

TIM JAMES



SPAL TĘ WODĘ



Jak zmienić wodę w ogień,
zrobić diament z masła
i inne cuda z krainy pierwiastków



Prószyński i S-ka

TIM JAMES

SPAL
TE
WODE

Przełożył Adam Tuz

Prószyński i S-ka

Tytuł oryginału
Elemental

Copyright © 2018 by Tim James
All rights reserved

Projekt okładki
Paweł Panczakiewicz
www.panczakiewicz.pl

Redaktor prowadzący
Adrian Markowski

Redakcja
Joanna Habiera

Korekta
Maciej Korbaśiński

ISBN 978-83-8169-704-0

Warszawa 2019

Wydawca
Prószyński Media Sp. z o.o.
02-697 Warszawa, ul. Rzymowskiego 28
www.proszynski.pl

Spis treści

Wstęp. Przepis na rzeczywistość

Rozdział pierwszy. Łowcy płomieni

Rozdział drugi. Nie do przecięcia

Rozdział trzeci. Karabin maszynowy i pudding

Rozdział czwarty. Skąd się biorą atomy?

Rozdział piąty. Cegielka za cegielką

Rozdział szósty. Mechanika kwantowa ratuje sytuację

Rozdział siódmy. Co może wybuchnąć

Rozdział ósmy. Marzenie alchemika

Rozdział dziewiąty. Lewa strona tabeli

Rozdział dziesiąty. Kwasy, kryształy i światło

Rozdział jedenasty. To żyje, to żyje!

Rozdział dwunasty. Dziewięć pierwiastków, które zmieniły świat (oraz jeden, który tego nie zrobił)

Dodatek I. „Sulfur” przez „f”

Dodatek II. Pół protonu?

Dodatek III. Równanie Schrödingera

Dodatek IV. Zamiana neutronów w protony

Dodatek V. Skale pH i pKa

Dodatek VI. Grupy w układzie okresowym

Podziękowania

Dedykuję uczniom liceum Northgate

Wstęp

Przepis na rzeczywistość

14 miliardów lat temu postanowił narodzić się nasz Wszechświat. Nie wiemy, co nastąpiło przedtem (o ile było jakieś „przedtem”), wiemy tylko, że Wszechświat zaczął się rozprzestrzeniać we wszystkich kierunkach i od tamtego czasu nieustannie to robi.

W ciągu kilku pierwszych nanosekund po Wielkim Wybuchu rzeczywistość była rozżarzoną zupą złożoną z cząstek, bulgoczącą w temperaturze miliony razy gorętszej od Słońca. Kiedy jednak wszystko zaczęło się rozprzestrzeniać, ulegało też ochłodzeniu, cząstki stabilizowały się i tak narodziły się pierwiastki.

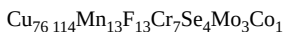
Pierwiastki są cegiełkami wykorzystywanymi przez naturę w kosmicznej kuchni, substancjami w najczystszej postaci, z których zbudowane jest wszystko, od buraka do roweru. Naukę zajmującą się badaniem pierwiastków oraz ich zastosowań nazywamy chemią, chociaż to pojęcie – niestety – dla wielu ludzi ma złowieszczy wydźwięk.

Niedawno pewien pisarz na popularnej, poświęconej zagadnieniom zdrowotnym stronie internetowej biadolił o „chemikaliach w naszej żywności” i zachodził w głowę, co możemy zrobić, żeby pozostała „wolna od chemii”. Tacy panikarze wydają się myśleć, że związki chemiczne są toksynami stworzonymi przez obłąkańców w laboratoryjnych kitchach, lecz to zdecydowanie nazbyt wąski punkt widzenia. Związki chemiczne to nie tylko ciecz bulgoczące w probówkach, lecz także same probówki.

Odzież, którą masz na sobie, wdychane przez siebie powietrze oraz strona książki, na którą właśnie patrzysz – wszystko to tworzą związki chemiczne. Jeśli nie życzysz sobie chemikaliów w żywności, obawiam się, że już za późno. Żywność to też chemikalia.

Przypuśćmy, że zmieszasz dwie cząstki pierwiastka, jakim jest wodór, z jedną cząstką tlenu. W zapisie naukowym przyjęłoby to postać H_2O – chodzi o wodę, najstężniejszy związek chemiczny świata. Dorzuc odrobinę innego pierwiastka, węgla, a otrzymasz $C_2H_4O_2$ – ocet domowy. Pomnóż każdy z tych składników przez trzy i otrzymasz $C_6H_{12}O_6$, związek znany powszechnie jako cukier¹.

Jedyna różnica między sztuką kulinarną a chemią polega na tym, że w przepisie kulinarnym figuruje jakieś warzywo, a chemia chce wnikać jeszcze głębiej i ustalić, z czego to warzywo jest zbudowane. Nie ma praktycznie żadnych limitów na to, co chcemy opisać, jeśli znamy zawartość pierwiastków. Na przykład taki oto zwierz²:



Wygląda na zawartość baryłki toksycznych odpadów, a jest wzorem chemicznym istoty ludzkiej. Trzeba pomnożyć każdą liczbę przez 700 bilionów, lecz tak przedstawia się prawidłowy stosunek pierwiastków w ciele jednego człowieka. Jeśli słyszysz, jak ktoś mówi, że nie ufa chemikaliom, możesz go śmiało zapewnić, iż sam się do nich zalicza.

Chemia nie jest jakimś abstrakcyjnym zajęciem odbywającym się w obskurnych laboratoriach; ona rozgrywa się wszędzie wokół nas i w naszym wnętrzu.

Żeby zatem zrozumieć chemię, musimy pojąć układ okresowy pierwiastków, tę okropną tabelę wiszącą, jak zapewne pamiętasz, na ścianie pracowni chemicznej w twojej szkole. Układ okresowy, który bił po oczach wszystkimi kratkami, literami i cyframi, może onieśmielać. Nie jest on jednak niczym więcej jak listą składników, a kiedy rozszyfrujesz jego treść, stanie się jednym z twoich najpotężniejszych sprzymierzeńców w wyjaśnianiu budowy Wszechświata.

Owszem, układ okresowy to obiekt dziwaczny i skomplikowany, podobnie zresztą jak cała natura. Właśnie dlatego warto go studiować. I to również czyni go pięknym.

1 Ściśle: glukoza (przyp. tłum.).

2 Sterner R.W., Elser J.J., *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*, Princeton University Press, Princeton, 2002.

Rozdział pierwszy

Łowcy płomieni

NAJBARDZIEJ ŁATWOPALNA SUBSTANCJA, JAKĄ KIEDYKOLWIEK SPORZĄDZONO

Chemia narodziła się w chwili, kiedy opanowaliśmy naszą pierwszą reakcję chemiczną – spalanie różnych materiałów. Umiejętność rozniecania ognia i panowania nad nim pomagała nam polować, gotować, odpędzać drapieżne zwierzęta, ogrzewać ciało zimą i wytwarzać prymitywne narzędzia. Pierwotnie spalaliśmy materiały takie jak drewno i tłuszcz, lecz okazuje się, że większość substancji należy do materiałów palnych.

Rzeczy zajmują się ogniem dlatego, że wchodzą w kontakt z tlenem, jednym z najbardziej reaktywnych pierwiastków. Dlaczego więc wszystko nie bucha bezustannie płomieniami? Zawdzięczamy to temu, że tlen – choć reaktywny – wymaga energii, by spalanie mogło ruszyć z miejsca. Dlatego rozniecenie ognia wymaga również czynnika takiego jak ciepło lub tarcie. Żeby mogła zajść reakcja spalania z udziałem tlenu, konieczne jest podgrzanie.

Jednakże najbardziej łatwopalną substancją, jaką kiedykolwiek sporządzono (znacznie bardziej łatwopalną od tlenu), stworzyli w 1930 roku dwaj naukowcy: Otto Ruff i Herbert Krug². Poznaj trifluorek chloru.

Ten związek, zbudowany z pierwiastków: chloru i fluoru w stosunku jeden do trzech, jest jedyny w swoim rodzaju – może podpalić dosłownie wszystko, czego dotknie, w tym środki zmniejszające palność.

Trifluorek chloru (ClF_3), który w temperaturze pokojowej przybiera postać zielonej cieczy, a po ogrzaniu zmienia się w bezbarwny gaz, roznieci ogień na szkle i na piasku. Podpali azbest i kevlar (materiał używany przy produkcji kombinezonów strażackich). Roznieci też ogień nawet z samej wody, wydzielając przy tym opary kwasu fluorowodorowego⁴.

Niewiele jest jednak przykładów zastosowania ClF_3 , ponieważ ma on tę niedogodną właściwość, że podpala wszystko, z czym się zetknie. Trzeba szczególnego rodzaju szaleńca, który by pomyślał: „Hm, wypróbuję to”.

Najbardziej spektakularny wypadek z ClF_3 wydarzył się w dniu o nieujawnionej dacie i miał miejsce w zakładach chemicznych w Shreveport w stanie Luizjana. Po posadzce fabryki przesuвано szczelnie zamknięty zbiornik zawierający tonę tego związku, zamrożonego w celu zapobieżenia jego reakcji z metalem. Na nieszczęście niska temperatura sprawiła, że zbiornik stał się kruchy i pękł, a zawartość rozlała się wszędzie dookoła. ClF_3 natychmiast podpalił betonową posadzkę i wypalił dziurę o głębokości przeszło metra, zanim ogień wygasł. Człowiek przesuwany zbiornik został podobno wyrzucony w powietrze i przeleciał sto pięćdziesiąt metrów, a zmarł na zawał serca. Tak oto działa zamrożony trifluorek chloru².

W latach czterdziestych XX wieku poczyniono kilka ostrożnych prób wykorzystania tego związku w roli paliwa raketowego, lecz nieuchronnie podpalał on same rakiety, toteż projekty jego użycia zarzucono.

Jako jedyni próbowali na serio określić moc tej substancji nazistowscy naukowcy, którzy prowadzili w bunkrze pod Falkenhagen badania nad nowymi rodzajami broni⁶. Wpadli na pomysł wykorzystania jej w charakterze paliwa do miotacza płomieni, ale podpałała sam miotacz i każdego, kto go niósł, zatem uznali ją za bezużyteczną.

Tylko pomysły. Trifluorek chloru nie tylko podpala wodę, lecz jest związkami tak złowrogim, że nawet hitlerowcy woleli z nim nie zadzierać. Co czyni go tak potężnym?

Odpowiedź brzmi następująco: fluor zachowuje się bardzo podobnie do tlenu, ale do zapoczątkowania reakcji potrzebuje znacznie mniej energii. Jest najbardziej reaktywnym pierwiastkiem w układzie okresowym i w rozkładaniu innych związków chemicznych skutecznie dystansuje tlen. Zatem po połączeniu go z chlorem, pierwiastkiem drugim pod względem reaktywności, otrzymamy potworną mieszaninę rozniecającą płomień bez żadnej zachęty.

OGIEŃ Z WODY

Grecki filozof Heraklit był rozmiłowany w ogniu i obwoływał go najczystsza substancją, podstawową materią, tworzywem rzeczywistości. Według niego wszystko w jakiś sposób było zbudowane z ognia w takiej czy innej formie. Innymi słowy, ogień miał być składnikiem elementarnym.

To zrozumiałe założenie, gdyż można odnieść wrażenie, że ogień rzeczywiście ma właściwości magiczne. Z drugiej strony Heraklit żywił się tylko trawą i próbował wyleczyć z puchliny wodnej w oborze dla bydła, gdzie spędził trzy dni przykryty gnojem, po czym zjadł go psy⁷. Chyba zatem nie musimy traktować poglądów Heraklita zbyt poważnie.

Przyczynę, dla której trudno było w antycznym świecie identyfikować pierwiastki, stanowił nieznanym dawnym filozofom fakt, że niewiele z nich występuje w czystej postaci. Większość z nich jest bowiem niestabilna i łączy się ze sobą, tworząc konglomeraty pierwiastków, zwane związkami chemicznymi.

To działa trochę tak jak bary dla samotnych. Każda samotna osoba czuje się nieszczęśliwa, więc łączy się z inną samotną osobą w parę. Pod koniec wieczoru większość singli wchodzi w związki, dzięki czemu stabilność całej grupy wzrasta. Jedynie garstka pierwiastków, na przykład złoto, którym nie przeszkadza samotność, pozostaje w swoim stanie pierwotnym.

Niemal wszystkie spotykane przez nas w naturze substancje to związki chemiczne, więc choć któryś z nich, na przykład sól kuchenna, może wyglądać na substancję w stanie czystym, jest to wyłącznie złudzenie. Sól kuchenna w rzeczywistości jest bowiem związkiem sodu i chloru, one zaś są prawdziwymi pierwiastkami.

Nigdy nie znajdzie się spoczywającej w glebie grudki sodu ani dryfującej z wiatrem chmury chloru, gdyż oba pierwiastki odznaczają się silną reaktywnością. Są one zatem praktycznie niewykrywalne, zwłaszcza za pomocą prymitywnego sprzętu laboratoryjnego rodem z pierwszego tysiąclecia naszej ery.

Faktem jest również to, że wiele pierwiastków występuje szokująco rzadko. Weźmy protaktyn, pierwiastek używany w badaniach z dziedziny fizyki jądrowej; cały jego występujący na świecie zapas pochodzi z jednego, ważącego 125 gramów odłupka pozostającego w posiadaniu brytyjskiej Agencji Energii Atomowej⁸. Grecy filozofowie, przeciwko którym sprzysięgło się tak wiele czynników, nie mieli szans dotrzeć do prawdy.

Dopiero pod koniec XVII wieku niemiecki alchemik Hennig Brand dowiódł, że w używanych na co dzień substancjach tkwią ukryte pierwiastki, a większość substancji, które uważamy za czyste, wcale czysta nie jest.

Pewnego dnia o nieznanym dacie w 1669 roku Brand spędzał wieczór w pracowni na gotowaniu sporej ilości moczu (trzeba przecież mieć jakieś hobby), prawdopodobnie dlatego, że ta ciecz ma złotą barwę, zatem badacz miał nadzieję zbić fortunę, kiedy udałoby mu się doprowadzić do zestalenia się moczu w cenny metal. Po wielu godzinach tej nieprzyjemnej pracy Brand ostatecznie otrzymał gęsty, czerwony syrop oraz czarną maź, podobną do tej, która powstaje w wyniku przypalenia grzanki. Zmieszał obie substancje i ponownie podgrzał mieszaninę. To, co nastąpiło potem, było dla niego niezrozumiałe.

Mieszanka pochodzącego z moczu syropu oraz na pozór zwykłego, kuchennego brudu przekształcała się w woskowane ciało stałe o silnym zapachu czosnku, które jarzyło się niebieskozieloną poświatą. Mało tego: okazało się niezmiernie łatwopalne, a po podpaleniu emanowało osłepiającym, białym światłem. Badacz jakimś sposobem otrzymał ogień z wody.

Brand nazwał tę substancję fosforem od greckiego słowa *phosphoros* („niosący światło”) i przez następne sześć lat w tajemnicy z nią eksperymentował. A nie były to przyjemne lata. Każda partia fosforu o masie 60 gramów wymagała wygotowania pięciu i pół tony moczu. Kiedy Brandowi skończyły się ostatecznie pieniądze żony, podał odkrycie do publicznej wiadomości i zaczął sprzedawać fosfor Danielowi Kraftowi, jednemu z pierwszych popularyzatorów nauki, który obwoził nabytek po całej Europie i demonstrował go zdumionym władcom oraz instytucjom naukowym⁹.

Brand zachował jednak metodę ekstrahowania fosforu w tajemnicy. Chociaż wszyscy łamali sobie głowę, dlaczego nikt jej nie odgadł. Badacz stworzył chyba diabelnie zmyślną historyjkę, aby wyjaśnić, po co mu było aż tyle moczu.

Obecnie dokładnie wiemy, jak działała metoda Branda. Zalecane spożycie fosforu wynosi od pół grama do ośmiu dziesiątych grama dziennie, lecz ponieważ zawiera go wszystko, co jemy, przeważnie spożywamy ilość przeszło dwukrotnie większą. Cały nadmiar przenika do moczu, a Brand po prostu odparowywał wszystko inne.

Odkrycie badacza wyznaczyło kluczowy dla chemii moment, ponieważ wyekstrahowany fosfor tak bardzo różnił się od źródła, z którego pochodził. Mocz nie świeci w ciemności (niestety), lecz najwyraźniej zawiera pierwiastek chemiczny, który ma tę właściwość. Był to dowód, że w zasięgu naszego wzroku kryją się substancje chemiczne. Pierwiastki nie leżały już poza naszym zasięgiem.

CZŁOWIEK, KTÓRY IGRAŁ Z OGNIEM

Na początku XVIII wieku niemiecki chemik Georg Stahl, uzbrojony w nową wiedzę, że używane na co dzień substancje mogą składać się z ukrytych pierwiastków, postanowił wyjaśnić zjawisko ognia.

Podczas spalania metali powstają barwne proszki, nazywane wówczas wapnami. Wapna słynęły z tego, że trudno je zapalić, więc Stahl wyciągnął wniosek, iż są pierwiastkami, a trudność ich podpalenia wynika z tego, że zostały pozbawione ognia. Według tej hipotezy wszystko, co da się podpalić, zawiera substancję ulatniającą się po podgrzaniu do atmosfery i pozostawiającą po sobie tylko zwęglone resztki. Stahl nazwał tę substancję flogistonem od greckiego *phlogizein* („płonąć”) i argumentował, że ogień jest flogistonem oddzielającym się od wapna¹⁰.

Dotycząca ognia hipoteza Stahla była ważna, ponieważ – w odróżnieniu od poprzednich idei w chemii – dawała się sprawdzić. Gdyby okazała się trafna, to przechwycenie flogistonu i połączenie go z wapnem w celu odtworzenia pierwotnego metalu powinno być możliwe. Stahl przedstawił ideę, której błędności można było dowieść, i przez to dał nam autentyczną hipotezę naukową, ona zaś – jak większość hipotez naukowych – szybko została obalona.

Pierwszy wyłom zrobił Henry Cavendish, brytyjski naukowiec urodzony we Francji, człowiek stynący z nieśmiałości, zapalony kolekcjoner mebli, wielbiony przez fizyków, jako że pomógł udowodnić działanie siły grawitacji. Jego największym wkładem w rozwój chemii była jednak seria eksperymentów z kwasem i żelazem.

W wyniku reakcji tych dwóch substancji uwalniał się niewidzialny gaz, który Cavendish zbierał. Najpierw myślał, że udało mu się przechwycić flogiston, aż odkrył coś dziwnego. Gaz spalał się w sposób wybuchowy¹¹. Jeśli ogień stanowił rezultat uwalniania się flogistonu, to jak sam flogiston mógł ulegać spalaniu? Jak flogiston mógł ulatniać się sam z siebie?

Jeszcze dziwniejsze było to, że gdy otrzymany przez Cavendisha gaz (który odkrywca nazwał „palnym powietrzem”) wybuchał, tworzyła się przy tym czysta woda. Skoro zaś można było otrzymać wodę z innych substancji, to może woda również nie zaliczała się do pierwiastków?

Na następną tajemnicę natknął się w 1774 roku angielski duchowny-odszczepieniec Joseph Priestley. Eksperymentował on z wapnem rtęciowym (czerwonym proszkiem otrzymywanym w wyniku spalania rtęci), kierując nań promienie światła za pomocą szkła powiększającego¹². Zbierał wydzielający się gaz i przekonał się, że inne materiały bardzo dobrze się w nim paliły, lepiej niż w zwykłym powietrzu.

Czymkolwiek był ów gaz, wyraźnie dobrze sobie radził z usuwaniem flogistonu. Logicznie rozumując, gaz musiał być zdeflogistonowany, skoro mógł absorbować flogiston, zatem odkrywca nazwał go „zdeflogistonowanym powietrzem”.

Dwieście lat wcześniej polski alchemik Michał Sędziwój odkrył, że powietrze stanowi mieszaninę dwóch gazów, z których jeden był „pokarmem życia”, drugi zaś był bezużyteczny¹³. Czy między tymi odkryciami istniał jakiś związek?

Priestley postanowił zamknąć kilka myszy w pojemniku wypełnionym zdeflogistonowanym gazem, a zwierzęta przetrwały w nim bez szkody. Uczony odkrył również, kiedy wypróbował działanie gazu na sobie, że w istocie woli go od zwykłego powietrza, wdychany gaz wprowadzał go bowiem w stan euforii. Najwyraźniej „pokarm życia” Sędziwoja był tym samym, co zdeflogistonowany gaz Priestleya.

Priestley odkrył ponadto, że rośliny – jak się zdaje – wydychają gaz, wypełniając nim wolną przestrzeń po wypaleniu się ognia. Wszystko to wydawało się bardzo dezorientujące. Ogień wydzielający wodę, metale wytwarzające ogień, rośliny wydychające powietrze... O co tu chodzi?

WPROWADZENIE PORZĄDKU

Odpowiedź na wszystkie powyższe zagadki pojawiła się w 1775 roku, kiedy Priestley podzielił się wynikami badań nad flogistonem z francuskim chemikiem Antoine’em Lavoisierem.

Lavoisier pracował dla francuskiego rządu jako poborca podatków, ale jego prawdziwą pasją była nauka. Już wcześniej eksperymentował z wapnami, zanim jeszcze jego uwagę zwróciły doświadczenia Priestleya¹⁴, uznał więc, że nadszedł czas, by przetestować hipotezę flogistonową. Skoro ogień miał być rezultatem uwalniania się flogistonu z danej substancji, to pozostałe po tym wapno powinno ważyć mniej.

Priestley próbował dokonywać pomiarów w doświadczeniach z wapnem rtęciowym, przeprowadzanych za pomocą szkła powiększającego, ale w XVIII wieku nie istniały precyzyjne instrumenty badawcze. Wyobraź sobie próbę odróżnienia, czy proszek waży 1 gram, czy 1,1 grama. To nie lada wyzwanie.

Lavoisier w celu otrzymania wyraźnych wyników postanowił zwiększyć skalę eksperymentu Priestleya. Różnica między masą 1000 i 1100 kilogramów wynosi 100 kilogramów, a to już można ocenić gołym okiem. Lavoisier zamówił zatem prawie trzymetrową konstrukcję ze szklami powiększającymi i naświetlił promieniami słonecznymi miskę napełnioną wapnem rtęciowym¹⁵.

Wynik nie pozostawiał wątpliwości – wapna ważyły więcej niż pierwotny metal. Wszyscy myśleli na odwrót. Ogień nie polegał na eliminowaniu flogistonu, tylko na dodawaniu jakiegoś składnika z samego powietrza. Substancje takie jak metale i fosfor były pierwiastkami, a ogień powstawał wtedy, gdy łączyły się z odkrytym przez Priestleya gazem.

Mimo geniuszu tego spostrzeżenia Lavoisier nie był nieomylny i wysnuł błędny wniosek, że gaz Priestleya odpowiada również za kwaśny smak kwasów. Uczony nazwał zatem gaz *oxygène* od greckich słów: *oksy* („kwaśny”) i *gennao* („rodzę”), co dawniej tłumaczono na polski jako „kwasoród”, dzisiaj zaś nazywa się go tlenem.

Wybuchowy gaz, który wyizolował Henry Cavendish, był innym pierwiastkiem (zawartym w kwasie, a nie w metalu); podgrzany w obecności tlenu, łączył się z nim, tworząc wodę. Lavoisier nadał mu nazwę *hydrogène* od greckiego *ydrogóno*, czyli „tworzący wodę” – jest to wodór¹⁶.

Ten nowy sposób spojrzenia na zagadnienie wyjaśniał ponadto, dlaczego nie da się oddychać w pomieszczeniu, w którym płonął ogień. Mianowicie dlatego, że ogień wydzieliał toksyczną substancję – powietrze częściowo składa się z tlenu, który ogień pochłoniął, pozostawiając inny gaz. W końcu wykazano, że ów bezużyteczny gaz w skrajnych warunkach przejawia reaktywność i może wejść w skład nitrytu (saletry), jednego z kluczowych składników prochu strzelniczego, zatem mąż stanu Jean-Antoine Chaptal nadał mu nazwę *nitregène* – „saletroród”, czyli azot.

Kiedy dowiedzie się, że jakaś hipoteza jest błędna, w nauce zawsze następuje postęp, a eksperymenty Lavoisiera wydały wyrok śmierci na flogiston. Powietrze okazało się mieszaniną azotu i tlenu, które nie wchodzi z sobą w reakcję, woda – związkiem chemicznym powstałym z połączenia

się wodoru z tlenem, ogień zaś był oznaką reakcji tlenu z dowolnym materiałem chemicznym. Żadna z tych substancji nie była pierwiastkiem.

Za swoje starania Lavoisier w maju 1794 roku został wysłany na gilotynę. Być może dlatego, że w przedrewolucyjnej Francji pracował jako poborca podatków (co nigdy nie jest dobrym pomysłem), lecz bardziej prawdopodobnym powodem była jego krytyka wobec Jeana-Paula Marata, gorszego odeń naukowca, który wyrósł na czołową postać rewolucji. Tak więc wielkiego myśliciela spotkał nieszczęśliwy koniec, choć to jeszcze nic w porównaniu z pechem chemika nazwiskiem Carl Scheele.

NAJBARDZIEJ PECHOWY CZŁOWIEK W DZIEJACH CHEMII

Cavendish, Lavoisier i Priestley byli geniuszami, którzy rozslawili nową dziedzinę nauki, a inni szybko przyłączyli się do pogoni za odkryciami. Wszyscy pragnęli chwały odkrywcy nieznanego wcześniej pierwiastka, choć wykazanie, kto dokonał odkrycia, bywa dyskusyjne.

Niektóre pierwiastki towarzyszyły ludziom od starożytności, nie sposób więc się dowiedzieć, kto je pierwotnie odkrył. Stary Testament zawiera ustępy sięgające trzech tysięcy lat wstecz, odnoszące się do złota, srebra, żelaza, miedzi, ołowiu, cyny, siarki (której łacińską nazwę *sulphur* prawidłowo powinno się pisać przez „f” – patrz dodatek I), być może również do antymonu¹⁷.

Istnieją też przykłady, kiedy ktoś przewidział istnienie pierwiastka, nie uzyskując w rzeczywistości jego próbki. Johan Arfwedson wydedukował obecność pierwiastka ukrytego w skale zwanej petalitem i nadał mu nazwę lit od greckiego słowa *lithos* („kamień”), ale dopiero w 1821 roku wyekstrahował go William Brande¹⁸.

Żeby uniknąć nieporozumień i rozstrzygnąć debaty, przeważnie mówimy o pierwszej osobie, który pierwiastek wyizolowała, a nie odkryła. Zasluga przypada więc temu, kto jako pierwszy zdołał otrzymać czystą próbkę pierwiastka, znając tożsamość tej substancji. To zaś prowadzi nas do szwedzkiego chemika Carla Scheelego.

W 1772 roku Scheelemu udało się wytworzyć brązowy proszek, który nazwał barytem od greckiego słowa *barys*, co znaczy „ciężki”. Wiedział, że w materiale kryje się pierwiastek (bar), ale to Humphry Davy go wyizolował i jemu przypadła chwała.

W 1774 roku Scheele odkrył gaz nazwany chlorem (od greckiego *chloros*, co znaczy „zielony”), lecz nie zdawał sobie sprawy, że to pierwiastek. Ustalił to znowu Humphry Davy w 1808 roku i zasługę ponownie zapisano na jego konto.

W tym samym roku Scheele odkrył wapno zwane piroluzytem, lecz nie zdołał wyizolować zawartego w nim pierwiastka – manganu – co kilka miesięcy później osiągnął Johan Gahn.

To samo zdarzyło się znowu w 1778 roku, gdy Scheele zidentyfikował molibden, zanim ten pierwiastek wyizolował Peter Hjelm. I znowu w 1781 roku, gdy wydedukował obecność wolframu, lecz nie zdołał go wyizolować, gdyż ubiegł go Fausto Elhuyar, któremu przypadła zasługa odkrycia¹⁹.

W 1771 roku Scheele odkrył nawet tlen – trzy lata przed Priestleyem – ale druk jego rękopisu opóźnił się i do czasu jego opublikowania Priestley ujawnił już wyniki swoich badań²⁰.

Dla upamiętnienia bogatego wkładu Scheelego w rozwój chemii od jego nazwiska nazwano minerał szelit (lub scheelit), aż nazwę tej substancji oficjalnie zmieniono na wolframian wapnia i tym sposobem ponownie wypchnięto Scheelego z podręczników historii nauki. Jeśli istnieje jakieś bóstwo chemii, to najwyraźniej znieawdziło ono Carla Scheelego.

3 Krug H., Ruff O., *Über ein neues chlorfluorid ClF₃*, „Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie”, t. 190, nr 1 (1930), 270–276.

4 *Compound summary for CID 24627, Open Chemistry Database*. Dostępne na stronie: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/chlorine_trifluoride#section=Top (dostęp: 18.08.2017).

5 Clark J.D., *Ignition! An Informal History of Rocket Propellants*, Rutgers University Press, New Brunswick, 1972.

6 *Eastern Germany 2004, Bunker Tours*. Dostępne na stronie: http://www.bunkertours.co.uk/germany_2004.htm (dostęp: 18.08.2017).

7 Diogenes Laertios, *Żywoty i poglądy słynnych filozofów*, przekł. I. Krońska et al., Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2004.

8 *Protactinium, Encyclopedia*. Informacje dostępne na stronie internetowej: <http://www.encyclopedia.com/science-and-technology/chemistry/compounds-andelements/protactinium> (dostęp: 18.08.2017).

9 Emsley J., *The Shocking History of Phosphorus: A Biography of the Devil's Element*, Macmillan, Londyn 2000.

10 Leicester H.M., Klickstein H.S., *A Source Book in Chemistry 1400–1900*, Harvard University Press, Cambridge 1952.

11 Muir H., *Eureka: Science's Greatest Thinkers and Their Key Breakthroughs*, Quercus, Londyn 2012.

12 Muir, *Eureka*.

13 Sędziwój M., *Letters of Michael Sendivogius to the RoseyCrusian Society*, epistoła 54 (12.01.1647), *The Masonic High Council the Mother High Council*, dostępne na stronie: http://rgle.org.uk/Letters_Sendivogius.htm (dostęp: 8.10.2017).

14 Asimov I., *Breakthroughs in Science*, Houghton Mifflin, Boston 1960.

15 Harré R., *Wielkie eksperymenty naukowe*, przekł. J. Kuryłowicz, Wiedza Powszechna, Warszawa 1991.

16 Asimov I., *Words of Science*, Harrap, Londyn 1974.

17 Biblia, Księga Izajasza 54,11 [w niektórych wersjach przekładu angielskiego; w przekładach polskich we wskazanym ustępie jest mowa o różnych kamieniach szlachetnych, choć również nie bez rozbieżności – przyp. tłum.].

18 *Periodic table – lithium, Royal Society of Chemistry*. Informacje dostępne na stronie internetowej: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/3/lithium> (dostęp: 18.08.2017).

19 Gibb B.C., *Hard-luck Scheele*, „Nature Chemistry”, nr 7 (2015), s. 855–856.

20 Leicester i Klickstein, *A Source Book in Chemistry*.

Rozdział drugi

Nie do przecięcia

DIAMENTY, ORZESZKI ZIEMNE I ZWŁOKI

W 1812 roku niemiecki chemik Friedrich Mohs opracował system klasyfikacji twardości minerałów w skali od 1 do 10. Na przykład szkliwo zębów oceniono na 5 punktów, a żelazo na 4 punkty. To oznacza, że zęby powinny w zasadzie pozostawić wgniecenie na bryłce żelaza, a nie odwrotnie. Nie polecam jednak takich prób, bo jeśli przypadkowo ugryziesz kawałek stali (czyli żelaza z domieszką węgla) o twardości wynoszącej około 7,5 punktu, to pożałujesz.

Diamentom przyznano wartość 10 punktów, gdyż były one najtwardsze ze znanych podówczas materiałów. Ich prawa do tej „korony twardości” zostały obalone dopiero w 2003 roku, kiedy grupie japońskich naukowców udało się wytworzyć coś jeszcze twardszego – hiperdiament.

Według najczęstszego wyjaśnienia sposobu powstawania diamentów węgiel (czyli skamieniały materiał roślinny) ulegał pod powierzchnią ziemi ścisnaniu, aż stał się twardy i przezroczysty. Wszyscy słyszeli to w szkole podstawowej, tyle że to kompletny mit. Diamenty powstają w znacznie skrajniejszych warunkach.

W tym samym roku, w którym wyprodukowano hiperdiamenty, w Hollywood narodziło się niewiarygodne dzieło – film z gatunku fantastyki naukowej *Jądro Ziemi*, który trzeba zobaczyć, żeby móc uwierzyć, że coś takiego nakręcono. Kilka najważniejszych motywów scenariusza obejmujące przejęcie kontroli nad całą siecią internetową świata przez jedną osobę z laptopem, stopienie się mostu Złote Wrota pod wpływem promieni słonecznych oraz lądowanie promu kosmicznego, pilotowanego przez Hilary Swank, w dolinie San Fernando.

W moich oczach szczególnie wyróżnia się jedna scena. W głąb płaszcza Ziemi wyrusza zespół naukowców, żeby odpalić ładunek nuklearny w jądrze planety, a po drodze muszą oni wymijać diamenty wielkości budynków²⁴. W omawianej scenie ciekawe jest to, że choć gigantyczne diamenty to rzecz mało prawdopodobna, poza tym jednym prezentuje ona dość dokładny obraz. Diamenty naprawdę tworzą się w płaszczu, a nie w skorupie ziemskiej.

Diament powstaje wyłącznie z węgla, a proces tworzenia się diamentu trwa miliardy lat. Rośliny rzeczywiście zawierają węgiel, ale nie żyją na Ziemi dostatecznie długo, by dać początek klejnotom wydobywanym przez nas dzisiaj w kopalniach. Zespolecie węgla w kryształ wymaga również oszałamiających wartości ciśnienia i temperatury, o wiele większych, niż mogą występować w skorupie planety.

Diamenty naprawdę powstają w górnej części płaszcza, czyli kilkaset kilometrów w głąb Ziemi. Panuje tam ciśnienie setki tysięcy razy większe od atmosferycznego i temperatura porównywalna z ciepłotą powierzchni Słońca. Po utworzeniu się kryształy zostają wyrzucone na powierzchnię w erupcjach wulkanicznych, a po zestaleniu się lawy możemy je w końcu odkopywać.

Mit o skompresowanym materiale roślinnym prawdopodobnie zrodził się z faktu, że wydobywamy również węgiel, który rzeczywiście powstaje ze sprasowanych w wysokiej temperaturze roślin, ale on

tworzy się w temperaturze i ciśnieniu o małych wartościach, niewystarczających do powstawania diamentów.

Prawdą jest i to, że jeden z tych materiałów w naturalny sposób przechodzi w drugi, ale odwrotnie, niż głosi mit. Diamenty są lekko niestabilne i w ciągu tysięcy lat rozpadną się i przeobrażą w węgiel. Nasuwa się zatem oczywiste pytanie: czy możemy odwrócić ten proces?

W 2003 roku Tetsuo Irifune z Tokijskiego Instytutu Technologii podjął próbe skompresowania węgla do postaci diamentu. Badacz posłużył się inżynierskim odpowiednikiem szybkowaru o skrajnie wielkiej mocy i poddał grudkę węgla ciśnieniu znacznie przewyższającemu to panujące w obrębie płaszczki Ziemi. W rezultacie otrzymał hiperdiament, substancję chemiczną, jakiej nigdy przedtem nie widziano w naturze²².

Hiperdiamenty osiągają w skali Mohsa wartość większą od 10 punktów, ale dokładnie jej nie obliczono, pierwotny kawałek węgla został bowiem tak skompresowany, że powstały hiperdiament jest bardzo mały. Mówimy tu o kilku milionowych grama.

