

FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

357 (LXIII) indeks 35810X Nr 4 lipiec/sierpień 2018 CENA 27,50 zł (w tym 5% VAT)

OGANESSON 118

– czy to koniec
tablicy Mendelejewa?

Nerki i dializa

– biofizyka
układu wydalniczego

EDISON I JEGO PATENTY

– 140-lecie
wynalezienia fonografu

Generatory elektrostatyczne

– zaczęło się od bursztynu...

Astronomia

- Osobliwe planetoidy
- Temperatura Ziemi



Termodynamika

– dzieje rozwoju maszyn cieplnych

ISSN 0426-3383



9 770426 338803

08

Oganesson 118:

czy to koniec tablicy Mendelejewa?

Grzegorz Karwasz

Dzieci, gdy tylko nauczą się, że istnieją duże liczby, prześcigają się w licytacji – „a ja mam tysiąc, a ja ma milion, a ja mam bilion miliardów”, trochę jak Maciej Dobrzyński z „Pana Tadeusza”: „do kroćset kroci tysięcy fur beczek furgonów milionów (diabłów)”. Fizycy prześcigają się w licytacji, kto znajdzie (lub raczej zbuduje) najcięższy pierwiastek.

Jaki jest najcięższy atom?

Niedawno wpisano do tablicy Mendelejewa pierwiastek o liczbie atomowej $Z=118$. Zamyka on siódmy okres, leży pod radonem, więc powinien być gazem szlachetnym. Ale być może jest metalem i to reaktywnym. Nie wiemy. Pięć, może sześć pierwszych jąder o masie 294 tego najcięższego pierwiastka, wytworzono

w 2002 roku w laboratorium rosyjskim w Dubnej przez „sklejenie” sztucznego jądra kalifornu $^{249}_{98}\text{Cf}$ z jądrem wapnia $^{48}_{20}\text{Ca}$, jak to pokazuje zeszłoroczny armeński znaczek pocztowy. Nowy pierwiastek nazwano oganesson na cześć fizyka rosyjskiego, pochodzenia ormiańskiego, Jurija Oganessiana, ale z końcówką „-on”, zgodnie z przypuszczeniem, że będzie to gaz szlachetny.



Rys. 1. Znaczek wydany przez pocztę armeńską w 2017 roku z okazji nadania nazwy oganesson, Og, pierwiastkowi o liczbie atomowej $Z=118$. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yuri_Oganessian_2017_stamp_of_Armenia.jpg

Kilka lat czekano na potwierdzenie powstania nowego pierwiastka w innych eksperymentach. Oficjalnie uznano odkrycie w listopadzie 2016 roku. Nadano mu symbol Og. Czy to już koniec tablicy Mendelejewa? Wygląda ona teraz bardzo okazale, (rys. 2).

Oby na wyspę

Pisząc w 2003 roku strony „Fizyki współczesnej”, nazwałem wyścig fizyków w syntezie coraz cięższych pierwiastków „Oby na wyspę” [1].

Cieęższe jądra stają się niestabilne. Już Maria Skłodowska odkryła, że ruda uranowa jest bardziej promieniotwórcza niż uran: cała sekwencja przemian różnych jąder (zarówno poprzez rozpad alfa jak i beta) jest powodem tej radioaktywności.

Protony odpychają się i potrzebne są neutrony, aby jądro było stabilne. I tak, począwszy od helu ^4_2He aż do tlenu $^{16}_8\text{O}$ neutronów jest tyle co protonów. Izotop tlenu z większą ilością neutronów, $^{18}_8\text{O}$ też jest stabilny (i służy do śledzenia zmian klimatycznych). Ale już w stabilnym fluorze $^{19}_9\text{F}$ przeważają neutrony, zaś izotop $^{18}_9\text{F}$ rozpada się emitując dodatni elektron, czyli pozyton. I tak fluor $^{18}_9\text{F}$ (podstawiony zamiast wodoru do glukozy) służy do diagnostyki nowotworów w tomografii emisji pozytonów, PET.

Zestawienie znanych nuklidów przypomina półwysp, nieco zakręcający w górę. Ale pod koniec półwysp zaczyna się rwać. Uran, ze swoimi 92 elektronami nie ma już stabilnych izotopów, chociaż czas połowicznego zaniku izotopu $^{238}_{92}\text{U}$ ($\tau_{1/2}=4,468$ mld lat) jest prawie taki jak wiek Ziemi (4,567 mld lat). To dzięki powolnemu rozpadowi uranu $^{238}_{92}\text{U}$ (i jeszcze powolniejszemu rozpadowi $^{232}_{90}\text{Th}$) Ziemia nie wystygła [2] a jej skorupa pozostaje w ciągłym ruchu. Jest to z niezwykle ważne dla natural-

		Group																																	
		1	2	3											4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
Period	1	1 H																											2 He						
	2	3 Li	4 Be																											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
	3	11 Na	12 Mg																											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
	4	19 K	20 Ca	21 Sc																	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
	5	37 Rb	38 Sr	39 Y																	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
	6	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn		
	7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og		

Rys. 2. Tablica Mendelejewa, ułożona według rosnących liczb atomowych Z (tzn. ilości elektronów). Czwarty i piąty szereg (czyli okres) zawiera pierwiastki, w których stopniowo zapełniają się orbitale d . Szósty i siódmy – pierwiastki, w których zapełniają się orbitale f . Szare okienka oznaczają, że nie wiemy, czy pierwiastki są metalami czy niemetalami, gazami czy ciekczami.

