

# Gdzie kończy się Tablica Mendelejewa?

Robert SMOLAŃCZUK

Pod koniec 1994 roku w ośrodku badawczym GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) w Darmstademie w Niemczech międzynarodowy zespół fizyków wytworzył ciężkie pierwiastki o liczbach atomowych  $Z = 110$  i  $Z = 111$ . Pierwiastek o liczbie atomowej  $Z = 112$  wyprodukowano w tym samym ośrodku na początku 1996 roku. Układ okresowy pierwiastków chemicznych, nazywany często Tablicą Mendelejewa, wzbogacił się więc o trzy nowe pierwiastki. Nie mają one jeszcze powszechnie uznawanych nazw własnych, są więc oznaczane przez liczby 110, 111 i 112, które są największymi liczbami atomowymi zaobserwowanymi dotychczas.

Znane obecnie pierwiastki Rf (rutherford,  $Z = 104$ ), Db (dubna, 105), Sg (seaborg, 106), Bh (bohr, 107), Hs (has, 108), Mt (meitner, 109), 110, 111 i 112, jak również pierwiastki o liczbach atomowych  $Z > 112$ , które planuje się wytworzyć w laboratoriach naukowych, nazywane są pierwiastkami superciężkimi. Izotopy każdego z tych pierwiastków, czyli ich jądra atomowe różniące się liczbą neutronów, nazywane są jądrami superciężkimi. Wszystkie znane jądra superciężkie powstały w reakcjach syntezy (złączenia) dwóch lżejszych jąder atomowych, w których bombardowano zjonizowanymi atomami-pociskami tarcze wykonane z bardzo cienkiej warstwy atomów innego pierwiastka.

Synteza pierwiastków 110, 111 i 112 poprzedzona była syntezą pierwiastków Bh, Mt i Hs dokonaną w pierwszej połowie lat osiemdziesiątych również w GSI w Darmstademie. Zostały one wyprodukowane w układzie doświadczalnym składającym się ze źródła jonów, akceleratora, tarczy, układu selekcyjnego oraz układu detekcyjnego. Źródło jonów dostarcza zjonizowanych atomów-pocisków, które następnie są przyspieszane w akceleratorze do energii umożliwiającej zajście reakcji jądrowej podczas zderzenia wiązki pocisków z tarczą. Tarcza musi być dostatecznie cienka (grubość rzędu  $0,5 \text{ mg/cm}^2$ ), aby produkt syntezy nie ugrzązał w niej. W celu zapobieżenia zbyt szybkemu przepaleniu tarczy przez wiązkę używa się kilku tarcz umieszczonych na kole wirującym w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku padania wiązki. Wirowanie zapewnia równomierne naświetlanie tarczy i umożliwia wypromieniowanie ciepła między kolejnymi naświetleniami, a więc chłodzenie tarczy. W układzie selekcyjnym, znajdującym się za tarczą, powstałe w wyniku bombardowania tarczy pożądane nieliczne produkty syntezy oddzielane są od tła zawierającego niepożądane produkty reakcji i bardzo liczne atomy-pociski, które przeszły przez cienką tarczę nie wchodząc w reakcję z jej atomami. Układ selekcyjny nazywany jest często filtrem prędkościowym, ponieważ oddziela zjonizowane produkty syntezy i atomy tła za pomocą kombinacji pól magnetycznych i elektrycznych wykorzystując fakt, że ciężkie produkty syntezy mają znacznie mniejszą prędkość od atomów tła. Dzieje się tak dlatego, że w przypadku syntezy względnie lekki pocisk musi podzielić się swą energią kinetyczną ze znacznie cięższym i początkowo nieruchomym jądrem tarczy (ściśle mówiąc – nieruchomym w kierunku padania wiązki), z którym łączy się w jedno jądro przemieszczające się w kierunku układu detekcyjnego. Układ detekcyjny umożliwia zarejestrowanie i zidentyfikowanie produktów syntezy. Jego głównym elementem jest detektor krzemowy, w którym zatrzymują się zsyntetyzowane jądra. Układ detekcyjny mierzy chwilę implantacji oraz położenie i energię kinetyczną zsyntetyzowanego jądra, a także chwilę rozpadu oraz położenie i energię kinetyczną produktów rozpadu zsyntetyzowanego jądra i jąder, które powstają w wyniku kolejnych rozpadów. Zsyntetyzowane w GSI izotopy pierwiastków Bh, Hs, Mt, 110, 111 i 112 rozpadają się przez emisję cząstki  $\alpha$ . Rozpad ten zapoczątkowuje łańcuch kolejnych rozpadów  $\alpha$ . Czas, upływający między implantacją a pierwszym rozpadem, jest czasem, jaki przeżyło