Nie musimy jednak używać węgla jako materiału wyjściowego. Dan Frost z Bawarskiego Instytutu Geologicznego w Niemczech zdołał wytworzyć diament przez skompresowanie masła orzechowego²³, a mająca swoją siedzibę w amerykańskim stanie Illinois firma LifeGem może wyprodukować sztuczne diamenty, kompresując prochy zmarłej ukochanej osoby. O ile ma się do dyspozycji węgiel, można nadać mu formę kryształu.

Fakt, że węgiel kamienny, diament i hiperdiament są zbudowane z tego samego pierwiastka (nazywamy je „odmianami alotropowymi węgla”), lecz mają odmienne właściwości, sugeruje, iż pierwiastki mogą się organizować na różne sposoby.

Żeby wyjaśnić to zjawisko, weźmiemy pod lupę twierdzenie, że coś przypomina diament lub jest „nie do przecięcia”. W starożytnej grece coś, czego nie da się rozciąć, określano słowem, które prawdopodobnie już znasz: *atom*.

CZŁOWIEK, KTÓRY OKAZAŁ SIĘ BOGIEM

Wyobraź sobie, że trzymasz między opuszkami palców ziarno piasku. Trudno gołym okiem rozróżnić szczegóły, ale na zdrowy rozum ziarno ma dwie połowy: lewą i prawą półkulę. Możesz sobie wyobrazić nóż na tyle mały, by mógł rozciąć ziarno przez środek i podzielić je na dwie części. Następnie, gdy już masz połówki ziarna, możesz powtórzyć ten proces i dzielić je na ćwiartki, i tak dalej. Teoretycznie można to robić w nieskończoność. Bez względu na to, jak mały jest fragment ziarna piasku, zawsze można powiększyć obraz i znowu podzielić ów kawałek na połowy.

Alternatywne przypuszczenie nie miało by sensu. Wyobraź sobie rozcięcie ziarna piasku na kawałki tak małe, że nie mają już lewej i prawej połowy. Każdy kawałek jest tak drobny, że nie ma żadnych stron i po prostu jest. W przypadku takiego obiektu już samo pojęcie dzielenia go na dwoje jest pozbawione znaczenia. Przypominałoby to próby wykonania na kalkulatorze dzielenia przez dwa i odpowiedzi kalkulatora: „Niestety, osiągnięto najmniejszą wartość, dalsze dzielenie niewykonalne”. Trzeba być szaleńcem, żeby sugerować istnienie najmniejszego obiektu. Dokładnie jak Demokryt.

Demokryt był pogodnym filozofem żyjącym w V wieku p.n.e., bardzo poważnie traktującym ideę substancji elementarnych. Uważał, że wszystko składa się z mikroskopijnych, niepodzielnych kawałków (atomów), łączących się i tworzących otaczający nas świat.

Powiedzmy, że masz torebkę czekoladek M&M's. Każdy zdrowy na umyśle człowiek, zamiast zjadać je garściami zawierającymi mieszaninę czekoladek różnych kolorów, dzieli je na stosiki według barw i zjada po kolei. Nie ufaj nikomu, kto robi inaczej.

Takie rozdzielanie mieszaniny w celu uzyskania czystości jest właśnie tym, co naprawdę robimy, gdy rozkładamy jakąś substancję na pierwiastki – grupujemy atomy według typu. To wyjaśniałoby również pochodzenie odmian alotropowych. Diament, węgiel kamienny i hiperdiament mogą składać się z atomów węgla, różniących się sposobem ułożenia i organizacji, co prowadzi do powstania odmiennych właściwości.

Jak gdyby hipoteza atomowa nie była pomysłem dostatecznie dziwnym, w późniejszym okresie Arystoteles wykorzystywał ideę Demokryta, żeby dowieść istnienia Boga. Ponieważ atomy pozostają

w bezustannym ruchu, odbijają się od siebie i mkną przez otaczającą je próżnię, ruch każdego atomu da się śledzić wstecz, aż do zderzenia z poprzednim atomem, którego ruch można tłumaczyć efektami jeszcze wcześniejszego zderzenia z innym. Przyczyna prowadzi do skutku, a każdy skutek ma poprzedzającą go przyczynę. Jeśli cofniemy się dostatecznie daleko, musimy się natknąć na pierwszy ruch, który spowodował wszystko, lecz sam nie miał przyczyny. Takie zjawisko (przyczyna bez przyczyny) wykraczałoby poza przyjęte prawa przyrody, lecz mogłoby nadal wywierać na nie wpływ. Innymi słowy, mamy Boga²⁴. Pojmuj to, jak chcesz.

PAN MOKRADEŁ

Niestety, hipoteza atomowa Demokryta została razem z wieloma innymi wielkimi ideami odłożona na półkę, gdy panowanie nad życiem intelektualnym Europy przejęło Święte Cesarstwo Rzymskie. Dopiero pod koniec XVIII wieku atomy wróciły do łask dzięki pracom angielskiego naukowca Johna Daltona.

Większość dwunastolatków w Anglii zaznajamia się z rolą ucznia liceum. John Dalton zaś uczył w jednym z nich. Ten syn tkacza samodzielnie nauczył się podstaw nauk ścisłych, matematyki, angielskiego, łaciny, greki i francuskiego, a pod koniec wieku nastoletniego uzyskał stanowisko dyrektora szkoły²⁵.

Nie daj się jednak nabrać. Dalton, choć był wybitnym naukowcem, umiał się dobrze zabawić i jak każdy młodzik spędzał wolne chwile na zbieraniu próbek gazu bagiennego z miejscowych mokradeł. Co zaskakujące, nigdy się nie ożenił.

Podczas spalania próbek gazu Dalton dowiedział się, że gazy nie reagują ze sobą jak popadnie, tylko łączą się w określonych proporcjach. Na przykład wodór i tlen zawsze łączą się jako mieszanina w stosunku dwa do jednego i w żadnym innym. Jeśli ma się trzykrotnie więcej wodoru niż tlenu, na zakończenie reakcji pozostanie jedna trzecia ilości wodoru. To tak, jak gdyby w reakcję wchodziła tylko ograniczona liczba „kawałków” tlenu.

Dalton uznał, że najlepszym sposobem wyjaśnienia tych odkryć jest założenie, iż każdy gazowy pierwiastek składa się z drobnych cząstek. Dzięki swojej biegłości w grece znał prace Demokryta i zaczął nazywać owe cząstki atomami.

Jego idea jednak nie zyskała powszechnej akceptacji. Dalton miał zwyczaj nadmiernego komplikowania omawianych zagadnień, a jego opublikowaną w 1808 roku książkę, w której uczony przedstawił hipotezę atomową, uznano za nader trudną lekturę²⁶. Jego idee były rygorystycznie opracowane, lecz wyjaśniał je w nudnym stylu, dlatego chemia w jego ujęciu jawiła się jako nauka męcząca i zawiła.

Niemniej Dalton cieszył się wielkim szacunkiem i w końcu dostąpił szacunku: przedstawiono go królowi Wielkiej Brytanii Wilhelmowi IV Hanowerskiemu. A to zaowocowało największym faux pas w jego karierze, ponieważ Dalton jako kwakier nie mógł nosić szkarłatnego stroju, wymaganego podczas audjencji u króla. Dalton nie odróżniał kolorów (nawiasem mówiąc, był pierwszą osobą, która udokumentowała istnienie tej wady wzroku), a organizatorzy uroczystości „zapomnieli” go poinformować, że ma na sobie szaty w kolorze, którym obraziły swoich kwakerskich współwyznawców²⁷.

Tak więc Dalton paradował przed innymi kwakrami w najbardziej oburzającym stroju, jaki mogli sobie wyobrazić. Był to bardzo niefortunny zbieg okoliczności – nieodróżnianie kolorów, przynależność do kwaków i publiczne wystąpienie w szkarłatnym stroju. Prawdopodobnie w jakimś ciemnym zakątku czyścica rozległ się wówczas donośny chichot Carla Scheelego.

POD CIŚNIENIEM

Prawdziwy przełom dotyczący hipotezy atomowej nastąpił w 1899 roku, kiedy francuski fizyk Émile Amagat rozpoczął eksperymenty z komorami ciśnieniowymi. Uczony spędził młode lata na

doświadczeniach, podczas których opuszczał próbki gazów w głąb szybów kopalnianych, żeby zmierzyć, w jakim stopniu ulegają kompresji, a w wieku dorosłym zaprojektował zaawansowaną maszynę sprężającą gazy do ciśnienia trzy tysiące razy większego niż ciśnienie atmosferyczne.

W toku tych eksperymentów Amagat odkrył, że gaz da się sprężyć do pewnej granicy. Po przekroczeniu pewnego punktu stawiał opór i nie chciał dalej zmniejszać objętości²⁸.

To zjawisko dawało się wyjaśnić hipotezą zakładającą istnienie nieskończenie małych cząstek. Jeśli materia rzeczywiście składa się z nieskończenie małych „porcji”, to każdy gaz zawiera pomiędzy nimi również nieskończoną liczbę wolnych przestrzeni. Bez względu na to, do jak małej objętości spręży się gaz, zawsze pozostanie dość miejsca, które może zająć materia. Fizyk Robert Boyle, syn hrabiego Cork, prowadził doświadczenia nad sprężaniem gazów i twierdził, że właśnie z tego powodu można sprężyć gaz w nieskończoność. Badania Amagata wykazały jednak coś innego. Gaz zawierał stałą ilość materii, a to oznaczało, że prawdopodobnie nie składa się z nieskończonej liczby mniejszych „kawałków”.

Amagat wykorzystał odkrycia dokonane przez Daltona przy badaniu gazu bagiennego i sformułował ideę atomową, mniej przypominającą hipotezę, a bardziej teorię, czyli mającą dowody przemawiające za jej słusznością. Był jednak pewien wielki problem lub raczej problem bardzo mały. Żeby zrozumieć prace Amagata, trzeba przyjąć, że atomy są maleńkie. Niewyobrażalnie.

Wyobraź sobie, że obserwujesz Ziemię z kosmosu i próbujesz dostrzec na jej powierzchni pojedyncze winogrono. To odpowiada spoglądaniu na winogrono i próbie dostrzeżenia w jego skórcie pojedynczego atomu. Jeśli atomy miały rzeczywiście istnieć, musiałyby być tak małe, że nawet fale światła widzialnego byłyby zbyt wielkie, by się od nich odbić. Atomy z samej swej natury byłyby niedostrzegalne, bez względu na siłę powiększenia mikroskopu.

Praca naukowców polega na testowaniu teorii po ich opracowaniu, ale jak tu przetestować taką jak ta? Jak zobaczyć to, co niewidzialne?

EINSTEIN TU BYŁ

Albert Einstein za życia stał się legendą. Jeszcze bardziej imponuje zaś to, że w pełni zasłużył sobie na swoją sławę. Jako autor przeszło trzystu artykułów naukowych, który w zasadzie stworzył obraz współczesnej fizyki, Einstein był uosobieniem geniuszu.

Nie sposób streścić jego licznych osiągnięć w kilku akapitach, skupimy się zatem na jednym, najbardziej związanym z chemią: opublikowanym 18 lipca 1905 roku artykule, którym sprawił, że hipoteza atomowa stała się możliwa do sprawdzenia, a nie tylko spekulatywna.

W okresie, kiedy Einstein pracował w szwajcarskim urzędzie patentowym, natknął się na opis badań przeprowadzonych w 1827 roku przez szkockiego botanika Roberta Browna. Brown zauważył, że unoszące się na wodzie ziarna pyłku poruszają się, jak się wydawało, według przypadkowych wzorców. Pierwotnie badacz założył, że przyczyną jest to, iż ziarna żyją, ale stwierdził, iż to samo zjawisko dotyczy również piasku i kurzu. Zostało ono nazwane ruchami Browna i, choć niewyjaśnione, pozostało jedynie ciekawostką.

Einstein postanowił nakreślić trajektorię ruchu pyłku w wodzie; stwierdził przy tym, że ów ruch można wytłumaczyć jedynie jako rezultat bombardowania ziaren cząsteczkami wody. Żeby dokładnie opisać ruchy pyłku, należy uwzględnić tarcie ziaren o wodę, co oznacza, że trzeba zaakceptować istnienie „wodnych atomów”.

Pomimo plotek, że Albert Einstein nie radził sobie w szkole z matematyką, był on matematykiem par excellence, opracował zatem równanie odzwierciedlające związek temperatury wody z prawdopodobnym ruchem ziaren pyłku. Wprowadził równanie z możliwym do zmierzenia wynikiem, czym całkowicie zmienił reguły naukowej gry. Można poddać dyskusji ideę, ale nie wartość liczbową, więc jeśli da się przewidzieć w ramach hipotezy określoną liczbę, to ma się coś, czego można realnie poszukiwać.

Einstein zakończył swój artykuł zdaniem: „Należy mieć nadzieję, że jakiemuś badaczowi może wkrótce uda się rozwiązać przedstawiony tu problem”²⁹. Jak to zwykle bywało z pracami Einsteina, jego równanie szybko sprawdzono, a jego słuszność potwierdzono. Zygakowaty ruch wcale nie był dziełem przypadku, lecz rezultatem drobnych fluktuacji przepływu wody po obu stronach ziarna.

Wyglądało to tak, jak gdyby ziarno pyłku bezustannie wchodziło w zderzenia, ponieważ rzeczywiście tak było.

Swoim odkryciem Einstein uczynił dla hipotezy atomowej to, co Lavoisier dla pierwiastków – dostarczył niepodważalnego dowodu ilościowego. Nie dało się już prowadzić sensownej dyskusji o pierwiastkach bez uwzględnienia atomów i na odwrót. Spór był teraz jałowy. Okazało się, że atomy rzeczywiście istnieją.

-
- 21 *Jądro Ziemi* (2003), reż. J. Amiel.
- 22 Irifune T. et al., *Ultrahard polycrystalline diamond from graphite*, „Nature”, nr 421 (2003), s. 599–600.
- 23 Robson D., *How to make a diamond from scratch with peanut butter*, BBC (7.11.2014). Dostępne na stronie: <http://www.bbc.com/future/story/20141106-the-man-who-makes-diamonds> (dostęp: 18.08.2017).
- 24 Russell B., *Dzieje filozofii Zachodu i jej związki z rzeczywistością polityczno-społeczną od czasów najdawniejszych do dnia dzisiejszego*, przekł. T. Baszniak, A. Lipszyc, M. Szczubiałka, Fundacja Aletheia, Warszawa 2000.
- 25 Hurd D., Kipling J., *The Origins and Growth of Physical Science*, Penguin, Londyn 1958.
- 26 Dalton J., *A New System of Chemical Philosophy*, R. Bickerstaff, Londyn 1808.
- 27 Masterson W.L., Hurley C.N., *Chemistry: Principles and Reactions*, Cengage Learning, Boston 2012.
- 28 Harré R., *Wielkie eksperymenty naukowe*, przekł. J. Kuryłowicz, Wiedza Powszechna, Warszawa 1991.
- 29 Einstein A., *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*, „Annalen der Physik”, nr 322 (1905), s. 549–560.

Rozdział trzeci

Karabin maszynowy i pudding

NAJKRÓTSZY FILM W DZIEJACH

W 1989 roku naukowcy z IBM poszerzyli granice reklamy, gdy stworzyli rzeźbę logotypu firmy przy użyciu zaledwie trzydziestu pięciu atomów. W 2013 roku poszli jeszcze dalej i stworzyli sześćdziesięciosiekundowy film *A Boy and His Atom* (Chłopiec i jego atom), za pomocą atomów narysowali obrazy i połączyli je metodą animacji poklatkowej, czym ustanowili światowy rekord Guinnessa w kategorii najkrótszego filmu nakręconego tą metodą.

Badacze z IBM, wykonując setki zdjęć w różnych pozycjach i odtwarzając je z dużą prędkością, mogli przedstawić historyjkę o patykowatej postaci bawiącej się małym atomem. Była to niełatwa sztuka, jako że z poprzedniego rozdziału dowiedzieliśmy się, iż atomy są za małe, by można było je zobaczyć.

Filmowa sztuczka polega na tym, że każda fotografia atomowych modeli w gruncie rzeczy nie jest fotografią. Zdjęcia są obrazami uzyskanymi za pomocą skaningowego mikroskopu tunelowego (ang. scanning tunnelling microscope, STM), urządzenia umożliwiającego nam obserwację z odległości mniejszej niż za pomocą światła widzialnego.

Wyobraź sobie, że stoisz obok ciemnego szybu i przerucasz kamień przez jego krawędź. Jeśli zmierzysz czas, jaki zajęło mu dolecenie do dna, możesz obliczyć głębokość szybu, choć nie możesz dojrzeć dna. Na podobnej zasadzie działa STM.

Końcówką roboczą STM nie jest soczewka, tylko cienka dysza, do której zakończenia przytwierdzone są drobne cząstki. Są one z nią luźno związane, więc po przepuszczeniu przez dyszę prądu elektrycznego oddzielają się i spadają na znajdującą się pod nimi powierzchnię. Kiedy opadają, wytracają część energii, którą STM może mierzyć, aby obliczyć, jak daleko znajduje się powierzchnia. Kiedy prowadzi się dyszę tam i z powrotem ponad całym obiektem, wszelkie wypukłości i zagłębienia powierzchni odpowiadają różnym ilościom traconej energii cząstek, co umożliwia pośrednie sporządzenie za pomocą STM mapy wyglądu danego obiektu.

Tworzenie filmu *A Boy and His Atom* wyglądało następująco: wzięto płaski arkusz miedzi i wiązano z nim w określonych miejscach cząsteczki tlenu węgla. Mikroskop podczas skanowania miedzianego podłoża wykrywał owe cząsteczki jak kropki napisu alfabetem Braille'a i tworzył w komputerze odpowiadający im obraz²⁰.

To nowatorska idea, ale jak to możliwe? Żeby móc wykryć kontur atomu, nasz STM musiałby przecież zrzucić cząstki jeszcze mniejsze od atomów. Gdzie możemy znaleźć cząstki tak drobne?

Na przełomie XIX i XX wieku głównym dążeniem każdego poważnego fizyka była próba zrozumienia elektryczności. Rozważano dwie wiodące dziewiętnastowieczne hipotezy, a każdą z nich wspierały największe postacie tej dziedziny nauki. Jeden narożnik zajmował Hermann von Helmholtz, zagorzały wyznawca idei cząstek. Argumentował on, że skoro na przykład łuk elektryczny rzuca cień, to musi być zbudowany z materii – elektrycznych atomów. Przeciwnikom przewodził jego student Heinrich Hertz, który wolał tłumaczyć różne sprawy działaniem niewidzialnych pól siłowych. Wykazawszy niedawno, że można zakrzywić bieg prądu elektrycznego za pomocą pola magnetycznego, Hertz twierdził, iż elektryczność również musi być jakimś zakłóceniem pola elektrycznego³¹.

Helmholtz i Hertz toczyli ze sobą namiętny spór, chociaż do końca życia pozostali dobrymi przyjaciółmi. Niestety, obaj zmarli w 1894 roku, krótko przed ostatecznym rozstrzygnięciem dylematu przez błyskotliwego brytyjskiego fizyka Josepha Johna Thomsona. Okazało się, że rację miał Helmholtz.

J.J. Thomson według wszystkich relacji był cudownym dzieckiem nauki. Został przyjęty na uniwersytet w Manchesterze jako czternastolatek, później zaś otrzymał nominację na stanowisko profesora fizyki eksperymentalnej pracowni Cavendisha, na którym zastąpił lorda Rayleigh.

Szczegóły doświadczeń Thomsona nad elektrycznością to wyższa matematyka, ale ich przesłanka jest prosta. Trzeba napełnić niewielką komorę gazem, a do przedniej i tylnej jej części podłączyć dwa końce obwodu elektrycznego. Po przyłożeniu dużego napięcia można wytworzyć płynący przez gaz strumień elektryczności i manipulować jego zachowaniem za pomocą umieszczonych w pewnych miejscach magnesów.

Dzięki przeprowadzeniu różnorodnych badań nad tym zagadnieniem Thomson poczynił kilka kluczowych obserwacji. Z najważniejszej z nich wynikało, że przepływ elektryczności odbywał się powoli. Wysunięta przez Herta hipoteza pola zakładała, że prąd elektryczny biegnie z prędkością światła, ale pomiary Thomsona dowiodły, że w porównaniu z tą prędkością prąd płynie praktycznie ślamazarnie. To znaczyło, że elektryczność ma masę, a zatem składa się z cząstek.

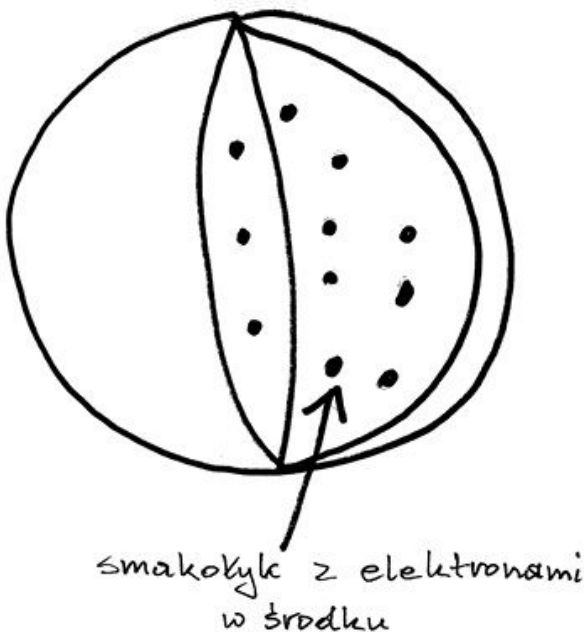
Irlandzki naukowiec George Stoney nazwał te cząstki elektronami od greckiego słowa *elektron* oznaczającego bursztyn (który po potarciu wytwarzał wyładowania elektryczności statycznej) i ta nazwa się przyjęła. Tyle tylko że elektrony wybitnie różniły się od innych cząstek. Po pierwsze, odkryte przez Daltona i Einsteina atomy były dwa tysiące razy większe. Faktycznie można było strzelać strumieniem elektronów przez litą płytkę żelazną, gdyż elektrony najwyraźniej potrafiły wpaść między atomy i przeniknąć na drugą stronę.

Ponadto normalne atomy chętnie się do siebie zbliżają, natomiast elektrony czynnie się odpychają. Ich „odpychającą” właściwość nazwano ładunkiem, ale – szczerze mówiąc – nadal pozostaje ona tajemnicą. Potrafimy mierzyć wpływ ładunku i opisać mechanizm sprawiający, że jeden elektron odpycha inny, ale przyczyny posiadania przez elektrony ładunku jeszcze nie rozumiemy.

Dla Thomsona jednak bardziej palącą kwestią było pytanie, skąd elektrony się biorą. Ogniwa składały się ze zwykłych atomów (większych i masywniejszych), zatem elektrony musiały jakoś się w nich kryć. Najwyraźniej atomy nie były jednak najmniejszymi strukturami, zawierały bowiem elektrony.

Dlaczego więc atomy nie miały tej właściwości – ładunku? Skoro zawarte w nich elektrony odpychały się, jak dwa atomy mogły się do siebie zbliżyć, a nawet wiązać ze sobą?

Thomson doszedł do wniosku, że atomy muszą zawierać dodatkową substancję obdarzoną antyładunkiem, który znosi ładunek elektronu i nadaje atomom pozór obojętności. Uczony wysunął hipotezę, że elektrony gnieźdzą się w czymś w rodzaju atomowej gąbki. Można zatem odkroić sobie kawałek atomu i ujrzeć się elektrony rozmieszczone niczym rodzyнки w bożonarodzeniowym puddingu. Mniej więcej tak:



Elektrony i ciasto są obdarzone przeciwnymi i przyciągającymi się ładunkami, co wyjaśnia przyczynę, dla której trzeba się tak natrudzić, żeby wydobyć elektryczność z atomu – trzeba bowiem wykroić elektrony z uzupełniającego je ciasta.

Model atomu Thomsona zyskał sobie zatem chwytliwą nazwę „hipotezy ciasta z rodzynkami”.

DLACZEGO WARTO BYĆ SUMIENNYM ERNESTEM³²

Do czasu opublikowania przez Thomsona wyników jego prac nazwa „atom” już się przyjęła, a szkoda, wiadomo bowiem, że jest myląca. To, co nazywamy atomami, wcale nie jest niepodzielne ani najmniejsze. Są to po prostu stabilne struktury, które nie lubią, gdy się je rozdziela.

Elektrony zaś były prawdziwymi cząstkami niepodzielnymi, zawieszonymi – jak to sobie wyobrażał Thomson – w cieście obdarzonym przeciwnym ładunkiem. Postęp w nauce dokonuje się jednak poprzez obalanie hipotez, a nie ich udowadnianie, tak więc ideę puddingu z rodzynkami ostatecznie rozniósł w strzępy student Thomsona – Ernest Rutherford.

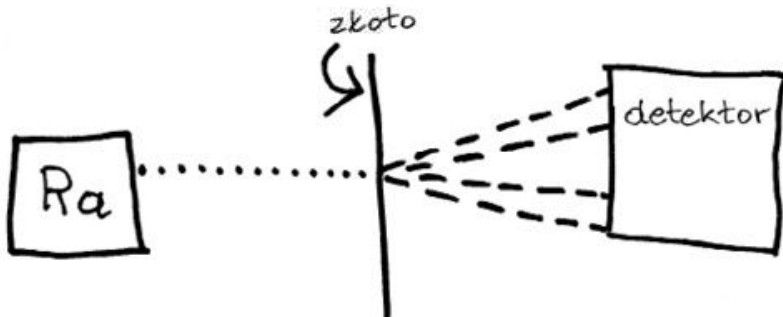
Rutherford, który dorastał na owczej farmie w Nowej Zelandii, słynął z tego, że odrzucił kosztowne instrumenty naukowe i przeprowadzał dość groteskowe doświadczenia, ponieważ nikt inny się nimi nie zajmował. Jego nieortodoksyjne podejście przyniosło mu jednak w 1908 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii, naukowcy woleli zatem, by z niego nie zrezygnował. Nagrodę zdobył za odkrycie, że większe atomy mogą wyrzucać z siebie małe fragmenty, które nazwał cząstkami alfa, o wiele cięższe od elektronów i obdarzone przeciwnym do nich ładunkiem. Rutherford założył, że dzieje się tak dlatego, iż atomowe ciasto odpycha samo siebie i kiedy atomy są duże, zwiększa się ryzyko niestabilności, która ostatecznie prowadzi do eksplozji. Odkryte przez niego cząstki alfa uważano za kawałki atomowego ciasta, wyrzucone przez mikrowybuchy³³.

Większość ludzi przyjęłaby Nagrodę Nobla i ruszyła w dalszą życiową drogę, ale Rutherford był naukowcem do szpiku kości. Chciał położyć własną hipotezę na katowskim pniu – sprawdzić, czy zdoła

ją obalić. Zatrudnił zatem najlepszego eksperymentatora na świecie, Hansa Geigera, i wspólnie opracowali metodę sondowania wnętrza atomu. Odkryli, że cząstki alfa przy uderzeniu w kawałek siarczku cynku (ZnS) wywołują drobne rozbłyśki światła, spędzali zatem niezliczone godziny w ciemnych pracowniach, bombardując ZnS cząstkami alfa i wypatrując rozbłyków przez szkła powiększające. Było to zajęcie nieznośnie nudne, więc Geiger skonstruował licznik elektroniczny, automatycznie wykrywający zderzenia. Wynalazł w ten sposób trzeszczący licznik Geigera, rekwizyt wykorzystywany od tamtego czasu w tysiącach filmów szpiegowskich.

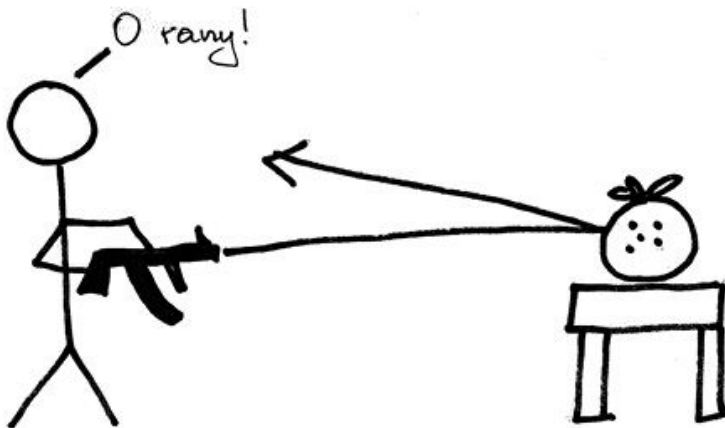
Pewnego ranka w 1909 roku Geiger przyszedł do Rutherforda, żeby pomówić o jednym z obiecujących studentów, Erneście Marsdenie. Marsden miał zaledwie dwadzieścia lat, ale już zyskał sławę badacza obdarzonego wyjątkową biegłością w pracach laboratoryjnych. Geiger chciał przydzielić mu jakieś zadanie, więc Rutherford w typowym dla siebie, zwariowanym stylu wpadł na osobliwy pomysł: „Każemy mu sprawdzić, czy cząstki alfa, przepuszczane podczas eksperymentów przez folię ze złota, ulegają rozproszeniu z dużym kątem rozrzutu”³⁴.

Eksperymenty ze złotą folią zaprojektowano kilka lat wcześniej. Jeśli wzięto się kawałek radu (metal uiotającego duże ilości cząstek alfa) i nakierowało go na cienką folię, można było strzelać cząstkami alfa prosto przez nią. A jeśli po drugiej stronie umieściło się detektor, można było mierzyć stopień, w jakim folia wpływała na tor lotu cząstek, to zaś dostarczało wskazówek co do gęstości atomowego ciasta. Najlepiej nadającym się do tego metalem było złoto, dające się rozciągnąć do postaci listka o grubości zaledwie kilku atomów. Plan wyglądał mniej więcej tak:



Z jakiegoś powodu Rutherford chciał, żeby Geiger i Marsden umieszczali detektor raczej pod dużym kątem względem folii niż bezpośrednio po drugiej stronie. Geiger musiał być zdumiony, gdyż uważał, że detektor na pewno niczego nie odczyta, ale ze względu na reputację Rutherforda (którą prawdopodobnie wspierał również medal Nagrody Nobla na jego biurku) tylko wzruszył ramionami i kazał Marsdenowi przystąpić do pracy. Już następnego dnia okazało się, że ekscentryczność Rutherforda przyniosła owoce.

Detektor zaczął wykrywać rozpraszane cząstki alfa, nawet kiedy przesunięto go na tę samą stronę folii, co źródło cząstek. Tego nie dało się wytłumaczyć hipotezą ciasta z rodzynkami, bo niby jak cząstka alfa mogła się odbić od ciasta? Przypominałoby to skierowanie ognia z karabinu maszynowego na prawdziwe ciasto z rodzynkami i odbijanie się pocisków od celu prosto w twarz strzelającego. Strzelec mógł się spodziewać, że kule przebiją ciasto i utkwią w przeciwległej ścianie, a tu nie może pojąć, dlaczego znalazł się w szpitalu. I jak niby ma to wyjaśnić pielęgniarce z izby przyjęć?



Rutherford opisał to podobnymi słowami: „To najbardziej niewiarygodne zdarzenie, jakie kiedykolwiek przydarzyło mi się w życiu. Prawie tak niewiarygodne, jak gdyby ktoś odpałił pocisk z działa piętnastocalowego kalibru w kawałek bibułki, a pocisk zawrócił i trafił w niego”³⁵.

Wyniki zostały opublikowane w lutym 1910 roku, a przez następny rok Rutherford przeprowadzał obliczenia. Rezultaty mogły mieć tylko jedno wyjaśnienie. Atom nie był w całości miękką gąbką, tylko zawierał twarde grudki, od których mogły się odbijać pociski. Ciasto z rodzynkami najwyraźniej zawierało też orzechy.

Owe orzechy najprawdopodobniej były małe i skupione w atomie w jednym miejscu, gdyż na tysiąc pocisków wykrywało się tylko kilka rykoszetów. Sensownie brzmiał również pomysł, że są one obdarzone tym samym ładunkiem, co cząstki alfa, gdyż te po zderzeniach ulegały rozproszeniu, nie mówiąc już o tym, iż ładunek utrzymywał na swoim miejscu elektrony.

Rutherford nazwał to skupisko cząstek jądrem od łacińskiego słowa *nucleus*, oznaczającego orzech; wysunął też hipotezę, że elektrony krążą wokół jądra niczym planety wokół Słońca. Thomsonowską ideę ciasta z rodzynkami należało porzucić. Była zmyślna, lecz nie miała dowodów trafności, a w nauce brak dowodów oznacza brak teorii.

CHCE PAN ŚWIROWAĆ? TO POŚWIRUJMY!

Czy Rutherford, sugerując przesuwanie detektora, kierował się jakimś przecuciem w kwestii jądra, czy po prostu się wygłupiał? A może usiłował wymyślić Marsdenowi zadanie i w pierwszej chwili tylko to przyszło mu do głowy?

Osobiście lubię wyobrazić sobie, jak Marsden ustawia detektor po niewłaściwej stronie w ramach ponurej chęci pokazania Rutherfordowi środkowego palca. Ten wielki człowiek dał mu do wykonania głupie zadanie. A więc życzy pan sobie zbadania szerokich kątów rozrzutu? No, to co pan powie na ustawienie detektora po niewłaściwej stronie folii? Dostatecznie szeroko jak dla pana, Rutherford?

Prawdopodobnie nigdy się tego nie dowiemy, ale cokolwiek zaszło w tamtej pracowni i jakiegokolwiek myśli kłębiły się w umysłach tych trzech panów, rezultaty owych wydarzeń stały się częścią naukowej tradycji.

Pozostało jednak pewne nurtujące pytanie, domagające się odpowiedzi. Zgodnie z ideą Rutherforda jądro miało zawierać cząstki o ładunku przeciwnym do posiadanego przez elektron, lecz skoro tak, dlaczego nie rozsadało samo siebie? Cząstki o identycznym ładunku odpychają się, zatem jądro

w ogóle nie powinno istnieć. Odpowiedź odkrył w 1932 roku kolejny student Rutherforda, James Chadwick.

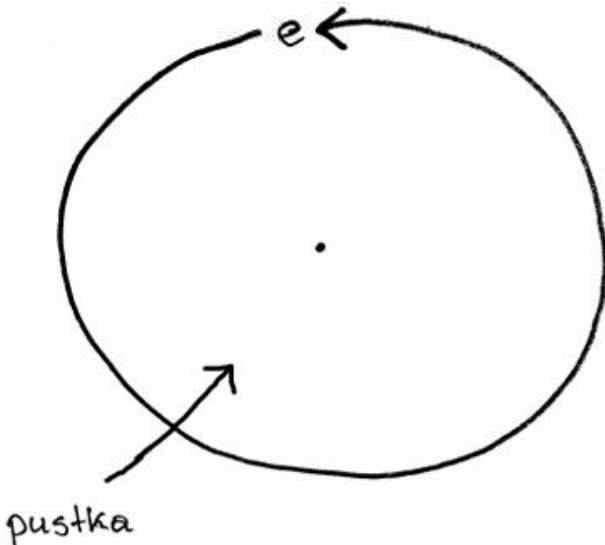
Chadwick wykorzystał kawałek polonu, znanego źródła wyrzucającego cząstki alfa, i bombardował nimi grudkę metalicznego berylu, a po drugiej stronie położył kawałek wosku, żeby amortyzować zderzenia. Za każdym razem, kiedy polon emitował cząstkę, po drugiej stronie grudki berylu coś wylatywało z jej wnętrza, jak gdyby w jądrach atomowych zderzały się ze sobą kule bilardowe. Owe wyrzucane cząstki miały dużą masę, ale nie odpychały się, co znaczyło, że posiadają ładunek obojętny. Musiały też odznaczać się jakąś właściwością przypominającą klej, utrzymującą razem naładowane cząstki z siłą przewyższającą ich wzajemne odpychanie.

