

Polon był pierwszy

Adam SOBICZEWSKI

1. Wstęp

Zjawisko promieniotwórczości zostało zaobserwowane przez Becquerela w 1896 r. Dopiero później zrozumiano, na czym to zjawisko polega, czym jest to „promieniowanie”. Materiałem, który je wysyłał, były związki uranu. Szybko jednak wyjaśniło się, że promieniotwórczość jest cechą pierwiastka, a nie związku chemicznego, w jakim on występuje. Jej natężenie zależy wyłącznie od ilości (liczby atomów) tego pierwiastka występującego w badanym związku, a nie od rodzaju związku. Zbadanie przez Marię Skłodowską-Curie wszystkich znanych wówczas pierwiastków pokazało, że oprócz uranu tylko jeszcze tor jest promieniotwórczy.

Pierwszym nowym pierwiastkiem promieniotwórczym, który został odkryty (i to właśnie dzięki własności wysyłania tego – nowego wówczas – promieniowania), był polon. Odkryli go Maria Skłodowska-Curie i jej mąż Piotr w roku 1898, tj. dokładnie 100 lat temu. Ogłosili to w lipcu 1898 r., a już w grudniu tego samego roku mogli zakomunikować o odkryciu następnego pierwiastka promieniotwórczego: radu (przedruk artykułu Marii Skłodowskiej-Curie o odkryciu polonu, jak również inne materiały związane z tym wydarzeniem i z osobą uczoney, może znaleźć Czytelnik w zeszytcie 2/1998 *Postępów Fizyki*, poświęconym rocznicy tego wydarzenia).

Obecnie wiemy, że zaobserwowane przez Becquerela promieniowanie to cząstki α (tj. jądra helu, złożone z dwóch protonów i dwóch neutronów) i promieniowanie β (elektrony dodatnie lub ujemne). Towarzyszy im z reguły promieniowanie elektromagnetyczne o stosunkowo dużej energii (promieniowanie γ). Byli to więc pierwsi zaobserwowani „wysłannicy” jądra atomowego. Badanie ich było zatem początkiem procesu poznawania jądra, tego bardzo ważnego składnika atomu.

Dzisiaj znamy wiele pierwiastków promieniotwórczych i im chcemy ten artykuł poświęcić. Kilka z nich występuje w sposób naturalny w przyrodzie. Reszta (większość) została wytworzona przez człowieka na drodze reakcji jądrowych. Ten proces syntezy nowych pierwiastków wciąż jeszcze trwa.

2. Pierwiastki promieniotwórcze

Znamy obecnie 31 pierwiastków promieniotwórczych. Jest to dużo, więcej niż 1/4 wszystkich pierwiastków, z czego nie zawsze zdajemy sobie sprawę. W podanej na tylnej okładce tego numeru *Delty* okresowej tablicy pierwiastków (zaczepniętej z *Postępów Techniki Jądrowej*, tom 40, zeszyt 4, 1997 r.) zaznaczono je kolorami. Ze względu na sposób powstania tych pierwiastków wyróżnione są trzy ich kategorie: pierwiastki promieniotwórcze pierwotne, wtórne i wytworzone przez człowieka. Omówimy je oddzielnie.

2.1. Pierwotne pierwiastki promieniotwórcze

Są to tor i uran (kolor zielony w tablicy pierwiastków na okładce), których czas połowicznego zaniku jest tak długi (porównywalny z wiekiem Ziemi), że przetrwały na Ziemi od czasu ich wytworzenia w procesach astrofizycznych.

2.2. Wtórne pierwiastki promieniotwórcze

Wtórne pierwiastki promieniotwórcze (kolor niebieski) powstają z rozpadu powyższych dwóch pierwiastków pierwotnych: toru i uranu. Są one uczestnikami procesu dynamicznego: powstają przez rozpad pierwiastków pierwotnych i same po pewnym czasie rozpadają się na pierwiastki lżejsze. Gdyby na Ziemi nie było wolnorozpadających się pierwiastków pierwotnych, nie byłoby też na niej i pierwiastków wtórnych, pochodnych. Jest ich siedem. Izotopy ich stanowią



Maria Skłodowska jako studentka Sorbony.





rodziny (szeregi) promieniotwórcze wypełniające przerwę pomiędzy torem i uranem, a najcięższymi pierwiastkami trwałymi (tj. mającymi trwałe izotopy): ołowiem i bizmutem. Do wtórnych pierwiastków promieniotwórczych należą m.in. polon i rad, odkryte przez Marię i Piotra Curie.