Rozróżniamy dwa rodzaje jąder atomowych: jądra trwałe oraz takie, które ulegają rozpadowi zmieniającym ich skład, czyli prowadzącym do innych już jąder. Rozpad może zaistnieć tylko wtedy, gdy jest to korzystne energetycznie. Innymi słowy, warunkiem koniecznym każdego rozpadu jest, aby suma mas wszystkich produktów rozpadu była mniejsza od masy układu wyjściowego.

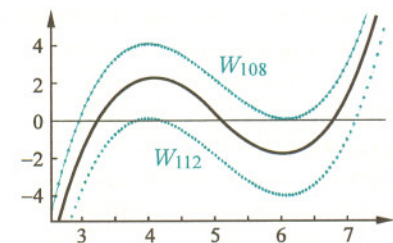
Dla jąder najcięższych najważniejszymi rozpadami są: rozpad  $\alpha$  i samorzutne rozszczepienie. Rozpadem  $\alpha$  nazywamy wyrzucenie z jądra cząstki  $\alpha$ , tj. jądra helu  ${}^4\text{He}_2$ . Rozszczepienie jądra atomowego polega natomiast na podziale jądra na części (fragmenty) o porównywalnej wielkości.

Wielkością fizyczną charakteryzującą szybkość rozpadu jest czas (okres) połowicznego zaniku  $T_{1/2}$ . Jest to czas, w którym liczba jąder, w wyniku rozpadu, maleje do połowy.



#### Rozwiązanie zadania M 840.

Jeśli  $a, b, c$  spełniają nasz układ równań, to są one (wobec wzorów Viète'a) pierwiastkami wielomianu  $W_r(x) = x^3 - 15x^2 + 72x - r$  dla pewnego  $r \in \mathbb{R}$ . Obliczając pochodną stwierdzamy, że  $W_r$  ma maksimum w  $x = 4$  i minimum w  $x = 6$ , jest rosnący na  $(-\infty, 4] \cup [6, \infty)$  i malejący na  $[4, 6]$ . Wielomian  $W_r$  ma 3 pierwiastki wtedy i tylko wtedy, gdy  $r \in [108, 112]$ , przy czym można sprawdzić, że  $W_{108}$  ma pierwiastki 3, 6, 6, a  $W_{112}$  ma pierwiastki 4, 4, 7. Dla  $r \in (108, 112)$  pierwiastki są różne, po jednym w każdym z przedziałów (3, 4), (4, 6), (6, 7). W dodatku każdy punkt każdego z tych trzech przedziałów jest pierwiastkiem pewnego wielomianu  $W_r$  (bowiem wykres  $W_r$  powstaje z przesuwania wykresu  $W_{108}$ ).

