

Ciężki, cięższy... najcięższy?

JANUSZ SKALSKI

Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Warszawa

Janusz.Skalski@fuw.edu.pl

Dr hab. Janusz Skalski pracuje w Zakładzie Fizyki Teoretycznej NCBJ. Zajmuje się strukturą jądra atomowego, w tym jąder najcięższych.

Najcięższy znany dziś pierwiastek ma liczbę atomową 118. Czy mogą istnieć jeszcze cięższe jądra atomowe? Gdzie leży granica układu okresowego pierwiastków?

Materia wokół nas ma formę atomów: elektrycznie związanych układów złożonych z jądra oraz elektronów. Rodzaje atomów numeruje całkowita liczba atomowa Z równa liczbie protonów w ich jądrach: nr 1 to wodór, 2 - hel, 3 - lit, 4 - beryl, 26 - żelazo, 79 - złoto, 82 - ołów... Wszystko, co istnieje w znaczącej ilości na Ziemi, kończy się na numerze

92 - uranie (U). Nie wszystkie pierwiastki o liczbie atomowej $Z < 93$ odkryto w materii ziemskiej, np. linie widmowe helu najpierw dostrzeżono w widmie Słońca (stąd nazwa), a niestabilny technet (Tc, $Z=43$) zsyntetyzowano sztucznie. Wytworzenie nowego pierwiastka polega na utworzeniu jądra atomowego o nieznannej dotychczas liczbie atomowej. Otwarte pozostaje pytanie: jak duże może być Z ?

Protony, neutrony, izotopy

Jądro atomu o liczbie atomowej Z składa się z nukleonów: zawiera Z protonów, czyli cząstek o ładunku przeciwnym do elektronu i ok. 1836 razy większej masie, oraz pewną liczbę N neutronów - cząstek elektrycznie neutralnych, o masie nieco większej od masy protonu. Jądro związane jest przez silne przyciąganie jądrowe między nukleonami, które równoważy elektryczne odpychanie protonów. Jądra atomowe jednego pierwiastka o różnych

Struktura jądra atomowego a zagadka najcięższych pierwiastków

liczbach neutronów to jego izotopy, oznaczane ${}^Z_N X$, gdzie X jest symbolem pierwiastka. Na przykład atom wodoru z jednym neutronem to deuter ${}^2_1\text{H}$, a z dwoma neutronami – to tryt, ${}^3_1\text{H}$. Na Ziemi występuje zwykle po kilka izotopów jednego pierwiastka, np. chlor ($Z=17$) jest mieszanką ${}^{35}\text{Cl}$ i ${}^{37}\text{Cl}$ w proporcji 3:1.

Masa jądra jest mniejsza od sumy mas protonów i neutronów o tzw. energię wiązania (nieco poniżej 1% masy), z grubsza proporcjonalną do liczby nukleonów ($Z+N$). Energia wiązania, liczona na 1 nukleon, rośnie z wartością Z dla jąder lekkich, osiąga maksimum dla żelaza i niklu, a następnie zmniejsza się powoli z powodu coraz silniejszego odpychania między protonami. Proporcja N/Z , odpowiadająca izotopowi o największej energii wiązania, wynosi 1 dla jąder lekkich i powoli wzrasta z Z . Izotopy o proporcji N/Z dalekiej od optymalnej ulegają rozpadowi β (zamianie neutronu na proton lub odwrotnie), któremu towarzyszy emisja lekkich cząstek. Wszystkie transuranowce, czyli pierwiastki cięższe od uranu, są nietrwałe; ich β -stabilne izotopy ulegają rozszczepieniu – dzielą się na dwa duże fragmenty, lub rozpadowi α – dzielą się na jądro helu i jądro potomne.