By Sandbh - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=55055463>

nego efektu cieplarnianego [3], zapewniającego trwanie życia na naszej planecie.

Wyścig w tworzeniu nowych, coraz cięższych jąder (czyli też nowych pierwiastków chemicznych) trwa od początku ery atomowej. W „popiele” z reaktora jądrowego znaleziono pluton ${}_{94}\text{Pu}$ (użyty w bombie w Nagasaki) i kiur ${}_{96}\text{Cm}$ (używany czasem w mini-elektrowniach sond kosmicznych). Oba te pierwiastki (a również neptun, ${}_{93}\text{Np}$ i ameryk ${}_{95}\text{Am}$) powstają z uranu poprzez wychwyt neutronów. Kolejne cięższe jądra znaleziono w opadzie po wybuchu bomby termojądrowej (uran był detonatorem).

Czasy życia coraz cięższych od uranu jąder systematycznie maleją. Dla dwóch jąder o parzystej ilości protonów – plutonu (${}^{244}_{94}\text{Pu}$) i kiuru (${}^{247}_{96}\text{Cm}$) są to jeszcze miliony lat (80,8 i 15,6 mln odpowiednio), dla berkelu (${}^{247}_{97}\text{Bk}$) i kalifornu (${}^{251}_{98}\text{Cf}$) – tylko tysiące lat (1,4 tys. i 0,9 tys. odpowiednio), a dla einsteina ${}^{253}_{99}\text{Es}$ i fermu ${}^{257}_{100}\text{Fm}$ – to zaledwie dni (20 i 100 odpowiednio). Ale niektóre obliczenia teoretyczne wskazywały, że jeszcze cięższe pierwiastki mogą być w miarę stabilne. Stąd poszukiwania owej „wyspy” stabilności. Była ona przewidywana około liczby atomowej $Z=114$.