2.3. Pierwiastki wytworzone przez człowieka

Wszystkie pierwiastki wytworzone dotychczas przez człowieka (kolor czerwony) są nietrwałe (promieniotwórcze). Jest ich 22. Dwa z nich: technet (Tc , $Z = 43$) i promet (Pm , $Z = 61$), gdzie Z jest liczbą atomową i jednocześnie numerem pierwiastka w tablicy okresowej, mają w tablicy pierwiastków miejsce około środka tablicy, występują więc pomiędzy pierwiastkami trwałymi. Reszta to pierwiastki transuranowe, występujące za uranem ($Z > 92$) i stanowiące zatem górną (wg liczby atomowej Z) jej część.

Technet otrzymano został w 1937 r., a promet w roku 1945. Najtrwałszym izotopem technetu jest ^{97}Tc (czas jego połowicznego zaniku $T_{1/2}$ wynosi 2,6 mln lat), a prometu – ^{145}Pm ($T_{1/2} = 17,7$ lat).

Próby wytwarzania (syntezy jądrowej) pierwiastków transuranowych podjęte zostały już w 1934 r. przez Enrica Fermiego w Rzymie. Wkrótce potem podjęli je także Irena Curie w Paryżu i Otto Hahn w Berlinie. Polegały one na naświetlaniu uranu neutronami pochodzącymi ze źródeł naturalnych. Na przykład, małe źródło berylowo-radonowe potrafiło dostarczyć strumienia około miliona neutronów na sekundę. W wyniku takich naświetlań Fermi ze współpracownikami obserwował promieniowanie, które przypisywał nowo utworzonym pierwiastkom transuranowym. Jednak badania chemiczne O. Hahna i F. Strassmana pokazały w 1938 r., że było to promieniowanie radioaktywnych izotopów pierwiastków już znanych, około dwa razy lepszych od uranu. Stwierdzenie to stanowiło odkrycie zjawiska rozszczepienia jądrowego, wywołanego naświetlaniem uranu przez neutrony. Przypomnijmy bowiem, że rozszczepienie stanowi podział jądra na dwie porównywalne co do wielkości części (fragmenty). Rozszczepienie odkryte więc zostało przypadkiem, przy próbach syntezy pierwiastków transuranowych.

Pierwszej udanej próby syntezy pierwiastka transuranowego dokonali McMillan i Abelson w 1940 r. w Berkeley (USA). Wytworzyli oni neptun (Np , $Z = 93$) na drodze reakcji



Zapis ten oznacza, że jądro ^{238}U naświetlone neutronami n przyłącza jeden z nich, dając jądro ^{239}U . To nietrwałe jądro przechodzi po pewnym czasie w jądro ^{239}Np poprzez rozpad β^- (tzn. emisję elektronu i antyneutrino). Przypomnijmy tu jeszcze, że zapis ${}_Z^AX_{A-Z}$ oznacza jądro o liczbie protonów Z , liczbie nukleonów A i symbolu chemicznym X .

W przeprowadzeniu reakcji (*) istotne było posiadanie cyklotronu, zbudowanego w Berkeley przez E.O. Lawrence'a w 1933 r. Użyty bowiem strumień neutronów nie pochodził już ze źródeł naturalnych, jak u Fermiego w Rzymie, lecz z reakcji jądrowej wywołanej naświetlaniem tarczy berylowej przyspieszonymi w cyklotronie deuteronami.

Także przez naświetlanie neutronami otrzymano został na przełomie lat 1944/45 ameryk (Am , $Z = 95$). W tym przypadku jednak neutrony nie pochodziły z cyklotronu, lecz z pierwszego reaktora jądrowego, uruchomionego przez Fermiego w Uniwersytecie w Chicago w grudniu 1942 r.