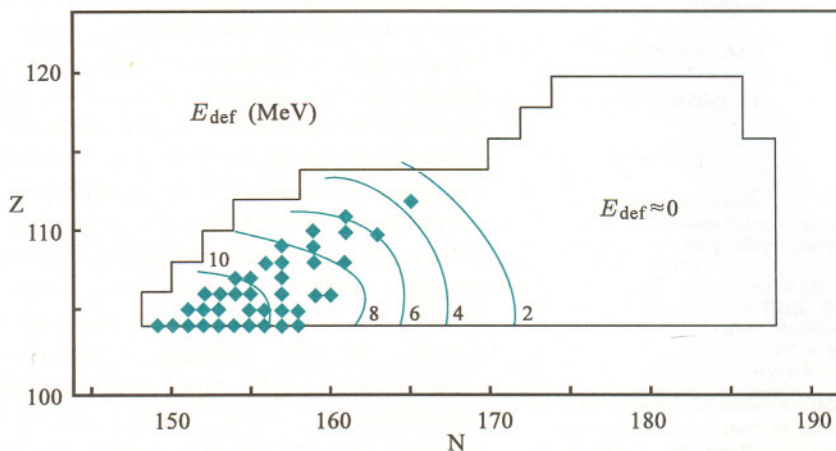


Wynika z tego, ostatecznie, że  $A = [3, 7]$ .

zsyntetyzowane jądro z dokładnością do czasu przelotu zsyntetyzowanego jądra od tarczy do detektora. Najkrócej żyjącym jądrem superciężkim, jakie może być zaobserwowane po jego zsyntetyzowaniu we współczesnych eksperymentach, jest zatem jądro przeżywające tylko czas przelotu od tarczy do detektora, wynoszący około 1  $\mu$ s. Różnica czasu między kolejnymi rozpadami jest czasem, jaki przeżyło dane jądro w łańcuchu. Znajomość przynajmniej jednego jądra (jego własności fizycznych) pozwala zidentyfikować wszystkie jądra w łańcuchu.

Z analizy systematycznego zmniejszania się prawdopodobieństw zajścia reakcji syntezy zmierzonych dla pierwiastków Rf, Db, Sb, Bh, Hs i Mt wynikało, że wytworzenie i zaobserwowanie pierwiastka 110 będzie wymagało podniesienia efektywności układu doświadczalnego około dziesięciokrotnie w stosunku do efektywności, przy której został zaobserwowany pierwiastek Hs w roku 1984. W ciągu 10 lat dokonano istotnych ulepszeń układu doświadczalnego, które pozwoliły podjąć udaną próbę syntezy nie tylko pierwiastka 110, lecz także pierwiastków 111 i 112. Dzięki tym usprawnieniom zaobserwowano cztery jądra  $^{269}110_{159}$  w ciągu 12 dni bombardowania tarczy  $^{208}\text{Pb}_{126}$  jonami  $^{62}\text{Ni}_{34}$  przyspieszonymi do energii 311 MeV. Natężenie wiązki pocisków wynosiło  $3 \cdot 10^{12}$  jonów/s. Użycie jako pocisku atomu niklu bogatszego o dwa neutrony zaowocowało wzrostem prawdopodobieństwa zajścia reakcji syntezy. W ciągu 3,5-dniowego bombardowania tarczy ołowiowej jonami  $^{64}\text{Ni}_{36}$  o energii 313 MeV zaobserwowano sześć przypadków syntezy jądra  $^{271}110_{161}$ . Syntezę jądra  $^{271}110_{161}$  przeprowadzano także przy nieco innych energiach pocisków. W sumie zarejestrowano dziewięć przypadków syntezy jądra  $^{271}110_{161}$ . W GSI zaobserwowano ponadto trzy jądra  $^{272}111_{161}$  i dwa jądra  $^{277}112_{165}$ . Zsyntetyzowane jądra  $^{269}110_{159}$ ,  $^{271}110_{161}$ ,  $^{272}111_{161}$  i  $^{277}112_{165}$  rozpadły się przez emisję cząstki  $\alpha$  po czasie rzędu 0,1–1 ms.