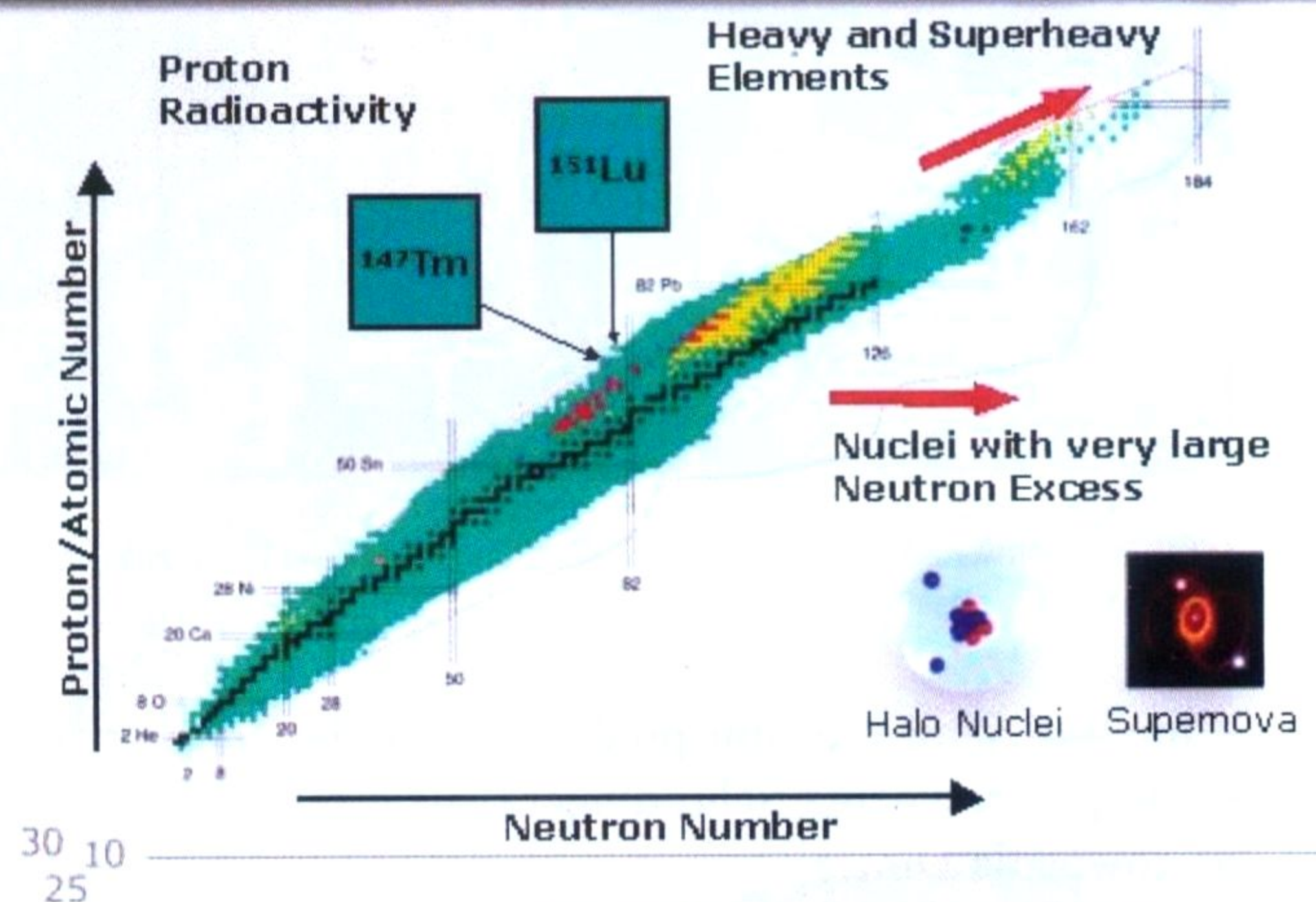
Copernicium 112

Z uwagi na coraz krótsze czasy życia superciężkich jąder, ich synteza poprzez doklejanie neutronów (lub cząstek alfa) staje się nieefektywna. Rozwinięto więc inną metodę – bombardowania ciężkich (lecz możliwie stabilnych) metali jonami lżejszych atomów. Potrzebne są do tego specjalne akceleratory. Najwięcej superciężkich izotopów zsyntetyzowano w Darmstadt. Tam też w roku 1996 powstał nowy pierwiastek o liczbie protonów 112. Powinien on przypominać chemicznie rtęć, mając całkowicie wypełnione dostępne podpowłoki f , d i s , według schematu $5f^{14}6d^{10}7s^2$.

Grupa z Darmstadt jednomyślnie zdecydowała nazwać nowy pierwiastek kopernik (*ang.* Copernicium). Nazwa została zatwierdzona przez międzynarodową komisję w urodziny Mikołaja, 19 lutego 2010 roku. Rok później, odkrywca, prof. Sigurd Hofmann, przy okazji wykładu na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika, osobiście wpisał ${}_{112}\text{Cn}$ do tablicy Mendelejewa. Mimo, że spodziewano się już wyspy, najbardziej stabilny z potwierdzonych izotopów, ${}^{285}_{112}\text{Cn}$, żyje zaledwie 29 sekund.

Nie do końca potrafimy przewidzieć, jakie będą czasy życia poszczególnych nuklidów. Budowa jąder powinna przypominać strukturę atomów – kolejnych zapelnianych powłok. Ale w odróżnieniu od elektronów na orbitach, protony i neutrony są bardzo gęsto upakowane. Energie wiązań są miliony razy większe niż te w atomach. W helu, aby oderwać jeden z elektronów, należy dostarczyć energii $24,6\text{ eV}^1$, ale aby rozbić jądro helu na jego poszczególne składniki, trzeba dostarczyć energii 28 MeV – milion

Nuclear Structure



Rys.3. Tak wyglądał półwysp znanych jąder atomowych w 2003 roku. Poziome i pionowe kreski oznaczają „magiczne” liczby protonów i neutronów, odpowiednio. Najwięcej stabilnych izotopów ma cyna a wśród nich w największej obfitości występuje ${}^{120}\text{Sn}$. Ale ogólnie, cyny w skorupie ziemskiej jest niewiele, co było jedną z przyczyn końca epoki brązu. Ostatnia kropka na półwyspie to ołów ${}^{208}\text{Pb}$, produkt końcowy rozpadu toru ${}^{232}\text{Th}$. W 2003 roku kropek powyżej 162 neutronów było zaledwie kilka. (Źródło: GSI Darmstadt).

razy więcej. Dlatego też tradycyjne metody obliczeniowe mechaniki kwantowej zawodzą.

Wiemy, że są pewne liczby „magiczne” neutronów i protonów, dla których nuklidy są stabilne. I tak, szczególnie dużo stabilnych izotopów ma wapń ${}_{20}\text{Ca}$, nikiel ${}_{28}\text{Ni}$, cyna ${}_{50}\text{Sn}$ (aż 10 stabilnych izotopów) i ołów ${}_{82}\text{Pb}$, zob. rys. 3.

