

# Jak wyprodukować najcięższe pierwiastki?

Mgr Marek PFÜTZNER

Najcięższym pierwiastkiem, który można spotkać na Ziemi, jest uran. Jego liczba atomowa (czyli liczba protonów w jądrze atomu tego pierwiastka, oznaczana przez  $Z$ ) wynosi 92. Bombardując najcięższe naturalne pierwiastki pociskami takimi jak neutrony, deuterony czy cięższe jądra dokonano syntezy pierwiastków tzw. transuranowych o liczbach atomowych większych niż 92. Okazało się, że są to pierwiastki nietrwałe o czasach życia dużo mniejszych niż wiek Ziemi, co tłumaczy ich nieobecność w naturze. Do jak ciężkich pierwiastków można dojść metodami sztucznej syntezy? Jeśli zajrzemy do podręcznika chemii, to w zamieszczonej tam tabelicy Mendelejewa znajdziemy 103 pozycje. Granica ta jest już dawno nieaktualna. W artykule tym opiszę, jak doszło do wyprodukowania najcięższego znanego pierwiastka o liczbie  $Z = 109$ .

Wyobraźmy sobie atom pierwiastka: w jego centralnej części znajduje się jądro złożone z  $Z$  protonów i  $N$  neutronów, otoczone chmurą elektronów. O jego własnościach chemicznych decyduje liczba i konfiguracja elektronów, których w obojętnym elektrycznie atomie jest  $Z$ . Natomiast za nietrwałość atomu odpowiedzialne jest jądro. Czas połowicznego rozpadu jądra pierwiastka o liczbie  $Z = 104$  wynosi około 1 minuty, a dla jąder cięższych jest dużo krótszy. Jest to czas zbyt krótki, aby istnienie takiego pierwiastka miało praktyczne znaczenie dla chemii. Synteza i identyfikacja najcięższych pierwiastków nie należy już więc do chemii, ale jest zagadnieniem fizyki jądrowej, a tytułowe pytanie będziemy rozumieć następująco: jak wyprodukować jądro o największej liczbie protonów?

Eksperyment mający na celu wytworzenie pierwiastka o  $Z = 109$  został wykonany w Laboratorium Ciężkich Jonów w Darmstadt w RFN w 1983 roku. Idea metody produkcji jest prosta: należy zderzyć ze sobą dwa jądra, których połączenie (fuzja) prowadzi do powstania pożądanego obiektu końcowego. W opisywanym przedsięwzięciu użyto wiązki jąder żelaza  $^{58}\text{Fe}$ , którymi bombardowano tarczę bismutu  $^{209}\text{Bi}$ . Wybór takich składników nie był przypadkowy.

Jednym z największych problemów utrudniających syntezę najcięższych jąder jest fakt, że gdy w wyniku zderzenia dwóch jąder doprowadzimy do ich fuzji, to powstające jądro złożone znajduje się w stanie silnie wzbudzonym. Oznacza to, że nukleony (protony i neutrony tworzące to jądro) znajdują się w szybkim ruchu względem — można powiedzieć, że jądro ma wysoką temperaturę. Zmniejszenie energii wzbudzenia (ochłodzenie) następuje przez wyparowanie kilku cząstek, co, niestety, trochę zmniejsza masę utworzonego jądra lub przez rozszczepienie, którego prawdopodobieństwo silnie wzrasta ze wzrostem energii wzbudzenia. Procesy te następują prawie natychmiast (w czasie rzędu  $10^{-22}$  s) i zwłaszcza ten drugi jest groźny, bo niszczy oczekiwany przez nas produkt reakcji, zanim zdążymy wydzielić go i zarejestrować. W tej sytuacji musimy tak dobrać warunki eksperymentu, aby powstające jądro złożone miało jak najmniejszą energię wzbudzenia. Od czego ona zależy?

Rozważmy proces zderzenia w układzie środka masy. Całkowita energia początkowa składa się z energii spoczynkowej składników i ich energii kinetycznej

$$E_{\text{pocz}} = M_1 c^2 + M_2 c^2 + E_{k0},$$

a energia końcowa (jądro złożone)

$$E_{\text{końc}} = M_z c^2 + E^*,$$

gdzie  $M_1, M_2, M_z$  oznaczają masy pierwszego i drugiego składnika oraz jądra złożonego,  $c$  jest prędkością światła,  $E_{k0}$  oznacza początkową energię kinetyczną składników, a  $E^*$  jest energią wzbudzenia jądra złożonego.