Najwyraźniej „orzech” atomu składał się z dwóch typów cząstek: neutronów (cząstek o ładunku obojętnym) obdarzonych właściwością przypominającą klej oraz naładowanych protonów (nazwanych tak od greckiego słowa oznaczającego „pierwszy”), które utrzymywały elektrony na swoich miejscach. Odkrycia Rutherforda rozwijali w swoich badaniach Niels Bohr, Werner Heisenberg i Oskar Klein, co ostatecznie doprowadziło do opracowania powszechnie znanego obrazu atomu.

Atomy przypominały Układ Słoneczny. Protony i neutrony tworzyły znajdujące się w centrum jądro, obdarzone zaś przeciwnym ładunkiem elektrony mknęły wokół niego na krawędzi atomu, a między nimi najwyraźniej nie było nic.

Jeśli wyobrazisz sobie atom powiększony do rozmiarów stadionu piłkarskiego, elektron przybrałby wielkość drobiniki kurzu, a protony i neutrony, zbite w ciasną grupkę w jądrze, przypominałyby w przybliżeniu wielkością piłkę do golfa, unoszącą się w środku tej przestrzeni.

Najdziwniejszym wynikającym z tego wnioskiem był fakt, że w atomie przeważa pusta przestrzeń. Nawet osm, pierwiastek o największej gęstości, najwyraźniej w 99 procentach składa się z niczego. Podobnie jak i ty.



UKRYTE PIERWIASTKI

W filmie o Supermanie *Człowiek ze stali* statek kosmiczny, którym Kal-El przybył na Ziemię, został przeanalizowany przez chemików. Naukowcy stwierdzili, że jest on zbudowany z pierwiastków

niepasujących do układu okresowego³⁶. Układ okresowy zawiera wszystkie znane pierwiastki, zatem mieszkańcy planety Krypton bez wątpienia mieli u siebie do dyspozycji pierwiastki nam nieznane.

Idea ukrytych pierwiastków to kuszący pomysł, którym przez całe dekady przerzucali się autorzy opowieści fantastycznych. W opowiadaniu H.P. Lovecrafta *Sny w domu więdźmy* bohater znajduje posążek zbudowany z pierwiastka, którego żaden naukowiec nie potrafi zidentyfikować³⁷. Lovecrafta zainspirował wykład z fizyki, którego wysłuchał w roku odkrycia neutronu, ale czy takie rzeczy naprawdę mogłyby istnieć? Czy gdzieś w nieznanach zakątkach Wszechświata mogą kryć się egzotyczne pierwiastki?

Nie żebym chciał burzyć wizje autorów owych fantastycznych opowieści, ale odpowiedź brzmi: nie. Nie może być ukrytych pierwiastków z prostej przyczyny: atomy nie mają charakteru atomowego. Tak, tak, odgaduję rodzące się w twojej głowie pytanie: o co, do cholery, chodzi?

Słowo „atom” oczywiście miało oznaczać coś niepodzielnego, ale najlepiej do tego opisu pasują elektrony, protony i neutrony. Nazwa „atom” jednak się przyjęła, więc wciąż jej używamy, choć określeniem bardziej precyzyjnym byłyby termin „superstruktura złożona z elektronów, protonów i neutronów”.

Na zdrowy rozum atom najmniejszy z możliwych zawierałby jeden proton (i jeden elektron, ponieważ ładunki zawsze się znoszą). Tak przedstawiałby się pierwiastek nr 1, którym okazał się odkryty przez Cavendisha wybuchowy gaz – wodór.

Następny pierwiastek miałby dwa protony (oraz kilka spajających je ze sobą neutronów). Ten z kolei okazał się helem. Nie mógłby istnieć pomiędzy nimi pierwiastek o liczbie atomowej 1,5, ponieważ nie ma czegoś takiego jak połowa protonu (patrz dodatek II).

Skoro mamy listę wszystkich pierwiastków, zyskujemy pewność, że żaden nie został pominięty, ponieważ natura może tworzyć wyłącznie atomy o pełnych liczbach atomowych. Pierwiastki znajdujące się na Ziemi są tymi samymi, które występują wszędzie indziej we Wszechświecie. Tam właśnie wybierzemy się w następnym rozdziale.

Przykro mi, Supermanie, ale pański statek kosmiczny nie może istnieć. Co ciekawe, kryptonit jednak jest prawdziwy³⁸. Taką nazwę nosi odkryty w 2007 roku w serbskiej kopalni minerał o wzorze chemicznym $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})\text{F}_2$.

[30](http://www.research.ibm.com/articles/madewithatoms.shtml) *A Boy and His Atom: The World's Smallest Movie*, IBM Research. Dostępny na stronie: <http://www.research.ibm.com/articles/madewithatoms.shtml> (dostęp: 18.08.2017).

[31](#) Whittaker E.T., *A History of Theories of the Aether and Electricity*, Longman, Green & Co, Harlow 1951.

[32](#) W oryginale gra słów, opierająca się na podobieństwie wymowy imienia Ernest oraz przymiotnika *earnest*, czyli „sumienny” lub „poważny” (przyp. tłum.).

[33](#) Rutherford E., *Nobel Lectures: Chemistry 1901–1921*, Elsevier Publishing, Amsterdam 1966.

[34](#) Von Bayer H.C., *Taming the Atom: The Emergence of the Visible Microworld*, Random House, Nowy Jork 1992.

[35](#) Chabay R.W., Sherwood B.A., *Matter & Interactions*, wyd. III, Wiley, Hoboken 2002.

[36](#) *Człowiek ze stali* (2013), reż. Z. Snyder.

[37](#) Lovecraft H.P., *Coś na progu*, przekł. R.P. Lipski, Zysk i S-ka, Poznań 1999.

[38](#) *Superman: powrót* (2006), reż. Bryan Singer; Whitfield P.S. *et al.*, *LiNaSiB₃O₇(OH) – novel structure of the new borosilicate mineral jadarite determined from laboratory powder diffraction data*, „Acta Crystallographica Section B”, r. 63, nr 3 (2007), s. 396–401.

Rozdział czwarty

Skąd się biorą atomy?

NAJZIMNIEJSZE MIEJSCE WE WSZECHŚWIECIE

Używaną przez nas na co dzień skalę temperatury opracował w 1742 roku Anders Celsjusz. Wziął temperaturę zamarzania i wrzenia słodkiej wody, przedział między nimi podzielił na sto części i nazwał je terminem pochodzącym od łacińskiego określenia „sto stopni”.

Pierwotny termometr Celsjusza definiował 100°C jako temperaturę zamarzania wody, a 0°C jako temperaturę jej wrzenia, ale po śmierci uczonego skalę odwrócono i nazwano na jego cześć jego nazwiskiem. Skalę Fahrenheita, powszechniej używaną w Stanach Zjednoczonych, opracował Daniel Fahrenheit, który jako punkty odniesienia skali wykorzystał temperaturę lodu powstałego z roztworu soli oraz ciepłość ludzkiego ciała.

Bez względu na to, której skali się używa, zachowanie cząstek jest identyczne: kiedy coś się podgrzewa, średnia prędkość ruchu cząstek wzrasta. Ponieważ w wyższej temperaturze cząstki stają się ruchliwsze, to również nam wyjaśnia, dlaczego gorętsze gazy zajmują więcej miejsca. I odwrotnie, jeśli cząstki stają się chłodniejsze, zajmują mniejszą objętość, gdyż stają się mniej ruchliwe. Gorętszy gaz = większa objętość. Chłodniejszy gaz = mniejsza objętość.

Ta prosta relacja między temperaturą a objętością nosi nazwę prawa Charles’a od nazwiska fizyka Jacques’a Charles’a, który je odkrył. Oczywiście ta relacja nie może jednak obowiązywać bez końca. Jeśli coraz bardziej ochładza się materiał, maleje również jego objętość, zatem ostatecznie powinno się dojść do temperatury, w której objętość maleje do zera. Prawo Charles’a sugeruje istnienie temperatury tak niskiej, że cząstki nie zajmowałyby w niej miejsca, co praktycznie powodowałoby ich nieistnienie. Wyraźnie widać, że osiągnięcie tej hipotetycznej temperatury jest niemożliwe, więc nazywamy ją „zerem absolutnym”, a jej obliczona wartość wynosi $-273,15^{\circ}\text{C}$. Jest to temperatura tak niska, że trzeba by złamać prawa fizyki, aby ją osiągnąć.

Jako najzimniejsze miejsce na Ziemi zwykle podaje się punkt na Antarktydzie w pobliżu kopuły lodowej Dome Argus, gdzie temperatura spada zimą do $-93,2^{\circ}\text{C}$ ³⁹. W pustce przestrzeni kosmicznej panuje średnia temperatura -270°C , a w obrębie mgławicy Bumerang wartość ta spada do -272°C , czyli o jeden stopień więcej, niż jest to fizycznie możliwe⁴⁰.

Jednakże rekord wszech czasów w kategorii najzimniejszych miejsc Wszechświata przypada miejscu znajdującemu się właśnie tu, na Ziemi, w pracowni Martina Zwierleina w amerykańskim stanie Massachusetts, gdzie jego zespół zdołał zsyntetyzować najzimniejszą substancję chemiczną, jaką kiedykolwiek stworzono, zwaną sodopotasem.

Kiedy dwa atomy tworzą wiązanie (patrz rozdział 8), zazwyczaj dodajemy przyrostek „-ek” do nazwy pierwiastka niemetalicznego; przykładem służy tlenek żelaza. Wiązanie między atomami dwóch metali jest jednak zjawiskiem tak rzadkim, że nie opracowaliśmy dla niego nazwy, stąd to nietypowo brzmiące słowo sodopotas.

Eksperyment Zwierleina polega na napełnieniu komory atomami sodu i potasu w stanie gazowym i podgrzaniu ich do temperatury około 7300°C. Pod wpływem oddziałującego na komorę pola magnetycznego atomy tracą zdolność poruszania się w tyłu kierunkach, w ilu mogły przedtem, i łączą się w pary (to zjawisko nosi nazwę rezonansu Feshbacha).

Następny etap polega na ostrzeliwaniu gazu dwiema wiązkami laserowymi: jedną o dużej energii, drugą o małej. Po trafieniu wysokoenergetyczną wiązką światła laserowego atomy ulegają pobudzeniu i zaczynają świecić tym samym kolorem, który ma wiązka. Oczywiście wydzielanie własnego światła sprawia, że atomy tracą energię, i właśnie wtedy wkracza do akcji drugi laser. Ponieważ emituje on wiązkę światła o niższej częstotliwości, służy ona jako coś w rodzaju łądowniska dla atomów, na które mogą one opaść. Atomy nadal tracą energię, aż ich częstotliwość dopasuje się do częstotliwości wiązki laserowej o niższej energii, co prowadzi do kolosalnego spadku temperatury.

Zwierlein zdołał pozbawić cząsteczki ciepła i obniżyć temperaturę do pięciuset miliardowych stopnia powyżej zera absolutnego, co stanowi aktualny światowy rekord⁴¹. Ponieważ jednak badanie materiałów w najniższych temperaturach bardzo wiele mówi nam o zachowaniach cząstek, chcemy pójść jeszcze dalej.

Problem z eksperymentem Zwierleina polega na tym, że badacz przeprowadził go na Ziemi, a pole grawitacyjne naszej planety lekko przyciąga atomy i wprawia je w ruch, czyli zwiększa ich temperaturę. Zatem oczywistym rozwiązaniem problemu jest usunięcie wpływu grawitacji. Taki jest cel skonstruowania Laboratorium Zimnych Atomów, czyli kolejnej wersji eksperymentu Zwierleina, który ma zostać przeprowadzony na pokładzie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (International Space Station, ISS). Ponieważ ISS krąży na orbicie wokół Ziemi i stale zmienia swoją pozycję, wpływ grawitacji uśrednia się do wartości zerowej. Dzięki temu można by obniżyć temperaturę atomów do wartości liczonych nie w miliardowych częściach stopnia, lecz w bilionowych.

Wyraźnie widać, że prawa astrochemii bardzo różnią się od praw rządzących chemią na Ziemi. Przede wszystkim jednak musimy w następnej kolejności skierować wzrok w kosmos, żeby zrozumieć, skąd się wzięły pierwiastki.

BO TEŻ CO MY WIEMY O GWIAZDACH?

Przed wiekami w Milecie wielki filozof Tales przechadzał się w mroku po polu, przypatrując się płamkom światła na nieboskłonie. W VI wieku p.n.e. nie było ulicznych latarni, więc Tales miał przed oczami idealny widok na Wszechświat z niezliczonymi gwiazdami, rozpościerający się od jednej linii horyzontu do drugiej.

Właśnie w tym momencie, gdy zaczął się zastanawiać, z czego są zbudowane same gwiazdy, zrobił krok w przód, lecz nie natrafił stopą na nic poza powietrzem i wpadł do studni. Gdy zwałił się na dno jamy, do jej krawędzi podbiegła tracka służąca, histerycznie zaśmiewając się z nieszczęśnika, że „mu się zachciewa wiedzieć, co się dzieje na niebie, a nie widzi tego, co ma (...) pod nogami”⁴².

Dokładnie wiem, jak Tales musiał się czuć. Kiedyś, gdy starałem się rozwiązać w pamięci jakieś równanie, nałożyłem spodnie tył na przód. Nawet zapiąłem zamek, nie zauważając niczego, a swój błąd odkryłem dopiero po kilku godzinach, kiedy próbowałem włożyć rękę do kieszeni.

Kilka stuleci po Talesie inny filozof, Arystoteles, uznał, że gwiazdy są zbudowane z niedosiężnej dla ludzi substancji, zwanej eterem – świętego pierwiastka bogów⁴³. To ładna hipoteza, ale niemożliwa do sprawdzenia, gdyż bogowie z definicji przebywają poza królestwem ludzi. Gdyby podążać tokiem rozumowania Arystotelesa, trzeba by założyć istnienie we Wszechświecie materiałów niemożliwych do uzyskania, zatem próby zrozumienia, z czego wszystko się składa, nie miałyby sensu.

Niestety, jego idea się przyjęła i ludzie przestali szukać odpowiedzi na pytania za pomocą eksperymentów i polegali wyłącznie na domysłach. Owa tendencja do ufania opiniom zamiast danym była przyczyną, dla której postęp w nauce zatrzymał się na całe milenium, a my utkwiliśmy w mrocznych wiekach. Dobra robota, Arystotelesie.

Morderczy uścisk idei Arystotelesa zaczął w końcu słabnąć w 1814 roku, kiedy niemiecki fizyk Joseph von Fraunhofer dokonał ważnego odkrycia. Wiązkę światła, które rzuca płomień, można za pomocą pryzmatu rozszcześcić i ujawnić jego wielobarwność. Ten sam efekt odpowiada za powstawanie tęczy.

Fraunhofer stwierdził, że nie wszystkie wiązki światła po rozszczepleniu wyglądają tak samo. Różne rodzaje ognia tworzą rozmaite typy tęczy.

45 lat później Robert Bunsen (ten od palnika) zdał sobie sprawę z implikacji tego odkrycia. Każdy pierwiastek podczas spalania emituje określony rodzaj widma, niczym niepowtarzalny, tęczyowy odcisk palca. Badanie światła ognia za pomocą instrumentów naukowych Fraunhofera pozwala dokładnie obliczyć, jakie atomy biorą udział w reakcji. Ta technika, zwana spektroskopią, umożliwia nam obserwowanie reakcji z dużej odległości, więc jeśli zwrócimy spektroskopy w stronę gwiazd, powinniśmy móc wydedukować ich skład chemiczny.

Najciekawsze odkrycie spektroskopowe pojawiło się w 1868 roku, kiedy dwaj astronomowie: Francuz Pierre Janssen i Brytyjczyk Norman Lockyer, jednocześnie zaobserwowali zupełnie nową sygnaturę pierwiastkową światła naszego Słońca⁴⁴. Nie pasowała ona do znanych ziemskich pierwiastków, zatem Lockyer nazwał pierwiastek helem od greckiego słowa *helios*, oznaczającego Słońce. Dwadzieścia siedem lat później William Ramsay wyekstrahował hel z ziemskich skał i uczynił go jedynym pierwiastkiem odkrytym w kosmosie przed wyizolowaniem go na Ziemi⁴⁵.

Następny przełom miał miejsce w 1925 roku, kiedy amerykańska astronomka Cecilia Payne-Gaposchkin zdołała obliczyć, ile każdego z pierwiastków zawiera typowa gwiazda. Payne-Gaposchkin studiowała astrofizykę na Harvardzie pod kierunkiem Harlowa Shapleya, jednego z nielicznych na świecie astronomów, którzy zachwalali kobietom zajmować się tą dziedziną. Napisała pracę doktorską na temat klasyfikacji gwiazd, opracowanej przez inną astronomkę, Annie Jump Cannon (prawdopodobnie najwybitniejsza postać w dziejach nauki).

Cannon kończyła właśnie dziewięcioletni katalog wszystkich znanych gwiazd, kiedy Payne-Gaposchkin zaczęła przeglądać zgromadzone przez nią dane. Jako uczona dobrze zorientowana w nowej dziedzinie nauki, mechanice kwantowej (której większość astronomów nie znała), Payne-Gaposchkin wykazała, że ilość każdego pierwiastka w gwiazdach bardzo się różni od jego zawartości na Ziemi. Gwiazdy nie były po prostu gorącymi planetami, jak zasugerował czołowy astronom świata Henry Norris Russell – były czymś całkowicie odmiennym⁴⁶.

Do pierwiastków najobficiej występujących na Ziemi należą: tlen, krzem, glin i żelazo, gwiazdy natomiast składają się niemal wyłącznie z wodoru i helu. Astronomowie Otto Struve i Velta Zebergs nazwali pracę naukową Payne-Gaposchkin „najbardziej błyskotliwą bez wątpienia rozprawę doktorską, jaką kiedykolwiek napisano w dziedzinie astronomii”⁴⁷, choć przez większość została ona zlekceważona (zgaduj do trzech razy dłaczego).

Henry Norris Russell nawet odradzał jej opublikowanie otrzymanych wyników, aby uniknąć ośmieszenia, choć należy oddać mu honor, że zmienił zdanie, kiedy uczona sprawdziła swoje metody i przekonała się, iż przez cały czas były prawidłowe.

Okazuje się zatem, że Wszechświat składa się niemal w całości z wodoru i helu. Pozostałe pierwiastki, od których wywodzą się wszystkie planety, są zaledwie śladowymi domieszkami. Ta upokarzająca konstatacja zachęciła astronoma Lewisa Fry Richardsona (lub może George’a Gamow, bo istnieją w tej kwestii niejasności) do napisania na cześć tego odkrycia następującego wierszyka:

Migocz, gwiazdko, w głębi nieb,
Wiem, czym jesteś, bom nie kiep.
Mój spektroskop rzekł mi o tem,
Żeś wodorem, a nie złotem⁴⁸.

NIEPRZELICZONE GWIAZDY

Jeśli podczas pobytu na wsi, gdzie zanieczyszczenie świetlne jest znacznie mniejsze, spojrzysz w bezchmurne, nocne niebo, dojrzysz bladą wstęgę światła, rozpościerającą się od jednej linii horyzontu do przeciwnej. Starożytni Grecy uważali ją za mleko z piersi bogini Hery i nazywali *galaxias kyklos* – „mlecznym kręgiem”.

Dzisiaj wiemy, że ów świetlny strumień składa się z gwiazd, takich jak Słońce. Jest ich tak dużo, że policzenie ich jako pojedynczych punktów światła staje się niemożliwe, zatem zlewają się w piękną poświatę.

Noc wypełnia coś, o czym zazwyczaj myślimy jako o świetle gwiazd, ale w nader rzeczywistym sensie przedmiot naszego rozumowania jest światłem słonecznym. Nasze Słońce, źródło całej naszej energii, jest tylko jednym z miliardów innych, krążących wokół supermasywnej czarnej dziury Sagittarius A*.

Gdyby jakimś cudem udało ci się spojrzeć na naszą galaktykę z zewnątrz, w jej całym blasku nasze Słońce byłoby niezauważalne. Przypominałoby to wypatrywanie w chmurze pojedynczej kropli wody.

Droga Mleczna zawiera od stu do czterystu miliardów słońc, choć trudno to ustalić z całą pewnością, gdyż nigdy nie znaleźliśmy się na zewnątrz, żeby zrobić zdjęcie. A nasza galaktyka również niczym specjalnym się nie wyróżnia. W 964 roku perski astronom Abd al-Rahman al-Sufi dostrzegł w obrębie gwiazdozbioru Andromedy coś, co wyglądało jak chmura. Nie bardzo zdawał sobie sprawę, że właśnie odkrył najbliższą nam sąsiednią galaktykę, co w 1923 roku potwierdził astronom Edwin Hubble. Znajduje się ona w odległości około 20 trylionów kilometrów od nas i zawiera około biliona gwiazd.

Noszący imię Hubble’a teleskop, spokojnie krążący na orbicie naszej planety na wysokości 547 kilometrów, wysondował regiony jeszcze dalsze niż Andromeda i ujawnił istnienie w naszym lokalnym regionie kosmosu ponad 170 miliardów innych galaktyk.

Gdyby ktoś zapytał, ile jest gwiazd we Wszechświecie, odpowiedź mogłaby zabrzmieć komicznie. Według nawet najskromniejszej szacunkowej oceny liczba gwiazd tylko w naszym lokalnym regionie wynosi około 10 bilionów. Jedynie osoby, które posługują się tak wielkimi liczbami, to dzieci w wieku przedszkolnym, które nie mają pojęcia, jak śmiesznie owe liczby brzmią, oraz naukowcy, którzy dokładnie o tym wiedzą.

JAK POWSTAJĄ GWIAZDY?

Typowa odpowiedź na to pytanie nie oddaje prawdy. Ludzie słyszą zwykle, że słońca to kule ognia albo rozżarzonego gazu. Oba opisy są beznadziejnie nieadekwatne. Najbardziej zbliżyliśmy się do skonstruowania gwiazdy tutaj, na Ziemi, 30 października 1961 roku. To wtedy rasa ludzka doznała jednocześnie uczucia podziwu i grozy, gdy została zdetonowana Car-bomba nad rosyjskim archipelagiem Nowa Ziemia.

Była to najmocniejsza osiągnięta dotychczas eksplozja jądrowa, w której promień obszaru zniszczeń po wybuchu wynosił około 35 kilometrów. Żeby oddać proporcje, trzeba sobie wyobrazić, że moc naszego Słońca w przybliżeniu odpowiada dwóm miliardom Car-bomb, odpalanych jednocześnie co sekundę. W jednej chwili Słońce swobodnie wytwarza ilość energii przeszło milion razy większą od tej, którą cały nasz gatunek zużywa przez rok.

Światło naszej gwiazdy dostarcza nam energii potrzebnej naszym uprawom do wzrostu, jej ciepło powoduje parowanie wody i daje nam deszcz, a jej przyciąganie grawitacyjne powstrzymuje nas przed dryfowaniem w mroźną pustkę kosmosu. Nie ma przesady w twierdzeniu, że Słońce podtrzymuje istnienie całego gatunku ludzkiego i pozwala mu żyć. A także robi dla nas znacznie, znacznie więcej.

Żeby pojąć to, co się naprawdę dzieje, będziemy musieli wziąć pod uwagę efekty wszechogarniającej siły grawitacji, którą w chemii zazwyczaj się ignoruje.

Cała materia Wszechświata ma swoje pole grawitacyjne, co oznacza, że wszystko się wzajemnie przyciąga. Nie czujemy tego, ale nasze ciała są lekko przyciągane przez wszystkie otaczające nas w pomieszczeniu przedmioty, z kolei one są przyciągane w naszym kierunku. Powodem, dla którego nie

odczuwamy tego efektu, jest fakt, że grawitacja to bardzo słaba siła (potrzeba aż całej planety, żeby utrzymać rzeczy na swoich miejscach), ale mimo to jest nieskończona i istnieje od samego początku.

W ciągu pierwszej połowy sekundy po rozpoczęciu ekspansji związanej z Wielkim Wybuchem powstałe najwcześniej cząstki, zwane fotonami i neutrinami (ponownie odsyłam do dodatku II), zaczęły się zderzać i tworzyć znane nam już protony, neutrony i elektrony. Po upływie kilkuset sekund protony i neutrony połączyły się i stworzyły jądra wodoru i helu z małą domieszką litu i berylu (pierwiastków o liczbach atomowych 3 i 4). A potem przez dalsze 380 tysięcy lat nic się nie działo⁴⁹.

Wszechświat był wówczas zestawem swobodnie unoszących się jąder i elektronów. Nie dałoby się w nim nic zobaczyć nawet na wyciągnięcie ręki, ponieważ światło promieniowało we wszystkich kierunkach i rzeczywistość sprawiałaby wrażenie mleczej mgły.

Następnie po upływie 1,6 miliona lat temperatura spadła do rzeńskiego tysiąca stopni i jądra atomów zaczęły chwycić elektrony i tworzyć chmury wodoru i helu. Wszechświat wreszcie nabrał przejrzystości i grawitacja doszła do głosu.

W miarę jak chmury wodoru/helu zapadały się pod wpływem własnej siły ciężenia, ich pola grawitacyjne stawały się bardziej skoncentrowane, co przyciągało do mieszaniny coraz więcej atomów. W ciągu milionów lat owe chmury w całym Wszechświecie zbijały się w wirujące węzły, coraz gorętsze, aż wreszcie wprawiły się w stan takiego rozgorączkowania, że jądra zawartych w nich atomów zaczęły łączyć się ze sobą. Grawitacja przyciągała materię do środka, podczas gdy żar powstały w reakcji fuzji jąder wypychał ją na zewnątrz. Kiedy owe siły ostatecznie zawarły między sobą rozejm, w rezultacie powstała stabilna sfera eksplozji jądrowej. Było to pierwsze słońce.

Jądro słońca takiego jak nasze osiąga temperaturę około 16 milionów stopni Celsjusza, jest w nim zatem na tyle gorąco, żeby wprawione w drgania atomy wodoru i helu wnikały w siebie nawzajem i ulegały zgniataniu, a w ten sposób powstawały pierwiastki cięższe, takie jak tlen i węgiel. Gwiazdy większe i gwałtowniejsze mogą posuwać się jeszcze dalej, spalać atomy węgla i wytwarzać magnez, a następnie prowadzić reakcje fuzji dalej aż do żelaza (pierwiastka o liczbie atomowej 26). W ten sposób powstają pierwiastki lekkie.

CZAS UMIERAĆ

W ciągu mniej więcej 4 miliardów lat wodór w naszym Słońcu się wyczerpie i jego materia zacznie stygnąć. Ciśnienie termiczne z jego wnętrza nie będzie już zasilane wystarczającym żarem, żeby zachować kształt gwiazdy, i grawitacja przeważy, w wyniku czego wszystko zacznie się kurczyć.

To na pewien czas zwiększy ciśnienie w jądrze Słońca i da mu chwilowy ciepły „drugi oddech” oraz spowoduje nadymanie się powłoki gazowej wokół zewnętrznej warstwy Słońca, w wyniku czego gwiazda znacznie się powiększy. W tym okresie promień Słońca wydłuży się do tego stopnia, że zasięg gwiazdy obejmie także Ziemię, a nasza piękna planeta spali się na popiół.

Jak już mówiliśmy, nasze Słońce to drobiazg w porównaniu z innymi ciałami niebieskimi. Kiedy dobiega kresu życie wielkich słońc, dzieje się coś zgoła odmiennego. Gwiazda supergigant będzie podtrzymywać reakcje spalania, aż jej całe jądro przekształci się w żelazo. Następnie ponownie dojdzie do tego, że ciepło nie będzie mogło już podtrzymać zewnętrznych warstw i gwiazda zapadnie się pod wpływem grawitacji. Tym razem jednak mamy do czynienia z większą gwiazdą i silniejszą grawitacją, zatem skurczy się ona w ciągu kilku sekund. Jądro z żelaza ma zbyt dużą gęstość, by dać się sprężyć, więc gdy zewnętrzna warstwa się skurczy, odbije się od jądra, a fala uderzeniowa spowoduje katastrofalną eksplozję, która rozerwie całą gwiazdę na kawałki.

Taką gwiazdę nazywamy supernową. Właśnie podczas tych gwałtownych eksplozji gwiazd atomy żelaza ulegają fuzji i powstają pierwiastki o liczbach atomowych aż do 92. Gwiazda zostaje rozerwana od środka, a nowo powstałe pierwiastki ciężkie rozprzestrzeniają się w postaci pyłu kosmicznego.

Następnie cały proces zaczyna się od początku. Powstają chmury, pod wpływem grawitacji zbijają się i tak rodzą się słońca, tyle że w mieszaninie mamy obecnie nowe rodzaje atomów. Chmury składają się już nie tylko z wodoru i helu, stanowią bowiem barwne koktajle zawierające również pierwiastki cięższe.

W miarę tworzenia się z martwych ciał supernowych drugiej generacji gwiazd pierwiastki cięższe zostają wessane w obręb wirującego pola grawitacyjnego gwiazdy. Sporo tego materiału ulega wciągnięciu w głąb paleniska, ale znaczna jego część buduje pierścień okalający słońce niczym fosa wokół zamku.

W wirach tego prądu gromadzą się skupiska metali i skał, które ostatecznie tężeją i tworzą planety. Każda planeta danego układu słonecznego składa się z atomów powołanych do życia we wnętrzu pradawnej gwiazdy, rozerwanej na kawałki podczas spektakularnego wybuchu supernowej.

Nie jest to czcza spekulacja. Dzięki spektroskopii byliśmy świadkami wszystkich tych zdarzeń. W istocie Wszechświat stanowi cykl gwiazdnej reinkarnacji, a planety i ich mieszkańcy tworzą się jako produkty uboczne.

DZIECI GWIEZDNEGO PYŁU

W wielu kulturach krążą opowieści o tym, jak powstaliśmy z ziemskiego prochu i stanowimy jedność z naturą. Nauka zaś daje nam coś znacznie wspanialszego – pewność, że to coś więcej niż tylko bajki.

Przez pierwsze dziewięć miesięcy życia matka budowała twoje ciało z pokarmów, które spożywała, zawarte zaś w tych pokarmach atomy pochodziły z Ziemi, a Ziemia powstała z resztek martwych od dawna słońc. Wszystkie atomy w twoim ciele z wyjątkiem wodoru narodziły się w sercu jakiegoś słońca, co oznacza – jak niegdyś zauważył Carl Sagan – że składasz się z gwiazdnej substancji.

Gwiazdy, które widzisz nocą, to nie transcendentalne byty zbudowane z eteru, jak wierzył Arystoteles – składają się z tego samego materiału co i ty. Są twoimi dalekimi krewnymi i kiedy umrzesz, powrócisz do nich. Kiedy naszą planetę spotka ognisty koniec, twoje atomy rozprzestrzenią się we Wszechświecie i staniesz się częścią innej planety, a może nawet innej żywej istoty. Może starożytni ludzie otaczający czcią gwiazdy mądrze wybrali sobie bogów?

39 *The coldest place in the world*, „NASA” (10.12.2013). Dostępne na stronie: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/09dec_coldspot (dostęp: 18.08.2017).

40 Sahai R. et al., *The coldest place in the Universe: Probing the ultra-cold outflow and dusty disk in the Boomerang Nebula*, „The Astrophysical Journal”, t. 841, nr 2 (2017).

41 Park J.W. et al., *Ultracold dipolar gas of fermionic Na₂₃K₄₀ molecules in their absolute ground state*, „Physical Review Letters”, nr 114 (2015).

42 Platon, *Parmenides. Teajtet*, przekł. W. Witwicki, Antyk, Kęty 2002.

43 Russell B., *Dzieje filozofii Zachodu i jej związki z rzeczywistością polityczno-społeczną od czasów najdawniejszych do dnia dzisiejszego*, przekł. T. Baszniak, A. Lipszyc, M. Szczubińska, Fundacja Aletheia, Warszawa 2000.

44 Dixon G., Parsons P., *The Periodic Table: A Field Guide to the Elements*, Quercus, Londyn 2013.

45 Aldersey-Williams H., *Fascynujące pierwiastki: w krainie fundamentalnych składników rzeczywistości*, przekł. A. Tuz, Prószyński i S-ka, Warszawa 2012.

46 Payne-Gaposchkin C., *Cecilia Payne-Gaposchkin: An Autobiography and Other Recollections*, Cambridge University Press, Cambridge 1996.

47 *Cecilia Payne-Gaposchkin*, *Encyclopaedia Britannica*. Dostępne na stronie: <https://www.britannica.com/biography/Cecilia-Payne-Gaposchkin> (dostęp: 18.08.2017).

48 To parafraza popularnej dziecięcej piosenki *Twinkle, twinkle, little star* (przyp. tłum.).

49 *The earl y universe*, CERN. Dostępne na stronie: <https://home.cern/about/physics/early-universe> (dostęp: 18.08.2017).

Rozdział piąty

Cegielka za cegielką

REKORDOWY SMAK

Od tysięcy lat klasyfikuje się substancje chemiczne ze względu na ich właściwości. Dzisiaj używamy do tego skomplikowanej aparatury, ale zdumiewająco wiele da się ustalić za pomocą naszych zmysłów.

Język człowieka jest pokryty receptorami co najmniej pięciu rodzajów: smaku kwaśnego, gorzkiego, słonego, słodkiego oraz umami (zwanego niekiedy smakiem pikantnym). Na przykład jeśli cząsteczka związku chemicznego o odpowiednim kształcie wylądzuje na receptorze smaku słodkiego, ten wysyła do mózgu sygnał i pokarm zostaje uznany za słodki. W taki sam sposób działają receptory zapachu, tyle że istnieją tysiące ich możliwych kształtów, co umożliwia nam rozróżnianie tysięcy zapachów.

W zmysłowej ocenie znajdującego się w ustach pokarmu biorą jednocześnie udział język i nos. Właśnie ta kombinacja zapachu i smaku nadaje każdej potrawie jej „aromat”. Wyjątkiem są potrawy pikantne, które działają na zasadzie przypadku.

Usta (oprócz smaku) muszą również monitorować temperaturę, żebyśmy nie zjadali rzeczy zbyt gorących. Receptory ciepła w organizmie człowieka noszą nazwy takie jak TRPV1 i występują licznie na języku oraz w jelitach. Pewne substancje chemiczne przypadkowo mają taki kształt, że pobudzają receptory ciepła, które informują mózg, iż w danym obszarze panuje gorąco, choć reszta jamy ustnej odczuwa chłód. Powstały zamęt skutkuje odczuciem, które postrzegamy jako „pikantność”.

W 1912 roku amerykański naukowiec Wilbur Scoville opracował test do matematycznego pomiaru pikantności potraw, którego używamy do dziś. Nadającą pikantność substancję chemiczną wielokrotnie rozcieńcza się wodą do momentu, kiedy grupa ochotników nie może już wyczuć jej smaku. Liczbę rozcieńczeń, konieczną do tego, żeby dany smak stał się niewyczuwalny, wyraża się w postaci liczby jednostek ostrości Scoville’a (ang. Scoville Heat Unit, SHU).

Ponieważ język dobrze sobie radzi z wykrywaniem zmysłem smaku nawet śladowych ilości substancji chemicznych, wartości SHU zazwyczaj są ogromne. Olej z papryki jalapeño staje się niewykrywalny po mniej więcej 8 tysiącach rozcieńczeń, zatem przydziela mu się wartość 8000 SHU, natomiast coś w rodzaju sosu tabasco zbliża się do wartości 50 000 SHU²⁰.