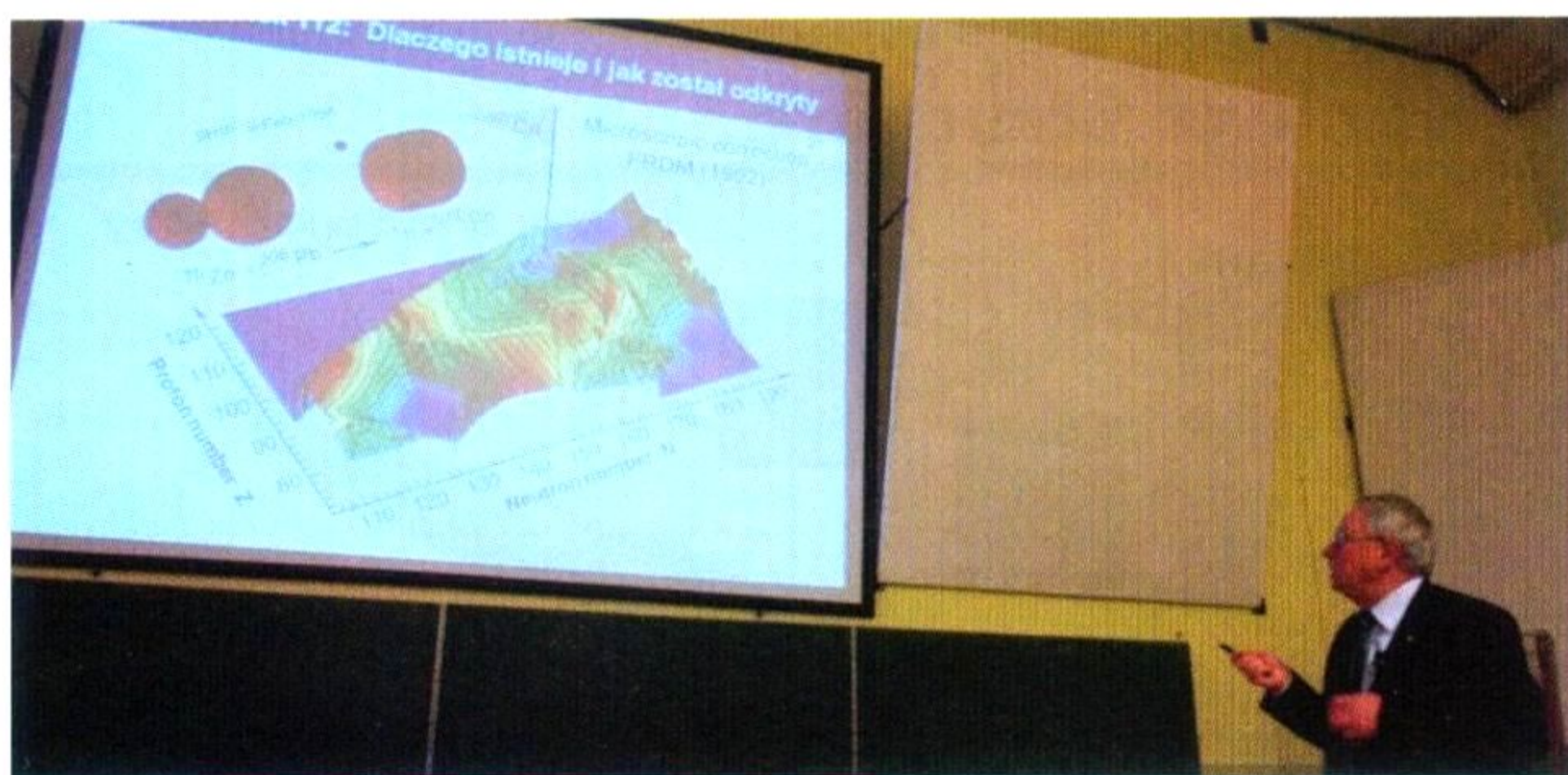
Dlaczego nie ma atomów superciężkich?

Atom wodoru jest praktycznie pusty²: jeśli proton przyrównamy do łepka szpilki, to elektron, też mniej więcej wielkości łepka szpilki, znajduje się odległości 100 metrów. Ale we wzorze na promień Bohra jest w mianowniku liczba atomowa Z . Tak więc, najbliższy jądra elektron w oganessonie wodoro-podobnym (czyli z jednym elektronem) krąży sto razy bliżej niż w wodrze. A ponieważ w oganessonie jest ponad sto elektronów, robi się ich gęsto. Jak gęsto?

Nie jest to proste do policzenia – należy uwzględnić oddziaływanie każdego elektronu z jądrem i każdego z każdym. Tego rodzaju obliczenia, dla znalezienia „dokładnych” orbit elektronów robią się niemożliwe (brakuje pamięci w komputerze) już dla atomu neonu z dziesięcioma elektronami. Ale istnieją metody zastępcze: nie liczenie pojedynczych elektronów, ale wszystkich razem, i poszukiwanie takiego ich rozkładu w przestrzeni, że całkowita energia układu jest najmniejsza. Nazywa się to Density Functional Method. Drugą trudnością jest konieczność uwzględnienia efektów relatywistycznych, gdyż elektrony na wewnętrznych orbitach poruszają się

¹ Elektronowolt, eV to wygodna jednostka pomiaru energii: od razu wiadomo, że bateria litowa dostarczy napięcia 3 V, bo pojedynczy elektron zyskuje energię 3 eV przepływając z jednego bieguna baterii do drugiego.