Od neptunu do $Z=118$

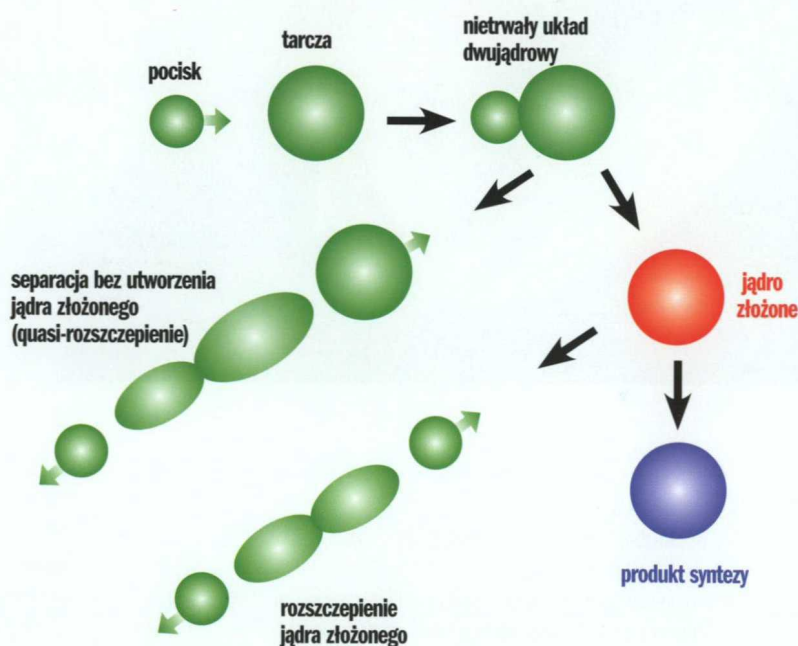
Historia odkrywania pierwiastków cięższych od uranu miała zaskakujące momenty. W 1938 roku Enrico Fermi dostał Nagrodę Nobla z fizyki m.in. za odkrycie pierwiastka 93: wydawało mu się, że bombardując uran neutronami, doprowadził do powstania ${}^{239}\text{U}$, a następnie jego rozpadu β . Gdy odbierał nagrodę, Otto Hahn i Fritz Strassmann wiedzieli już, że nieoczekiwanym produktem tej reakcji jest dużo lżejszy bar ($Z=56$) – odkryli rozszczepienie jądrowe (choć nie do końca zdawali sobie z tego sprawę).

Prawdziwym odkrywcą pierwiastków transuranowych został Edwin McMillan, który wytworzył neptun, a przy tym dokładnie zidentyfikował produkty reakcji. Reakcje z neutronem, deuterem i helem pozwoliły Glennowi Seaborgowi i jego grupie w Berkeley wytworzyć kolejne aktynowce. Einstein (Es, $Z=99$) i ferm (Fm, $Z=100$) odkryto w powietrzu nad atolem Eniwetok po wybuchu bomby wodorowej w słynnej próbie w 1952 roku. Oznacza to, że podczas wybuchu niektóre jądra uranu (ładunek rozszczepialny był pierwotnym, a pewnie i wtórnym zapalnikiem syntezy wodoru) musiały przyłączyć przynajmniej po 15 i 17 neutronów, czego nikt przedtem nie przewidywał.

Rywalizacja USA (Berkeley) i ZSRR (Dubna) przejawiała się w kłótniach o pierwszeństwo w odkryciu pierwiastków 104, 105 i 106 – pierwszych tzw. superciężkich ($Z=103$ – lorens – jest ostatnim z aktynowców; superciężkimi nazywa się zwykle pierwiastki $Z\geq 104$). Pierwiastki 107-112 wy-

tworzono w GSI Darmstadt w Niemczech w reakcjach ${}^{208}\text{Pb}$ lub ${}^{209}\text{Bi}$ z jonami chromu, żelaza, niklu i cynku, w których prawdopodobieństwo syntezy maleje 100 tysięcy razy między $Z=102$ a $Z=112$. Przełomowe okazało się użycie przez grupę Jurija Oganiesjana z Dubnej reakcji wapnia, głównie ${}^{48}\text{Ca}$, z jądrami aktynowców. W tych reakcjach w prawdopodobieństwo syntezy o wiele słabiej zmienia się z Z , co doprowadziło do dalszych odkryć i dzisiejszej granicy układu pierwiastków – $Z=118$.