W okresie, w którym pisałem tę książkę, najostrzejszą na świecie papryką był gatunek Oddech Smoka, wyhodowany przez mistrza tworzenia przypraw, Walińczyka Mike’a Smitha – ma on ponad 2,4 miliona SHU²¹. W zasadzie to tyle samo, ile gaz pieprzowy. Ta papryka jest tak ostra, że po zjedzeniu wywołałaby wstrząs anafilaktyczny, ale to jeszcze nic w porównaniu z najbardziej pikantną substancją chemiczną świata – resiniferatoksyną.

Jest to związek wytwarzany z żywicy rośliny *Euphorbia resinifera* (zwanej również wilczomleczem żywicośnośnym). Nikt nigdy nie przeprowadził prób smakowych resiniferatoksyny, ponieważ odznacza się ona ostrą toksycznością i powoduje silne oparzenia skóry, co oznacza, że musimy obliczać dla niej wartość SHU w sposób pośredni.

Badanie, które w 1989 roku na szczurach przeprowadził Árpád Szállási, wykazało, że resiniferatoksyna wiąże się z receptorami TRPV1 od tysiąca do dziesięciu tysięcy razy silniej niż substancje chemiczne zawarte w paprykach chilli⁵². Ponieważ wiemy, że papryki chilli mają wartość SHU wynoszącą około 16 milionów, resiniferatoksyna powinna uzyskać wynik w granicach 16–160 miliardów SHU. Jest zatem na tyle pikantna, by cię zabić.

Istnieje wiele innych substancji o rekordowej sile oddziaływania na nasze zmysły. Lugdunam, najśłodsza substancja chemiczna, tak mdląca, że wywołuje wymioty, jest 230 tysięcy razy słodsza od cukru stołowego⁵³. Najciemniejsza substancja, tak czarna, że nie widać nawet światła oświetlającej ją latarki, nosi nazwę vantablack⁵⁴. Pozycję substancji chemicznej o najokropniejszej woni zajmują ex aequo propantion i metanetiol, substancje mogące po powąchaniu nawet z dużej odległości na masową skalę wywołać utratę przytomności, samoistne wymioty, a nawet śmierć⁵⁵.

PIERWIASTKOWA WOJNA

Pierwszą próbę właściwego zidentyfikowania pierwiastków podjął sam Pitagoras, choć próba okazała się nieco dziwaczna. Większość ludzi zna Pitagorasa z twierdzenia o kwadracie przeciwprostokątnej, którego uczyli się w szkole. Zazwyczaj nie wspomina się jednak o tym, że Pitagoras prawdopodobnie był również pierwszym na świecie przywódcą kultu.

Niewiele wiadomo o zakonie pitagorejczyków, ponieważ za zdradzenie ich tajemnic groził wyrok wygnania, ale wiemy, że nie wolno im było tykać białych kurcząt ani jeść bobu⁵⁶. Pitagoras padł ofiarą mordu, gdyż kiedy rozjuszony tłum ścigał go aż do krawędzi pola bobu, filozof, zamiast poszukać tam schronienia, wołał zawrócić w stronę tłumu, który pobił go na śmierć⁵⁷.

Jedynie, co wiemy o pitagorejczykach, to fakt, że uważali liczby za pierwiastki. Pitagoras i jego wyznawcy czcili porządek liczbowy, wierzyli bowiem, że matematyka stanowi prawdziwe oblicze rzeczywistości. Ich tabela pierwiastków była po prostu listą liczb od jednego w górę. No dobrze.

Inni za elementarne składniki materii przyjmowali bardziej namacalne substancje. W rozdziale pierwszym poznaliśmy Heraklita, który na kandydata do tego miana proponował ogień. Poznany w rozdziale czwartym Tales faworyzował wodę, ponieważ przyjmuje wiele form, natomiast filozof Anaksymenes najczystszy materią ogłaszał powietrze i tak dalej.

W V wieku p.n.e. mężczyzna imieniem Empedokles pogodził zwaśnionych. Zamiast poprzeć któregoś z myślicieli, przyjął dyplomatyczne podejście i zasugerował, że może wszyscy mieli rację. Może nie ma jednego pierwiastka, tylko kilka⁵⁸. Układ okresowy pierwiastków Empedoklesa wyglądałby zatem tak:

W Woda Jest mokra	O Ogień Jest gorący
Z Ziemia Jest brązowa	P Powietrze Jest lotne

To zaskakująco proste rozwiązanie położyło kres sporom i zadowoliło wszystkich. Tales mógł zachować swoją wodę, Anaksymenes – powietrze, Heraklit – ogień, a Pitagoras poniósł śmierć przy polu bobu, więc nikogo nie obchodziło, co by o tym pomyślał.

W dzisiejszych czasach niektórzy nadal uważają te substancje za „elementarne”, ale nie ma to naprawdę żadnego uzasadnienia. Zostały wybrane raczej w ramach polityki zachowania pokoju niż

rzetelnej wiedzy, chociaż kłamstwo niestety zachowuje popularność, jeśli podoba się ludziom i jest łatwe do zrozumienia.

DEBIUT UKŁADU OKRESOWEGO

Kiedy Antoine Lavoisier odkrył, że powietrze to mieszanina azotu i tlenu, a woda – związek wodoru i tlenu, naukowcy zarzucili ideę Empedoklesa o istnieniu czterech pierwiastków i zaczęli spalać lub rozpuszczać wszystko, co wpadło im w ręce, żeby otrzymać prawdziwe pierwiastki.

Do roku 1789 odkryto mnóstwo nowych pierwiastków, zatem Lavoisier zebrał wszystkie informacje i opublikował pełną listę liczącą trzydzieści trzy pozycje⁵⁹.

Uczony pogrupował je w cztery kategorie: gazy, niewidzialne, lecz zajmujące pewną przestrzeń; metale, błyszczące i spalające się przy dostępie tlenu; niemetale dające się wykorzystać do wytwarzania kwasów; ziemie niepasujące do kategorii pierwiastków metalicznych lub rodzących kwasy.

Tabela Lavoisiera jako pierwsza opierała się nie na domniemaniach lub przeczeniach; wyglądała mniej więcej tak:

gazy	metale	niemetale	ziemie
światło*	antymon	fosfor	kreda*
ciepło*	srebro	siarka	magnezja*
tlen	arsen	węgiel	baryta*
azot	bizmut	rodnik muriatyczny*	glinka*
wodór	kobalt	rodnik fluoryczny*	krzemionka*
	miedź	rodnik boraksowy*	
	cyna		
	żelazo		
	mangan		
	rtęć		
	molibden		
	nikiel		
	złoto		
	platyna		
	ołów		
	wolfram		
	cynk		

Później odkryto, że substancje oznaczone gwiazdką nie są pierwiastkami, ale jak na pierwszą próbę tabela prezentowała się dobrze.

Oczywiście inni chemicy mieli własne metody grupowania substancji. Niemiecki chemik Johann Döbereiner grupował pierwiastki w rodziny po trzy na podstawie podobieństwa. Na przykład metale: lit, sód i potas, zachowywały się identycznie. Reagują one bowiem gwałtownie z wodą, na powietrzu pokrywają się nalotem i dają się ciąć nożem (jeśli nie miałeś okazji ciąć nożem metalicznego litu, to zradzę, że przypomina to sprzenie lodów bezpośrednio po ich wyjęciu z zamrażarki).

Podobne obserwacje sprawdzały się w przypadku siarki, selenu i telluru. Wszystkie trzy były bowiem sybkimi ciałami stałymi, tworzącymi w reakcji z tlenem związki o silnych zapachach. Döbereiner nazywał te grupy triadami, choć nie było wyraźnej przyczyny wzorców ich zachowań⁶⁰. Ukończona tabela pierwiastków musiałaby w jakiś sposób wyjaśnić te tajemnice.

MUZYCZNE INTERLUDIUM

Najsłynniejszą próbą opracowania układu okresowego przed tą, która rzeczywiście okazała się sukcesem, było skazane na klęskę przedsięwzięcie Anglika Johna Newlandsa z 1863 roku⁶¹. Szwedzki chemik Jöns Berzelius opracował już pionierską metodę pomiaru masy atomów (wprowadził również symbole pierwiastków, używane przez nas także dzisiaj⁶²), zatem Newlands zebrał dane i spisał listę pierwiastków uporządkowanych według rosnącej masy. Kiedy to zrobił, odkrył, że pierwiastki *prawie* pasują do cyklicznego wzorca w taki sam sposób jak nuty zapisu muzycznego.

W myśl zachodniej teorii muzyki istnieje tylko siedem nut głównych. Jeśli zacznie się grać od któregośkolwiek określonego dźwięku w górę gamy, odkryje się, że ósma nuta jest identyczna z pierwszą, tylko stanowi jej wyższą wersję. Nuta dziewiąta jest wyższą wersją nuty drugiej i tak dalej. Jeden kompletny zestaw nut nosi nazwę oktawy, a dźwięki wznoszą się coraz wyżej, aż wreszcie ludzkie ucho nie może już ich uchwycić.

John Newlands zastosował tę logikę w swojej tabeli pierwiastków i twierdził, że istnieje siedem kategorii powtarzających się wciąż na nowo w miarę wzrostu masy. Pierwsza siódemka pierwiastków tworzyła pierwszy rząd, a ósmy pierwiastek stanowiłby pierwszy wpis w rzędzie drugim, odznaczając się właściwościami podobnymi do znajdującego się bezpośrednio nad nim pierwiastka pierwszego.

Uczony nazwał siedem kolumn tabeli „rodzinami”, a osiem rzędów „okresami”, czyli czynniki, co regularnie się powtarza. Tak oto John Newlands wprowadził ideę „okresowości” pierwiastków⁶³.

Okazało się, że w idei okresów tkwi ziarno prawdy, ale tabela Newlandsa miała pewną drobną wadę, która w przypadku hipotezy może niekiedy stać się niedogodnością – była błędna.

W okresie, w którym Newlands komponował (określenie ze wszech miar zamierzone) swoją tabelę, znano już 63 pierwiastki, lecz nie pasowały one do siatki tabeli o rozmiarze osiem na siedem. Zamiast dołączyć dodatkową kolumnę albo porzucić ideę oktaw, Newlands upchnął garść pierwiastków w tych samych komórkach siatki. Na przykład metaliczny pierwiastek kobalt, który śmie istnieć, wypchnął pierwiastki na dalszych pozycjach z ich prawidłowo wyodrębnionych rodzin, co nie zgadzało się z hipotezą. Newlands uznał zatem, że kobalt i nikiel to ten sam pierwiastek.

Nie były one jednak tym samym. Chociaż, zabawnym trafem, oba otrzymały nazwy od niemieckich chochlików o imionach Kobold i Nickel.

Newlands wiedział, że te pierwiastki nie są identyczne, ale dzięki temu jego tabela zachowywała elegancki wygląd, uznał zatem, że najlepiej będzie tym się nie przejmować. To samo musiał uczynić z kłopotliwym wanadem i ponownie z lantanem. Tym sposobem Newlands sfalszował dane, żeby pasowały do jego idei. Mamy w nauce określenie na takie poczynania – oszustwo.

Przypominało to twierdzenie, że istnieją trzy typy zwierząt: krowy, karasie i gołębie, a kiedy ktoś pokaże tygrysa, należy uznać go za krowę i przypisać do tej samej kolumny.

Newlands ponadto dobierał sobie cechy pierwiastków według uznania. Kobalt jest lśniąącym metalem o właściwościach magnetycznych, lecz uczony umieścił go w jednym rzędzie z fluorem, chlorem

i wodorem, które wszystkie są reaktywnymi gazami. Newlands z radością zauważył, że chlor, wodór i fluor należą do jednej grupy, lecz zignorował fakt, iż kobalt do niej nie pasuje.

Zadaniem naukowca jest rozpoznanie wadliwej hipotezy. Jeśli natura twierdzi, że idea jest błędna, to wysuwa się nową ideę, zamiast dyktować naturze, co ma robić.

W rezultacie tabela Newlandsa została odrzucona przez jemu współczesną naukową społeczność, choć ta historia ma jednak szczęśliwe zakończenie. Każdemu naukowcowi zdarzyło się kiedyś opublikować niepewną ideę, zatem naukowca brać jest skłonna do wybaczenia i nie żywi urazy do swoich członków. Nawet jeśli jedna idea okaże się błędna, innym nadal daje się należny posłuch. To pozytywne podejście, bo chociaż hipoteza oktagon Newlandsa była błędna, jego idea okresowego powtarzania się pierwiastków okazała się trafna. Pierwiastki rzeczywiście podporządkowują się cyklicznemu wzorcowi, lecz o wiele bardziej skomplikowanemu, niż uczony zakładał. Za to spostrzeżenie Towarzystwo Królewskie nagrodiło go w 1887 roku Medalem Davy'ego za osiągnięcia w dziedzinie chemii.

MARZYCIEL

Dmitrij Mendelejew urodził się w 1834 roku na Syberii jako najmłodsze z prawdopodobnie trzynaścioro dzieci (historycy nie zgadzają się ze sobą co do ich liczby, ale jestem pewien, że rodzice ją znali).

Kiedy ojciec Dmitrija stracił wzrok, syn wspierał rodzinę finansowo i udzielał korepetycji z nauk ścisłych. Według relacji osób, które widziały go w akcji, nawiązywał fantastyczny kontakt z uczniem jako człowiek pełen pasji i entuzjazmu zarówno dla przedmiotu nauczania, jak i dla samej sztuki wyjaśniania.

Po ukończeniu przez Dmitrija piętnastu lat jego matka zadecydowała, że syn potrzebuje wyższego wykształcenia, więc wyruszyła z nim w pieszą podróż przez całą Rosję. Po drodze składali podania o przyjęcie we wszystkich uniwersytetach, gdzie tylko mogli. Ta wyprawa zajęła im blisko rok, lecz matka chłopca w miarę upływu kolejnych miesięcy podupadła na zdrowiu. Zmarła, kiedy dotarli do Sankt Petersburga, zdążyła jednak doczekać przyjęcia syna w poczet studentów tamtejszego uniwersytetu państwowego, gdzie podjął studia na dwóch fakultetach: chemii i pedagogice.

Matka byłaby dumna z osiągnięć syna, który wkrótce stał się jednym z najznakomitszych rosyjskich chemików, słynącym z pisania obszernych podręczników z pamięci w ciągu paru miesięcy. Mendelejew pomagał również w założeniu pierwszej w kraju rafinerii ropy naftowej w rejonie tutajwskim. Był fascynującą postacią, golił brodę raz do roku i wdawał się w zażarte starcia z innymi studentami oraz profesorami. Jego największym wkładem w rozwój nauki stało się jednak stworzenie pierwszego układu okresowego pierwiastków, który faktycznie odpowiadał rzeczywistości⁶⁴.

Kilka dni przed dokonaniem przełomowego odkrycia Mendelejew sporządził talię kart, na których zamiast kolorów widniały pierwiastki. Na podstawie ich właściwości chemicznych opracował własną wersję pasjansa, miał bowiem nadzieję, że pomoże mu to odkryć głęboko ukryty wzorec ich organizacji. Według relacji jego przyjaciela, Aleksandra Inostrancewa, Mendelejew nie spał przez trzy dni i noce, pochłonięty graniem w swoją grę, wreszcie po południu 17 lutego 1869 roku wyczerpany padł na łóżko. Otoczony swoimi kartami, zasnął; przyśnił mu się wtedy najbardziej sugestywny sen w życiu. We śnie uczony ujrzał, jak karty tańczą mu przed oczami i spadają dokładnie na właściwe miejsca, odsłaniając przed nim wzorec, którego poszukiwał⁶⁵. Pierwiastki rzeczywiście układały się zgodnie z cyklem, ale nikt go dotychczas nie odgadł, ponieważ niektórych pierwiastków nadal brakowało!

Do tamtego czasu odkrywano pierwiastki przypadkowo i grupowano je według barwy, reaktywności, przewodnictwa, właściwości cieplnych oraz wszelkich innych cech. Mendelejew uświadomił sobie, że pierwiastki układają się w kolejności według rosnącej masy, ale niektóre z nich wciąż kryją się gdzieś w głębi skał. Pierwiastki sprawiające wrażenie umieszczonych w niewłaściwym miejscu leżały po prostu obok tych, których ówczesni chemicy jeszcze nie znali. Nikt nie wyizolował jeszcze pierwiastka o liczbie atomowej 32, 61 lub 72. Zgodnie z zakładanym przez Mendelejewa prawem rosnących liczb

całkowitych należało odkryć pierwiastki pasujące do tych wartości i faktycznie german, promet i hafn zostały w końcu zidentyfikowane i wypełniły odpowiednie luki.

„NA TEJ DRODZE GROZI SZALEŃSTWO”⁶⁶

Do 1932 roku już ustaliliśmy, że pierwiastki składają się z atomów, one same zaś są zbudowane z protonów, neutronów i elektronów. Skoro jednak wszystkie atomy są zbudowane z tych samych trzech cząstek, to dlaczego tak bardzo się od siebie różnią?

Weźmy brom, pierwiastek o liczbie atomowej 35. Ma on postać gęstej, fioletoworóżowej cieczy powodującej spalanie się metali i oparzenia ludzkiej skóry. Następny pierwiastek o liczbie atomowej 36 to krypton. Jest nieszkodliwym, niewidzialnym gazem, pozbawionym zapachu i reaktywności. Różnią się jedynie tym, że krypton ma więcej o jeden proton/elektron niż brom, dlaczego zatem nie zachowują się podobnie?

A co możemy zrobić z triadami Döbereinera? Pierwiastki o liczbach: 29, 47 i 79, to miedź, srebro i złoto – wszystkie są kowalnymi metalami o lśniącej powierzchni. Dlaczego właśnie te trzy liczby atomowe nadają im te same właściwości?

Dlaczego pierwiastek o liczbie 4 jest błyszczącym ciałem stałym, a ten o liczbie pięć to brązowy proszek? Czemu pierwiastek o liczbie 9 należy do najbardziej reaktywnych pierwiastków znanych ludziom, lecz ten o liczbie 10 – do najmniej reaktywnych? Dlaczego pierwiastki o liczbach od 11 do 14 przewodzą prąd elektryczny, a te z liczbami od 15 do 18 już nie?

Wszelkie próby znalezienia porządku zakończyły się niepowodzeniem, a hipoteza musi tłumaczyć wszystkie dane, nie tylko ich dogodną część. Gdybyśmy nie mogli wykorzystać modelu protonu/neutronu/elektronu do wyjaśnienia różnic zachowania atomów, musielibyśmy go porzucić.

Jedynym wyobraźalnym wyjaśnieniem jest to, że choć każdy atom składa się z tych samych trzech cząstek, są one jakoś inaczej ułożone w przestrzeni. Już Demokryt sugerował, że atomy mają różne kształty (atomy ognia miały być kuliste, co ułatwiało im przemieszczanie się, natomiast atomy „goryczy” miały być ostre i postrzępione). Czyżby filozof był na dobrym tropie?

Odpowiedź wreszcie nadeszła, kiedy fizycy odkryli jedną z najważniejszych teorii współczesnej nauki, która nadała układowi okresowemu pierwiastków ostateczny kształt – mechanikę kwantową.

-
- 50 *The Scoville Unit, Jalapeño Madness*. Dostępne na stronie: http://www.jalapenomadness.com/jalapeno_scoville_units.html (dostęp: 18.08.2017).
- 51 "World's hottest" chilli pepper grown in St Asaph, *BBC News* (17.05.2017). Dostępne na stronie: <http://www.bbc.com/news/uk-wales-north-east-wales-39946962> (dostęp: 18.08.2017).
- 52 Szallasi A., Blumberg P.M., *Resiniferatoxin, a phorbol-related diterpene, acts as an ultrapotent analog of capsaicin, the irritant constituent in red pepper*, „Neuroscience”, r. 30, nr 2 (1989), s. 515–520.
- 53 *How we taste*, „Technology Review” (kwiecień 2004). Dostępne na stronie: <https://www.heise.de/tr/artikel/Wie-wir-schmecken-404206.html> (dostęp: 18.08.2017).
- 54 *Vantablack, Surrey Nanosystems*. Dostępne na stronie: <https://www.surreynanosystems.com/vantablack> (dostęp: 18 sierpnia 2017).
- 55 Clayden J., Greeves N., Warren S., *Chemia organiczna*, cz. 1–4, przekł. D. Bal *et al.*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009–2011; *4 workers killed at DuPont Chemical plant*, „Scientific American” (18.11.2014). Dostępne na stronie: <https://www.scientificamerican.com/article/4-7-workers-killed-at-dupont-chemical-plant> (dostęp: 18.08.2017).
- 56 Russell B., *Dzieje filozofii Zachodu i jej związki z rzeczywistością polityczno-społeczną od czasów najdawniejszych do dnia dzisiejszego*, przekł. T. Baszniak, A. Lipszyc, M. Szczubińska, Fundacja Aletheia, Warszawa 2000.
- 57 Pennington B., *The death of Pythagoras*, „Philosophy Now”, nr 121 (2017).
- 58 Russell, *Dzieje filozofii Zachodu*.
- 59 Lavoisier A., *Traktat podstawowy chemii: fragment*, przekł. R. Mierzecki, „Analecta: studia i materiały z dziejów nauki. 1230–1159”, 2001, nr 1, s. 8–122.
- 60 Scerri E., *The Periodic Table: Its Story and Its Significance*, Oxford University Press, Oksford 2006.
- 61 Scerri E., *The Periodic Table: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oksford 2011.
- 62 Jorpes J.E., *Jac. Berzelius: His Life and Work*, Royal Swedish Academy of Science, Sztokholm 1966.
- 63 Newlands J.A.R., *On the Discovery of the Periodic Law: and On Relations of the Atomic Weights*, E. & F.N. Spon, Londyn 1884.
- 64 Gordin M.D., *A Well-Ordered Thing: Dmitrii Mendeleev and the Shadow of the Periodic Table*, Basic Books, Nowy Jork 2004.
- 65 *Periodic Law, Mendeleev*. Dostępne na stronie: http://www.mendeleev.nw.ru/period_law/ver_trif.html (dostęp: 18.08.2017).
- 66 William Szekspir, *Król Lear*, przekł. Józef Paszkowski (przyp. tłum.).

Rozdział szósty

Mechanika kwantowa ratuje sytuację

INTENSYWNY KURS MECHANIKI KWANTOWEJ

Mechanika kwantowa cieszy się złą sławą. Wszyscy słyszeli o niej i o jej reputacji dziwacznej teorii naukowej (nawiasem mówiąc, jest to reputacja zasłużona). W ostatnich latach część jej terminologii przejęli różni spirytualiści na określenie wszelkiego rodzaju niezwiązanych ze sobą rzeczy, co niestety gmatwa tylko całe zagadnienie. Proszę mnie źle nie zrozumieć – nie ma nic złego w rozmowach o sprawach duchowych, ale nadawanie określeniom rodem z mechaniki kwantowej nowych znaczeń to działania niezbyt pomocne. Będziemy zatem postępować ostrożnie.

Na początek należy powiedzieć, że mechanika kwantowa nie jest pojedynczą ideą, lecz zbiorem zaawansowanych teorii objaśniających świat na najniższym poziomie. Mechanika kwantowa tłumaczy zachowanie elektronów, jąder atomów, światła oraz ich interakcje, a zatem ma wielkie znaczenie dla chemii.

Omówienie jej z detalami wymagałoby napisania oddzielnej książki, zatem w dyskusji ograniczymy się do części teorii, opracowanej przez austriackiego fizyka Erwina Schrödingera, która pomogła stworzyć układ okresowy pierwiastków.

Schrödinger przysparzał mnóstwa problemów, co sprawiło, że wiele uczelni oraz instytucji grzecznie prosiło go, by je dobrowolnie opuścił. Jednak to nie z powodu osiągnięć akademickich, które prezentowały się znakomicie. Chodziło o to, że żył w trójkącie ze swoją żoną Annemarie oraz ich przyjaciółką Hilde. Ponadto nosił liczne muszki. Skandaliczne.

Najważniejszy wkład Schrödingera w rozwój nauki nosi nazwę równania falowego Schrödingera. Właśnie to równanie ujarzmiło układ okresowy i wyjaśniło, dlaczego pierwiastki zachowują się tak, a nie inaczej. Wygląda ono następująco:

$$H|\Psi\rangle = i\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t}$$

Wiem, że równania mogą czasami niektórym odrzucać, ale to jedno ma znaczenie kluczowe dla całego wywodu, nie możemy zatem po prostu zamieść go pod dywan. W dodatku III zamieściłem krótkie wyjaśnienie jego znaczenia, jeśli czujesz się na siłach, by się z nim zapoznać. Mimo to nie martw się, możemy i tak pojąć, co ono oznacza, bez konieczności zagłębiania się w matematyczne szczegóły.

Nikt nie wie na pewno, jak Schrödinger wpadł na pomysł swojego równania, nie ma bowiem jednoznacznych zapisów sposobu, w jaki je wyprowadził. Niektórzy twierdzą, że po prostu pewnego ranka przebudził się, zszedł na dół i zapisał równanie na podstawie przeczuca. Dopiero później je sprawdzono i dowiedziono jego słuszności.

To równanie mówi nam, gdzie prawdopodobnie znajdują się elektrony mknące wokół jądra atomu. Wychodzi się od właściwości elektronu (takich jak jego masa, prędkość itd.) i ustala się wielkość siły jego przyciągania przez protony w dowolnym atomie, który się opisuje. Rozwiązując równanie dla danego atomu, można sporządzić mapę trójwymiarowego obszaru, w którym znajdują się elektrony, i ustalić, jakie wzorce torów ruchu wykreślą one w przestrzeni.

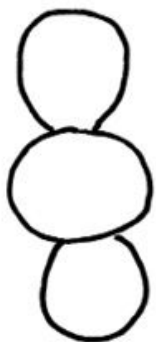
Kiedy to zrobimy, przekonamy się, że elektrony wcale nie poruszają się po orbitach okrężnych. Otaczają jądro, znajdując się w obszarach o rozmaitych kształtach, tak jak zwierzęta w zoo zajmują różniące się kształtem zagrody. Nazywamy te obszary „orbitalami”, a czasem, kiedy dopadnie nas lenistwo – „chmurami elektronowymi”.

Niektóre elektrony zajmują orbitale kuliste, inne zaś – obszary w kształcie hantli do ćwiczeń, wystające u dołu i u góry atomu. Każdy orbital może pomieścić maksymalnie dwa elektrony, zatem im więcej elektronów w danym atomie, tym więcej orbitali jest w użyciu i tym bardziej ekstrawaganckie kształty przybiera atom.

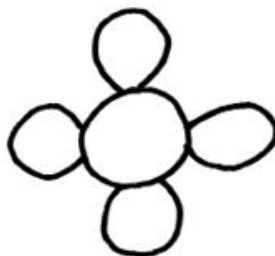
Przyczyną powstawania pewnych kształtów orbitali jest fakt, że ruchy elektronów są cokolwiek faliste. Elektrony nie lecą wzdłuż linii prostych niczym kule bilardowe, wydaje się, że tor ich ruchu od jednego punktu do drugiego jest jak gdyby pomarszczony. Ponieważ takie zmarszczki mogą przybierać tylko pewne kształty (nie mogą mieć, na przykład, kształtu połowy fali), to samo dotyczy orbitali elektronów.

Atom boru, mający pięć elektronów, rozmieszcza je w orbitalach o kształtach przedstawionych na diagramie po lewej na stronie 78. Natomiast węgiel ma siedem elektronów, pojawia się w nim zatem nowy kształt orbitalu i atom wygląda tak, jak to przedstawiono na diagramie po prawej na następnej stronie.

Fakt, że rozmaite atomy przybierają różne kształty, wyjaśnia przyczynę ich nietrywialnych od wyjaśnienia chemicznych zachowań. W odmienny sposób układają się w stopy, tworzą wiązania chemiczne pod różnymi kątami, pasują do niejednakowych przestrzeni i tak dalej.



bor



węgiel

Rozwiązanie równania Schrödingera dla określonego pierwiastka wyjaśnia, dlaczego różni się on od swojego sąsiada. To, że oba mają podobną liczbę elektronów, nie oznacza ich jednakowego kształtu. Stanowi to również odpowiedź na pytanie, jakie zadaje każdy uczeń, który po raz pierwszy w życiu widzi układ okresowy pierwiastków.

DLACZEGO AKURAT TAKI KSZTAŁT?

Tabela ma tworzyć schludny prostokąt podzielony na kolumny i rzędy. Taki, jaki stworzył Lavoisier. Używany przez nas dzisiaj układ okresowy wygląda trochę tak, jak gdyby szympanś przypadkowo wciągnął do odkurzacza przyciski z komputerowej klawiatury, po czym starał się ją skleić za pomocą modeliny. W ogóle nie przypomina tabeli. A więc kto wpadł na taki projekt i dlaczego wszyscy mówią: „No, jak dla mnie wygląda dobrze”?

Człowiek, któremu jesteśmy winni podziękowania, to niejaki Alfred Werner, szwajcarski noblista w dziedzinie chemii, który w 1905 roku opublikował krótki artykuł o chwytliwym tytule *Wkład w rozbudowę układu okresowego*⁶⁷. Właśnie w tej publikacji układ okresowy po raz pierwszy przybrał swój obecny kształt.

Wźmy dziesięć pierwszych pierwiastków. Albo zróbmy inaczej. Pomińmy pierwiastki o numerach 1 i 2, zacznijmy od pierwiastka z liczbą atomową 3 (za chwilę wyjaśnię dlaczego).

Moglibyśmy uszeregować pierwiastki w ładny rząd i na tym skończyć:

3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	----

Dzięki równaniu Schrödingera możemy jednak zrobić to lepiej. Pierwsze dwa pierwiastki w tym rzędzie układają elektrony w postaci orbitali kulistych, natomiast sześć następných tworzy orbitale w kształcie hantli. Co oznacza, że możemy rozdzielić ten szereg w następujący sposób:

kuliste

↓

3	4
---	---

w kształcie hantli

↓

5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	----

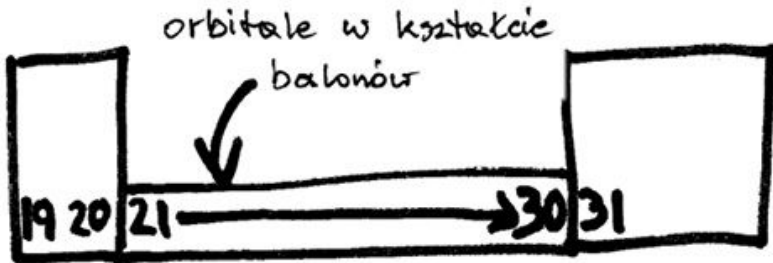
Osiem następnych pierwiastków ma takie same kształty orbitali. Ich atomy są większe, lecz poza tym charakteryzują się one bardzo podobnymi właściwościami chemicznymi. Żeby to zademonstrować, wykorzystamy ideę okresowości Newlandsa i dodamy do naszej tabeli drugi rząd, nadal podzielony na dwa bloki:

3	4
11	12

5	6	7	8	9	10
13	14	15	16	17	18

Każda kolumna reprezentuje pierwiastki o określonym kształcie orbitali. Jedyna różnica polega na tym, że w miarę posuwania się w dół orbitale stają się większe.

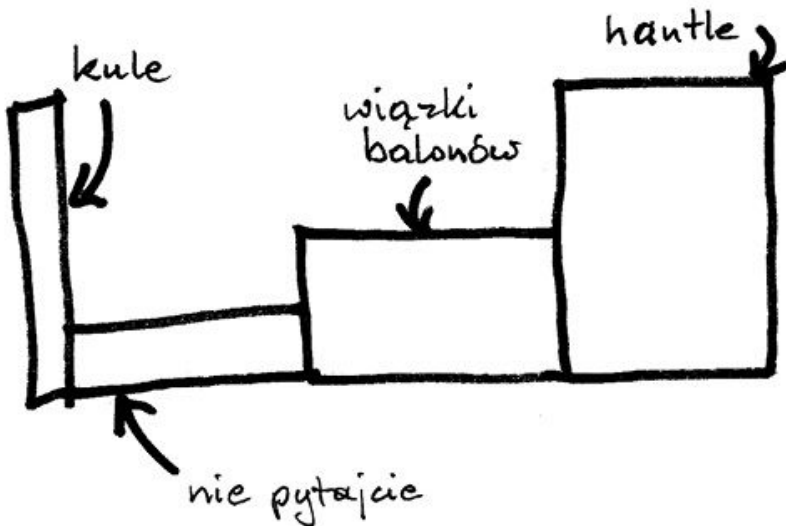
Kiedy dojdziemy do pierwiastka o liczbie atomowej 21, pojawia się nowy kształt (mechanika kwantowa właśnie taka jest). Zewnętrzne elektrony atomu tego pierwiastka, czyli skandiu, aż do pierwiastka o liczbie atomowej 30, którym jest cynk, mają kształt raczej wiązki balonów niż hantli, musimy zatem wprowadzić do tabeli nowy blok. Pierwiastek o liczbie atomowej 31 wraca do kształtu hantli, więc nasza tabela wygląda teraz tak:



To trochę irytujące, że natura upiera się przy wprowadzaniu dziwacznych orbitali w większych atomach pierwiastków, lecz właśnie z tego powodu tabela ma taki skomplikowany kształt. To dlatego, że natura jest skomplikowana.

Kiedy teraz odczytasz pierwiastki wzdłuż rzędu (okresu), będziesz je odczytywać według rosnącej liczby protonów, a kolumna (grupa) informuje, jaki kształt mają atomy. Po dojściu do końca jednego okresu po prostu schodzi się do następnego.

Kiedy Alfred Werner zamieścił w tabeli wszystkie znane pierwiastki i kształty orbitali, ostatecznie przybrała ona taką formę:



Przypuśćmy, że chcesz się czegoś dowiedzieć o jodzie. Jeśli policzysz od lewej do prawej, przekonasz się, że to pierwiastek numer 53, co znaczy, że ma pięćdziesiąt trzy protony i tyle samo elektronów. Widzisz, że znajduje się on w bloku po prawej (orbitali w kształcie hantli), wiesz zatem również, pod jakim kątem będzie się łączył z innymi atomami.

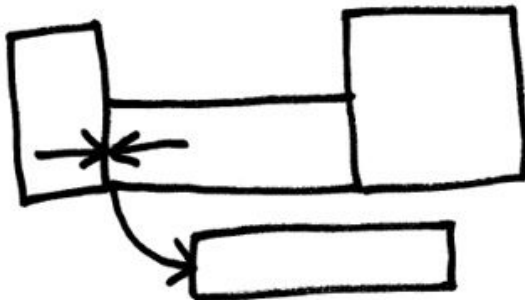
Bezpośrednio nad nim znajdują się chlor i fluor – dwa barwne niemetale. Jod mieści się w tej samej kolumnie, zatem prawdopodobnie i on jest barwnym niemetalem, lecz o większej gęstości, gdyż umieszczono go w niższym okresie. Rzeczywiście, zobaczymy, że jod ma dokładnie takie właściwości.

Za pomocą układu okresowego można nawet przewidzieć właściwości pierwiastków, których nikt nigdy nie widział. Bezpośrednio pod jodem leży astat, pierwiastek najrzadziej występujący w skorupie ziemskiej (na całej planecie istnieje niespełna 1 gram), ale gdybyśmy mieli jego próbkę, to prawdopodobnie zachowywałby się jak gęstsza wersja jodu. Niechaj będzie pochwalona mechanika kwantowa.