² Rozmiary protonu to $0,88$ (albo $0,84$ według innego typu eksperymentu) $\times 10^{-15}\text{ m}$, „klasyczny” (tzn. uzyskany z przyrównania energii elektrostatycznej i $E=mc^2$) $2,8 \times 10^{-15}\text{ m}$ zaś promień pierwszej „orbity” według Bohra to $5,29 \times 10^{-10}\text{ m}$, czyli pięć rzędów wielkości więcej.



Rys. 4. Wykład prof. S. Hofmanna z GSI Darmstadt na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika 22/02/2011: kopernik 277112Cn to chorągiewka na małej przełęczy wśród gór niestabilnych nuklidów.

z prędkościami bliskimi prędkości światła. Nie korzysta się więc z równania Schrödingera, ale z relatywistycznego równania Diraca.

Wyniki obliczeń rozkładu elektronów w atomie oganesson i gęstości nukleonów (protonów i neutronów, oddzielnie) w jądrze $^{302}_{118}\text{Og}$ (powinien to być najbardziej stabilny izotop, mający wypełnioną kolejną „powłokę” neutronów) przedstawia rysunek 5. Według tych obliczeń jądro oganesson ^{302}Og ma promień około $10 \times 10^{-15} \text{ m}$ (więcej niż izotop cyny ^{132}Sn) a atom ^{118}Og – promień około $0,1 \times 10^{-10} \text{ m}$ (podobny do ksenonu ^{54}Xe i radonu ^{86}Rn). Oznacza to, że w atomie Og najbardziej wewnętrzne elektrony znajdują się, względnie, jakiś tysiąc razy bliżej jądra niż w atomie wodoru.

Najbardziej zaskakujący jest wynik obliczeń gęstości elektronów wokół jądra. Dwie różne metody (relatywistyczna i nie-relatywistyczna) dają nieco różne wyniki, zob. rys. 5a. Metoda relatywistyczna, dokładniejsza dla wszystkich atomów w „dolnej” części tablicy Mendelejewa, pokazuje, że w atomie oganesson zacierają się granice między poszczególnymi orbitalami elektronowymi. O ile w ksenonie i radonie elektrony tworzą wyraźne

powłoki, w oganessonie są one mniej więcej wszędzie. Chemia oganesson może być więc bardzo dziwna. O ile o chemii, w przypadku zacierania się granic między orbitalami, można jeszcze mówić.

Podobnie w ^{308}Og zacierają się powłoki neutronowe (lewy środkowy kwadrat na rys. 5b). W atomie tym i elektrony, i neutrony zachowują się jak w tzw. modelu Thomasa-Fermiego: nie na poszczególnych orbitalach, ale jak groszki w worku (a raczej – elektrony w cieple stałym). I mimo że do granicy liczby neutronów, które można opisać modelem Thomasa-Fermiego ($N > 5000$) jeszcze daleko, obliczenia dla 308 neutronów (lewy dolny kwadrat na rys. 5b) pokazują, że jądra superciężkie stopniowo stają się tego rodzaju „workiem”, bez wyraźnych orbit. Właściwym „workiem” są natomiast gwiazdy neutronowe.