O ile dalej można tę granicę przesunąć? To zależy będzie od czasu życia nowych izotopów i możliwości ich syntezy. Czas, który musi upłynąć pomiędzy wytworzeniem w reakcji nowego jądra a jego rejestracją, wynosi przy dzisiejszej technice co najmniej 10 μs . Nowe jądro musi więc żyć przynajmniej tak długo. Synteza staje się procesem coraz rzadszym ze wzrostem Z – trzeba czekać miesiącami na zarejestrowanie kilku łańcuchów rozpadów (głównie α) wytworzonego jądra i jego potomnych. Ponieważ z eksperymentu poznajemy tylko energie rozpadów i czasy życia, nasza wiedza o jądram superciężkich opiera się w wielkim stopniu na teoretycznych przewidywaniach ich struktury



oraz rozpadów. Takimi właśnie przewidywaniami zajmujemy się w naszym zespole w NCBJ.

Magiczne jądra

Ze względu na złożoność oddziaływań jądrowych oraz dużą liczbę nukleonów przewidywania opierają się na modelach uproszczonych. Istotną cechą wszystkich modeli jest występowanie deformacji kształtu jąder. Zależność

Nazwa	Symbol	Rok odkrycia	Najtrwalszy izotop	Czas życia
mendelew	Md	1955	258 _{Md}	51,5 dni
nobel	No	1958	259 _{No}	58 m
lorens	Lr	1961	266 _{Lr}	11 h
rutherford	Rf	1964-1969	267 _{Rf}	1,3 h
dubn	Db	1967-1970	268 _{Db}	30,8 h
seaborg	Sg	1974	271 _{Sg}	2,4 m
bohr	Bh	1981	270 _{Bh}	3,8 m
has	Hs	1984	269 _{Hs}	27 s
meitner	Mt	1984	278 _{Mt}	7,6 s
darmsztadt	Ds	1994	281 _{Ds}	9,6 s
roentgen	Rg	1994	281 _{Rg}	26 s
kopernik	Cn	1996	285 _{Cn}	29 s
	Uut	2003-2004	286 _{Uut}	19,6 s
flerow	Fl	1999-2000	289 _{Fl}	2,6 s
	Uup	2003	289 _{Uup}	220 ms
liwermor	Lv	2000	293 _{Lv}	53 ms
	Uus	2010	294 _{Uus}	51 ms
	Uuo	2002	294 _{Uuo}	0,89 ms

Najcięższe wytworzone pierwiastki. Nazwy pochodzą od nazwisk naukowców i wynalazców (np. 112 – od Mikołaja Kopernika) albo miejscowości lub kraju położenia laboratoriów (105 – Dubna, 110 – Darmstadt, 108 – Hesja, 116 – Livermore). Pierwiastki nienazwane oznaczane są liczebnikami łacińskimi np. Uut – Ununtrium. Wśród najdłużej żyjących izotopów nie umieszczamy danych niepotwierdzonych, jak np. stany izomeryczne: ²⁸¹Ds – żyjący 3,7 m czy ²⁸⁹Fl – 1,1 m. Przykładowe liczby obecnie znanych izotopów: Hs – 12, Mt – 8, Cn – 6, Uut – 6, Lv – 4, Uuo – 1.

energii wiązania od deformacji jest kluczowa dla badania stabilności, szczególnie ze względu na rozszczepienie. Analiza wymaga rozważenia wszystkich istotnych deformacji. Pominięcie którejś prowadzi do dramatycznego przecenienia czasów życia, co, jak pokazują nasze wyniki, stanowi główną przyczynę przeszacowań stabilności dawniej i dziś.