Z zasady zachowania energii mamy:

$$E^* = (M_1 + M_2 - M_z) c^2 + E_{k0}.$$

Energię spoczynkową jądra można przedstawić następująco:

$$M_1 c^2 = A_1 u c^2 - D_1,$$

$$M_2 c^2 = A_2 u c^2 - D_2,$$

$$M_z c^2 = (A_1 + A_2) u c^2 - D_z,$$

gdzie  $A$  oznacza liczbę nukleonów, a  $D$  tzw. defekt masy odpowiedniego jądra,  $u$  jest jednostką masy atomowej. Korzystając z tych zależności mamy:

$$(*) \quad E^* = (D_z - D_1 - D_2) + E_{k0}.$$

Aby zminimalizować  $E^*$ , musimy zderzać jądra o jak największych defektach masy, czyli jądra silnie związane i o jak najmniejszej energii kinetycznej. Z pierwszego z tych warunków wynika właśnie wybór pocisku i tarczy użytych w eksperymencie.

Przyjrzyjmy się teraz dokładniej drugiemu warunkowi. Czy początkowa energia kinetyczna może być dowolnie mała? Siły jądrowe są siłami krótkozasięgowymi i włącza się do działania, sprzyjając utworzeniu jądra złożonego, dopiero wtedy, gdy zderzające się składniki zetkną się ze sobą. Aby doszło do zetknięcia, cząstki muszą pokonać odpychające siły elektrostatyczne między nimi. Minimalną wartość początkową energii kinetycznej obliczymy żądając, by w zderzeniu centralnym w momencie zetknięcia energia kinetyczna była równa zeru (układ środka masy). Energia potencjalna układu pochodzi tylko od sił elektrostatycznych i wynosi wtedy

$$E_p = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0(R_1 + R_2)},$$

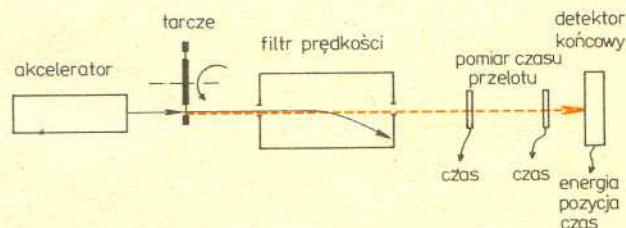
$Z$  i  $R$  oznaczają liczbę atomową (ładunek) i promień składników,  $e$  — ładunek elementarny,  $\epsilon_0$  — stałą dielektryczną próżni. W chwili początkowej jądra są tak daleko od siebie, że energia potencjalna równa jest zeru i składniki mają energię kinetyczną  $E_{k0}$ . Znowu zasada zachowania energii daje

$$E_{k0} = E_p = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0(R_1 + R_2)} \text{ ozn } B_C.$$

Wartość tę nazywamy barierą kulombowską. Do fuzji może zatem dojść wtedy, gdy początkowa energia kinetyczna w układzie środka masy spełnia warunek

$$E_{k0} \geq B_C.$$

W naszym przypadku bariera kulombowska ma wartość 220 MeV. Eksperyment przeprowadzono dla 3 energii pocisków. Po przeliczeniu do układu środka masy wynosiły one 224, 229, 234 MeV. Ponieważ jądro złożone w tym przypadku jest bardzo słabo związane, pierwsza część wzoru (\*) jest ujemna i kompensuje stosunkowo dużą energię kinetyczną konieczną do jego utworzenia. Dla największej energii pocisków energię wzbudzenia jądra złożonego oceniono na około 20 MeV.

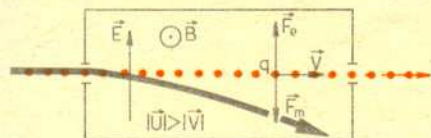


Rys. 1. Schemat układu eksperymentalnego do produkcji i identyfikacji najcięższych pierwiastków.