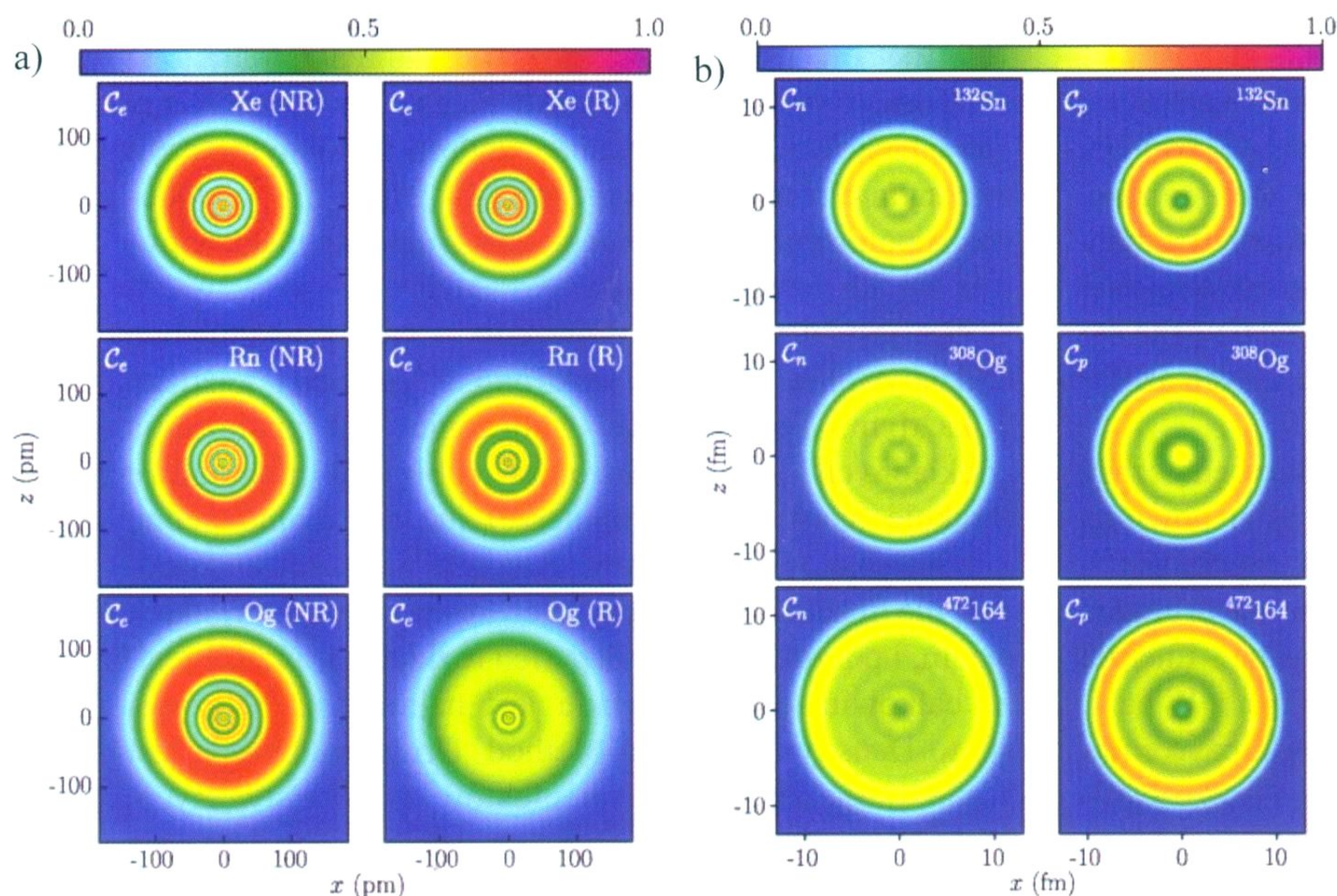
Duże jądro, czy mała gwiazda?

W wyścigu do ciężkich pierwiastków uczestniczą też astrofizycy. Od lat 50-tych zeszłego wieku jest jasne, że ciężkie pierwiastki, powyżej żelaza i niklu musiały powstać w trakcie zapadania się i wybuchu gwiazd. Kiedy atomy zapadają się do neutronów, mieszają we wspólnym gwiazdowym „worku” a ten może ponownie wybuchnąć.

Ciężkie pierwiastki powstają wskutek szybkiego przyłączania kolejnych neutronów, jak w gigantycznym reaktorze jądrowym (albo w wybuchu termojądrowym). Źródłem takiego potężnego strumienia mogą być tylko gwiazdy neutronowe. Ale nie było wiadomo, jakie są masy gwiazd neutronowych, ich rozmiary i co dzieje się w momencie wybuchu.

Od 17/08/2017 wiemy dużo więcej. Tego dnia, o 12:41:06 zarejestrowano kolejną falę grawitacyjną – ale w odróżnieniu od tej pierwszej [5] trwającą nie ułamki, ale kilka sekund. Zderzyły się dwie gwiazdy neutronowe – ich łączna masa wynosiła 2,8 masy Słońca, a promień jakieś 10 km. Innymi słowy, zaobserwowaliśmy model reakcji, w jakiej mogły powstać pierwiastki w Układzie Słonecznym. I zdarzyło się to niedaleko od nas – nie 1,4 mld lat świetlnych [5] ale „zaledwie” 130 mln lat świetlnych.

Po raz pierwszy też zaobserwowano nie tylko falę grawitacyjną, ale i rozbłysk gamma (1,9 sekundy później) – dowód na przepływ ogromnych ładunków elektrycznych (i gigantycznych pól magnetycznych). Po czym, przez kolejne godziny obserwowano promieniowanie rentgenowskie i świecenie – najpierw niebieskie później czerwone, w końcu fale radiowe. Przez miesiąc na galaktykę NGC 4933 były skierowane najważniejsze teleskopy świata.



Rys. 5. Funkcje lokalizacji w atomie (lewy panel) i jądrze oganesson. Lewy panel – porównanie funkcji lokalizacji elektronów w Xe, Rn, Og w przybliżeniu nie-relatywistycznym (NR) i relatywistycznym (R). Zwraca uwagę zacieranie się granic między powłokami elektronowymi w Og w przybliżeniu relatywistycznym. Prawy panel – rozkład neutronów (lewa kolumna) i protonów (prawa) w Sn, Og i hipotetycznym jądrze 472164. Źródło: Jelonek et al. [4], reproducer with permission.