Choć używane modele są dopasowane do właściwości znanych jąder, ich wyniki dla $Z > 110$ różnią się; ekstrapolacja nie jest jednoznaczna. Głównym powodem są różne przewidywane liczby magiczne poza ołowiem, szczególnie ta dla protonów. Liczby magiczne to takie liczby nukleonów, dla których energia wiązania na nukleon jest większa niż dla liczb sąsiednich; są to 2, 8, 20, 50, 82 oraz 126 dla neutronów. Np. ²⁰⁸Pb ($Z=82$, $N=126$) jest szczególnie stabilnym jądrem podwójnie magicznym.

Dziś nie jesteśmy pewni, które Z , 114 czy 126, odpowiada większej stabilności ze względu na rozszczepienie. Wiemy jednak, że czasy życia jąder superciężkich są istot-

nie skrócone przez rozpad α . Decyduje on o stabilności jąder wokół ³⁰⁰120, na których syntezie skupione są obecne wysiłki.

Spowolnić rozpad?

Czy mogą istnieć jakieś superciężkie izotopy, których rozszczepienie i rozpad α byłyby spowolnione ze względu na ich szczególną strukturę? Szczególnie ciekawe byłyby czasy życia rzędu sekund lub minut, gdyż umożliwiają analizę właściwości chemicznych pojedynczych atomów radioaktywnych, np. pierwsze takie eksperymenty z flerowem (2007-2012 r.) wskazują na jego własności pośrednie między metalami a gazami szlachetnymi. Wiemy, że rozszczepienie jest spowolnione dla nieparzystej liczby nukleonów. Z kolei rozpad α jest spowalniany przez różnicę struktury stanów początkowego i końcowego (tzn. jądra $Z-2$, $N-2$), która może wynikać z ich bardzo różnych deformacji lub różnego sprzężenia momentów pędu nukleonów. Okazało się, że wiele modeli przewiduje obie różnice dla izotopów $Z=119$, 120 o $N=165$, 166 (kształty spłaszczonej sferoidy o stosunku osi 3:2 oraz lekko wydłużone dla jąder α -potomnych) oraz różnice w sprzężeniach momentów pędu w okolicach $Z=109$, $N=163$. Synteza tych pierwszych izotopów jest obecnie nieosiągalna. Czasy życia drugich zostaną być może sprawdzone doświadczalnie.

Sprawdzaliśmy również, czy mogą istnieć jakieś bardziej stabilne jądra o $Z > 126$. Okazało się, że wyniki istotnie zależą od modelu. W takim, w którym 126 jest liczbą magiczną dla protonów, szansę na mierzalne czasy życia miałyby jądra nieparzyste wokół $Z=134$, $N=228$, o kształtach spłaszczonej sferoidy. Niestety, nikt nie ma pojęcia, jak stworzyć tak ciężkie obiekty. Podobnie niesprawdzalne wydają się dziś wcześniejsze sugestie stabilności układów o nietypowych rozkładach gęstości, o $Z=500$ i więcej. Możliwe, że najcięższy pierwiastek, jaki da się wyprodukować i zidentyfikować, zostanie określony przez granice możliwości syntezy. Już synteza pierwiastka $Z=120$ wymaga pocisku cięższego od ⁴⁸Ca (nie da się zrobić tarczy z fermu), co dotychczas nie dało rezultatów. Możliwe jednak, że Przyroda przygotowała dla nas kolejną niespodziankę. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Mizerski S., Polityka (25.VIII.2005). Wywiad z prof. A. Sobczewskim.
Sobczewski A. (2007). *Postępy Fizyki*, 58, 52.
Jachimowicz P., Kowal M., Skalski J. (2011). *Phys. Rev. C* 83, 054302.
Brodziński W., Skalski J. (2013). *Phys. Rev. C* 88, 044307.