Jeszcze inne źródło neutronów wykorzystane było w procesie, w którym dokonano pierwszej syntezy einsteina (Es , $Z = 99$) i fermu (Fm , $Z = 100$). Tutaj neutrony pochodziły z reakcji termojądrowej, jaka zaszła w pierwszym wybuchu termojądrowym „Mike”, przeprowadzonym na Pacyfiku w listopadzie 1952 r. Zawarty w bombie termojądrowej izotop uranu ^{238}U naświetlony został przez



Rozwiązanie zadania F 487.
Prawdopodobieństwo rozpadu jądra promieniotwórczego w jednostce czasu jest stałe. Zmianę liczby jąder w danej próbce możemy opisać równaniem

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{\tau} N,$$

gdzie τ jest średnim czasem życia. Obliczmy najpierw średnią liczbę N_1 atomów ^{234}Pa . Ponieważ ich czas życia jest bardzo krótki w porównaniu do czasu życia ^{238}U i wieku próbki, więc ustala się stan równowagi – tyle samo atomów ^{234}Pa powstaje, co się rozpada. Oznaczając przez N_0 liczbę atomów ^{238}U , możemy to zapisać w postaci następującego równania

$$dN_1 = N_0 \frac{dt}{\tau_0} - N_1 \frac{dt}{\tau_1} = 0,$$

skąd wyznaczamy $N_1 = N_0 \tau_1 / \tau_0$. N_0 praktycznie nie zmienia się, a więc również N_1 pozostaje stałe i rozumowanie można powtórzyć dla przejścia $^{234}Th \rightarrow ^{234}Pa$, otrzymując $N_2 = N_1 \tau_2 / \tau_1 (= N_0 \tau_2 / \tau_0)$, co pozwala na wyznaczenie szukanego stosunku $N_2 / N_1 = \tau_2 / \tau_1$.



bardzo krótki czas (rzędu kilku nanosekund) ogromną dawką (rzędu 10^{24}) neutronów. Fakt, że wśród produktów naświetlenia wykryto takie jądra, jak ^{253}Es i ^{255}Fm , świadczy o tym, że jądro ^{238}U wychwyciło 15, a nawet 17 neutronów, zanim doznało pierwszego rozpadu β . Musiały więc powstać tak bogate w neutrony izotopy uranu, jak ^{253}U i ^{255}U , które dopiero po siedmiu- i ośmiokrotnym rozpadzie β^- przeszły odpowiednio w jądra ^{253}Es i ^{255}Fm , leżące już na ścieżce trwałości β .

Oprócz neutronów do syntezy pierwiastków transuranowych stosowano także lekkie cząstki (jądra) naładowane. Na przykład kiur (Cm, $Z = 96$), berkel (Bk, $Z = 97$), kaliforn (Cf, $Z = 98$) i mendelew (Md, $Z = 101$) otrzymane zostały przez naświetlanie odpowiednich tarcz cząstkami α .

Mendelew był jednak ostatnim pierwiastkiem, który otrzymano przez naświetlanie tak lekkimi jądrami, jak cząstka α . Do otrzymania cięższych pierwiastków potrzebne już było użycie cięższych pocisków. Powodem jest brak odpowiednio ciężkich tarcz. Tak więc np. nobel (No, $Z = 102$) otrzymano, naświetlając uran ^{238}U jądrami neonu ^{22}Ne , a pierwiastek 112 – naświetlając ołów ^{208}Pb jądrami cynku ^{70}Zn .

Staraliśmy się tu zilustrować, w jak różnych procesach (od stosunkowo prostych reakcji jądrowych do wybuchów termojądrowych) i za pomocą jak różnych urządzeń (akcelerator cząstek naładowanych, reaktor jądrowy, bomba termojądrowa) syntetyzowane były pierwiastki transuranowe. Więcej szczegółów na ten temat może znaleźć Czytelnik np. w artykule A. Hrynkiwicza i A. Sobiczewskiego: „Odkrycia najcięższych pierwiastków”, *Postępy Fizyki*, 45, 111 (1994).