Schemat układu eksperymentalnego pokazany jest na rysunku 1. Aby poznać funkcję każdego z elementów, prześledźmy drogę, jaką przebywają cząstki od akceleratora do układu detekcyjnego. Wiązka jonów  $^{58}\text{Fe}$  przyspieszonych w akceleratorze do odpowiedniej energii pada na tarczę, która składa się z kilku kawałków cienkiej folii bismutu umieszczonych na obwodzie obracającego się koła. Co jakiś czas kolejny sektor wstawiany jest w wiązkę, co umożliwia ochłodzenie kawałka poprzednio naświetlonego i zapobiega przepaleniu się tarczy. W tym miejscu zachodzi reakcja między jądrami  $^{58}\text{Fe}$  i  $^{209}\text{Bi}$ . Produkty tej reakcji (w tym interesujące nas jądra złożone) zostają wybite z tarczy i lecą w kierunku detektorów. Niestety, od fuzji dużo bardziej prawdopodobne są procesy konkurencyjne, w wyniku których w stanie końcowym pojawiają się dwie (lub więcej)



cząstki. Musimy więc jakoś oddzielić jądra złożone od ogromnego tła tworzonych przez te cząstki i przez wiązkę pierwotną, której duża część przechodzi przez tarczę. Spośród wszystkich cząstek w wiązce za tarczą produkty reakcji fuzji mają najmniejszą prędkość. Wynika to z zasady zachowania pędu i z tego, że są to najcięższe obiekty, jakie mogą powstać w reakcji. Pamiętajmy, że jądro złożone znajduje się początkowo w stanie wzbudzone. W wyniku natychmiastowej deekscytacji, np. przez emisję kilku neutronów, doznaje odrzutu, co jednak tylko nieznacznie zmienia jego prędkość. Odrzucenie niepotrzebnych cząstek stanowiących tło odbywa się w filtrze prędkości. Jego zasada działania jest następująca. Cząstki wpadają do obszaru, w którym istnieje pole elektryczne  $E$  i pole magnetyczne  $B$  prostopadłe nawzajem do siebie i do kierunku prędkości cząstek (rys. 2). Na cząstkę o ładunku  $q$

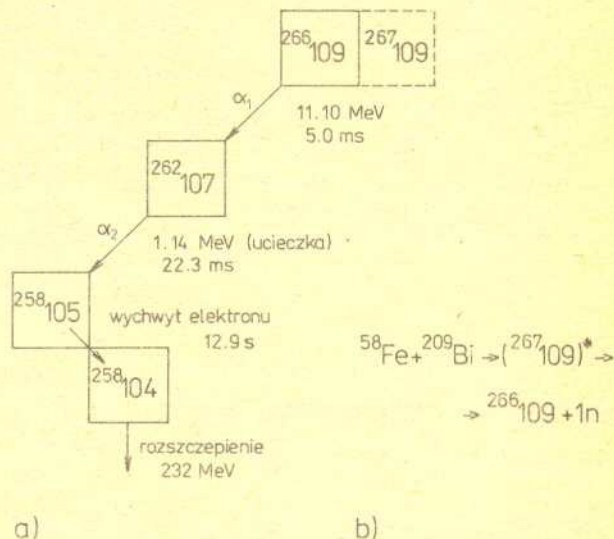


Rys. 2. Zasada działania filtru prędkości.

