica energii pomiędzy stanem wzbudzonym a stanem podstawowym równa się dokładnie  $h\nu_1$ . Proces selektywnego wzbudzenia izotopu A będzie możliwy tylko wtedy, gdy stany wzbudzone atomów A\* i B\* nie pokrywają się,

a więc gdy są przesunięte względem siebie wskutek efektu izotopowego. Symbolicznie poziomy energetyczne atomów lub molekuł oznacza się poziomymi liniami. W rzeczywistości każdy poziom energetyczny jest mniej lub bardziej „rozmyty” (poszerzony). Rozdział izotopów będzie więc możliwy, gdy szerokość poziomów A\* i B\* będzie mała, nie większa od różnicy energii wynikającej z efektu izotopowego. Efekt izotopowy wynika z różnicy mas jąder. Wpływa on na strukturę poziomów energetycznych. W ogólności efekt izotopowego przesunięcia poziomów energetycznych jest dość złożony i nie będziemy go tu omawiać. Jeżeli do wzbudzenia atomów izotopu A zastosujemy wiązkę lasera barwnikowego, wówczas długość fali jego promieniowania możemy dobrać z dokładnością do siódmego miejsca znaczącego. W przypadku mieszaniny U235 i U238 długość ta wynosiła 4,266325  $\mu\text{m}$ . W tym przypadku następuje selektywne wzbudzenie tylko atomów izotopu A; atomy izotopu B pozostają w stanie podstawowym. W procesie drugim, realizowanym jednocześnie z pierwszym, pomocnicza wiązka światła ultrafioletowego powoduje jonizację wzbudzonych atomów A\*. Otrzymane w ten sposób jony są następnie oddzielone od neutralnej reszty. Długość fali wiązki jonizującej wynosiła 3,609  $\mu\text{m}$  (dla mieszaniny izotopów uranu). Energia kwantów  $h\nu_2$  tej wiązki była oczywiście niewystarczająca do jonizacji niewzbudzonych atomów izotopu B.



### Rozwiązanie zadania M 135

Wśród czterech kolejnych liczb naturalnych istnieje jedna podzielna przez 2, ale nie przez 4. W rozkładzie na czynniki pierwsze zawiera ona 2 w potęgę pierwszej, co kończy dowód. Por. artykuł A. Rotkiewicza (zag. Catalana Delta 8/1975).



### Rozwiązanie zadania M 134

Rzeczywiście podzbiory  $\{n+1, 2n+4\}$  oraz  $\{2n+2, n+2\}$  mają żądaną własność, bowiem  $(n+1)(2n+4) = (2n+2)(n+2)$ . Zauważmy, że podana wartość  $H(n)$  nie zawsze jest najmniejsza spośród możliwych: na przykład  $H(5) < 7$  bo  $6 \cdot 12 = 8 \cdot 9$ . Znalazienie dobrych oszacowań liczby  $H(n)$  stanowi treść problemu postawionego w roku 1976 przez znanego matematyka węgierskiego, P. Erdősa.





Aby metoda wzbudzenia selektywnego była efektywna, powinny być spełnione następujące warunki:

1. Szybkość przekazywania energii od atomu wzbudzonego  $A^*$  do atomu niewzbudzonego B powinna być możliwie mała. Proces ten zilustrowano na rys. 1b. Warunek ten nie zawsze jest spełniony, zważywszy że poziomy  $A^*$  i  $B^*$  bardzo nieznacznie różnią się od siebie. W przypadku atomów lekkich przesunięcie izotopowe, mierzone w skali liczb falowych, jest rzędu  $1 \text{ cm}^{-1}$ ; w pierwiastkach ciężkich jest ono około 10 razy mniejsze. Jeżeli wzbudzony atom  $A^*$  w zderzeniu z niewzbudzonym atomem B przekazuje mu swoją energię, wówczas sam wróci do stanu podstawowego i nie zostanie zjonizowany pomocniczą wiązką światła. Proces „transferu” energii jest więc wyraźnie niekorzystny.

2. Proces relaksacji atomu wzbudzonego  $A^*$  do stanu podstawowego powinien być możliwie powolny, albo inaczej — czas życia atomu w stanie wzbudzonym powinien być możliwie długi. W przypadku izotopu  $U^{235}$  czas ten wynosi  $10^{-7} \text{ s}$ . Bez względu biorąc, jest to czas bardzo krótki; w skali atomowej — czas ten jest jednak stosunkowo długi. Stąd płynie praktyczny wniosek, aby do wzbudzenia mieszaniny izotopów stosować krótkie impulsy światła o czasie trwania rzędu kilkudziesięciu nanosekund. Lasery barwnikowe mogą wytwarzać tak krótkie impulsy światła; ich moc jest jednak wtedy niewielka. Zwykle stosuje się impulsy nieco dłuższe, o czasie trwania rzędu mikrosekund.

3. Absorpcja kwantów  $h\nu_1$  z wiązki wzbudzającej powinna być możliwie duża, co w języku fizyki oznacza, że przekrój czynny na absorpcję atomów izotopu A powinien być również możliwie duży. W przypadku  $U^{235}$  wynosi on około  $10^{-17} \text{ cm}^2$ . Jest to stosunkowo duży przekrój czynny; należy pamiętać, że odnosi się on tylko do jednego atomu.