Prawdopodobieństwo połączenia się w jedną całość dwóch zderzających się jąder bardzo szybko maleje ze wzrostem ładunków i mas tych jąder. Stąd eksperyment, w którym syntetyzowane są najcięższe pierwiastki, trwa kilka tygodni lub nawet kilka miesięcy, a wynikiem jego jest wytworzenie co najwyżej jednego lub kilku atomów nowego pierwiastka. Jeśli wziąć dodatkowo pod uwagę, że atomy te rozpadają się po kilku sekundach lub nawet drobnych częściach sekundy, to staje się jasne, że nie dysponowaliśmy nigdy dotąd jednocześnie więcej niż jednym atomem takiego pierwiastka. Badanie ich jest więc badaniem pojedynczych atomów. Już to jednak wystarczyło, byśmy poznali kilka podstawowych ich własności fizycznych, a nawet chemicznych. Nie są to jednak własności makroskopowe, ale jądrowe i atomowe.

Opis współczesnego eksperymentu, w którym syntetyzuje się najcięższe pierwiastki, może znaleźć zainteresowany tym Czytelnik w artykule P. Armbrustera, S. Hofmanna i A. Sobiczewskiego: „Synteza pierwiastków 110 i 111”, *Postępy Fizyki*, 46, 431 (1995). Pewne aspekty takiego eksperymentu były omawiane także przez R. Smolańczuka w artykule „Gdzie kończy się tablica Mendelejewa?”, *Delta* 3/1998.

3. Możliwości syntezy dalszych pierwiastków

Jak wspomnieliśmy powyżej, eksperymenty nad syntezą najcięższych pierwiastków są przedsięwzięciami dużymi, trudnymi, długotrwałymi i kosztownymi. Pozwolić sobie na nie mogą tylko niektóre duże laboratoria. Obecnie są to głównie: Instytut Ciężkich Jonów w Darmstadtzie (Niemcy) i międzynarodowy Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych w Dubnej koło Moskwy, którego członkiem jest także Polska.

W Darmstadtzie, gdzie w 1996 r. otrzymano został najcięższy spośród znanych dotychczas pierwiastków (o liczbie atomowej $Z = 112$), trwają prace nad syntezą pierwiastka o $Z = 113$. W Dubnej zaś trwają przygotowania do syntezy pierwiastka o $Z = 114$. Czy próby tych syntez powiodą się za pierwszym razem, czy też na pozytywny ich wynik trzeba będzie długo czekać – pokaże czas.



Rozwiązanie zadania F 488.

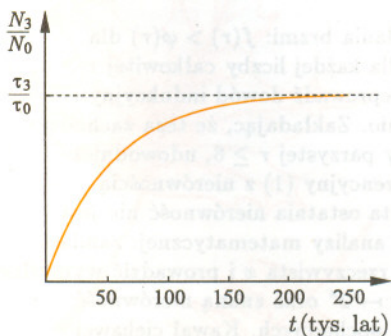
Wiek próbki można ocenić, mierząc względną koncentrację atomów ^{230}Th i ^{238}U . Ponieważ czas życia ^{230}Th jest porównywalny z szukanim wiekiem, więc stan równowagi nie będzie jeszcze ustalony (porównaj rozwiązanie zadania F 487). Za stałą natomiast możemy przyjąć liczbę nowo powstających atomów ^{230}Th w jednostce czasu. Otrzymujemy równanie

$$\frac{N_3(t)}{dt} = \frac{N_0}{\tau_0} - \frac{N_3(t)}{\tau_3},$$

którego rozwiązanie zgadujemy w postaci $N_3(t) = a(1 - e^{-bt})$. Współczynniki a i b wyznaczamy, wstawiając odgadniętą postać do powyższego równania, otrzymując zależność stosunku N_3/N_0 od czasu

$$\frac{N_3(t)}{N_0} = \frac{\tau_3}{\tau_0} (1 - e^{-t/\tau_3})$$

przedstawioną na rysunku.



Widać, że pomiar stosunku N_3/N_0 pozwala na wyznaczenie wieku próbki. Jest to tzw. metoda uranowo-torowa rzeczywiście używana do wyznaczania wieku skał osadowych.