PROSTOTA ARCHITEKTURY

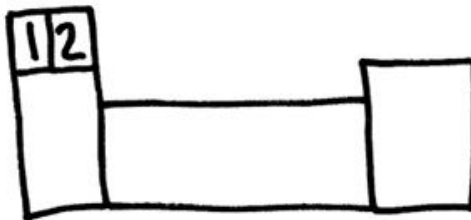
Po przyjrzeniu się układowi okresowemu na koszulce, podkładce pod mysz, zastanie prysznicowej, piórniku i pulpicie w notebooku (ja go mam we wszystkich wymienionych miejscach i zakładam, że inni także) prawdopodobnie wiesz, iż powyższe obrazy jeszcze niezupełnie są takie, jak trzeba.

Rozbudowana w pełni wersja tabeli jest dość nieporęczna, zatem gwoli większej prostoty weźmiemy jeden z bloków, przesuniemy go w dół, a wszystkie pozostałe – do środka, żeby się zetknęły ze sobą.

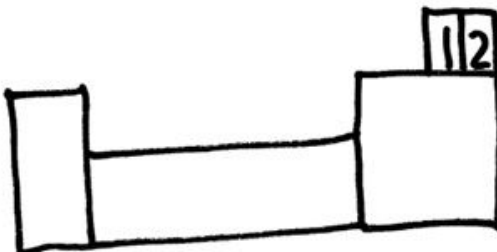


Taką postać układu okresowego zaproponował w 1945 roku Glenn Seaborg. Wkrótce stała się ona standardem dzięki swojej prostocie oraz zasługom Seaborga w dziedzinie popularyzowania nauki⁶⁸. Oczywiście pominęliśmy pierwiastki o liczbach 1 i 2.

Wodór i hel mają atomy kuliste, co oznacza, że należą do grup, odpowiednio: 1 i 2:



Właśnie to uczynił Harvey White ze swoim projektem układu okresowego z 1934 roku, czego pragnąłby Schrödinger⁶⁹. Niestety, z powodu niewielkich rozmiarów H i He nie zachowują się całkiem tak samo jak inne pierwiastki w tym bloku. W istocie mają więcej wspólnego z pierwiastkami po drugiej stronie tabeli, więc jeśli je umieścimy zgodnie z ich reaktywnością, sprawa przybierze ostatecznie taki obrót:

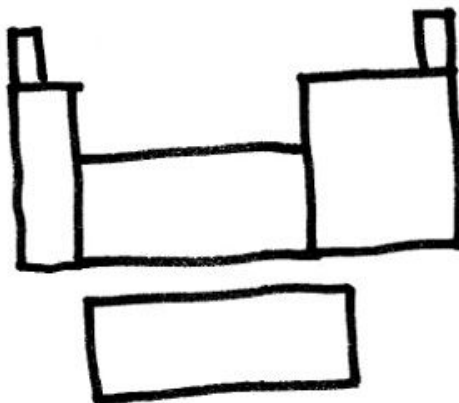


Właśnie to w 1928 roku zrobił ze swoim układem okresowym Ernst Riesenfeld (czego życzyłby sobie Mendelejew)⁷⁰.

Glenn Seaborg nie mógł się zdecydować, gdzie umieścić te dwa nieporęczne pierwiastki. Przeciągał je to na jedną, to na drugą stronę (a w 1945 roku na krótko włączał wodór do dwóch grup)⁷¹.

Ostatecznie uzgodniono uznanie wyników zarówno elektronowo-orbitalowych prac Schrödingera, jak i dokonanej przez Mendelejewa klasyfikacji na podstawie właściwości chemicznych.

Tak więc rozdzielamy oba pierwiastki i umieszczamy je na przeciwnych krańcach tabeli, po jednym dla każdego naukowca. Nie przedstawia się to zbyt logicznie, ale jest wdzięcznym hołdem złożonym ludziom, którzy stworzyli układ okresowy. Voilà, oto wreszcie go mamy.



[67](#) Werner A., *Beitrag zum Ausbau des periodischen systems*, „Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft”, nr 38 (1905), s. 914–921.

[68](#) Seaborg G., *Priestley Medal Address – The Periodic Table: Tortuous Path to Man-Made Elements* (16.04.1979), przedruk w: Seaborg G., *Modern Alchemy: Selected Papers of Glenn Seaborg Vol. 2*, World Scientific Publishing Co., Singapur 1994.

[69](#) White H.E., *Introduction to Atomic Spectra*, McGraw-Hill, Nowy Jork 1934.

[70](#) Riesefeld E.H., *Practical Inorganic Chemistry*, przedruk wydania z 1943, Labour, Barcelona 1950.

[71](#) Seaborg G., *Priestley Medal Address*.

Rozdział siódmy

Co może wybuchnąć

NAJSILNIEJSZY MATERIAŁ WYBUCHOWY

Większość materiałów wybuchowych, z wyjątkiem broni jądrowej, działa w taki sam sposób. Najpierw syntetyzuje się materiał, który jest wysoce niestabilny. W terminologii chemicznej to oznacza, że przy sposobności ulegnie on rozpadowi. Po drugie, prowokuje się ten materiał i daje mu szansę ulegnięcia rozpadowi z odtworzeniem się na nowo substancji stabilnych. W trakcie tej reakcji odtwarzania uwalnia się mnóstwo energii w postaci światła i ciepła. Ponadto niewielka ilość stałego lub ciekłego materiału wybuchowego błyskawicznie się rozpręża, przechodząc w gaz o dużej objętości. To nagłe rozprężenie w połączeniu z mnóstwem uwolnionego ciepła i światła nazywamy wybuchem.

Niektóre substancje są tak niestabilne, że nawet niewielki wstrząs może zapoczątkować reakcję. Proch strzelniczy potrzebuje do reakcji rozpadu tylko płomienia świecy, trotyl zaś wymaga jedynie iskry. Można nawet kupić zabawki dla dzieci w postaci małych, papierowych pakietików napełnionych piorunianem srebra – związkami chemicznymi, wybuchającym pod wpływem uderzenia. Pakietik rzuca się o ziemię, a wstrząs powoduje donośny trzask.

Na podobnej zasadzie działają sztuczne ognie. Sproszkowany metal zostaje wyrzucony w powietrze i kiedy znajdujący się wewnątrz ładunku lont się wypali, uruchamia się żelowy detonator i zmienia się w gaz. Rozprężający się gaz rozrzuca drobinki proszku, które rozgrzewają się do tego stopnia, że zaczynają reagować z tlenem w atmosferze, wytwarzając iskry. Z rozdziału czwartego dowiedzieliśmy się już, że rozmaite pierwiastki emitują różne rodzaje światła, zatem przez wybranie określonych metali otrzymujemy iskry konkretnego koloru. Sód będzie miał kolor żółty, bar – zielony, miedź da nam barwę niebieską, a stront – ceglastą. Purpurowe fajerwerki słyną z tego, że trudno je uzyskać; zwykle zawierają mieszaninę miedzi i strontu.

Działanie wszystkich materiałów wybuchowych opiera się na zawartych w nich niestabilnych związkach chemicznych, ale najbardziej niestabilnym, jaki kiedykolwiek stworzono, jest azydek azydoazydku, który w 2011 roku zsyntetyzował Thomas Klapötke. Aczkolwiek zrozumienie, po co ktokolwiek chciałby wytworzyć taki związek chemiczny, wykracza poza moje granice pojmowania. Zawiera on 14 atomów azotu i dwa atomy węgla, poutykane w odgałęzieniach wokół ciasnego pierścienia, a wszystko to ściśnięte razem na niewielkiej przestrzeni. Wiązania między atomami są tak napięte, że rozłączają się w dowolnych okolicznościach.

Kiedy Klapötke próbował rozpuścić ów związek chemiczny w wodzie, ten wybuchł. Kiedy starał się przenieść materiał przez pracownię, ten wybuchł. Pod wpływem wypuszczenia z płuc powietrza w tym mniej więcej kierunku, w którym się znajdował, również wybuchł. Wybuchł nawet po oświetleniu go światłem podczerwonym (takim, jakie emituje pilot od telewizora)⁷².

Oczywiście najlepsze materiały wybuchowe eksplodują na sygnał. Muszą być dostatecznie stabilne, by dawać się transportować, lecz na tyle niestabilne, by nadal można było je zdetonować. Azydek azydoazydku to kiepski wybór z tego samego powodu, z którego trifluorek chloru byłyby koszmarnym

paliwem do rakiet. Lepiej trzymać się dobrego, starego dynamitu, który wynalazł nie kto inny, tylko Alfred Nobel.

HANDLARZ ŚMIERCIĄ NIE ŻYJE

Kiedy ktoś umiera, staramy się mówić o nim dobrze, ponieważ obrzucanie nieboszczyka błotem jest w złym guście. Opublikowane 12 lutego 1888 roku wspomnienie pośmiertne o Alfredzie Noblu wyglądało jednak inaczej. Francuska gazeta ogłosiła podobno w nagłówku „Handlarz śmiercią nie żyje”, dalej zaś można było przeczytać: „Doktor Alfred Nobel, który wzbogacił się w wyniku wynalezenia sposobu szybszego uśmiercenia większej liczby ludzi, niż kiedykolwiek zdołano przed nim, zmarł wczoraj”⁷³.

Wielu ludziom nie podobało się takie gazetowe wspomnienie o wielkim naukowcu. Dotyczyło to również samego Alfreda Nobla, który mógł przeczytać ten nekrolog, ponieważ tak naprawdę jeszcze nie umarł. Wieść głosi, że zmarł Ludvig, brat Alfreda, a redakcja gazety pomyliła braci i opublikowała ten nieprzychylny nekrolog.

Nobel, bardzo utalentowany chemik, wynalazł dynamit 21 lat wcześniej. Początkowo zamierzał przeznaczyć go do prac górniczych, lecz materiał w oczywisty sposób objawił swoje zastosowania militarne. Nobel najwyraźniej zdawał sobie sprawę, jaką pozostawia po sobie spuściznę, więc postanowił zmienić testament i zapisać swoją wielką fortunę (ponad 31 milionów koron) fundacji mającej wypłacać nagrody ludziom, którzy swoimi działaniami „przynieśli ludzkości największe korzyści”. Nagrody miały być przyznawane za osiągnięcia w trzech dziedzinach nauki, literaturze oraz propagowaniu pokoju i miały się nazywać Nagrodami Nobla⁷⁴.

Podobno gazeta, która wydrukowała ten nekrolog, nosiła tytuł „Idiotie Quotidienne”; desperacko starałem się znaleźć dokumenty potwierdzające jej istnienie, ale niestety na nic nie natrafiłem⁷⁵. Fakt, że nazwę należy tłumaczyć jako „Idiotyzm codzienny”, może wskazywać, iż cała historia jest zmyślona. Niektórzy biografowie Nobla rzeczywiście ją pomijają jako wiecznie żywą plotkę⁷⁶.

Być może jest to apokryficzny moralitet albo upiększenie reakcji Nobla na śmierć brata. Bez względu na to, czy historyjka jest prawdziwa, czy nie, Nagrody Nobla nadal uznaje się za najbardziej prestiżowe wyróżnienia, jakie można otrzymać w działalności naukowej. Fundusz nagród jest imponujący, liczony w milionach, a pochodzi z majątku Nobla, zbudowanego całkowicie za pomocą dynamitu. Oczywiście nie dosłownie. To byłoby głupie.

Sposób działania dynamitu jest prosty. Bierze się dużą ilość skalnego pyłu zawierającego krzem i nawilża się go związkiem chemicznym, nazywanym nitrogliceryną. Materiał pakuje się w tubę, a na jednym jej końcu mocuje się lont. Ciepło płonącego lontu przenika do pyłu nasyconego nitrogliceryną i bum!

Nitrogliceryna to jeden ze wspomnianych przeze mnie wcześniej niestabilnych związków chemicznych. Reaguje sama ze sobą – jedna cząsteczka nitrogliceryny, składająca się z atomów węgla, azotu, tlenu i wodoru, reaguje z drugą, wytwarzając grupę gazów, głównie dwutlenek węgla i wodę. Gazy te rozprężają się i osiągają objętość tysiąc dwieście razy większą od pierwotnej i temperaturę 5000°C. Reakcja zachodzi szybko – rozprężanie się i wydzielanie ciepła trwa krócej niż mikrosekunda.

To wszystko sprowadza się do pytania, na które w tym rozdziale udzielię odpowiedzi – dlaczego reakcje chemiczne w ogóle zachodzą? Co mamy na myśli, gdy mówimy, że związek chemiczny jest niestabilny? A przede wszystkim: jak atomy wiążą się ze sobą? Żeby się w tym wszystkim połączyć, będziemy musieli zanurkować nieco głębiej w kwantowym oceanie.

NIEWŁAŚCIWA NAZWA CHEMII

Słowo „chemia” pochodzi od „alchemii”, ale stosowniejszą nazwą dla tej dziedziny byłyby elektronika, gdyż w reakcjach chemicznych najważniejsze są elektrony. Jądro w porównaniu z całym promieniem atomu jest maleńkie, zatem to elektrony na obrzeżach atomu odpowiadają za wszystkie jego interakcje.

Elektrony pozostają w nieustannym ruchu. Gdyby elektron miał przerwać ruch, jednocześnie przestałby istnieć, ruch bowiem, podobnie jak posiadany ładunek, stanowi część tożsamości elektronu. Nieruchomy elektron nie istnieje, podobnie jak czteroboczny trójkąt.

Jeśli zatem przyjmiemy ruch jako właściwość daną, elektron w atomie może zrobić naprawdę tylko dwie rzeczy. Może odsunąć się od jądra, ku zewnętrznej części atomu, albo się do niego przybliżyć, czyli przemieścić bliżej wnętrza atomu. Te dwa zachowania stanowią podstawę prawie każdej reakcji chemicznej, z jaką się zetknie.

Przyjrzyjmy się ponownie pojęciu orbitalu, które wywiedliśmy z równania Schrödingera. Są to leżące wokół jądra obszary, w których spędzają czas elektrony. Orbitale są terenami dozwolonymi dla elektronów, ale to nie znaczy, że elektrony muszą przez całe życie ograniczać się do jednego orbitalu. Mogą przeskakiwać między nimi. Kiedy elektron przeskakuje z jednego orbitalu do innego, nazywa się to „skokiem kwantowym”. Takie zjawisko może zajść między dwoma dowolnymi orbitalami, nawet tymi, które są puste.

Oczywiście elektrony wolą zajmować orbitale w pobliżu jądra, ma ono bowiem ładunek przeciwny względem ich ładunku, ale nie zawsze udaje im się postawić na swoim. Jeśli orbitale leżące najgłębiej wewnątrz atomu są zajęte, inne elektrony muszą się zadowalać tymi leżącymi dalej.

Atom naprawdę jest miejscem, w którym trwa ciągła krzątanina i panuje rozgardiasz, gdzie orbitale znajdujące się najbliżej jądra uchodzą za najatrakcyjniejsze nieruchomości, do których każdy elektron chce się wprowadzić. Jeśli jeden z „wewnętrznych” elektronów z jakiegoś powodu przypadkiem zwolni swój orbital, elektron „zewnętrzny” dokonuje skoku kwantowego, by go zastąpić.

Owe skoki kwantowe nie odbywają się jednak losowo. Reguła stanowiąca ostateczne wyjaśnienie chemii brzmi następująco: jeśli elektron absorbuje wiązkę światła, zostaje przerzucony do zewnętrznego orbitalu, a jeśli ją emituje, przeskakuje do wewnętrznego orbitalu.

Niektóre rodzaje światła odznaczają się większą zdolnością przenoszenia elektronów, inne zaś mniejszą. Wiązka niebieska może przenieść elektron aż do dalekiego orbitalu, podczas gdy światło czerwone może mu tylko dać lekkiego kuksańca, by przeskoczył o jeden poziom. Tak samo elektrony z dalekich orbitali w trakcie opadania do niższych mogą emitować światło niebieskie, natomiast te znajdujące się już w pobliżu jądra mogą wysyłać jedynie czerwone.

Właśnie tak działają sztuczne ognie oraz wspomniana już spektroskopia. Każdy atom ma niepowtarzalną konfigurację orbitali, zatem emituje lub absorbuje światło o niepowtarzalnym widmie. Kiedy elektrony zaczynają przeskakiwać z jednego orbitalu do drugiego, pokonywany przez nie dystans określa rodzaj światła emitowanego lub absorbowanego, w zależności od kierunku ruchu.

W tym momencie wszyscy zadają pytanie, dlaczego głównie elektrony absorbują lub emitują światło. Obawiam się, że istnieje tylko jedna odpowiedź: natura po prostu taka jest. Wynika to z jednego z fundamentalnych praw ustanowionych podczas rozszerzania się Wszechświata po Wielkim Wybuchu. Tak jak piłki staczają się ze stoku, ponieważ są posłuszne prawom grawitacji, elektrony uwalniają lub absorbują światło, gdyż są posłuszne prawom mechaniki kwantowej.

ZDOLNOŚĆ I STABILNOŚĆ

Mówiliśmy o pewnych wiązkach światła, odznaczających się większą zdolnością przenoszenia elektronów niż inne; w nauce niekiedy zastępujemy słowo „zdolność” terminem „energia”. Wcześniej unikałem używania go, ponieważ jest to określenie najeżone trudnościami i błędnymi przekonaniem.

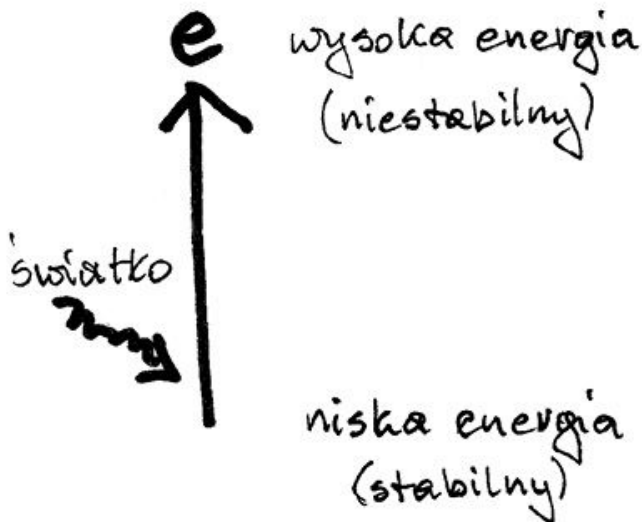
O energii mówi się tak, jak gdyby była to jakaś rzecz przenoszona z miejsca na miejsce, ale w istocie jest inaczej. Nie można wziąć w rękę grudki energii, ale grudka materii może mieć zdolność uderzania w inne przedmioty albo zdolność eksplozowania, czyli może mieć energię.

W kontekście chemii kwantowej energia oznacza stopień, w jakim wiązka światła ma zdolność wypchnięcia elektronu do wyższego orbitalu. Można czasem usłyszeć, jak naukowcy mówią, że elektrony w zewnętrznych orbitalach „zaabsorbowały energię” i ta energia, gdy opadną niżej, zostaje uwolniona. To wygodny skrót myślowy, ale musimy powiedzieć jasno: tym, co ulega absorpcji i emisji, jest światło. Światło ma zdolność przenoszenia elektronów, a zatem posiada energię, lecz energia nie jest rzeczywistym bytem.

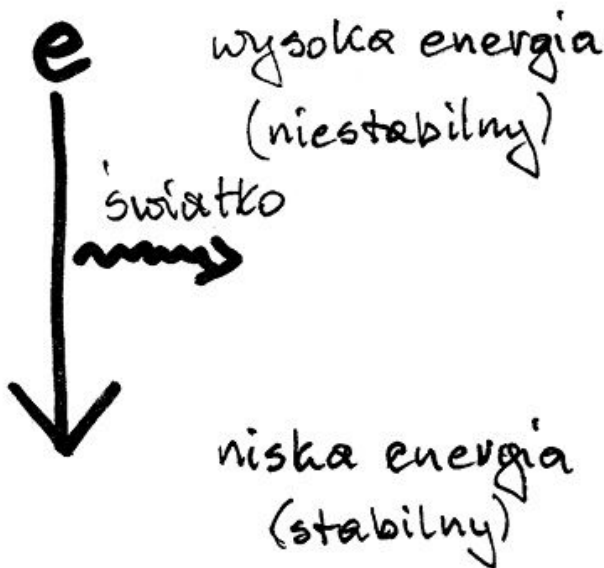
Określeniem przeciwnym do słowa „zdolność” jest to, co rozumiemy pod pojęciem „stabilności” – miernika ilości energii utraconej przez elektron w wyniku opadnięcia do niższego orbitalu albo stopnia jego niechęci do zmiany obecnego orbitalu na wyższy.

Elektron z wewnętrznego orbitalu, znajdującego się blisko jądra, ma mniejszą chęć na zmiany, bo dobrze mu tam, gdzie jest. Opisujemy to jako stan chemicznej „stabilności”. Natomiast elektron z mnóstwem energii (czyli zdolności uwalniania światła), zajmujący wyższy orbital, jest bardzo niestabilny, gdyż nie jest mu dobrze i jeśli dać mu szansę, dokona zmiany.

Zamieszczony poniżej diagram pokazuje, co się dzieje, gdy elektron absorbuje wiązkę światła. Przeskakuje on z orbitalu niskoenergetycznego do wysokoenergetycznego i staje się niestabilny.



Następny diagram obrazuje proces odwrotny – elektron o wysokiej energii opada do stabilniejszego orbitalu. Jedyna różnica polega na tym, że w tym wypadku światło zostaje wyemitowane, nie zaabsorbowane.



Zdolność i stabilność zawsze wadzą się ze sobą i rządzą zachowaniami elektronu podczas reakcji. Pozyskiwanie energii oznacza utratę stabilności i na odwrót. Ów kompromis między zdolnością a stabilnością decyduje o tym, czy reakcja zajdzie, czy nie.

DAJEMY CZADU

Różne rodzaje światła wywierają na atom inny wpływ. Światło podczerwone o zbyt niskiej energii, żeby wejść w interakcję z elektronami w naszych oczach, w wyniku czego nie widzimy go, powoduje raczej rozciąganie się i skręcanie samych orbitali niż przeskakiwanie elektronów między nimi. Mikrofałe wywołują podobne zjawiska, tyle że powodują raczej obracanie się atomów zamiast ich skręcania się i wyginania.

Jeśli poddamy atomy działaniu wiązki światła podczerwonego albo mikrofał, atomy zaczną w rezultacie tańczyć i uderzać o siebie, wymieniając się energią. Koniec końców odbywa się to na zasadzie tego samego mechanizmu przekazywania światła (elektrony w jednym atomie wysyłają światło elektronom innego i przenoszą je na wyższy orbital, co sprawia, że atom bardziej się skręca lub obraca), ale szybciej i wygodniej jest mówić o atomach zderzających się ze sobą i przekazujących energię.

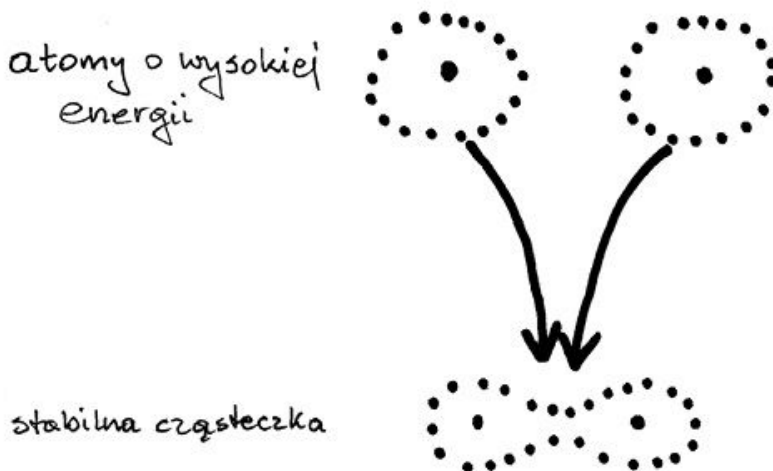
Skręcanie się i obroty atomów są tym, co nazywamy ciepłem, dlatego odczuwamy ciepło pod wpływem oddziaływania światła podczerwonego lub mikrofał na skórę. Na tym również opiera się działanie kuchenek mikrofalowych, które wprawiają w drgania cząsteczki wody, zawarte w kawałku produktu żywnościowego.

Oczywiście im gorętsza jest próbka substancji chemicznej, tym większe prawdopodobieństwo wpadania atomów na siebie i wywoływania zmian konfiguracji orbitali, skręcania się i obrotów atomów. Innymi słowy, podgrzewanie przeważnie sprawia, że większość reakcji zachodzi szybciej.

ZJEDNOCZENI, OPADAMY

Wyobraź sobie, że jesteś elektronem uwiązanym do jądra atomu. Jeśli zbliży się inny atom, jego jądro jednocześnie może przyciągać również ciebie. Jeśli to przyciąganie będzie dostatecznie silne, może cię przeciągnąć na miejsce w pół drogi między oboma jądrami, zatem nie będziesz już w orbitalu atomowym, tylko w „orbitalu cząsteczkowym”. Ten ostatni nosi bardziej rozpowszechnioną nazwę wiązania chemicznego.

Jeśli orbitale cząsteczkowe odznaczają się niższą energią niż orbitale atomowe, od których zaczęliśmy, wówczas elektrony dwóch zbliżających się do siebie atomów mogą razem wpaść do orbitalu cząsteczkowego, a po drodze uwolnić światło. Utworzyło się w ten sposób wiązanie między atomami, czyli przeprowadziliśmy reakcję chemiczną.



W przypadku reakcji wodoru z tlenem jednostki wodoru i tlenu unoszą się swobodnie, lecz kiedy reagują, elektrony każdego atomu wypełniają orbitale cząsteczkowe, łącząc atomy ze sobą i tworząc spójną wiązaniem chemicznym cząsteczkę H_2O . Całość energii opadających elektronów uwalnia się w postaci światła widzialnego oraz podczerwonego (ciepła), wywołując wybuchy, które jako pierwszy ujrzał Henry Cavendish.

Nie musimy przy tym rozpoczynać od atomów, mogą to być cząsteczki. Wiązania w cząsteczce nitrogliceryny są wysokoenergetyczne, zatem ten związek chętnie rozpada się na cząsteczki o stabilniejszych orbitalach, takie jak dwutlenek węgla i woda. W procesie opadania wszystkich elektronów cząsteczki wyrzucają mnóstwo energii, a w rezultacie widzimy wybuch.

ZAPOCZĄTKUJMY TO

Podstawa chemii jest prosta – zaczynamy z jednym zestawem orbitali i kończymy z innym. Rozerwanie początkowych cząsteczek może jednak być trudne. Elektrony w orbitalu cząsteczkowym nie muszą wiedzieć, że mogą stworzyć lepszy układ, trzeba zatem dać im energetycznego kopa, żeby wpadły w pożądaną przez nas konfigurację.

Trafną analogią jest obrazek z płaszczem wiszącym na haku. Płaszcz będzie tam tkwił aż do końca świata, choć mógłby osiągnąć większą stabilność, gdyby spadł na podłogę. To się jednak nie zdarzy, bo najpierw trzeba wprowadzić do systemu energię. Stanie się tak tylko wtedy, gdy uniesiesz płaszcz

o kilka centymetrów i uwolnisz go z haka, a przez to stworzysz mu możliwość upadku i uzyskania stabilniejszej konfiguracji.

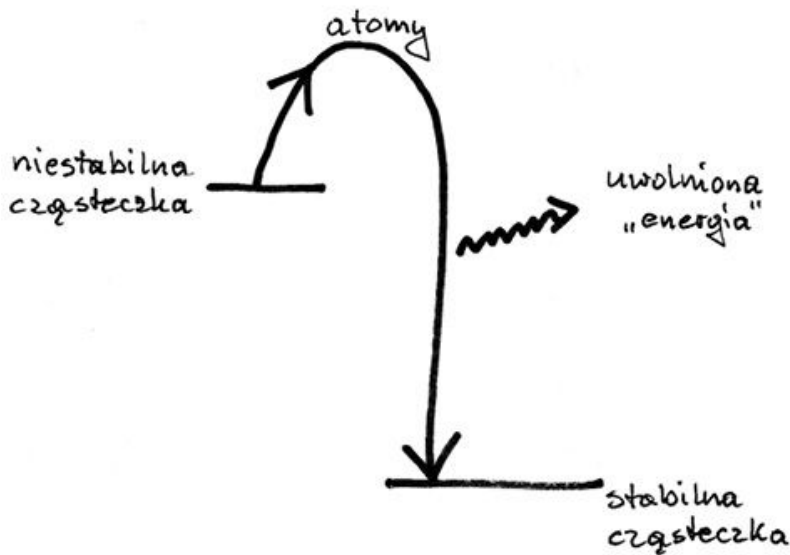
Elektrony zachowują się identycznie. Musimy je najpierw pobudzić i wydobyć z ich orbitali, zanim będą mogły wpaść w głąb nowych.

Stabilną cząsteczkę, taką jak woda, można uważać za płaszcz wiszący na haku kilkumetrowej długości. Żeby uwolnić płaszcz, trzeba wejść na drabinę i unieść płaszcz na całą wysokość haka. Kiedy zaś się go puści, prawdopodobnie tylko opadnie z powrotem prosto na hak. Dlatego woda prawie z niczym nie reaguje.

Natomiast nitrogliceryna przypomina płaszcz wiszący na kilkumilimetrowym haczyku nad urwiskiem. Drobny impuls (powiedzmy, palący się lont) wystarczy, żeby wytrącić elektrony z orbitali, a następujący po tym spadek poziomu energii jest ogromny.

Można też wyobrazić to sobie jako model z klocków Lego. Jeśli chce się coś zbudować od nowa, trzeba włożyć energię w rozdzielanie klocków. Dopiero wtedy, gdy wszystko zostanie rozłożone na części składowe, będzie można utworzyć coś innego.

Bez względu na rodzaj reakcji chemia polega na przekonaniu elektronów do przeskoczenia z orbitali początkowych do nowych, tych, których chcemy. Jak mocno trzeba wszystko ogrzać? Jaki kształt musi mieć wyjściowa cząsteczka? Jakie otrzymania się produkty uboczne? Co zrobić, jeśli reakcja nie zajdzie? Ile cząsteczek przybierze nową konfigurację, a ile wróci do pierwotnej pozycji?



Chociaż w laboratorium może powstać mnóstwo zawiłości, ogólne założenie jest proste: unieść elektrony i pozwolić im opaść.

72 Klapötke T.M. *et al.*, *New azidotetrazoles: Structurally interesting and extremely sensitive*, „Chemistry – An Asian Journal”, r. 7, nr 1 (2012), s. 214–224.

73 *Alfred Nobel*, *Encyclopædia Britannica*. Dostępne na stronie: <https://www.britannica.com/biography/Alfred-Nobel> (dostęp: 18 sierpnia 2017); Sirleaf E.J., *Alfred Nobel's legacy to women*, „New York Times” (12.12.2011).

74 *Alfred Nobel's fortune*, *Nobel Peace Prize*. Dostępne na stronie: <https://www.nobelpeaceprize.org/History/Alfred-Nobel-s-fortune> (dostęp: 18.08.2017).

75 Janes J., *Documents which Changed the Way We Live*, Rowman & Littlefield, Lanham, MD, 2017.

76 Fant K., *Alfred Nobel: A Biography*, Arcade Publishing, Nowy Jork 2014.

Rozdział ósmy

Marzenie alchemika

NAJDROŻSZY PIERWIASTEK, O KTÓRYM NIGDY NIE SŁYSZAŁEŚ

Trzeciego kwietnia 2017 roku na aukcji sprzedano firmie Chow Tai Fook Enterprises diament Pink Star (Różowa Gwiazda) za okrągłe 71 milionów dolarów⁷⁷. Kiedy pisałem tę książkę, była to najwyższa suma, jaką zapłacono kiedykolwiek za drogocenny kamień.

Dla porównania: diament Hope (Nadzieja) sprzedano w 1908 roku Selimowi Habibowi, występującemu w imieniu tureckiego sułtana, za 200 tysięcy dolarów; następnie w 1911 roku kamień odkupiła Evalyn McLean za 154 tysiące dolarów. W 1958 roku otrzymał go w darze waszyngtoński Instytut Smithsona. Diament został ubezpieczony na milion dolarów, a chodzą słuchy, że dzisiaj jest wart jeszcze więcej⁷⁸.

Diamenty są formą czystego węgla, zatem słusznie byłoby obwołać węgiel jednym z najdroższych pierwiastków w układzie okresowym. Z drugiej strony węgiel drzewny – również składający się z czystego węgla – kupuje się za kilka funtów w każdym supermarkecie. Zatem należy on chyba do najtańszych pierwiastków.

Złoto traktujemy jak metal cenniejszy od srebra, lecz w latach dziewięćdziesiątych XIX wieku zwycięzcy igrzysk olimpijskich wręczano srebrny medal, a nie złoty. Firmy płytowe nagradzają artystów w dowód najwyższego uznania platynowymi płytami, ale platyna na wolnym rynku kosztuje mniej od złota o 15 dolarów za uncję systemu troy.

Rod i pallad, stosowane w samochodowych katalizatorach, aktualnie mają wartość podobną do wartości platyny, ale w 2008 roku cieszyły się krótkotrwałym skokiem notowań – ich wartość wzrosła wtedy dziesięciokrotnie i przez miesiąc były cenniejsze od złota. Towary są warte tyle, ile ktoś chce za nie zapłacić, a pierwiastki pod tym względem niczym się nie wyróżniają.

Jednym z najdroższych materiałów na Ziemi jest z oczywistych powodów pluton o wartości 11 tysięcy dolarów za gram (według amerykańskiego Departamentu Energii), zatem często się podaje, że to najdroższy pierwiastek⁷⁹. Istnieje jednak inny, o którym rzadko się dyskutuje, a który dystansuje pluton. To kaliforn, pierwiastek o liczbie atomowej 98, używany jako czynnik inicjujący pracę reaktorów jądrowych i sprzedawany za gigantyczną sumę 27 milionów dolarów za gram⁸⁰. Diament Pink Star waży około 12 gramów, co oznacza, że gram kalifornu kosztuje ponadpięciokrotnie więcej.

Tym, co czyni go tak kosztownym, jest fakt, że kaliforn nie występuje w przyrodzie. To pierwiastek, który sami musimy sobie wytwarzać.

WSZYSTKO TO WIEDZMY

Przed odkryciem fosforu oraz eksperymentami z ogniem, przeprowadzanymi w XVIII wieku, badania chemiczne pozostawały w opłakanym stanie. Pod wpływem mieszaniny symbolizmu

judeochrześcijańskiego, starożytnych bajek oraz prac perskiego autora Dżabira Ibn Hajjana ignorowano rygorystyczne badania substancji chemicznych, a fakty łączone z przesadami.

Powstała w ten sposób dziedzina nosiła nazwę „alchemia” – ten pochodzący z arabskiego termin wywodzi się od greckiego słowa *chemeia*, oznaczającego czarną magię. W tamtych czasach nikt nie próbował poszukiwać substancji elementarnych. Zamiast tego starano się wynaleźć substancje będące w mniejszym lub większym stopniu wytworami ludzkiej ręki.

Należał do nich „alkahest”, uważany za najsilniejszy kwas rozpuszczający wszystko. Kolejnym był „eliksir życia”, mający powstrzymać śmierć, jeszcze innym – „panaceum”, czyli lek na wszystkie choroby⁸¹. Celem alchemików było jednak przede wszystkim wytworzenie materiału zwanego „kamieniem filozoficznym”, który mógł zmieniać inne metale w złoto. Nie wiadomo, kto wymyślił kamień filozoficzny, ale plotki o jego istnieniu krążyły od XIII wieku.

Autor średniowiecznej encyklopedii, Wincenty z Beauvais, twierdził, że Bóg zdradził wiedzę o „transmutacji” Adamowi, który przekazał ją Noemu i tak dalej. Wydaje się, że źródłem tej informacji była wyobraźnia autora, choć podobną historię zawiera *Le Livre de Sydrac*, anonimowe dzieło z XIII wieku, zatem w tamtych czasach była to najwyraźniej rozpowszechniona idea⁸².