Wszystkie wytworzone dotychczas jądra superciężkie są zaznaczone na rysunku 1 kwadracikami. Na osi poziomej odłożona jest liczba neutronów  $N$ , a na pionowej liczba protonów  $Z$  w jądrze atomowym. Rysunek ten przedstawia także teoretyczne wartości energii deformacji dla parzysto-parzystych (parzyste zarówno  $Z$ , jak i  $N$ ) jąder superciężkich już znanych, jak również tych jeszcze nie odkrytych. Energia deformacji to wartość, o jaką obniża się energia jądra dzięki temu, że przyjmuje ono kształt zdeformowany zamiast kulistego. Energia ta wyrażona jest w megaelektronowoltach (MeV). Jej wartości liczbowe są podane przy poziomicach.



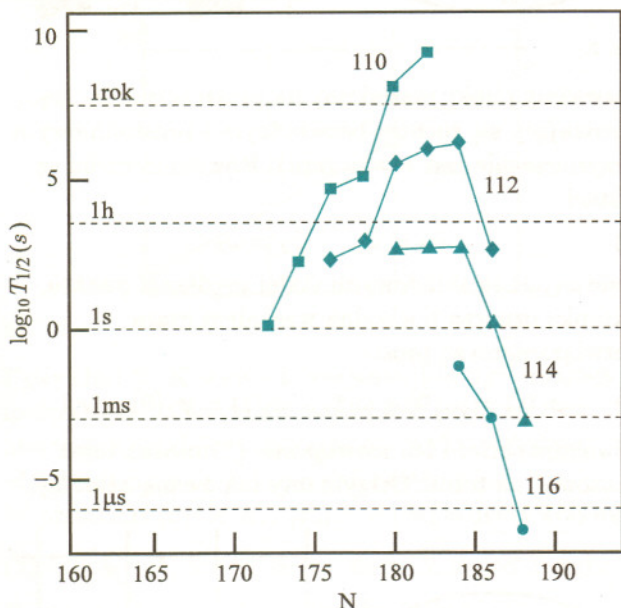
Rys. 1

Jądra atomowe klasyfikujemy jako dobrze zdeformowane ( $E_{\text{def}} \gtrsim 2$  MeV), przejściowe ( $E_{\text{def}} \lesssim 2$  MeV) lub kuliste ( $E_{\text{def}} \approx 0$ ). Z rysunku 1 wynika, że wszystkie zsyntetyzowane dotychczas jądra superciężkie są dobrze zdeformowane. Niestety, nie mamy na razie eksperymentalnego rozstrzygnięcia, czy jądra te są zdeformowane, czy nie. Z rysunku 1 wynika również, że najcięższe z wyprodukowanych dotychczas jąder,  $^{277}112_{165}$ , leży bardzo blisko obszaru hipotetycznych kulistych jąder superciężkich ( $E_{\text{def}} \approx 0$ ), które

zbudowane są z większej liczby neutronów w porównaniu ze zdeformowanymi jądrami superciężkimi.

Jądra atomowe mogą rozpaść się również poprzez rozpad  $\beta^-$  polegający na emisji elektronu prowadzącej do przemiany danego jądra  ${}^A_Z N$  w jądro  ${}^A_{(Z+1)}(N-1)$ . Możliwa jest też przemiana  $\beta^+$  (emisja pozytonu) lub wychwyt jednego z elektronów otaczających jądro (WE). Oba te procesy skutkują powstaniem jądra  ${}^A_{(Z-1)}(N+1)$ . Znaczna liczba jąder atomowych nie ulega żadnej z przemian  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  oraz WE. Są to tzw. jądra  $\beta$ -stabilne.

Obliczone czasy połowicznego zaniku  $T_{1/2}$  dla wielu kulistych jąder superciężkich, pokazane na rysunku 2, są dostatecznie duże, aby jądra te mogły być gromadzone i przechowywane przez dłuższy czas, gdyby udało się je zsyntetyzować. Na przykład, czas połowicznego zaniku, obliczony dla  $\beta$ -stabilnego jądra  ${}^{292}_{110}_{182}$ , wynosi 51 lat. Czasy połowicznego zaniku przewidywane dla wielu kulistych izotopów pierwiastków superciężkich, poczynając od Rf, a kończąc na pierwiastku 115, są większe niż 1 sekunda. Umożliwia to badanie własności chemicznych tych pierwiastków, gdyby ich kuliste izotopy zostały zsyntetyzowane. Synteza kulistych izotopów tych pierwiastków otworzyłaby szerokie pole badań dla chemii i fizyki atomowej.