W trakcie wybuchu w przestrzeń kosmiczną trafiło prawie 0,1 masy Słońca, a sekwencja świecenia dostarczyła doświadczonego dowodu na syntezę ciężkich pierwiastków. Zaobserwowano różne procesy. Jak piszą autorzy jednego z wielu artykułów [6] opublikowanych w październiku 2017, reakcja $^{56}_{28}\text{Ni} \rightarrow ^{56}_{27}\text{Co}$ (z emisją pozytonu), jakiej można się spodziewać w wybuchu „zwykłej gwiazdy”, nie wyjaśnia szybko zmieniającego się świecenia resztek po neutronowej kolizji. Dane wskazują na powstanie ciężkich nuklidów – lantanowców i aktynowców, w ilości 1% całości masy. Może w tym gigantycznym kotle powstawał oganesson i inne, nieznane nam stwory.

I cóż z wyspą?

Oganesson może okazać się końcem układu okresowego a jednocześnie początkiem nowych, nieznanych nam form materii.

A co z wyspą? Zdaje się, że już była, ale się skończyła. Spoglądając na aktualne zestawienie nuklidów z Laboratorium w Brookhaven, (rys. 6), jasne jest, że półwysp stabilności kończy się na izotopach ołowiu ^{82}Pb . Na wyspie, czarne punkty (czasy życia powyżej 10^{10} s, czyli 320 lat) oznaczają, m.in., tor ^{90}Th , uran ^{92}U , pluton ^{94}Pu , kiur ^{96}Cm , i jako ostatni kaliforn ^{98}Cf . Przyciężkie towarzystwo, od einsteina ^{99}Es wzwyż, włączając kopernika ^{112}Cn , żyje pojedyncze minuty, jeśli nie sekundy. Wyspa kończy się szarą łachą ruchomych piasków – nuklidami trudnymi do wytworzenia, powstającymi w znikomych ilościach i żyjącymi bardzo krótko. Oganesson, niezaznaczony, byłby na czubku tej łachy.

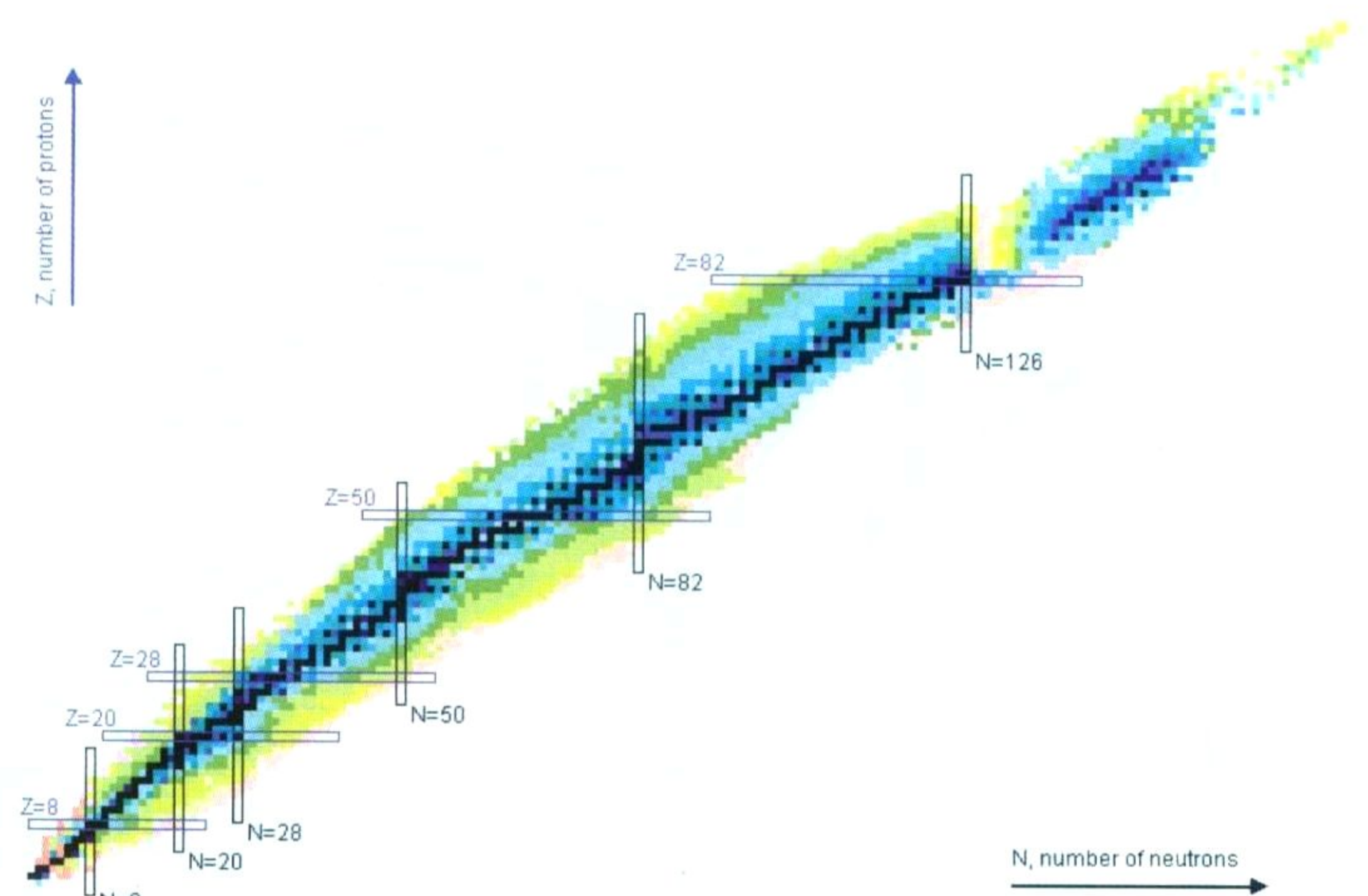
W poszukiwaniach wyspy (a mieli w tym znaczny udział również polscy fizycy teoretycy) nie uwzględniono, że coraz większe jądra i coraz bardziej gęste chmury elektronowe, w pewnym momencie się zleją. Widać to z wyników obliczeń [4] dla oganessona ^{118}Og , zamykającego (obecnie) układ Mendelejewa.