Na rys. 2 zilustrowano schematycznie laserową metodę separacji izotopu  $U^{235}$ . Strumień atomów  $U^{235}$  i  $U^{238}$  wytwarza się w odpowiednim zasobniku próżniowym, przez podgrzanie metalicznego uranu w piecu wolframowym do temperatury 1800–2000 K, albo też strumień ten wytwarza się przez odparowanie uranu spowodowane bombardowaniem elektronami. Mieszanina izotopów jest następnie formowana za pomocą odpowiednich kolimatorów szczelinowych i wpada do komory, gdzie poddana jest działaniu dwóch strumieni świetlnych: wzbudzającego i jonizującego. Tutaj następuje selektywne wzbudzenie i jonizacja atomów  $U^{235}$ . Następnie pole elektryczne lub magnetyczne oddziela cząstki naładowane od neutralnych. W jednej z praktycznie zrealizowanych już metod separacji laserowej otrzymano 50% wzbogacenia mieszaniny w składnik  $U^{235}$ .

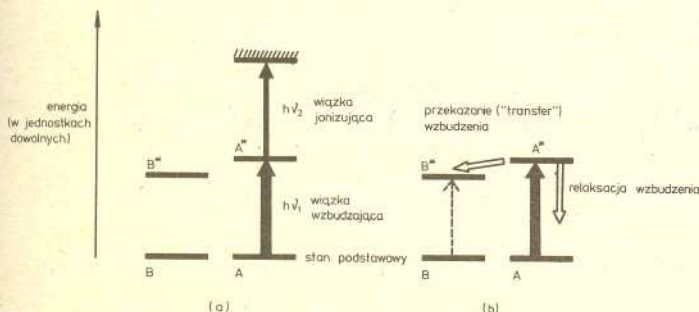
Aby metoda ta mogła znaleźć zastosowanie do otrzymania około 100 ton izotopu  $U^{235}$  w ciągu jednego roku, średnia moc wiązki lasera powinna być rzędu kilkunastu kW. Obecnie nie ma jeszcze tak silnych przestrajalnych laserów barwnikowych.

W opisaney wyżej metodzie separacji izotopów wykorzystano selektywne wzbudzenie stanów elektronowych atomu lub cząsteczki. Do tego celu konieczne było promieniowanie z obszaru widzialnego lub ultrafioletowego. Niedawno odkryto niezwykle wydajną selektywną dysocjację cząsteczek w polu promieniowania lasera podczerwonego (laser  $CO_2$ ,  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ). Proces ten jest bardzo efektywny, jeżeli pasmo pochłaniania energii promienistej związane z charakterystycznymi drganiami cząsteczki pokrywa się z długością fali linii lasera. A ponieważ drgania charakterystyczne cząsteczki zależą od masy jąder, cząsteczki zawierające różne izotopy będą miały nieco inne częstotliwości drgań (przesunięcie izotopowe). Obecnie można budować lasery na  $CO_2$  wielkiej mocy, promieniające energie rzędu setek dżuli w impulsach nanosekundowych. Taki laser oświetlający mieszaninę formaldehydu  $H_2CO$  i HDCO dał już 40-krotne wzbogacenie substancji w deuter.

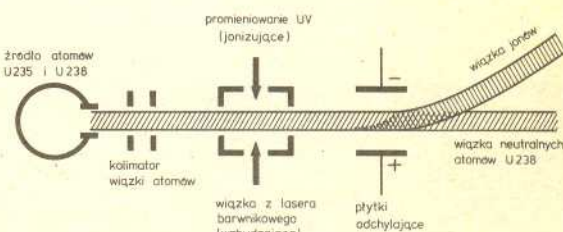
Lasery metody separacji różnych izotopów, zarówno lekkich jak i ciężkich, działają już w skali laboratoryjnej w kilku krajach świata, przede wszystkim w ZSRR i USA. Można spodziewać się, że zostaną zastosowane w skali przemysłowej w latach osiemdziesiątych.

#### Rozwiązanie zadania M 133

Niech długościami krawędzi prostopadłościanu będą liczby  $y-1, y, y+1$  ( $y \geq 2$ ),  $x$  zaś niech będzie długością krawędzi sześciangu. Gdyby było  $(y-1)y(y+1) = x^3$ , to mielibyśmy  $y^3 > y^3 - y = x^3 > y^3 - 3y^2 + 3y - 1 = (y-1)^3$  (gdyż  $3y^2 - 4y + 1 = (3y-1)(y-1) > 0$ ), a więc  $y > x > y-1$ , co jest niemożliwe (między dwiema liczbami naturalnymi różniącymi się o 1 nie ma żadnej liczby naturalnej). Rozumowanie to jest podobne do przeprowadzonego w rozwiązaniu zadania M122 (Delta 5/1977).



Rys. 1. Uproszczony schemat poziomów energetycznych izotopów A i B wybranego pierwiastka (a). Gwiazdka oznacza stan wzbudzony. W części (b) rysunku objaśniono mechanizm utraty energii izotopu wzbudzonego wskutek przekazania jej izotopowi niewzbudzonemu, B, lub też relaksacji do stanu podstawowego.



Rys. 2. Schemat ideowy metody laserowej separacji izotopów. Źródłem atomów  $U^{235}$  i  $U^{238}$  jest metaliczny uran podgrzany w piecu wolframowym do temperatury 1800–2000 K lub też rozpylony silnym bombardowaniem elektronów.