Jedną z najwcześniejszych udokumentowanych wzmianek o „kamieniu filozoficznym” zawiera sztuka Bena Jonsona *Alchemik* z 1610 roku, której treść sugeruje, że Adam dowiedział się, jak wytwarzać tę legendarną substancję⁸³. Kiedy jednak został wyrzucony z raju, przypuszczalnie zapomniał recepturę. Bravo, Adamie! Najpierw straciłeś żebro, potem recepturę kamienia filozoficznego. Co będzie następne? Twój młodszy syn?

Alchemii zawdzięczamy znajomość rozmaitych reakcji chemicznych, by nie wspomnieć o odkrytym przez Branda Forsterze, ale zawarta w niej wiedza była nieuporządkowana i oparta głównie na domysłach.

Problem z próbami zamieniania jednego pierwiastka w inny polega na tym, że tożsamość pierwiastka określa liczba protonów w jego jądrze, a jej zmiana nie jest tak prosta jak zmieszanie ze sobą kilku substancji w próbówce.

Z lektury poprzedniego rozdziału dowiedzieliśmy się, że w chemii najważniejsze jest manipulowanie elektronami. Jądro atomu jest zbyt małe i za dobrze przed nami ukryte, żebyśmy mieli na nie jakiś wpływ. Mówiąc wprost, elektrony mogą tańczyć tak, jak się im zagra, lecz dopóki jądro pozostanie nienaruszone, dopóty pierwiastek się nie zmieni.

A mimo to we wnętrzu gwiazd nieprzerwanie zachodzi transmutacja wodoru w hel, więc najwyraźniej żadne prawo fizyki tego nie uniemożliwia. Imitowanie tej techniki tu, na Ziemi, wymagałoby nadludzkiej mocy. Skoro zaś o tym mowa...

POWSTANIE SUPERBOHATERÓW

Peter Parker posiadał moc Spider-Mana, kiedy ugryzł go radioaktywny pająk, który dokonał nieodwracalnych zmian w jego DNA. Bruce Banner dostał się w zasięg wybuchu oraz promieniowania gamma bomby atomowej i zmienił się w Hulka. Fantastyczna Czwórka wpadła w burzę promieniowania kosmicznego, Daredevil został ochlapany promieniotwórczymi odpadami, a zdolności telekinetyczne Jean Grey z pierwotnej fabuły *X-Mena* wyzwolił lot promem kosmicznym w rejonie radioaktywnej burzy słonecznej⁸⁴.

Bez wątpienia wiele zawdzięczamy radioaktywności, ale w latach pięćdziesiątych XX wieku stworzyła ona również Godzillę i niezliczoną rzeszę gigantycznych owadów, więc raczej powinniśmy traktować ją ostrożnie⁸⁵. Niemniej jednak to dzięki radioaktywności ludzkość ostatecznie posiadała zdolność transmutowania jednego pierwiastka w drugi, wobec tego powinniśmy się z nią zaznajomić.

To zjawisko odkrył przypadkowo w 1896 roku francuski fizyk Henri Becquerel. Zamierzał przeprowadzić kilka eksperymentów z fotograficznymi płytkami światłoczułymi, lecz tamtego dnia niebo było zachmurzone i włożył je do szuflady. Kiedy po dwóch dniach je wyjął, na płytkach widniał powstały jakimś sposobem obraz leżącego obok nich miedzianego krzyża. Najwidoczniej coś znajdującego się w szufladzie zrobiło zdjęcie. W szufladzie po drugiej stronie krzyża był jeszcze tylko słoiczek z roztworem siarczanu potasu-uranu, toteż Becquerel uznał, że to on jest sprawcą zjawiska.

Płytką fotograficzną najlepiej uaktywnia się pod wpływem światła słonecznego, ale jej przemianę może wywołać każda wiązka promieniowania o wysokiej energii. Atomy potasu i cząsteczki siarczanu nie promieniują, zatem zgodnie z logicznym rozumowaniem promienie pochodziły z innego pierwiastka w roztworze – uranu.

Najwyraźniej uran emitował coś niewidzialnego, co zmieniało powierzchnię płytek fotograficznych. Krzyż znalazł się między nimi i – voilà – powstał pierwszy radiogram zrobiony przez słoik.

Wkrótce po dokonaniu przez Becquerela tego odkrycia Maria Skłodowska-Curie, jedyna osoba wyróżniona Nagrodami Nobla z dwóch dziedzin nauki, nazwała omawiane zjawisko „radioaktywnością” od łacińskich słów *radius* (promień) oraz *activus* (czynny).

Maria wraz z mężem Pierre’em odkryła jeszcze dwa pierwiastki promieniotwórcze; pierwszy nazwała radem (z oczywistego powodu), drugi zaś polonem na cześć ojczystej Polski. Niestety, Skłodowska-Curie uległa chorobie spowodowanej wystawianiem się na działanie radioaktywności, z czego wynika dla nas jeszcze jedna nauka – ten czynnik uszkadza komórki.

NIEODŁĄCZNA NIESTABILNOŚĆ

Z rozdziału trzeciego dowiedzieliśmy się, że jądro atomu to twór niestabilny. Protony utrzymują elektrony na swoich miejscach, ale same się odpychają, zatem spajając je ze sobą muszą neutrony.

Urodzona w Austrii badaczka Lise Meitner uświadomiła sobie, że gdy liczby atomowe pierwiastków zbliżają się do 90, ta równowaga staje się niestabilna i jądro może się rozpaść. Meitner jednak nie otrzymała za to ważne odkrycie Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki. Otrzymał ją za to mężczyzna, z którym wspólnie prowadziła badania w tej samej pracowni. Ostatecznie na jej cześć nadano nazwę meitner pierwiastkowi o liczbie atomowej 109, zatem nie została całkowicie zlekceważona.

W miarę naszego posuwania się w stronę coraz cięższych pierwiastków rośnie liczba zawartych w nich protonów, dlatego musi iść z nią w parze również liczba neutronów, żeby te cząstki mogły trzymać się razem. Wiąże się z tym jednak pewna komplikacja (czy nie tak jest zawsze?). Odpychająca siła działająca między protonami ma nieskończony zasięg, ale ze spajającą siłą neutronów jest inaczej.

To oznacza, że w dużych atomach tylko kwestią czasu staje się zwycięstwo siły odpychania, co czyni z ich jąder struktury niepewne. Duże atomy są kruche i pozostawione przez dłuższy czas ulegną rozpadowi.

Emitujący niebieskie światło aktyn ma kolosalne jądro zawierające 89 protonów, zatem około połowy grudnia tego pierwiastka w ciągu dwudziestu lat rozpadnie się i powstanie coś innego. Dla odróżnienia, znacznie mniejszy rubid ma tylko 37 protonów, w związku z tym rozpad takiej samej ilości trwa 49 miliardów lat.

Wspomniane pierwiastki odznaczają się osobliwą tendencją – mają w jądrach liczbę neutronów, która w pierwiastkach zazwyczaj nie występuje. Owe „potomne” cząstki mogą powstawać jedynie w wyniku rozpadu promieniotwórczego, więc jeśli zmierzy się w skale zawartość jąder „macierzystych” i „potomnych”, ich stosunek umożliwi obliczenie ilości wyjściowej pierwiastka, a następnie długości okresu jego istnienia. Za pomocą takiej techniki amerykański chemik Clair Patterson obliczył wiek Ziemi na około 4,5 miliarda lat⁸⁶.

ROZBIJ TO

Istnieją różne sposoby rozpadu jądra atomu. Niekiedy całe jądro ulega rozpadowi w reakcji noszącej nazwę rozszczepienia, ale najczęściej z niezrozumiałych powodów z rozpadającego się jądra zostaje wyrzucony z olbrzymią prędkością pakiet zawierający dwa protony i dwa neutrony. Owe pakiety wyrwywają się z atomów z prędkością 15 milionów metrów na sekundę i okazują się tymi samymi cząstkami alfa, które Rutherford wykorzystywał w eksperymentach ze złotą folią.



Kiedy dochodzi do wyemitowania cząstki alfa, pozostałe jądro traci dwa protony, a tym samym zmienia swoją tożsamość. Rutherford wykorzystał to zjawisko. Ze względu na prędkość cząstek alfa wysunął hipotezę, że gdy ostrzela nimi inny atom, cząstki roztrzaskają jego jądro i zmieniają go w jakiś lżejszy pierwiastek.

W 1919 roku Rutherford ostrzelał cząstkami alfa pojemnik z azotem w gazowym stanie skupienia, lecz pod wysokim ciśnieniem, które miało zwiększyć prawdopodobieństwo zderzeń cząstek z atomami. W końcu udało mu się rozbić atomy azotu i zmienić je w węgiel. Jego eksperyment trafił na pierwsze strony gazet, ponieważ uczony zdołał „rozdzielić atom” i dokonać transmutacji jednego pierwiastka w inny. Pradawne marzenie alchemika nie miało postaci mitycznego kamienia z rajskiego ogrodu, lecz komory z gazem i źródła emitującego cząstki alfa⁸⁷.

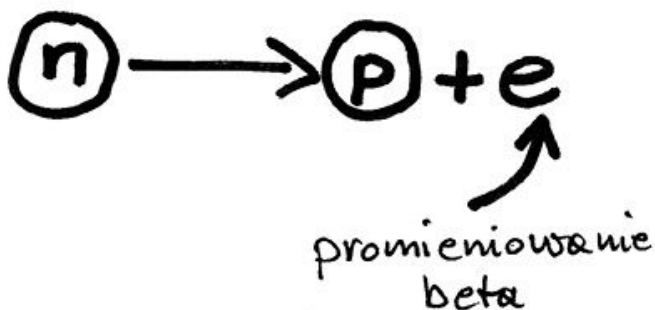
Nie da się wprawdzie zmienić ołowiu w złoto uświęconym zaklęciem, lecz jeśli weźmiesz pierwiastek tal, doprowadzisz go do temperatury wrzenia i zmienisz w gaz, który sprężysz pod wysokim ciśnieniem, po czym ostrzelasz próbkę cząstkami alfa – jeden na kilka tysięcy atomów talu zmieni się w złoto.

ROZBUDUJ TO

Rozpad alfa ma dla ludzkiego umysłu pewien sens, bo możemy sobie wyobrazić, że coś się rozpada, gdy odpychanie góruje nad przyciąganiem. We wnętrzu jądra może jednak zachodzić inne zjawisko, którego nie da się zobrazować tak łatwo. Neutrony mogą przeistaczać się w protony, wyrzucając w trakcie tego procesu elektron.

W dodatku IV znajduje się szczegółowy opis mechanizmu tego zjawiska, lecz w tym momencie wyjaśnianie go odwiódłoby nas od tematu. Najlepiej więc będzie uciec się do małego szachrajstwa i wyobrazić sobie neutron jako proton z elektronem spowijającym go niczym opakowanie cukierka. Jeśli elektron zostanie zdjęty i wyrzucony, powstała w wyniku tego cząstka będzie protonem.

Owe strumienie wyrzucanych elektronów nazywamy promieniowaniem beta. W odróżnieniu od rozpadu alfa, zachodzącego jedynie w jądrach o większej masie, przemiana neutronu w proton może dotyczyć każdego pierwiastka. Niektóre są podatniejsze od innych (te z większą liczbą neutronów), ale wszystkie atomy mogą przejawiać radioaktywność beta.



Gdybyśmy zdołali przekonać pierwiastek do przekształcenia jednego z neutronów w proton, otrzymalibyśmy pierwiastek o numerze wyższym o jeden od tego, który mieliśmy na początku – byłby to odwrócony proces Rutherforda. Najpierw jednak pomówmy o bananach.

BANANY

Cząstki radioaktywne mają ładunek i poruszają się z wielką prędkością, co oznacza, że niszczą rzeczy stojące im na drodze, w tym związki chemiczne w twoim ciele.

W razie wystawienia na działanie dostatecznie dużej dawki promieni zawarty w twoich komórkach DNA ulegnie zniszczeniu i twoje ciało rozpadnie się od środka. Zazwyczaj jako pierwsze cierpią na tym najszybciej rosnące elementy ciała (włosy i paznokcie) i dlatego wskutek choroby popromiennej wypadają. Następnie dzieją się najróżniejsze niemiłe rzeczy: oddziela się skóra, wypadają zęby, a wnętrzości stopniowo się rozpuszczają i zmieniają się w papkę, tracąc uporządkowaną strukturę.

W celu monitorowania otrzymanej przez daną osobę dawki promieniowania mierzymy ją w jednostkach zwanych siwertami (Sv). Dawka w siwertach wyraża ilość energii przenoszonej przez promieniowanie w porównaniu z masą ciała osoby, która ją otrzymała.

Nie ma jednoznacznych danych liczbowych, dotyczących tego, ile siwertów stanowi dawkę niebezpieczną dla człowieka, ale problemy zaczynają się mniej więcej od 0,05 siwerta⁸⁸ na rok⁸⁹. Najsilniejsze źródło radioaktywności, z jakim się prawdopodobnie kiedykolwiek zetkniesz, to RTG zęba albo mammografia, dostarczające około 0,004 siwerta, czyli 4 milisiwertów (4 mSv). Innymi słowy, to dawka absolutnie bezpieczna.

Istnieje jeszcze inna jednostka pomiaru ekspozycji na radioaktywność – banan.

Najpierw należy w tym miejscu wyjaśnić, że pewne jądra atomów są stabilniejsze od innych. Dzięki zastosowaniu równania Schrödingera dla protonów i neutronów możemy otrzymać listę parametrów szczególnie stabilnych jąder, które autentycznie nazywa się „liczbami magicznymi”. Nie zajęto zgodnego stanowiska w dyskusji nad powodem, dla którego to działa – po prostu wiemy, że pewne liczby protonów i neutronów się sprawdzają, a inne nie.

Najlepszym przykładem jest potas. Większość atomów potasu we Wszechświecie, mających po 19 protonów i 20 neutronów, jest stabilna. Około 0,012 procent ma jednak 21 neutronów – jest to potas-40, a konfiguracja jego jądra okazuje się niestabilna. Potas-40 łatwo ulega rozpadowi beta, więc każda próbka potasu emituje bardzo słaby strumień promieniowania, a owocem zawierającym najwięcej potasu jest skromny banan.

Bananowa dawka równoważna (ang. *banana equivalent dose*, BED), pierwotnie stworzona w 1995 roku przez Gary’ego Mansfielda z Laboratorium Narodowego im. Lawrence’a w Livermore w ramach żartu, obrazuje dawkę promieniowania, jaką prawdopodobnie otrzyma dana osoba w wyniku zjedzenia jednego banana. Można jej używać do obliczania radioaktywności produktów żywnościowych⁹⁰.

Nie chcę cię jednak niepokoić – jedna BED odpowiada niespełna jednej milionowej siwerta⁹¹, więc zanim wezwiesz do bojkotowania bananów, przeprowadźmy trochę obliczeń. Jeśli założymy, że 0,05 siwerta jest dawką śmiertelną, trzeba byłoby zjeść 5 tysięcy bananów, i to na tyle szybko, by narazić się na niebezpieczeństwo. Oznacza to 14 bananów dziennie. Przez cały rok.

Jeśli naprawdę chcesz spróbować przeprowadzić taki eksperyment, sugeruję najpierw zasięgnięcie porady lekarza. Może psychiatry?...

POWRÓT DO ZABAWY W BOGA

W 1940 roku amerykański chemik Dale Corson wyizolował astat, pierwiastek o liczbie atomowej 85⁹². Był to ostatni odkryty pierwiastek występujący w przyrodzie, którego istnienie przewidziano na podstawie układu okresowego Mendelejewa.

Po umieszczeniu go w odpowiedniej komórce tabeli otrzymaliśmy układ okresowy obejmujący cały przedział od 1 do 92 bez luk. Wszystkie pierwiastki – od wodoru powstałego w Wielkim Wybuchu aż do uranu tworzącego się w supernowych – zostały ostatecznie zidentyfikowane. Czy można było pójść dalej i tworzyć nasze własne pierwiastki o wyższych liczbach atomowych?

W filmie *Iron Man 2* Tony Stark poszukuje pierwiastka do zasilania swojej zbroi, zanim ta go uśmierci wskutek zatrucia palladem. Odpowiedni metal jednak nie istnieje, więc żeby uratować film i pokonać przeciwnika, którego gra Mickey Rourke, bohater wytwarza nowy pierwiastek za pomocą lasera nadfioletowego oraz swojego charyzmatycznego uroku⁹³.

Wiemy już, że w układzie okresowym nie brakuje żadnych pierwiastków, toteż nienazwany pierwiastek Starka musiałby składać się z olbrzymich atomów, a więc wykazywać ogromną radioaktywność. Zatem mój pomysł na scenariusz *Iron Man 3* obracał się wokół Tony'ego Starka przebywającego w szpitalu i przez dwie godziny filmu wymiotującego do kubła, gdyż radioaktywność powoli niszczyłaby mu narządy wewnętrzne. Z jakiegoś powodu scenariusz, który producenci ostatecznie wybrali, przedstawiał sprawę inaczej. Ich strata.

W 1940 roku Edwin McMillan postanowił uprzedzić Tony'ego Starka i samemu wytworzyć nowy pierwiastek. Wziął grudkę uranu i ostrzeliwał ją strumieniem neutronów o dużej energii, aż część z nich uległa absorpcji. Jądro uranu może przyjąć neutron, lecz w wyniku tego staje się niestabilne. Żeby stracić nieco energii, jeden z neutronów musi ulec rozpadowi beta, czyli wyrzucić elektron i przekształcić się w proton. Atom uranu ma zatem zamiast neutronu dodatkowy proton, więc naprawdę już nie jest uranem, tylko pierwiastkiem o liczbie atomowej 93.

Przez 14 miliardów lat pierwiastek o takiej liczbie atomowej nie istniał we Wszechświecie, aż nagle w 1940 roku pojawił się na Ziemi⁹⁴.

Uran nazwano od planety o tej samej nazwie, zatem McMillan nazwał swój pierwiastek neptunem od następnej planety w kolejności. Później, w tym samym roku, w ramach Projektu Manhattan, Glenn Seaborg zdołał zsyntetyzować pierwiastek o liczbie atomowej 94. Jest on znacznie stabilniejszy niż neptun, więc choć neptun powstał jako pierwszy sztucznie wytworzony pierwiastek, ten Seaborga można było produkować w porcjach na tyle dużych, by dało się wziąć go w rękę. To lśniący metal o toksyczności porównywalnej z gazem paraliżującym; Seaborg, aby nie odbiegać od motywów planetarnych, nazwał go plutonem⁹⁵.

Do końca drugiej wojny światowej i później Seaborg dalej syntetyzował pierwiastki: ameryk (liczba atomowa 95, nazwany od Ameryki), kiur (liczba atomowa 96, nazwany na cześć Marii Skłodowskiej-Curie) i berkel (liczba atomowa 97, nazwany od kalifornijskiego miasta Berkeley, gdzie prowadzono badania).

Powyzsze eksperymenty były ściśle tajne ze względu na wojnę, lecz po jej zakończeniu Seaborgowi pozwolono zaprezentować uzyskane wyniki 16 listopada 1945 roku na forum Amerykańskiego Towarzystwa Chemicznego. Uczony jednak przypadkiem wygadał się pięć dni wcześniej. Jako namiętny popularyzator nauki otrzymał zaproszenie do wystąpienia w radiowej audycji dla dzieci *Quiz Kids* (Quiz dla dzieci), w której miał odpowiadać na pytania dotyczące fizyki. Kiedy jedenastolatek nazwiskiem Richard Williams spytał, czy ludzie kiedykolwiek wytworzą nowe pierwiastki (nieświadom, że rozmawia z największym na świecie ekspertem w tej dziedzinie), Seaborg nie zdołał

opanovać podniecenia i w programie nadawanym na żywo wyapała wszystko o utajionych odkryciach ku wielkiemu zdenerwowaniu swoich zwierzchników⁹⁶.

Czy jednak naprawdę można go winić? Otaczały go odczucie umysły, pytao go o wszystko, co wiedział na temat ulubionego zagadnienia. Można rzec, że znalazł się w swoim żywiole. Czekaaem przez osiem rozdziałów na moment, gdy będę mógł o tym napisać.

UKOŃCZENIE TABELI

Układ okresowy pierwiastków dzieli się na 7 okresów oznaczających 7 powłok elektronowych, składających się z orbitali, oraz na 18 grup odzwierciedlających liczbę elektronów zajmujących każdą powłokę. W rezultacie tabela zawiera 118 miejsc. W przyrodzie występują 92 pierwiastki, do wypełnienia zostało nam więc 26.

Seaborg miał szczęście do swoich pierwiastków, ponieważ wszystkie okazały się dość stabilne. Gdyby pracował nad tym dalej, przekonałby się, że sprawa robi się o wiele trudniejsza. Zmuszanie jąder do zwiększania masy jest niełatwe, bo im większe się stają, tym mocniej siła odpychania oddziałuje na protony.

Najlepsza metoda polega na wzięciu próbki pierwiastka o już dużej masie i bombardowaniu jej mniejszymi jądrami w nadziei, że zostaną zaabsorbowane. W 1950 roku otrzymano kaliforn przez ostrzeliwanie kiuru cząstkami alfa, a w 1952 roku w podobny sposób wytworzono einstein i ferm.

Ponadto wykorzystuje się tę technikę do produkowania pierwiastków o niższych liczbach atomowych, lecz rzadko występujących w przyrodzie. Drugim pod względem małej dostępności pierwiastkiem w układzie okresowym (za astatem) jest frans – zaledwie około 30 gramów w skorupie ziemskiej. Można go jednak wytworzyć, bombardując atomami tlenu kawałek złota.

Można również odtwarzać zapasy technetu, pierwiastka o liczbie atomowej 43, który ma niestabilne jądro i w normalnych warunkach jest nietrwały. Warto jednak to robić, ponieważ wchodzi on w skład 80 procent używanych na świecie znaczników medycznych, wstrzykiwanych w celu śledzenia przepływu krwi.

Oczywiście wytwarzanie sztucznych pierwiastków to precyzyjna operacja. Jeśli bombardując próbkę jądra będą zbyt powolne, odbiją się, a jeśli zbyt szybkie – wszystko roztrzaskają. Jednakże w ciągu ostatniego półwiecza coraz bardziej zbliżaliśmy się do ukończonej w pełni tabeli.

Bombardowaliśmy ameryk i kiur atomami węgla, żeby wytworzyć mendelew i nobel. Poprzez bombardowanie neonu einsteinu otrzymaliśmy lorens. Dzięki ponownemu użyciu neonu do bombardowania plutonu wytworzyliśmy rutherford. Na początku lat dwutysięcznych mieliśmy już dubn, seaborg, bohr, has, meitner, darmsztadt, roentgen, kopernik, flerow i liwermor, do odkrycia zostały zatem jeszcze tylko cztery. Oto liczby atomowe owych brakujących pierwiastków: 113, 115, 117 i 118.

W tamtym momencie część tabeli na dole po prawej stronie wyglądała jak rząd powybijanych zębów. Wtedy, w listopadzie 2016 roku, Międzynarodowa Unia Chemii Czystej i Stosowanej ogłosiła wieść o pomyślnej syntezie pierwiastków: nihonium, moscovium, tennessine oraz oganesson. Układ okresowy został wreszcie ukończony⁹⁷.

Część tych prac może się wydawać bezsensowną zabawą, ale wiele z tych sztucznych pierwiastków może się przydać. W tym momencie prawdopodobnie masz w domu próbkę ameryku, pierwiastka o liczbie atomowej 95. Przynajmniej mam taką nadzieję. Ameryk bezustannie emituje cząstki alfa, więc jeśli umieścić go w otwartym obwodzie, naładowane cząstki mogą przelatywać przez przerwę do odbiornika i zamykać obwód bezprzewodowo. Jeśli w tę przerwę dostaną się kłęby dymu lub kurzu, strumień cząstek alfa zostanie zablokowany, co uruchamia alarm. Na tym polega działanie wykrywaczy dymu.

KONIEC WSZYSTKIEGO

Skoro mamy już wszystko aż do numeru 118 i zapełniliśmy całą tabelę, czy moglibyśmy pójść jeszcze dalej? Szczerze mówiąc, nie jesteśmy pewni. Oganesson ma wypełnioną siódmą powłokę elektronową, ale może być jeszcze ósma lub nawet dziewiąta.

Seaborg podejrzewał, że układ okresowy może się zakończyć po dojściu do pierwiastka o liczbie atomowej 126, gdyż to liczba magiczna, a powyżej niej odpychanie się protonów może stać się zbyt potężne, bez względu na liczbę umieszczonych przez nas w jądrze neutronów. Przyjęto nawet jako nazwę zastępczą termin unbihexium⁹⁸.

Inni fizycy spekulują na temat możliwości stworzenia dziewiątego okresu lub nawet dziesiątego i jedenastego, bez żadnych ograniczeń. Nie wiemy dostatecznie dużo o jądrze, żeby wysnuć ostateczne wnioski, więc jedyne rozsądne działanie polega na podjęciu próby. Oto cały sens nauki – przekonać się, co jest możliwe.

77 Sotheby's sells record \$71 million diamond to Chow Tai Fook, „Bloomberg” (4.04.2017). Dostępne na stronie: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-04-04/sotheby-s-sets-world-record-selling-71-million-pink-diamond> (dostęp: 18.08.2017).

78 Kurin R., *Hope Diamond: The Legendary History of a Cursed Gem*, HarperCollins, Nowy Jork 2007.

79 Plutonium certified reference materials price list, US Department of Energy – Office of Science. Dostępne na stronie: <https://science.energy.gov/nsl/certified-reference-materials/prices-and-certificates/plutonium-certified-reference-materials-price-list> (dostęp: 18.08.2017).

80 Californium price, Metalary. Dostępne na stronie: <https://www.metalary.com/californium-price> (dostęp: 18 sierpnia 2017).

81 Hedesan G.D., *An Alchemical Quest for Universal Knowledge: The 'Christian Philosophy' of Jan Baptist Van Helmont 1579–1644*, Routledge, Oksford 2016.

82 Patai R., *The Jewish Alchemists: A History and Source Book*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1994.

83 Jonson B., *Alchemik*, przekł. J. Kydryński, Wyd. Literackie, Kraków 1982.

84 Lee S., Ditko S., *Amazing Fantasy*, nr 15 (15 sierpnia 1962); Lee S., Kirby J., *The Incredible Hulk*, nr 1 (1.05.1962); Lee S., Kirby J., *The Fantastic Four*, nr 1 (1.11.1961); Lee S., Everett B., *Daredevil*, nr 1 (1.04.1964); Claremont C., Byrne J., *X-Men*, nr 137 (1.09.1980), *Phoenix: The Untold Story* (1.04.1984).

85 *Godzilla* (1954), reż. I. Honda.

86 Patterson C., *Age of meteorites and the earth*, „Geochimica et Cosmochimica Acta”, r. 10, nr 4 (1956), s. 230–237.

87 Rutherford E., *The Collision of Alpha-particles with Light Atoms*, „Philosophical Magazine”, r. 37 (1919).

88 Czyli 50 milisiwertów (mSv); w prasie fachowej podaje się taką dawkę graniczną u radiologów, jednak pod warunkiem, „że w ciągu kolejnych 5 lat nie zostanie przekroczona sumaryczna wartość 100 mSv” (https://dawki.ifj.edu.pl/wia/DTP0405_18_Budzanowski.pdf) (przyp. tłum.).

89 *Public ignorant about radiation dose of mammograph*, „Medscape” (12 maja 2014). Dostępne na stronie: <http://www.medscape.com/viewarticle/824999> (dostęp: 18.08.2017).

90 Mansfield G., *Banana equivalent dose* (7.03.1995). Dostępne na stronie: http://health.phys.iit.edu/extended_archive/9503/msg00074.html (dostęp: 18.08.2017).

91 Źródła internetowe podają wartość 0,1 mikrosiwerta (μSv) (przyp. tłum.).

92 Corson D.R., MacKenzie K.R., Serge E., *Artificially radioactive element 85*, „Physical Review”, r. 58, nr 8 (1940), s. 672–678.

93 *Iron Man 2* (2010), reż. Jon Favreau.

94 Edwin M. McMillan – facts, Nobel Prize. Dostępne na stronie: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1951/mcmillan-facts.html (dostęp: 18.08.2017).

95 Shoch R.M., *Case Studies in Environmental Science*, West Publishing Co., Eagan, MN, 1996.

96 *Americium*, ACS Publications. Dostępne na stronie: <http://pubs.acs.org/cen/80th/print/americiumpint.html> (dostęp: 18.08.2017).

97 IUPAC announces the names of the elements 113, 115, 117 and 118, *International Union of Pure and Applied Chemistry* (30.11.2016). Dostępne na stronie: <https://iupac.org/iupac-announces-the-names-of-the-elements-113-115-117-and-118> (dostęp: 18.08.2017).

98 Emsley J., *Nature's Building Blocks: An A–Z Guide to the Elements*, Oxford University Press, Oksford 2001.

Rozdział dziewiąty

Lewa strona tabeli

NAJŁATWIEJ ZDOBYTA NAGRODA NOBLA

Gdyby 20 lat temu zapytać jakiegoś naukowca o pierwiastek najlepiej przewodzący prąd elektryczny, wskazałby srebro. A nie używa się go w elektronice jedynie dlatego, że miedź wypada taniej.

W 2004 roku dwaj fizycy zdobyli Nagrodę Nobla za poprawienie przewodności innego pierwiastka za pomocą kawałka taśmy klejącej.

Rosyjscy fizycy: Konstantin Nowosiołow i Andriej Geim (może pamiętasz go jako naukowca, który w 1997 roku sprawił, że żaby zyskały zdolność lewitacji⁹⁹), pracowali z grafitem, miękką postacią węgla, używaną do wytwarzania wkładów do ołówków. Ponieważ grafit jest kruchy, przeważnie się odłupuje, więc naukowcy pracujący w gabinetach w tym samym korytarzu używali taśmy klejącej do czyszczenia próbek. Przyklejenie taśmy i zerwanie wraz z nią nadmiaru grafitowego pyłu umożliwiło uzyskanie świeżej, połyskliwej powierzchni¹⁰⁰. Przyglądanie się tej czynności nasunęło Nowosiołowowi i Geimowi pewien pomysł.

Jeśli przyklei się taśmę do grudki już oczyszczonego grafitu, można uzyskać pojedynczą warstwę węgla o grubości nie większej niż jeden atom. Ta osobliwa substancja, którą uczeni nazwali grafenem, sposobem organizacji przypomina złożoną z atomów węgla siatkę podobną do tej, z której robi się zagrody dla drobiu, i cechuje się wieloma niezwykłymi właściwościami. Nie tylko jest dwiście razy mocniejsza od stali, lecz także przezroczysta i można ją wykorzystywać jako sito do oddzielania soli z wody morskiej¹⁰¹.

Oprócz tego wszystkiego grafen odznacza się przewodnością elektryczną lepszą od srebra. Właściwość tę mierzy się w jednostkach nazywanych simensami (S). Srebro ma przewodność wynoszącą 60 milionów simensów na metr, a grafen przewodzi jeszcze szybciej, choć wciąż nie uzgodniono wspólnego stanowiska co do ostatecznego wyniku pomiarów¹⁰². Zaskakuje w tym fakt, że węgiel nie należy do metali, a zwykle tylko metale wykazują taką przewodność. Mamy zatem do czynienia z czymś bardzo dziwnym.

CZYM JEST METAL?

Kiedy słyszymy słowo „metal”, mamy przed oczami to samo: Iana „Lemmy’ego” Kilmistera, basistę i wokalistę angielskiej grupy rockowej Motörhead. Niech spoczywa w spokoju.

W następnej kolejności myślimy o szarawych ciałach stałych, twardych i lśniących. Naprawdę zaś myślimy wtedy o stali, tytanie, aluminium i chromie, czyli czterech metalach dominujących w naszym codziennym życiu, choć metale mają najróżniejsze cechy wyglądu oraz właściwości.

Bizmut tworzy zawiłe formy z kwadratowych kryształów, lśniące niczym olej na powierzchni kałuży, podczas gdy lutet i tul występują w postaci włóknistych kępek wyglądających jak postrzępione

kawałki wołowy. Niob w pierwszej chwili po wyizolowaniu przypomina zmętniałe srebro, ale wystarczy przepuścić przez niego prąd elektryczny, a nabierze tęczyowych barw.

Niektóre metale wykazują właściwości magnetyczne (żelazo, kobalt, nikiel, terb i gadolin), a inne, choć same nie mają takich właściwości, wzmacniają je u wymienionej piątki (jak neodym). Pewne metale zachowują stały stan skupienia nawet po ogrzaniu do temperatury ponad 3000°C (jak wolfram), inne natomiast topią się w dłoni (jak gal). Ich reaktywność również wykazuje dużą rozpiętość, począwszy od złota, które nawet nie koroduje w kwasie, do erbu, wybuchającego przy lekkim ogrzaniu.

Co je wszystkie łączy mimo tak szerokiego spektrum zachowań? Odpowiedź brzmi następująco: metal to pierwiastek, który zawsze przewodzi prąd elektryczny. Oczywiście węgiel w postaci grafenu też go przewodzi, lecz metale przewodzą go bez względu na to, w jakim są stanie.

Żeby zrozumieć chemię metali, musimy pojąć elektryczność, a ta opowieść rozpoczyna się w starożytnym Egipcie.

PIERWSZY FARAON

W 3100 roku p.n.e. królestwo Egiptu zostało po raz pierwszy zjednoczone pod berłem Narmera, pierwszego faraona. Wokół tożsamości Narmera toczy się mnóstwo debat, ale mamy jakąś dozę pewności przynajmniej co do znaczenia jego imienia. Po przetłumaczeniu na polski oznacza ono „gniewny sum”¹⁰³.

Może wydać się dziwaczne to, że faraon przybrał imię na cześć rzecznej ryby, ale w kulturze egipskiej sumy były panami, obrońcami Nilu, należącymi do najbardziej czczonych stworzeń na świecie.

Prawda, większość sumów to bezużyteczne monstra, lecz rasa żyjąca w Egipcie jest wyjątkowa. Jej łacińska nazwa brzmi *Malapterurus electricus*, co znaczy „sum elektryczny”.

Podobnie jak żyjące w Ameryce Południowej węgorze elektryczne, te stworzenia posiadają specjalny narząd, który daje im zdolność poddawania wszystkich, którzy dotkną ich skóry, wstrząsom elektrycznym o napięciu 400 woltów. Zapisy dotyczące suma elektrycznego stanowią najwcześniejsze przykłady wzmianek o elektryczności, poprzedzające o pięć tysięcy lat czasy, w których ludzie mogli się pochwalić podobnym opanowaniem tego zjawiska.

WSTRZĄSY

O pomstę do nieba woła fakt, że zazwyczaj nie pamięta się o człowieku, który odkrył elektryczność. Grecki naukowiec Tales (ten sam, który wpadł do studni) już wcześniej odkrył, że pocieranie kawałka bursztynu o wełnę wywołuje trzaski, a w odpowiednich okolicznościach iskry, ale zasługa odkrycia tego, co rozumiemy przez pojęcie prądu elektrycznego, przypada angielskiemu eksperymentatorowi Stephenowi Grayowi.

Jednym z powodów przeoczenia prac Graya był jego błąd polegający na tym, że poprosił innego naukowca o pomoc w ich rozwinięciu. Tym naukowcem był John Flamsteed – niefortunny traf, śmiertelny wróg sir Isaaca Newtona.

Newton w stosunkach towarzyskich przejawiał charakter okrutny, nawet złośliwy, a wykorzystywał swoją pozycję prezesa Towarzystwa Królewskiego do dyskredytowania i grzebania w mrokach niepamięci prac osób, których nie lubił, a do których zaliczał się Flamsteed¹⁰⁴. W rezultacie wiele osiągnięć Flamsteeda i Graya zostało zignorowanych. Trzeba powiedzieć, że choć Newton należał do największych umysłów w dziejach, niekiedy zachowywał się jak osioł. Przywróćmy zatem równowagę i oddajmy Stephenowi Grayowi należną mu część zasługi.