poruszającą się z prędkością  $v$  działają siły o wartościach: magnetyczna —  $F_m = qvB$ , elektryczna —  $F_e = qE$ , skierowane przeciwnie. Pola  $E$  i  $B$  dobiera się tak, aby dla zadanej prędkości siły te równoważyły się. Cząstki o tej prędkości przejdą przez szczelinę wyjściową, natomiast wszystkie cząstki o innej prędkości zostaną odchylone i w ten sposób odfiltrowane. W rzeczywistości urządzenie to jest bardziej skomplikowane i jest (choć bardzo mało) prawdopodobne, że niepożądana cząstka przejdzie przez filtr prędkości np. w wyniku rozproszenia na jakimś elemencie mechanicznym. O jakości oczyszczania wiązki świadczy fakt, że w ciągu całego eksperymentu na tarczę padło  $7 \times 10^{17}$  pocisków (liczba cząstek za tarczą była dużo większa) i tylko 187 000 cząstek przeszło przez filtr prędkości. Odfiltrowana wiązka produktów reakcji wchodzi następnie do układu detekcyjnego. Pierwszą jego część stanowią dwie cienkie folie umieszczone na drodze wiązki w odległości około 50 cm od siebie. Przelatująca cząstka wywołuje impuls najpierw w pierwszej, a potem w drugiej folii i czas między tymi sygnałami pozwala obliczyć prędkość cząstki. Ostatnim urządzeniem jest końcowy detektor, który zatrzymuje padające nań cząstki. Za jego pomocą mierzy się czas implantacji (wbicia się cząstki do detektora), przybliżone miejsce tego zdarzenia oraz energię kinetyczną padającego pocisku. Znając prędkość i energię kinetyczną możemy obliczyć masę implantowanego obiektu. Jeśli jest nim jądro ciężkiego pierwiastka, to spodziewamy się, że chwilę później rozpadnie się przez rozszczepienie lub emisję cząstki alfa. Energia kinetyczna powstających w rozpadzie cząstek oraz czas i miejsce rozpadu również zostaną zarejestrowane. Głębokość implantacji ciężkiego jądra jest dużo mniejsza niż zasięg cząstek alfa w materiale detektora i musimy się liczyć z tym, że jeśli cząstka alfa zostanie wysłana do tyłu, to zarejestrujemy tylko część jej energii kinetycznej.

Eksperyment trwał 250 godzin. Wszystkie sygnały z detektorów były zapisywane na bieżąco na taśmach magnetycznych i analizowane na komputerze po zakończeniu doświadczenia. W czasie analizy natknięto się na zapis wydarzenia, którego zrekonstruowany przebieg w czasie był następujący:  
1) Detektory zanotowały obiekt, którego liczbą masową oszacowaną z prędkości i energii wydzielonej podczas implantacji wynosi  $264 \pm 13$ .

2) 5 ms później z tego samego miejsca została wysłana cząstka alfa o energii  $(11,10 \pm 0,04)$  MeV.  
3) Następnie po czasie 22,3 ms to samo miejsce opuściła druga cząstka alfa o energii  $(1,11 \pm 0,02)$  MeV.  
4) Na koniec 12,9 s później wydzielili się energia  $(232 \pm 10)$  MeV wskazując na rozszczepienie zagadkowego jądra.  
Po bardzo szczegółowej analizie biorąc pod uwagę wszystkie możliwości autorzy eksperymentu podali taką oto interpretację tego zdarzenia (rys. 3). W wyniku fuzji utworzyło się wzbudzone jądro  $^{267}_{109}$ . Po wyparowaniu jednego neutronu powstało jądro  $^{266}_{109}$ , które zostało zarejestrowane przez detektory (pkt 1).



Rys. 3. Zaobserwowana sekwencja rozpadów (a) i jej interpretacja (b).

W wyniku rozpadu alfa przeszło ono w  $^{262}_{107}$  (pkt 2), które również przez emisję cząstki alfa (pkt 3) zamieniło się w jądro  $^{258}_{105}$ , przy czym cząstka alfa uciekła z detektora zostawiając tylko część swojej energii kinetycznej (równej około 10 MeV). Jądro  $^{258}_{105}$  wychwyciło jeden z krążących wokół niego elektronów, co doprowadziło do powstania jądra  $^{258}_{104}$ , które w czasie rzędu milisekund uległo rozszczepieniu (pkt 4). Wszystkie procesy, jakie nastąpiły od utworzenia  $^{262}_{107}$ , były znane z poprzednich eksperymentów, co bardzo zwiększa wiarygodność tej interpretacji. Może wydać się zaskakujące, że ogłasza się odkrycie nowego pierwiastka po obserwacji jednego jądra! Zwróćmy jednak uwagę, że na tę obserwację składa się kilka skorelowanych w czasie i przestrzeni sygnałów. Analiza statystyczna wykazała, że prawdopodobieństwo tego, że zarejestrowane 3 rozpadły, które nastąpiły po pierwszym sygnale implantacji, należały się przypadkowo i pochodziły od 3 różnych jąder, jest mniejsze niż  $2 \cdot 10^{-18}$ .