A wąskie przejście z wyspy na półwysp stabilności przetrwała młoda dziewczyna z Lublina, Maria, która w nie ogrzewanej szopie na podwórku technikum elektrycznego w Paryżu, kropla po kropli rozseparowała półtorej tony radioaktywnego śmiecia, zwanego rudą uranową. Dostała za to dwie nagrody Nobla, a „po drodze” urodziła dwie córki (w dorosłości też noblistki). Ale to już inna historia.

P. S. Jurij Oganessian

Prawo nazywania nowych pierwiastków przysługuje, od zawsze, jego odkrywcom. Ale najchętniej odkrywcy upamiętniali własny kraj – od galu (1875) i skandu (1879) przez german (1886) do polonu (1898). Najwięcej nazw superciężkim pierwiastkom nadali Amerykanie – od ameryka, przez berkela, lorensa ($Z=103$), do liwermora ($Z=116$) i tennesina ($Z=117$).

Pierwiastek zamykający obecną formę tablicy Mendelejewa nazwano na cześć fizyka (według wikipedii rosyjskiej) radzieckiego a później rosyjskiego, ale narodowości (według wikipedii armeńskiej) ormiańskiej.



Rys. 6. Przez ostatnie 15 lat znacznie przedłużono „wyspę” – nie ma tam stabilnych izotopów. Na jej końcu, kilka ciemno-zielonych kropek (czasy życia rzędu sekund) stało wokół kopernika $^{285}^{112}\text{Cn}$. Reszta, zaznaczona na szaro, to nadal „ruchome piaski” – czasy życia nieznane. A przeprawa z wyspy na półwysp, poprzez wąską kładkę polonu i radu – to dzieło Marii Skłodowskiej-Curie, której 150-lecie urodzin niedawno świętowaliśmy. Źródło: BNL [7].

Armenia, w porównaniu z innymi krajami post-radzieckimi, choćby z Gruzją czy leżącym na ropie Azerbejdżanem, jest krajem nieco zapomnianym. Nawet holocaust narodu ormiańskiego z lat 1915-16 (1-2 mln wygnanych i zagłodzonych na pustyni syryjskiej) nie przebił się do świadomości światowej. Po I wojnie światowej Armenia została podzielona między Turcję a Związek Radziecki. Dopiero od 1991 roku Armenia z trudem buduje własną niezależność. Tym bardziej trafne stało się udokumentowanie wkładu badacza pochodzenia ormiańskiego w domknięcie tablicy Mendelejewa.



Armenia jest nazywana w polskich przewodnikach „Zakaukaziem”. W rzeczywistości, jest to przedmurze Europy, najstarsze państwo chrześcijańskie, w które uderzały przez stulecia natarcia wojowniczych ludów z Azji. Na zdjęciu – klasztor z IX w. nad jeziorem Sedan.

LITERATURA

- [1] G. Karwasz, Czyżby już wyspa?, Na ścieżkach Fizyki Współczesnej. Wystawa wirtualna, Gdańsk-Trento, 2003, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/nuklear1.html
- [2] G. Karwasz, J. Chojnacka, Wewnętrzny ogień, czyli o tektonice płyt Ziemi, „Geografia w Szkole”, 3/2012, s. 28
- [3] G. Karwasz, K. Służewski, Ziemia pod pierzynką, czyli o naturalnym efekcie cieplarnianym, Foton, 121 (Lato 2013) 37-42.
- [4] P. Jerabek et al. Electron and Nucleon Localization Functions of Oganesson: Approaching the Thomas-Fermi Limit, Phys. Rev. Lett. 120, 053001 (2018), <https://physics.aps.org/articles/v11/10>
- [5] G. Karwasz, Fala z grawitacyjnej otchłani, „Fizyka w Szkole”, 2/2016
- [6] P. S. Cowperthwaite et al. The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Nmeiger LIGO/Virgo GW170817, Astr. J. Lett. 848, No. 2 (2017) L12
- [7] Interaktywna tablica nuklidów, Chart of Nuclides, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>
- [8] Więcej o kolizji dwóch gwiazd neutronowych na: http://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_GW170817