Rys. 2

Pamiętać jednak należy, że do obliczenia czasów połowicznego zaniku zastosowany został względnie prosty model opisujący rozpad  $\alpha$ . Rozpad ten jest przewidywany jako dominujący dla jąder superciężkich. Użyty model może nie uwzględniać pewnych efektów w dostatecznym stopniu. Może to oznaczać, że kuliste jądra superciężkie są nieco bardziej stabilne w stosunku do przewidywań teoretycznych przedstawionych na rysunku 2.

Wiele zdeformowanych jąder superciężkich udało się wytworzyć w warunkach laboratoryjnych (patrz rys. 1). W niezbyt odległej przyszłości zostaną podjęte próby syntezy kulistych jąder superciężkich. Jądra te cechują się większą liczbą neutronów w porównaniu ze zdeformowanymi jądrami superciężkimi. Do ich syntezy potrzebne są więc pociski o dużej liczbie neutronów, która nie mogła być osiągnięta przy dotychczas stosowanych stabilnych pociskach. Dlatego duże nadzieje na syntezę kulistych jąder superciężkich wiązane są z opanowaniem techniki neutrononadmiarowych wiązek radioaktywnych.

Przewidywany obszar kulistych jąder superciężkich jest nieco większy od przedstawionego na rysunku 1, gdyż ten ostatni ogranicza się tylko do jąder parzysto-parzystych. Jak wiemy z obserwacji lżejszych jąder, jądro bogatsze o jeden proton bądź proton i neutron od danego jądra parzysto-parzystego ma czas połowicznego zaniku porównywalny, a czasem istotnie większy, od czasu połowicznego zaniku danego jądra parzysto-parzystego. Dzięki tej prawidłowości pierwiastek 121 być może zamknie Tablicę Mendelejewa. Przynajmniej na razie jest prawdopodobnie najcięższym pierwiastkiem, możliwym do zsyntetyzowania po opanowaniu techniki neutrononadmiarowych wiązek radioaktywnych. Rozszerzenie Tablicy Mendelejewa o pierwiastki o  $Z \geq 121$  wymaga wynalezienia metody umożliwiającej syntezę i detekcję jąder superciężkich żyjących krócej niż 1  $\mu$ s.



#### Rozwiązanie zadania M 839.

$\sqrt{m + \sqrt{n + \sqrt{m + \dots}}} > \sqrt{n + \sqrt{m + \sqrt{n + \dots}}}$ . Dla  $k = 1$  mamy oczywiście  $\sqrt{m} > \sqrt{n}$ . Dla  $k = 2$  mamy  $\sqrt{m + \sqrt{n}} > \sqrt{n + \sqrt{m}}$ , bo  $m - n = (\sqrt{m} + \sqrt{n})(\sqrt{m} - \sqrt{n}) > \sqrt{m} - \sqrt{n}$ .

Jeśli teraz  $x > y > 0$ , to  $\sqrt{m + \sqrt{n + \sqrt{x}}} > \sqrt{n + \sqrt{m + \sqrt{y}}}$ .

bo  $m - n > \sqrt{m} - \sqrt{n} > \sqrt{m + x} - \sqrt{n + x} > \sqrt{m + y} - \sqrt{n + x}$ .

Przedostatnia nierówność wynika z tego, że dla  $m > n > 0$  funkcja  $\sqrt{m + x} - \sqrt{n + x}$  jest, dla  $x \geq 0$ , malejąca.

Wystarczy teraz zastosować indukcję, by otrzymać naszą nierówność.