Całkowitą pewnością, że można wytworzyć atomy pierwiastka 109 i dokładniejsze dane na temat jego własności (czas życia, kanały rozpadu itp.) będziemy mieli dopiero po potwierdzeniu tego odkrycia w innych eksperymentach i w innych laboratoriach. Tymczasem fizycy z Darmstadt wykorzystali swoje urządzenia do następnego doświadczenia i w roku 1984 donieśli o pierwszym przypadku udanej syntezy pierwiastka 108. Bombardując jądrami  $^{58}\text{Fe}$  tarczę  $^{208}\text{Pb}$  w identycznym układzie, jak opisany powyżej, zaobserwowali rozpad trzech jąder  $^{265}_{108}$ . Obecnie (połowa 1985) trwa eksperyment mający na celu produkcję pierwiastka 110.



Rozwiązanie zadania M 426. Zastosujemy indukcję względem  $n$ . Przypadek  $n = 1$  jest oczywisty; przypuścmy więc, że twierdzenie zachodzi dla pewnego  $n$ . Rozpatrzmy zbiór  $(n+1)$ -elementowy  $S$  i  $k$ -elementową rodzinę  $\mathcal{A}$  jego podzbiorów, gdzie

$$k > \sum_{i=0}^{m-1} \binom{n+1}{i}.$$

Wybieramy  $s_0 \in S$  i tworzymy rodzinę  $\mathcal{A}_1 = \{A \setminus \{s_0\} : A \in \mathcal{A}\}$  i  $\mathcal{A}_2 = \{B \in \mathcal{A}_1 : B \cup \{s_0\} \in \mathcal{A}\}$ .  $\mathcal{A}_1$  ma  $k_1$  elementów,  $\mathcal{A}_2$  ma  $k_2$  elementów.

Zauważmy, że  $k_1 + k_2 = k$ . Istotnie,  $k_2$  jest liczbą par zbiorów z  $\mathcal{A}$  różniących się tylko o  $s_0$  i dających ten sam zbiór z  $\mathcal{A}_1$ . Mogą zająć dwa przypadki.

$$1. k_1 > \sum_{i=0}^{m-1} \binom{n}{i}. \text{ Wtedy rodzina } \mathcal{A}_1$$

podzbiorów  $S \setminus \{s_0\}$  spełnia założenie indukcyjne (dla  $m$ ). Istnieje wtedy taki  $m$ -elementowy zbiór  $Z \subset S \setminus \{s_0\}$ , że  $\{Z \cap B : B \in \mathcal{A}_1\} = 2^Z$ . Zatem  $\{Z \cap A : A \in \mathcal{A}\} = 2^Z$ .

$$2. k_1 \leq \sum_{i=0}^{m-1} \binom{n}{i}. \text{ Wtedy } k_2 = k - k_1 >$$

$$> \sum_{i=0}^{m-1} \binom{n+1}{i} - \sum_{i=0}^{m-1} \binom{n}{i} = \sum_{i=0}^{m-2} \binom{n}{i}, \text{ jako}$$

$$\text{ze } \binom{n}{i} + \binom{n}{i+1} = \binom{n+1}{i+1}.$$

Zatem rodzina  $\mathcal{A}_2$  spełnia założenie indukcyjne (dla  $m-1$ ), wobec tego istnieje taki  $(m-1)$ -elementowy zbiór  $Z_1 \subset S \setminus \{s_0\}$ , że  $\{Z_1 \cap B : B \in \mathcal{A}_2\} = 2^{Z_1}$ . Niech  $Z = Z_1 \cup \{s_0\}$ . Wtedy  $\{Z \cap A : A \in \mathcal{A}\} = 2^Z$ . Istotnie, biorąc zbiory  $Z \cap A$  dla  $A \in \mathcal{A}_2$  otrzymujemy wszystkie podzbiory  $Z$  nie zawierające  $s_0$ , natomiast zbiory  $Z \cap (A \cup \{s_0\})$  dla  $A \in \mathcal{A}_1$  dają wszystkie podzbiory  $Z$  zawierające  $s_0$ .