Gray, urodzony w 1666 roku, przez większość życia pracował w farbiarni, a działalności naukowej oddawał się w ramach hobby. Kiedy miał 42 lata, pewnego wieczoru odkrył elektryczność, zabawiając się w sypialni prymitywnym przyrządem do wytwarzania ładunku statycznego – szklaną rurką.

Maszyny elektrostatyczne istniały od 1661 roku, kiedy taki przyrząd wynalazł niemiecki polityk Otto von Guericke, ale Gray nie miał pieniędzy na równie luksusowy sprzęt. Musiał się zadowolić

pocieraniem o królicze futro szklanego pręcika i przytykaniem go do tego, co miał pod ręką, w nadziei na wywołanie wstrząsu elektrycznego.

Graya zaciekawiał fakt, że jeśli po potarciu pręcika przytknie się go do ziemi, wydaje się tracić ładunek elektryczny i nie spowoduje wstrząsu, zanim nie naładuje się go ponownie. Tamtego wieczoru postanowił zatknąć koniec pręcika w kawałku korka i odkrył, że jeśli przytknie końcówkę korka do stosika pierza, przeskoczą iskry. Szkło zostało potarte, ale korek jakimś sposobem przerosił elektryczność. Elektryczność zatem, czymkolwiek była, miała zdolność przepływu.

Podekscytowany tym rezultatem Gray sporządził z jedwabiu zawieszoną u sufitu uprzęż, na której przedmioty nie dotykały ziemi, i zaczął badać różne materiały dla sprawdzenia, czy przewodzą elektryczność. Po przeprowadzeniu prób z jarzynami, sznurkiem, monetami i wszystkim, cokolwiek wpadło mu w rękę, Gray zaczął dzielić materiały na dwie kategorie: izolatory, nieprzewodzące elektryczności, i przewodniki, które mogły to robić¹⁰⁵.

Najlepszymi przewodnikami okazały się metale zlokalizowane po lewej stronie układu okresowego. Radziły sobie one z przewodzeniem prądu tak dobrze, że Gray mógł przesłać wstrząs wzdłuż wywieszonego za okno sypialni drutu o długości prawie 250 metrów¹⁰⁶.

Metale przewodziły prąd nawet wtedy, gdy były skierowane ku górze, co oznaczało, że bez względu na to, czym jest elektryczność, nie podlega ona wpływowi grawitacji. Oczywiście nadal odpływała do ziemi, lecz najwyraźniej nie z powodu siły ciężenia. Zamiast tego sama planeta była przewodnikiem, przez który prąd przepływał, jeśli dano mu taką sposobność.

Wśród wyników doświadczeń Graya największą niespodzianką okazało się odkrycie, że elektryczność przewodzą także ludzie. Po podwieszeniu na jedwabnej uprząży małego chłopca Gray mógł go naładować i wytwarzać iskry tryskające z jego twarzy. Stało się to podstawą popularnego pokazu, znanego pod nazwą „Latający chłopiec”, podczas którego widzowie mogli dotykać palców unoszącego się w powietrzu malca i odbierać wstrząs elektryczny¹⁰⁷. Wszystko w imię nauki.

Sekret owego pokazu tkwi w tym, że skórę człowieka pokrywa zwykle cieniutka warstwa roztworu soli pod postacią potu, umożliwiającą elektryczności przeskakiwanie przez powierzchnię skóry. Kiedy widzowie „podłączeni” do ziemi dotykali naładowanego chłopca, prąd przepływał przez ich skórę do ziemi i wywoływał efekt wstrząsu.

Z rozdziału trzeciego dowiedzieliśmy się, że prąd elektryczny składa się z elektronów, żeby więc wyjaśnić wszystkie te zachowania, musimy wrócić do równania Schrödingera.

ELEKTRYCZNOŚĆ STATYCZNA

Jak wiemy, elektrony zajmują orbitale znajdujące się wokół jądra atomów, a jeśli zbliżyć atomy do siebie, mogą one mieszać swoje orbitale ze sobą i tworzyć cząsteczki.

Elektryczność statyczna powstaje dlatego, że to mieszanie się orbitali jest zjawiskiem dość częstym. Faktycznie zachodzi wtedy, gdy zetkną się dwie dowolne powierzchnie. Jeśli właśnie teraz siedzisz w fotelu, parę elektronów z fotela tworzy tymczasowe wiązania z elektronami w twojej odzieży (przynajmniej taką mam nadzieję; proszę, nie czytaj mojej książki nago).

Kiedy wstajesz, większość elektronów wróci do swoich pierwotnych atomów i wiązania zostaną zerwane. Elektrony z fotela wrócą do niego, a te z odzieży – do ciebie. Nazywamy to efektem tryboelektrycznym, stanowiącym rodzaj słabego wiązania chemicznego. Rzecz w tym, że niektóre cząsteczki przytrzymują elektrony lepiej niż inne, a kiedy przychodzi pora zrywania tych wiązań, nie zawsze wracają do początkowej konfiguracji.

Na przykład cząsteczki, z których składają się ludzkie włosy, słabo przytrzymują elektrony, natomiast guma radzi sobie z tym doskonale. Jeśli przytkniesz do włosów kawałek gumy, na przykład balon, niektóre elektrony we włosach uświadomią sobie, że wolą trzymać się gumy, zatem przeskakują do niej. Liczba elektronów mogących wcisnąć się do cząsteczki nie ma ograniczeń, toteż guma z chęcią przyjmuje tych podróżników. Kiedy odejmiesz gumę od włosów, niektóre elektrony z włosów pozostają na powierzchni nowego domu, powodując powstanie różnicy ładunków.

Guma i włosy początkowo nie miały ogólnego ładunku, ponieważ ładunki elektronów i protonów znoszą się nawzajem, lecz jeśli przeniesiemy elektrony z włosów do gumy, sprawy zaczną wyglądać

inaczej. Okaże się, że balon ma nadwyżkę elektronów, a włosy – ich deficyt.

To zaskakujące, ale przenoszenie elektronów w ten sposób prowadzi do większej stabilności. Brzmi to źle, ponieważ guma coś skradła z twoich włosów, lecz pamiętaj, że stabilność w terminologii kwantowej oznacza „rzeczy, które już straciły energię, by osiągnąć ten stan”. Dwie cząsteczki po rozdeleniu mogą być o wiele stabilniejsze, tak jak domek z kart ma się znacznie lepiej, gdy rozpadnie się na kawałki.

Ogólny rezultat jest taki, że po potarciu włosów balonem skradnie on około 200 miliardów elektronów. Brzmi to jak wielka liczba, lecz stanowi niespełna jedną bilionową procentu ogólnej liczby elektronów w twoim ciele.

Jeśli teraz zbliżyć balon do dobrego przewodnika (takiego jak kawałek metalu albo ziemia), zaoferuje on elektronom jeszcze lepszy układ, zatem przepłyną do niego, odsuwając się od siebie nawzajem jak najdalej. Tyle że tym razem mówimy nie o tworzeniu się małych wiązań, mówimy o jednoczesnym przeskoku wszystkich elektronów, w wyniku czego powstaje cieszący się złą sławą wstrząs elektrostatyczny.

Kiedy Stephen Gray pocierał szklany pręcik, gromadził na jego powierzchni elektrony z króliczego futra. Szkło jest izolatorem, dlatego może gromadzić elektrony na powierzchni i nie pozwoli im przepłynąć z jednego końca pręcika do drugiego. Korek natomiast jest przewodnikiem, więc elektrony mogły przezeń przepływać do ziemi. Eksperymenty z drutami stanowiły rozszerzenie tej samej zasady.

DLACZEGO METALE W OGÓLE PRZEWODZĄ PRĄD?

Kiedy odczytujesz tabelę układu okresowego od lewej do prawej, stopniowo rośnie liczba protonów w jądrach atomów. Im większy ładunek protonów, tym więcej elektronów przyciągnie on do wewnątrz i tym mniejszy staje się atom, co oznacza, że obserwujemy zmniejszanie się wielkości atomu wzdłuż każdego rzędu.

Wobec tego atomy po lewej są duże i szeroko rozpostarte, a ich orbitale – obszerne i sflaczałe. Elektrony znajdują się w nich daleko od jądra i niewiele trzyma je na swoich miejscach. Dzięki temu idealnie nadają się do wymieniania się elektronami z innymi atomami, gdyż elektrony mają bardzo małą motywację, by trwać tam, gdzie są.

Kiedy zbierze się owe pokaźne atomy razem, ich orbitale zaczną mieszać się ze sobą nie tylko w pojedynczych atomach, lecz w całej populacji. Atomy dzielą się elektronami tak skwapliwie, że jeśli rozwiąże się równanie Schrödingera dla opisanego milionów atomów metalu, otrzymamy wynik stanowi coś w rodzaju megaorbitalu – niespokojnego chaosu, który fizycy nazywają „morzem elektronowym”. Owa sieć nakładających się na siebie orbitali oznacza, że elektrony mogą z łatwością przelewać się z jednej strony danej struktury na drugą.

Dotknij kawałka metalu, a pod opuszkami twoich palców zjawi się rój elektronów śmigających tam i z powrotem według własnej woli. Te ruchy są przypadkowe, ale jeśli zdołamy przekonać elektrony do jednoczesnej wędrówki w tym samym kierunku, otrzymamy prąd elektryczny.

W mniejszych cząsteczkach, utworzonych przez fragmenty z prawej strony tabeli, przerwy pomiędzy orbitalami utrudniają elektronom ruchy, zatem nie przewodzą one prądu. To oczywiście nie znaczy, że nie da się zmusić elektronu do przebicia się przez izolator. Teflon, najlepszy izolator na Ziemi, można mimo wszystko skłonić do przewodzenia, ale potrzeba niesamowitej ilości energii, żeby nakłonić elektrony do przeskakiwania przez przerwy pomiędzy orbitalami.

Substancję o przewodności powyżej 1 miliona simensów na metr klasyfikuje się jako przewodnik, a poniżej 0,01 simensa – jako izolator. Co prawda olbrzymia luka dzieli 0,01 simensa i milion simensów na metr, ale w tym przedziale wartości znajdują się tylko bardzo nieliczne substancje. Te zaś, które się w nim mieszczą, uznajemy za „półprzewodniki”.

DZIWADEŁO

Stan skupienia danej substancji – stały, ciekły lub gazowy – zależy od siły, z jaką cząsteczki przyciągają się wzajemnie. Cząsteczki tlenu niechętnie wchodzą ze sobą w interakcję, ponieważ są stabilne, a to sprawia, że w temperaturze pokojowej tlen jest gazem. Można zmienić go w ciecz poprzez schłodzenie (to zabawne, ale ciekły tlen jest niebieski), lecz w warunkach standardowych ma on skłonność do rozpraszania się.

Dla odróżnienia, metale chętnie dzielą się elektronami, co oznacza, że ich orbitale nakładają się na siebie, a atomy zbijają się ze sobą i tworzą ciało stałe, z oczywistym wyjątkiem rtęci, metalu w stanie ciekłym. Pełne wyjaśnienie ciekłego stanu skupienia rtęci wymaga znajomości szczególnej teorii względności Einsteina, ale możemy pojąć sedno zagadnienia, nie przejmując się tym.

Orbitale rtęci, podobnie jak innych metali, wystają w wielu kierunkach na podobieństwo płatków kwiatu, dzięki czemu rtęć może przewodzić prąd, ale zajmuje w tabeli zabawną pozycję. Znajduje się w dolnym rzędzie, co znaczy, że ma ogromne atomy, lecz nad prawą stroną tabeli, a to oznacza wiele protonów przyciągających orbitale do wewnątrz. W rezultacie orbitale sięgają dostatecznie daleko, by nakładać się na siebie, lecz nie na tyle, by utrzymywać atomy blisko siebie.

Jeśli przesunąć się w prawo, gdzie rośnie liczba protonów, skutkiem będzie lepsze upakowanie atomów obok siebie, a w wyniku tego stały stan skupienia. Jeśli przesunąć się w lewo, orbitale zaczną lepiej nakładać się na siebie, co również skutkuje stałym stanem skupienia.

Atomy rtęci po prostu za słabo się przyciągają, żeby trzymać się razem, ale na tyle silnie, by umożliwiać elektronom przeskakiwanie z jednego atomu do drugiego. W rezultacie rtęć jest pierwiastkiem przewodzącym prąd, a zatem metalem, lecz ponad wszelką wątpliwość najgorszym metalem w układzie okresowym.

INNE DZIWAŁO

Kiedy elektrony wędrują przez kawałek metalu, nie poruszają się torem idealnie liniowym. Jądra bowiem drgają i wewnętrzne orbitale wchodzą w interakcje z zewnętrznymi. W wyniku tego przewodność nigdy nie jest perfekcyjna, a zbiór właściwości spowalniających przewodzenie nazywamy oporem lub rezystancją i mierzymy w omach. Energię nadawaną elektronom przeciskającym się poprzez metal nazywamy napięciem (mierzonym w voltach). To wszystko razem wzięte daje początek ogólnemu przepływowi elektronów.

Jeśli pomyślimy o napięciu jako pięci ściskającej koniec tubki pasty do zębów, a opór będzie dla nas jak średnica tubki, to rzeczywista ilość wyciśniętej pasty będzie tym, co nazywamy prądem, którego natężenie mierzymy w amperach.

Bateria zasilająca ręczny zegarek dostarcza mechanizmowi elektronów z energią wynoszącą około półtora volta. Opór obwodu spowalnia ich bieg, zatem ostatecznie otrzymujemy prąd o natężeniu około pięciu milionowych ampera (0,000005 A).

Dla porównania, błyskawica ma napięcie około 100 milionów voltów. Ten prąd jednak musi przepływać przez powietrze, a jego ostateczne natężenie do momentu dotarcia do ziemi wynosi około 5 tysięcy amperów. Przepływ prądu poprzez środowisko niemetaliczne wiąże się z wielkimi stratami energii.

Wobec tego przewodność grafenu to bardzo dziwna rzecz. Węgiel przez większość czasu jest niemetalem, lecz po ułożeniu jego atomów w postaci cienkich płatków grafenu zaczyna przewodzić prąd.

Dzieje się tak dlatego, że atomy w grafenie układają się w płaskie sześciokąty, w których każdy atom wiąże się z trzema innymi. Ponieważ węgiel ma w zewnętrznych orbitalach dostępne cztery elektrony, każdy atom ma jeden wolny elektron, który nie bierze udziału w tworzeniu wiązań. Ten elektron może się przemieszczać z jednego atomu do drugiego niemal bez przeszkód, więc nawet małe napięcie wywoła prąd o dużym natężeniu.

Od metali grafen różni się tym, że jest prawie dwuwymiarowy. Elektrony w metalu mogą zmieniać trasy i penetrować go we wszystkich kierunkach, a w grafenie mają mniej miejsc, do których mogłyby się przemieszczać. Ten materiał to niemal płaska powierzchnia, co oznacza, że elektrony nie mogą wędrować do góry ani w dół, zatem większe jest prawdopodobieństwo, że nie zboczą ze szlaku.

ELEKTRYCZNOŚĆ I TY

W 1886 roku amerykański komitet praw człowieka zdecydował, że wykonanie kary śmierci dla przestępców poprzez powieszenie jest niehumanitarne i potrzeba nowej metody wykonywania kary głównej. Jednym z członków komitetu był nowojorski dentysta Alfred Southwick, który już kilka lat wcześniej zaprojektował krzesło elektryczne. Pomysł Southwicka zyskał aprobatę i rozpoczęły się próby popierane przez nikogo innego, tylko samego Thomasa Edisona¹⁰⁸.

W tamtych czasach toczyła się batalia o to, który typ prądu elektrycznego należy przyjąć w Stanach Zjednoczonych. Edison sporo zainwestował w elektryczność opartą na akumulatorach i musiał znaleźć sposób na zszarganie opinii elektryczności generowanej magnetycznie, faworyzowanej przez jego rywala George'a Westinghouse'a. Znalazł rozwiązanie proste, choć nieco makabryczne.

W ramach najbardziej śmiertelnej strategii marketingowej, jaką kiedykolwiek wykorzystano, Edison nalegał, żeby nowo zaprojektowane krzesło elektryczne zostało skonstruowane w taki sposób, by zasiała je elektryczność Westinghouse'a, w wyniku czego skojarzyłyby się ludziom ze śmiercią. W swojej pracowni testował krzesło na bezpańskich zwierzętach. Istnieją świadectwa potwierdzające, że uśmiercał psy, koty, ptaki, konia oraz cyrkowego słonia o imieniu Topsy (był na tyle uprzejmy, że ten ostatni czyn sfilmował, a jeśli interesujesz się takimi rzeczami, możesz bezpłatnie obejrzeć ten materiał w internecie)¹⁰⁹.

Wkrótce po tym, w 1890 roku, zbudowano krzesło elektryczne dla pierwszej ofiary, Williama Kemmlera¹¹⁰. Trzeba było ponad czterech minut ciągłego rażenia prądem, żeby Kemmler skonał, przy czym procedurę przerwano w połowie, zanim ktoś nie krzyknął: „Wielki Boże, on żyje!”¹¹¹. Rzeczywiście, humanitarna metoda.

Kluczem do działania krzesła elektrycznego jest zadbanie o to, by ciało człowieka stanowiło część obwodu, co w rzeczywistości bywa całkiem trudne. Mimo tego, co się twierdzi w kreskówkach oglądanych w sobotni poranek, nie tak łatwo o śmiertelne porażenie prądem.

Jeśli kiedykolwiek miałeś pecha zawisnąć na linii elektrycznej, mogłeś odczuć mrowienie palców, lecz nie groziło ci rzeczywiste niebezpieczeństwo. Z chwilą gdy elektryczność wypełniła wszystkie dostępne orbite na powierzchni twojego ciała, nie może uczynić nic więcej. Jeśli natomiast zostaniesz jakimś sposobem uziemiony, już nie będziesz ślepą uliczką, tylko drogą, z której prąd elektryczny skorzysta. Jeśli elektryczność przepłynie na ciebie, nic ci nie będzie, ale jeśli przepłynie poprzez ciebie, znajdziesz się w tarapatkach.

Ludzkie ciało jest przywoitym przewodnikiem (jesteś wszak workiem pełnym słonej wody), ale – dla większego skomplikowania zagadnienia – skóra działa jak znakomity izolator. Sucha skóra ma rezystancję o wartości około 100 tysięcy omów, chociaż gdy jest wilgotna, wchłania wodę w głębi porów, a wtedy jej rezystancja maleje do około tysiąca omów.

Warto również zauważyć, że gdy prąd wniknie w głębi twojego ciała, podąży możliwie najłatwiejszą ścieżką. Niewielka ilość może penetrować tkanki, ale można przepuścić przez rękę prąd o natężeniu mierzonym w tysiącach amperów i pozostać przy życiu. To jednak będzie bardzo bolało, więc lepiej zrezygnuj z tego śmiertelnie niebezpiecznego pomysłu.

Jedyny przypadek, kiedy elektryczność uśmierca, ma miejsce wtedy, gdy przez dłuższy czas przepływa przez serce, płuca albo mózg.

Serce działa w ten sposób, że zewnętrzna warstwa mięśnia sercowego otrzymuje co sekundę krótki wstrząs elektryczny o natężeniu około 0,0000012 ampera, w wyniku czego kurczy się i pompuje krew do organizmu. Potem może się rozluźnić i ponownie otworzyć zastawki, by napełnić się kolejną porcją krwi, po czym cały cykl się powtarza.

Jeśli jednak przez dłuższy czas przepuszczasz przez serce prąd elektryczny, mięsień sercowy mocno się zaciśnie, a serce nie otworzy ponownie zastawek i nie napełni się nowym ładunkiem krwi. Dlatego ludzie mogą przeżyć uderzenie pioruna, ale nie krzesło elektryczne. Prąd pioruna może przepłynąć przez serce, lecz tylko przez krótki czas, a serce może po tym wrócić do normalnej pracy. Jeśli zaś utrzymuje się przepływ prądu, w zasadzie wywołuje się u danej osoby sztuczny zawał serca.

To zaskakujące (choć może i nie), ale niewiele badań poświęcono zagadnieniu dawki prądu potrzebnej do wywołania takiej reakcji serca. Przybliżone wskazówki, oparte w dużej mierze na niepotwierdzonych dowodach oraz odrobinie teoretycznej wiedzy na temat zjawisk bioelektrycznych,

sugerują, że do uśmiercenia danej osoby potrzebny jest prąd o natężeniu około 0,05 ampera. Krzesło elektryczne przepuszczało prąd o natężeniu od 1 do 7 amperów, w zależności od prądu stanowego. To ponad dwadzieścia razy więcej, niż wynosi dawka śmiertelna.

Zazwyczaj dwie końcówki obwodu pod napięciem podłącza się do skóry głowy i do kostki, w wyniku czego prąd płynie jednocześnie poprzez mózg, serce i płuca, gwarantując zaburzenie czynności przynajmniej jednego z tych narządów i lekką śmierć. Miłego dnia.

99 Geim A.K., Berry M.V., *Of flying frogs and levitrons*, „European Journal of Physics”, r. 18, nr 4 (1997), s. 307–313.

100 Novoselov K.S. et al., *Electric field effect in atomically thin carbon films*, „Science”, t. 306, nr 5696 (2004), s. 666–669.

101 *How strong is graphene?*, University of Manchester. Dostępne na stronie: <http://www.graphene.manchester.ac.uk/discover/video-gallery/what-is-graphene/how-strong-is-graphene> (dostęp: 18 sierpnia 2017); Abraham J. et al., *Tunable sieving of ions using graphene oxide membranes*, „Nature Nanotechnology”, nr 12 (2017), s. 546–550.

102 *Properties of stainless steel, metals and other conductive materials*, TibTech Innovations. Dostępne na stronie: <http://www.tibtech.com/conductivity.php> (data wejścia na stronę 18 sierpnia 2017); *Understanding graphene*, Graphenea. Dostępne na stronie: <https://www.graphenea.com/pages/graphene> (dostęp: 18.08.2017).

103 Romer J., *A History of Ancient Egypt: From the First Farmers to the Great Pyramid*, Thomas Dunne Books, Nowy Jork 2013.

104 Levy J., *Scientific Feuds: From Galileo to the Human Genome Project*, New Holland Publishers, Londyn 2010.

105 Gray S., *An account of some new electrical experiments*, „Philosophical Transactions of the Royal Society of London”, t. 31–33 (1708).

106 Lemons D.S., *Fizyka w rysunkach: 2600 lat odkryć od Talesa do Higgosa*, przekł. M. Tarnowski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.

107 Bertucci P., *Sparks in the dark: The attraction of electricity in the eighteenth century*, „Endeavour”, r. 31, nr 3 (2007).

108 Brandon C., *The Electric Chair: An Unnatural American History*, McFarland, Jefferson 1999.

109 Levy, *Scientific Feuds; Electrocuting an Elephant (1903) – WARNING: Viewer Discretion – Disturbing footage – Thomas Edison*, Change Before Going Productions (16.01.2014). Dostępne na stronie: <https://www.youtube.com/watch?v=NoKi4cqvFw0> (dostęp: 18.08.2017).

110 Combs C.S., *Deathwatch: American Film, Technology and the End of Life*, Columbia University Press, Nowy Jork 2014.

111 Rosenwald M.S., *“Great God, he is alive!” The first man executed by electric chair died slower than Thomas Edison expected*, „Washington Post” (28.04.2017).

Rozdział dziesiąty

Kwasy, kryształy i światło

BECZKA OKROPIEŃSTW

W marcu 1949 roku angielskie gazety zamieściły artykuły o jednej z najbardziej makabrycznych zbrodni w dziejach Wielkiej Brytanii od czasów Kuby Rozpruwacza. John George Haigh, którego na łamach „Daily Mirror” nazywano „mordercą-wampirem”, stanął przed sądem oskarżony o sześć zabójstw z premedytacją. Tym, co czyniło je szczególnie odrażającymi, był nie sam fakt morderstwa, lecz sposób, w jaki sprawca pozbywał się zwłok.

Haigh po wypiciu szklanki krwi każdej z ofiar łądował zwłoki do stu pięćdziesięciolitrowego bębna i dopełniał go stężonym kwasem siarkowym, następnie zostawiał go na dwa dni. Pozostały osad wylewał do kanalizacji za swoim warsztatem. Zyskał tym sobie kolejny barwny przydomek „mordercy od kąpeli w kwasie”.

Kwasy przykuwają wyobraźnię ludzi jako typowe „paskudne” chemikalia, mogące przeżerać ludzkie ciało i niszczyć wszelkie ślady bytności danej osoby. Haigh został ujęty wyłącznie dlatego, że roztwór z rozpuszczonymi zwłokami jego ostatniej ofiary, Olive Durand-Deacon, nadal zawierał część należącej do niej plastikowej protezy dentystycznej, którą jej dentysta zidentyfikował.

Haigh zginął na szubienicy 10 sierpnia. Twierdził, że ma na koncie jeszcze inne ofiary, lecz do dzisiaj ich nie zidentyfikowano z powodu tak perfekcyjnego sposobu likwidowania zwłok¹¹².

TO PARZY, TO PARZY!

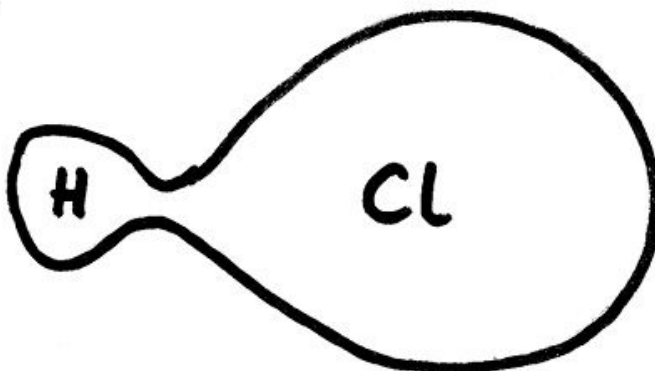
Kwas jest substancją, której cząsteczki rozpadają się w wodzie, tworząc unoszące się swobodnie w roztworze protony. Protony zaś są naładowanymi cząstkami jądrowymi, przez większość czasu chronionymi przez orbitale elektronowe, lecz po uwolnieniu się w wyniku rozpuszczenia się macierzystej cząsteczki mogącami powodować niewypowiedziane zniszczenia.

Osamotniony proton stanowi skoncentrowaną grudkę ładunku elektrycznego, która przyciąga do siebie elektrony za wszelką cenę. Substancje takie jak szkło lub plastik mają silne wiązania między atomami, więc kwasy zazwyczaj z nimi nie reagują, ale wszelkie związki chemiczne o luźniejszych wiązaniach, w tym również te wchodzące w skład twojego ciała, ulegają rozłożeniu.

Kwas można uważać za sok z protonów, a najprostszy sposób wytworzenia roztworu protonów polega na upewnieniu się, że cząsteczka wyjściowa zawiera wodór. Wodór to najprostszy pierwiastek zawierający jeden proton i jeden elektron, więc jeśli ten ostatni przejawia większe zainteresowanie innymi atomami macierzystej cząsteczki, proton odpływa w dal.

Wzmy chlorowodór. Każda jego cząsteczka zawiera atom H i atom Cl, zatem jego wzór chemiczny to HCl. Atom chloru doskonale radzi sobie z zatrzymywaniem elektronów, lepiej niż wodór, więc

wiązanie między nimi nie jest podziałem pół na pół, tylko przedstawia się asymetrycznie, jak na rysunku poniżej:



Jeśli rozpuścić ten związek w wodzie, oba atomy rozdzielają się, przy czym chlor zatrzymuje wszystkie elektrony, a wodór w zasadzie pozostaje nagi. Ów osamotniony wodór dryfuje do momentu, aż pojawi się jakaś inna cząsteczka, z którą może reagować. My sami wytwarzamy w żołądku kwas solny, mogący rozpuszczać kości.

NAJMOCNIEJSZY KWAS

Moc kwasu mierzymy jego skłonnością do uwalniania protonów. Wartości liczbowe, z którymi mamy tu do czynienia, tworzą olbrzymi zakres, zatem posługujemy się w pomiarach tak zwaną skalą pK_a . Skala ta działa tak samo jak skala Richtera do pomiaru siły trzęsienia ziemi, w której każda wartość liczbowa jest dziesięć razy większa od poprzedniej. Ponadto skala ta działa do tyłu z powodów, którymi nie musimy się teraz przejmować (jeśli cię to ciekawi, zajrzyj do dodatku V). Zatem im mniejsza jest wartość liczbowa, tym mocniejszy mamy kwas.

Ocet domowy ma wartość pK_a wynoszącą 5, natomiast kwas szczawiowy, zawarty w rabarbarze – bliską 4, zatem ten kwas jest dziesięciokrotnie mocniejszy. A jest jeszcze kwas chromowy, środek przemysłowy o potężnej sile działania, o wartości pK_a równej 1 – o trzy pozycje w skali niżej od kwasu szczawiowego, a tym samym o tysiąckrotnie większej mocy. Dla porównania: kwas szczawiowy można spożywać bez szkody dla zdrowia, ale kwas chromowy spali żywe tkanki.

Stężony kwas siarkowy, którego używał Haigh, żeby pozbywać się zwłok ofiar, osiąga w skali pK_a wartość -3 , czyli o siedem liczb mniejszą niż ocet, a zatem ma moc 10 milionów razy większą¹¹³. To inny sposób stwierdzenia, że kwas siarkowy 10 milionów razy lepiej uwalnia swoje protony niż ocet. Jeśli stworzymy cząsteczki absolutnie niezainteresowane utrzymywaniem przy sobie wodoru, dostaniemy w ręce klasę związków chemicznych zwanych superkwasami (no cóż, mam nadzieję, że w rzeczywistości nie będziemy brali ich do rąk).

Kwas nadchlorowy ma wartość pK_a -10 , czyli 10 milionów razy większą moc niż stężony kwas siarkowy, a pK_a kwasu triflowego (trifluorometanosulfonowego) to -14 , co oznacza moc większą 100 miliardów razy¹¹⁴. To zaś nawet nie zbliża się do mocy kwasu magicznego (tak brzmi prawdziwa nazwa), rozpuszczającego nawet wosk do świec¹¹⁵.

Jeśli przeszukasz internet, przekonasz się, że większość stron popularnonaukowych podaje jako kwas najmocniejszy na świecie pewien związek zwany kwasem fluoroantymonowym, szczycący się wartością pK_a -19 . To moc 10 miliardów razy większa niż kwasu siarkowego. Używa się go niekiedy

w przemyśle elektronicznym do wytrawiania elementów sprzętu, ale naprawdę nie zasługuje on na złoty medal. Ten bowiem należy się kwasowi tak mocnemu, że w udokumentowanej historii zsyntetyzowano go tylko raz¹¹⁶.

Zadanie kwasu polega na odrzucaniu wodoru, zatem najlepszy kwas to taki, w którym inne atomy przede wszystkim nie chcą wiązać się z tym pierwiastkiem. A nie ma atomu lepszego pod tym względem niż hel, najmniej reaktywny pierwiastek w układzie okresowym. Jeśli zmusi się wodór do związania się z helem, to znaczy, że się stworzyło najsłabsze z możliwych wiązań, które natychmiast się rozpadnie.

W 1925 roku chemik Thorfin Hogness zdołał uwarzyć mikroskopijną ilość wodoru helu o wartości pK_a – uwaga! – wynoszącej -69 ¹¹⁷. To moc tak wielka, że nie ma nawet słowa, by móc opisać, jak bardzo jest większa od mocy kwasu siarkowego¹¹⁸.

Niereaktywność helu odpowiada również za jego inną rekordową właściwość – ciekły hel jest najbardziej ciekłym płynem we Wszechświecie. Kiedy próbka helu zostaje ochłodzona do temperatury około -269°C , atomy tracą energię kinetyczną i przechodzą w formę ciekłą. W większości cieczy atomy nadal wchodzą w słabe interakcje, natomiast w helu pozostają samotne.

Gdyby wziąć kubek z ciekłym helem i raz go zamieszać, wirowałby bez końca. Każda inna ciecz weszłaby w interakcję z pojemnikiem i zwolniła, lecz ciekły hel nie jest wrażliwy na tarcie i będzie wirować aż do końca świata.

Czyż to nie jest perpetuum mobile? Odpowiedź na to pytanie brzmi następująco: gdybyśmy spróbowali coś zanurzyć w wirującym ciekłym helu, na przykład śrubę, hel po prostu opływałby ją naokoło. Jedyne sposoby zmuszenia ciekłego helu do oddziaływania na coś polegałyby na jego ogrzaniu, a w tym momencie utraciłby on swoją nadciekłość.

Tak się składa, że ciekły hel ignoruje również grawitację. Powietrze na poziomie atmosferycznym wywiera na wszystko nacisk, zatem przy krawędziach pojemnika pewne cieczki mogą wpełzać na ścianki, gdyż nacisk powietrza działa na nie po jednej stronie, a po drugiej już nie. W większości cieczy cząsteczki przyciągają się na tyle silnie, by trzymały się razem i nie wspinały po ściankach, ale ciekły hel nie należy do większości. Hel pełnie po ściankach otwartego pojemnika i znajduje sobie drogę na zewnątrz, opróżnia pojemnik, jak gdyby pragnął z niego uciec¹¹⁹.

Żeby zrozumieć surrealistyczne właściwości ciekłego helu oraz wodoru helu, musimy przenieść się na prawą stronę układu okresowego. Do królestwa niemetali.

SAMOLUBNE STWORY

Większość spektakularnych i gwałtownych reakcji w chemii zachodzi wśród niemetali, ponieważ są one bardzo chciwe. Jak już się przekonaliśmy, metale mają duże atomy o przyjaznych, nakładających się na siebie orbitalach, natomiast atomy po prawej są małe i mocno trzymają swoje elektrony.

Najbardziej reaktywnym pierwiastkiem jest fluor, przedstawiony w rozdziale pierwszym, kiedy podpalał wodę. Fluor, rzadki, żółty gaz, trzeba transportować w pojemnikach z gęstej stali i szkła kuloodpornego, gdyż wyrwa elektrony ze wszystkiego, z czym się zetknie.

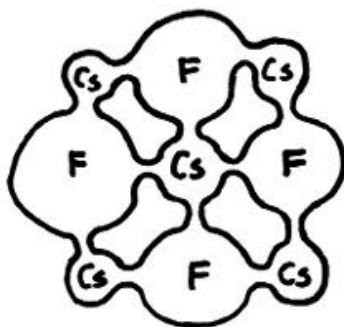
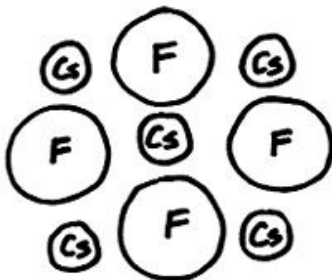
Ponieważ fluor przejawia taki apetyt na elektrony, jego złożona z dwóch atomów cząsteczka jest idealnie symetryczna, gdyż elektrony zostają rozdzielone między atomami. Jeśli połączyć ten pierwiastek z metalem, na przykład z cezem, wiązanie jest nierówne, a fluor zagarnia lwią część gęstości elektronów. Podobny sposób organizacji mają cząsteczki kwasu solnego – niemetale zawsze wygrywają, ponieważ nie lubią się dzielić.

Taka elektronowa wymiana oznacza, że atomy cezu stają się ubogie w elektrony, atomy fluoru zaś zyskują ich nadmiar. Nazywanie ich atomami naprawdę nie jest już poprawne, gdyż nie stanowią one jednostek obojętnych, zatem nazywamy je zamiast tego „jonami”.

Jony nadal dzielą się elektronami, ale przy tak nierównym wiązaniu zwykle nie wyobrażamy sobie, że cez mógłby stracić elektrony, a fluor je zyskać.

Na pierwszym diagramie widzimy wiązania jonowe, w których cząstki zostały naszkicowane jak upakowane razem piłki. Nie jest to ściśle poprawne, ale pomaga śledzić położenie jonów i sposób ich

organizacji. Diagram poniżej przedstawia nieco dokładniejszy obraz.



Ten typ wiązania, w którym pierwiastki są ułożone w rusztowanie w kształcie kratownicy, daje początek właściwościom krystalicznym. Począwszy od grupy 13, rozpoczynającej się od boru, niemetale przejawiają skłonność do utrzymywania elektronów w bardzo konkretnych miejscach i tworzenia siatek o ostrych krawędziach. A to nas do czegoś prowadzi...

ISKRZĄCE SIĘ STWORY

Bor to pierwiastek zajmujący drugie miejsce po węglu pod względem twardości. Używany do produkcji klejów i szkła, zwykle występuje w formie związanej z tlenem i sodem w postaci boraksu eksportowanego z kalifornijskiej Doliny Śmierci, najgorętszego miejsca na Ziemi.

Kryształy boraksu mają barwę widmowej bieli i w większości są przezroczyste, czego nie widuje się u metali. Za sprawą morza elektronowego światło odbija się od powierzchni metalu i dlatego jest on nieprzezroczysty. Natomiast niemetale utrzymują elektrony w stałych orbitalach przedzielonych przerwami, co oznacza, że promienie światła raczej je przenikają, zamiast ulegać odbiciu.

W zależności od kątów między jonami oraz rozmiarów ich orbitali wiązka światła wyłaniająca się z niemetalu może bardzo się różnić wyglądem od tej, która wniknęła w próbkę. Światło, odbijając się wewnątrz struktury krystalicznej, może tracić lub zyskiwać energię, zmieniać kolor i nadawać kryształowi inny wygląd.

Najbardziej rozpowszechnione na Ziemi kryształy bazują na połączeniu krzemu i tlenu w postaci SiO_2 . Domieszki innych pierwiastków dają początek różnym znajduwanym w ziemi minerałom. Pojedynczy kawałek skały (konglomerat zbitych ze sobą krystalicznych minerałów) może zawierać dziesiątki rozmaitych pierwiastków, które musimy ekstrahować za pomocą kwasów lub prądu elektrycznego.

Faktycznie większość pierwiastków układu okresowego odkryto poprzez rozcieranie skał i sprawdzanie, co kryje się w ich wnętrzu. Na przykład pierwiastki: itr, iterb, erb i terb, odkryto w tej samej szwedzkiej kopalni w jednym rodzaju skały.

Najcenniejsze kryształy przeważnie bazują jednak na tlenie związanym raczej z glinem niż z krzemem. Sam tlenek glinu to biała, krystaliczna substancja zwana korundem, wyglądająca podobnie do soli kuchennej. Jeśli jednak zawiera domieszkę paru atomów chromu, mamy do czynienia z rubinem. Jeśli chrom zastąpi tytan lub żelazo, mamy szafir.

Kryształy najbardziej drogiecenne ze wszystkich, czyli diamenty, są zbudowane z atomów węgla, tworzących układ czworościenny, w którym każdy atom jest związany z czterema innymi wokół siebie. W tym przypadku również domieszki nadają kryształom barwę. Odrobina boru i diament staje się błękitny, a szczypta azotu daje barwę żółtą. Wystarczy zmienić atomy, a zmieni się również kolor.

WYNIOSŁE PIERWIASTKI

Kiedy podążamy wzdłuż dowolnego rzędu w układzie okresowym, mamy do czynienia z atomami mieszczącymi coraz więcej protonów. Orbitale elektronów są w nich coraz mocniej wciągane do wewnątrz, zatem wszystkie atomy po prawej stronie są mniejsze i bardziej chciwe.

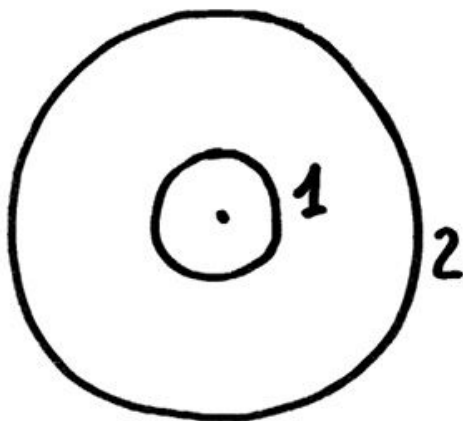
W grupie 17 mamy pierwiastki takie jak fluor (który może podpalić wate), chlor (dawniej wykorzystywany jako broń chemiczna) oraz brom (toksyczny środek dezynfekcyjny). A kiedy przejdziemy do grupy 18, dzieje się coś dziwnego. Pierwiastki z tej kolumny – hel, neon, argon, krypton, ksenon i radon – przejawiają najmniejszą reaktywność w całej tabeli. Tworzą one wiązania tak niechętnie, że pierwotnie nazywano je gazami obojętymi. Od tamtych czasów dowiedzieliśmy się, że pierwiastki z grupy 18 odrobinę mieszają się z innymi, lecz jeśli mogą temu zaradzić, nie robią tego. W rezultacie owe przemądrzałe substancje określa się mianem gazów „szlachetnych” (inne grupy też mają swoje nazwy – patrz dodatek VI).

Wcześniej przekonaliśmy się, że niechęć helu do tworzenia wiązań czyni z wodoru helu najmocniejszy kwas na świecie, zatem rodzi się oczywiste pytanie – co robią owe najbardziej pozbowione wyrazu pierwiastki obok takich jak fluor i chlor?

Odpowiedź znajdziemy w sposobie rozmieszczenia elektronów wokół jądra. Orbitale zgodnie z kwantowym regulaminem mają nie tylko ustalone kształty, lecz również tworzą grupy w określonych odległościach.

Pierwszy zestaw orbitali skupia się wokół jądra, ale drugi znajduje się w wielkiej odległości od nich. Ten zewnętrzny zestaw jest odpychany przez wewnętrzny, a między nimi leży ziemia niczyja.

Diagram poniżej przedstawia poziomy energii zestawów orbitali: pierwszego i drugiego. Dla uproszczenia zignorujemy kształty orbitali, w przeciwnym razie nasz diagram wyglądałby niczym półmisek z wnętrzościami pandy.



Grupy orbitali nazywamy powłokami elektronowymi i to właśnie one stanowią przyczynę zauważonej przez Newlandsa tendencji do okresowości. W miarę posuwania się od jednej strony rzędu do drugiej wypełniamy orbitale określonej powłoki. Kiedy ulega ona wypełnieniu, przeskakujemy do wyższej i zaczynamy ją wypełniać, zapoczątkowując nowy rząd tabeli.

Gazy szlachetne to pierwiastki, do których docieramy, kiedy mamy całkowicie wypełnioną którąś powłokę. Ponieważ wszystkie orbitale tych atomów są pełne elektronów, żaden przybysz nie ma już gdzie się wcisnąć. Ponadto atomy są małe (znajdują się wszak po prawej stronie tabeli), silnie przytrzymują swoje elektrony i nie chcą ich oddawać innym atomom.

Wobec tego mało prawdopodobne, by gazy szlachetne przyjmowały lub oddawały elektrony, co sprawia, że kiepsko tworzą wiązania chemiczne. W ciągu kilku ostatnich dekad stworzono kilkadziesiąt związków gazów szlachetnych, lecz nie należą one do rozpowszechnionych.

Mogłoby się wydawać, że te pierwiastki są niepotrzebne i nudne, lecz to ich niechęć do wchodzenia w reakcje czyni je przydatnymi. Weźmy żarówkę. Włókno umieszczone w jej wnętrzu jest zrobione z wolframu, który jarzy się po przepuszczeniu przez niego prądu elektrycznego. Problem polega na tym, że wolfram tak się przy tym rozgrzewa, że mógłby zacząć reagować z tlenem. Żeby tego uniknąć, wypełniamy żarówki argonem zamiast powietrzem, więc nie zachodzi żadna reakcja i żarówka może należycie spełniać swoje zadanie.

Możemy też wykorzystywać gazy szlachetne jako źródła ich własnych, jaskrawych kolorów. Jeśli zamknie się próbkę gazu szlachetnego w szklanej rurce i przepuści się przez nią prąd elektryczny z jednego końca do drugiego, atomy gazu zaczną wibrować. Energia elektryczna wypycha elektrony na zewnątrz, lecz one natychmiast opadają, emitując promienie światła o konkretnych parametrach.

Wszystkie inne gazy zaczęłyby wchodzić w reakcje i wszystko uległoby reorganizacji, by osiągnąć stabilność. Ponieważ stabilność oznacza brak dostępnej energii, światło zgasłoby chwilę po włączeniu. Jako że gazy szlachetne nie chcą tworzyć wiązań, elektrony nieustannie przeskakują tam i z powrotem, emitując stały strumień światła. Neon podświetla rurkę na czerwono, hel jarzy się barwą pomarańczową, argon świeci światłem niebieskim, krypton – zielonym, a ksenon – turkusowym. Neon został odkryty jako pierwszy i z tego powodu owe jaskrawe, brzęczące rurki wypełnione gazem, oglądane przez nas na zewnątrz sklepowych witryn, nazywamy neonami.

112 Wilson D., *A History of British Serial Killing*, Sphere, Londyn 2011; Whittington-Egan M., Whittington-Egan R., *Murder on File: The World's Most Notorious Killers*, Neil Wilson Publishing, Castle Douglas 2005.

113 Ripin D.H., Evans D.A., *pK_as of inorganic and oxo-acids, The Evans Group*. Dostępne na stronie: http://evans.rc.fas.harvard.edu/pdf/evans_pKa_table.pdf (dostęp: 18.08.2017).

114 Ripin, Evans, *pK_as of inorganic and oxo-acids*; Cheek G.T., *Electrochemical studies of the Fries rearrangement in ionic liquids*, „Electrochemical Society Transactions”, r. 16, nr 49 (2009), s. 541–544.

115 Olah G.A., *My search for carbocations and their role in chemistry*, wykład noblowski (8.12.1994).

116 Jako źródło dokumentujące stwierdzenie autor przyjął artykuł o superkwasach z Wikipedii. Dostępne na stronie: <https://en.wikipedia.org/wiki/Superacid> (dostęp: 18.08.2017). Wikipedia powołuje się na cytata w: Olah G.A., *Crossing conventional boundaries in half a century of research*, „Journal of Organic Chemistry”, r. 70, nr 7 (2005), s. 2413–2429, na poparcie stwierdzenia, że kwas fluoroantymonowy jest 10^{16} razy mocniejszy od kwasu siarkowego o znanej wartości pK_a – 3, z czego wynika, że jego wartość pK_a wynosi –19.

117 Hogness T.R., Lunn E.G., *The ionisation of hydrogen by electron impact as interpreted by positive ray analysis*, „Physical Review”, r. 21, nr 1 (1925), s. 44–55.

118 Przytoczoną wartość liczbową obliczono za pomocą cyklu Born-Habera; patrz: Lias S. *et al.*, *Evaluated gas phase basicities and proton affinities of molecules: Heats of formation of protonated molecules*, „Journal of Physical and Chemical Reference Data”, r. 13, nr 3 (1984), s. 695. Zakłada się, że jon HHe⁺ ma rozpuszczalność podobną do jonu litu o porównywalnej wielkości. Jeśli założymy, że zmiana energii swobodnej podczas dysocjacji wynosi -360 kJmol^{-1} , będziemy mogli odwołać się do równania $G = -RT \ln K_a$. Jeśli weźmiemy wartość $-360 / (0,008314 \times 273)$, otrzymamy $158,6 = \ln K_a$, zatem K_a będzie miało wartość $4,15 \times 10^{68}$. Ujemny logarytm z tej liczby daje nam wartość –68,6, którą autor zaokrąglił do –69.

119 *Strange but true: Superfluid helium can climb walls*, „Scientific American” (20.02.2009). Dostępne na stronie: <https://www.scientificamerican.com/article/superfluid-can-climb-walls> (dostęp: 18.08.2017).

Rozdział jedenasty

To żyje, to żyje!

NAJBARDZIEJ TOKSYCZNA TRUCIZNA

W 2006 roku media całego świata zamieszczały doniesienia o Aleksandrze Litwinience, który umierał w męczarniach, otruty polonem. W tej historii poza jej politycznymi podtekstami krew w żyłach mroził pewien szczegół – tak mała ilość polonu potrzebna do spowodowania śmierci. Szacowano, że Litwinienko spożył niespełną jedną setną grama, a po trzech tygodniach już nie żył¹²⁰. Czy polon to najgorsza substancja, która może dostać się do organizmu?

Ocena toksyczności nie przedstawia się tak prosto, jak można by sobie wyobrazić. Na wstępie należy zaznaczyć, że każdy metabolizuje różne substancje nieco inaczej. Już sama nikotyna u poszczególnych osób zmienia się w siedem różnych związków chemicznych, co może tłumaczyć przyczynę, dla której pewnym osobom trudniej przychodzi rzucenie palenia. Takie osoby dosłownie przekształcają ją w substancje o silniejszym działaniu uzależniającym.

To oznacza, że jeśli poda się truciznę dużej grupie osób, część z nich umrze, a część przeżyje, zupełnie przypadkowo. Żeby obejść ten problem, biolodzy posługują się wartością LD_{50} , czyli dawką śmiertelną (ang. *lethal dose*), gwarantującą uśmiercenie pięćdziesięciu procent grupy. Liczbę tę podaje się w mg/kg (czyli liczbie miligramów, potrzebnej do uśmiercenia każdego kilograma masy ciała danego stworzenia); im mniejsza wartość LD_{50} , tym większa toksyczność substancji.

Czysta kofeina ma wartość LD_{50} wynoszącą 367 mg/kg¹²¹. Wobec tego młoda kaczka o typowej masie ciała około jednego kilograma mogłaby przyjąć 367 mg kofeiny i mieć 50 procent szans na przeżycie. Natomiast samiec słonia afrykańskiego waży 5 tysięcy kilogramów, zatem potrzeba około dwóch kilogramów kofeiny, żeby zyskać 50 procent pewności, że zwierzę padnie.

W przypadku ludzi trudno podawać dokładne wartości LD_{50} , ponieważ jedyny sposób uzyskania takich danych polegałby na podaniu trucizny grupie osób i sprawdzeniu, ile z nich zmarło. Niestety, zdarzały się przypadki eksperymentowania na nieświadomych niczego podejrzanych, lecz takie badania na szczęście prowadzone są bardzo rzadko¹²².

Niektóre zwierzęta można uważać za bliskie odpowiedniki człowieka, lecz i tu napotyka się te same problemy. Różne gatunki inaczej metabolizują substancje. Kwas glukuronowy nie szkodzi ludziom i stosuje się go w kuchni jako składnik sosów, ale dla kota to śmiertelna trucizna. Arsen jest dla nas toksyczny, ale dodany do paszy dla drobiu zwiększa przyrost masy mięśniowej. Wiadomo też, że zawarta w czekoladzie teobromina może zabić niedużego psa, a u ludzi wywołuje tylko poczucie wstrętu do samego siebie.

Zwierzętami, które są do nas najbardziej podobne biologicznie, oprócz szympansov – na których nie przeprowadza się prób – są szczury. Bez względu na twoją postawę etyczną w kwestii eksperymentów na zwierzętach nadal aktualny pozostaje fakt, że badania związków chemicznych na szczurach przynoszą dane najbliższe ludziom.

Warto również pamiętać, że substancje chemiczne są różnie przetwarzane w zależności od sposobu, w jaki dostają się do organizmu. Niektóre pierwiastki, jak holm, zachowują toksyczność bez względu na sposób przyjęcia, a na przykład ind jest niebezpieczny tylko wtedy, gdy się go wdycha (uwaga: lepiej chyba nie przyjmować go także doustnie).

Wszystkie powyższe czynniki bardzo utrudniają określenie, co jest najbardziej trującą substancją chemiczną na świecie. To chyba dobrze, ale skoro już o tym mówimy, moglibyśmy równie dobrze przyjrzeć się niektórym kandydatom do tego tytułu.

Ołów ma wartość LD_{50} wynoszącą 600 mg/kg, a tal – 32 mg/kg, czyli jest dwudziestokrotnie bardziej niebezpieczny. Arsen, ulubiona trucizna dziewiętnastowiecznych pisarzy, ma LD_{50} wynoszącą 20 mg/kg, a fosfor – bliską 3 mg/kg¹²³.

Jeśli weźmiemy pod uwagę samą toksyczność, to najbardziej trującym pierwiastkiem jest fosfor, lecz po uwzględnieniu działania radioaktywności polon wyprzedza go o dobry kilometr. Pierwiastki promieniotwórcze nie zabijają po prostu przez zakłócanie funkcji organizmu – wyrzucają cząstki alfa (patrz rozdział ósmy), które w zasadzie rozrywają komórki na strzępy. Ze względu na ten dodatkowy sposób zabijania polon prawdopodobnie jest najbardziej śmiertelnie działającym pierwiastkiem. Nikt faktycznie nie zna jego wartości LD_{50} , ponieważ eksperymetatorzy niechętnie z nim pracują. Nawet jego pył może zabić. Jeśli wziąć pod uwagę ilość potrzebną do uśmiercenia Litwinienki, wartość LD_{50} musi być jednak bardzo mała.

Jeśli obok pierwiastków zaczniemy jednak uwzględniać także związki chemiczne, okaże się, że polon nie jest taki zły. Jako najbardziej toksyczny związek na świecie często wymienia się dimetylokadm, tak trujący, że śmiertelną dawką jest 0,001 grama, rozpuszczona w tonie wody¹²⁴. Korona jednak należy się toksynie botulinowej – substancji chemicznej pochodzenia bakteryjnego, wytwarzanej przez laseczkę jadu kiełbasianego (*Clostridium botulinum*). Istnieje kilka jej odmian o nazwach od A do H, a najgorsza jest toksyna botulinowa H. Żeby uśmiercić dorosłą osobę, trzeba zaledwie dwóch miliardowych grama¹²⁵. Przy założeniu, że liczba ludności na Ziemi wynosi około 7 miliardów, potrzeba zaledwie 14 gramów (łyżeczkę do herbaty), żeby zetrzeć z powierzchni planety cały nasz gatunek. A toksyna uśmierca w dość paskudny sposób, mianowicie poprzez prowadzące do śmierci porażenie mięśni.

Można ją jednak rozcieńczyć do małego stężenia i wstrzyknąć pod skórę czoła, żeby porazić mięśnie i zapobiec występowaniu zmarszczek. Właśnie do tego celu używa się toksyny botulinowej A (niezupenie aż tak śmiertelnej jak poprzednia), dostępnej w sprzedaży pod handlową nazwą botoks¹²⁶.

PIERWIASTKI ŻYCIA

W 1924 roku Charles Mayo, prezes Amerykańskiego Towarzystwa Medycznego, opublikował wyniki żartobliwych obliczeń, pokazujące, że gdyby rozdzielić ludzkie ciało na sterty jego pierwiastków składowych, to ich całkowita wartość wyniosłaby około 84 centów¹²⁷. Zawarte w krwi zलयo wystarczyłoby na jeden domowy gwóźdz, a węgiel z białek – na mały worek węgla drzewnego itd.

Zrobiliśmy coś podobnego we wstępie tej książki, gdy przyglądaliśmy się wzorowi chemicznemu człowieka. To potężne przypomnienie, że atomy składające się na nasze ciała nie różnią się od tych, które składają się na zawartość naszej kuchni.

To stwierdzenie wielu ludziom sprawi przykrość. W jakimś czasopiśmie widziałem reklamę, w której naukowiec pociesza strapionego klienta, że lody „nie zawierają 4-hydroksy-3-metoksybenzaldehydu, tylko naturalną wanilinę”. Być może, że twórcy reklamy nie zdawali sobie sprawy, że 4-hydroksy-3-metoksybenzaldehyd to właśnie chemiczna nazwa waniliny. To tak, jakby powiedzieć: „Ten napój nie zawiera ani śladu H_2O , tylko wodę”.

W średniowieczu wszyscy uważali, że żywe stworzenia składają się z magicznych „esencji”, co odróżnia je od przedmiotów nieożywionych. Taki pogląd nazywano witalizmem, ale – podobnie jak w przypadku większości starożytnej szarlatanerii – w epoce renesansu na jego powierzchni pokazały się rysy.

W 1745 roku Vincenzo Menghini spalił ludzkie narządy na popiół i odkrył, że za pomocą namagnetyzowanego noża można z resztek wydobyć żelazo¹²⁸. Uczony doszedł do wniosku, że ciało ludzkie zawiera żelazo, a więc pospolity metal, więc chyba nie składa się z żadnych magicznych ingrediencji.

W 1828 roku Friedrich Wöhler posunął się jeszcze dalej – wytworzył mocznik z tanich odczynników laboratoryjnych¹²⁹. Mocznik to główny składnik moczu, dlatego zakładano, że jego wytworzenie leży poza granicami ludzkiego poznania. Wöhler wykazał, że jest to pospolita cząsteczka o wzorze $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$.

Czy ci się to podoba, czy nie, pierwiastki wykorzystywane w biologii istot żywych niczym nie różnią się od tych w sterylnej chemii. Nić ludzkiego DNA zawiera 240 miliardów atomów, a wszystkie to węgiel, wodór, tlen, azot i fosfor. Nie posiada żadnej dodatkowej „esencji”, która czyniłaby ten związek szczególnym.

Żelazo, które Menghini odkrył we krwi, służy do wiązania cząsteczek tlenu i transportowania ich do różnych narządów. Kiedy tlen dotrze do miejsca przeznaczenia, enzymy oraz inne białka, zawierające chrom, molibden, miedź i cynk, pomagają w jego magazynowaniu, podczas gdy mangan utrzymuje szkodliwe atomy na swoim miejscu, żeby nie narobiły szkód.

Kobieta w ciąży przez dziewięć miesięcy rozkłada pokarm i ponownie wiąże atomy, budując organizm płodu. Wapń zawarty w mleku staje się wapniem w twoich kościach, azot z ziemniaków staje się azotem w skórce, a sód z soli kuchennej – sodem w mózgu. Jesteśmy tym, co jemy, w nader dosłownym sensie.

Rzecz dotyczy nie tylko zwierząt. Rośliny za pomocą magnezu absorbują światło słoneczne i używają wanadu lub molibdenu do wiązania azotu z gleby, który stanowi kluczowy dla ich wzrostu składnik odżywczy. Bez względu na to, o jakim systemie biologicznym mówimy, każdy jego fragment znajdziesz w układzie okresowym pierwiastków.

Słyszę niekiedy, jak ludzie nazywają biologię „chemią stosowaną” ze względu na głębokie związki łączące obie dziedziny, ale to wcale nie jest słuszne stwierdzenie. Biologia po prostu jest chemią rozwiniętą w najcudowniejszym stopniu.

Ma to jednak swoją cenę. Jako że składamy się z tych samych materiałów co świat wokół nas, jesteśmy podatni na te same zaburzenia.

JAK ZNALEŹĆ ŻŁOTY ŚRODEK

W XVI wieku Niemcy przeżywały renesans rozwoju nauki, a jedną z najwybitniejszych postaci tamtych czasów był wielki szwajcarski lekarz Paracelsus. Naprawdę nazywał się Theophrastus Bombastus von Hohenheim i jako pierwszy zgłębiał medycynę jako naukę, a nie stek zabobonów (choć i on wierzył w istnienie gnomów – cóż, nikt nie jest doskonały).

Jego najsłynniejsza wypowiedź, nazwana na jego cześć regułą Paracelsusa, brzmi prosto: „To dawka czyni truciznę”. Innymi słowy, korzystne bądź szkodliwe działanie jakiejś substancji zależy wyłącznie od jej ilości. Nawet cyjanek szkodzi tylko powyżej pewnego poziomu. W istocie pestki jabłek zawierają amygdalinę, którą twój organizm przekształca w cyjanek, ale do zachorowania trzeba byłoby pestek mniej więcej z osiemnastu jabłek (przy założeniu, że przedtem nie zabiłyby cię promieniotwórcze banany).

Tak samo jest z metalami w twoim ciele. Przy niedoborze miedzi twój układ odpornościowy nie może działać, ale przy jej nadmiarze oczy nabierają czerwonawożłotej barwy. Na pewno wygląda to pięknie, lecz trudno byłoby ci owo piękno docenić, jednocześnie bowiem wymiotowałbyś krwią.

Arsen jest pierwiastkiem słynącym jako składnik trucizny, ale w małych dawkach można nim leczyć białaczkę¹³⁰. Był on również głównym atomem w cząsteczce salwarsanu, pierwszego na świecie cudownego leku i głównej przyczyny faktu, że nie słyszysz dzisiaj zbyt wiele na temat kiły¹³¹. Antymon można stosować jako środek przeciwbakteryjny, ale w zbyt dużej dawce zaczyna zabijać, a niewielka ilość ceru może leczyć gruźlicę, lecz zbyt wielka spowoduje zawał serca¹³².

Reguła Paracelsusa jest przyczyną, dla której leki mają zalecane dawkowanie. Weź odpowiednią ilość środka chemicznego, a ocalisz życie, weź nieodpowiednią, a położysz temu życiu kres.

PRZEDE WSZYSTKIM DLACZEGO SUBSTANCJE TRUJĄ?

Mówiąc szczerze, nie wiemy, dlaczego pewne substancje są szkodliwe, inne zaś – korzystne. Biorąc pod uwagę liczbę istniejących związków chemicznych, nie zdołalibyśmy sporządzić katalogu działań wszystkich. Mechanizm wiązań cząsteczkowych poznaliśmy dopiero pod koniec lat dwudziestych ubiegłego wieku, więc to żadna niespodzianka, że duża część biologii leży nadal poza naszym zasięgiem. Robi ona bowiem to, co robi, już od przeszło trzech miliardów lat, nie ma zatem możliwości, byśmy ją poznali w ciągu zaledwie stulecia.

Organizm człowieka to miejsce, w którym utrzymuje się krucha równowaga przemian chemicznych. Jeśli zmienimy jedną z nich, uruchomimy reakcję łańcuchową, której ostateczny rezultat może być nieprzewidywalny. Na przykład zbyt duża zawartość telluru w organizmie powoduje okropnie cuchnący oddech, a srebro zabarwia skórę na niebiesko – taki stan nazywa się srebrzycą (argyrią)¹³³. Nawet nitrogliceryna, którą poznaliśmy jako składnik czynnika dynamitu, służy również do leczenia duszniczy bolesnej, chociaż nikt nie wie na pewno, dlaczego ta terapia przynosi efekty¹³⁴.

Jedną z niewielu trucizn, których działanie zgłębiliśmy, jest cyjanek. Działa on dlatego, że cząsteczki cyjanku silnie wiążą się z żelazem. Jeśli zdarzy się tak, że zwiążą się z atomem żelaza w centralnej części cząsteczki zwanej oksydazą cytochromu c, żelazo staje się bezużyteczne i cały mechanizm się wyłącza. To zła wiadomość, ponieważ oksydaza cytochromu c to cząsteczka potrzebna nam do czerpania energii z pokarmu. Wyłączenie jej oznacza w zasadzie śmierć głodową w czasie mierzonym raczej w minutach niż w tygodniach.

Wiemy również, że niektóre pierwiastki, zwłaszcza metale ciężkie, są trujące z powodu ich podobieństwa do pierwiastków potrzebnych w organizmie, mogą one bowiem przypadkowo ulec wbudowaniu w cząsteczki enzymów. Cynk jest potrzebny do wzrostu, lecz inny pierwiastek – kadm – odznacza się podobną wielkością, zatem po jego spożyciu organizm zaczyna wytwarzać enzymy z kadmem zamiast cynku. Kadm jednak nie ma odpowiednich orbitali, żeby reagować ze związkami chemicznymi w organizmie, w wyniku czego doznaje się zatrucia kadmem i ciało przestaje rosnąć.

Do zatrucia ołowiem dochodzi dlatego, że ołów przypomina wielkością wapni potrzebny do wytwarzania krwinek czerwonych, więc jeśli organizm wchłonie zbyt dużo ołowiu, zakłóca to czynność układu krwiotwórczego. Rtęć działa jeszcze gorzej, gdyż z powodu odpowiedniej wielkości przenika przez błony otaczające mózg. Po dostaniu się do wnętrza mózgu niekorzystnie wpływa na czynność układu nerwowego, nie mówiąc już o wzorcach myślenia. Większość ludzi właśnie z tego powodu unika rtęci, ale w XIX wieku ogrzanego azotanu rtęci używano jako kluczowego składnika do przygotowywania filmu, z którego szyto kapelusze. Oczywiście ludzie pracujący w kapelusznictwie wkrótce zaskarbili sobie reputację osób, którym brak paru elektronów w atomie, i stąd pochodzi powiedzenie „szalony jak kapelusznik”¹³⁵.

WEWNĘTRZNY OGIEN

Przeprowadzanie tych wszystkich reakcji to dla organizmu wyczerpująca praca, wymagająca ciągłego dopływu życiodajnej energii, pozyskiwanej poprzez spożywanie cukru i spalanie go.

W chemicznym znaczeniu słowo „cukier” nie odnosi się do jednego związku chemicznego, lecz do całego zbioru związków. Wszystkie składają się z atomów węgla, tlenu i wodoru, układających się w pętle w kształcie sześciokątów bądź pięciokątów. Cukier spożywczy jest mieszaniną dwóch związków: sacharozy i fruktozy. Różne, dostępne w handlu postacie cukru, takie jak cukier kryształ, cukier puder albo lukier, odnoszą się do wielkości kryształów, a nie do samych związków chemicznych.

Większość spożywanych przez nas pokarmów zawiera cukry, które organizm rozkłada na najprostszy typ – glukozę ($C_6H_{12}O_6$). Następnie cząsteczki glukozy wchodzi w sekwencję reakcji, podczas których ulegają przekształceniu w wodę i dwutlenek węgla. Organizm wydala wodę z potem, a dwutlenek węgla rozpuszcza się we krwi, która przynosi go do płuc, skąd wydostaje się w wydychanym powietrzu. Wydychane teraz przez ciebie powietrze powstało z żywności zjedzonej na śniadanie.

Pierwotne atomy C, H i O zostają zatem przeobrażone w wysoce niestabilną cząsteczkę, zwaną adenozynotrójfosforanem (w skrócie ATP). Cząsteczka ATP zawiera łańcuch zwisających z niej atomów fosforu połączonych z tlenem, które w dowolnej chwili mogą się odłączyć, uwalniając przy tym światło i ciepło. Inne cząsteczki mogą przechwytywać tę energię, która w ten sposób jest zużywana do zasilania wszystkich reakcji w komórce.

Całą procedurę steruje cząsteczkowa maszyna, włączająca się i wyłączająca dla zapewnienia, żeby odpowiednie reakcje zachodziły we właściwym czasie. Jej odkrywca Hans Krebs zgarnął Nagrodę Nobla za opracowanie mapy tej całej zabawy.

Na tym przede wszystkim polega powód, dla którego potrzebujemy pokarmu. Bez cukrów nie moglibyśmy zaopatrywać się w energię do zasilania wszystkich innych reakcji chemicznych, które czynią nas żywymi istotami. Z wyjątkiem jednego gatunku (*Spinoloricus cinziae*, który, jak się zdaje, posiadał w toku ewolucji odmienny sposób pozyskiwania energii) wszystkie żyjące na Ziemi stworzenia przeprowadzają reakcje odkryte przez Krebsa.

Noszą one wspólną nazwę oddychania (angielskie słowo *respiration* pochodzi od łacińskiego *spirare*, co znaczy „oddychać”), które w sensie chemicznym odpowiada reakcji spalania. Pewne związki chemiczne reagują z tlenem, w wyniku czego powstają dwutlenek węgla, woda, ciepło i światło. Wszyscy jesteśmy zatem chodzącymi elektrowniami.

Nie narażamy się przez to na niebezpieczeństwo jedynie dzięki temu, że odbywa się to w kilku etapach i na bardzo małą skalę. Całe szczęście, gdyż w przeciwnym razie samoistnie zajęlibyśmy się płomieniem. A skoro o tym mowa...

WEWNĘTRZNE PALENISKO

Najwcześniejszy zapis dotyczący samozapłonu człowieka to relacja o śmierci anonimowego polskiego szlachcica na początku XVI wieku, za panowania Zygmunta I Starego i jego żony, królowej Bony Sforzy. Wzmianka pochodzi z wydanej w 1654 roku książki Thomasa Bartholina, który usłyszał o tym w formie relacji z drugiej ręki od Adolphusa Vorstiusa, temu zaś opowiedział o tym jego ojciec, który twierdził, że widział raz dokument zawierający opis tego zdarzenia¹³⁶. Krótki opis, pierwotnie po łacinie, można przetłumaczyć następująco: „Wypił dwa puchary grzanego wina, po czym buchnęły z niego płomienie, w których zgorzał”.

Samozapłon człowieka (ang. *spontaneous human combustion*, SHC) jest zagadnieniem kontrowersyjnym ze względu na brak zgody co do tego, czy takie zjawisko zachodzi. Idea, że dana osoba bez zapłonu z zewnątrz może zająć się ogniem, przedstawia się nader dramatycznie, lecz najwyraźniej dotyczy zdarzeń tak rzadkich, iż nie da się znaleźć solidnych badań nad nimi. Nie można bowiem badać grupy ludzi, żeby sprawdzić, która z nich ulegnie samozapłonowi. Chodzi wszak o zjawisko samoistne.

Większość doniesień na temat SHC przypomina powyższą historię polskiego szlachcica – są to niepoparte żadnymi dowodami relacje z drugiej ręki i prawdopodobnie nie ma w nich nic poza upiornymi opowieściami. Ponadto opisy przytaczające rzeczywiste szczegóły zazwyczaj łatwo dają się wyjaśnić. Jest to jednak ciekawe i działające na wyobraźnię zagadnienie, któremu warto się przyjrzeć.

W przeważającej liczbie przypadków SHC szczątki ciała człowieka są zwęglone lub stopione z wyjątkiem stóp i rąk. Kości obracają się w popiół, a otaczające meble przeważnie pozostają nienaruszone.

Zajmijmy się najpierw spopielonymi kośćmi. Wiele osób zgodnie twierdzi, że dla uzyskania takiego efektu spalanie musiałoby zachodzić w straszliwej temperaturze. Krematoryjne piece zazwyczaj wytwarzają bądź co bądź temperaturę przekraczającą 980°C.

Tak wysoka temperatura jest jednak potrzebna, ponieważ w krematoriach ciała muszą spalać się szybko. Mimo to płomień o kilkusetstopniowej temperaturze wystarczy do spopielenia kości, o ile pozostają w ogniu przez kilka godzin. Jeśli źródło ognia wystarczy na tak długo, nie ma w tym żadnej tajemnicy.

Następnym zadaniem jest wyjaśnienie kwestii paliwa. W 1998 roku naukowiec John De Haan przeprowadził serię eksperymentów, podczas których owinął ciało martwej świni tkaniną, której jeden

z rogów podpałił. Po zapoczątkowaniu spalania woda zawarta w ciele świni wyparowała i sucha padlina płonęła dalej przez pięć godzin, a zniszczeniu uległo całe ciało oprócz nóg¹³⁷. Wyjaśnieniem tego makabrycznego pokazu jest „efekt knota”.

Podskórna tkanka tłuszczowa większości ssaków jest palna, więc jeśli skóra zostanie przerwana, tłuszcz może się topić i wyciekać do otaczającej ciała tkaniny. Tkanina przesiąka wtedy ciekłym tłuszczem i będzie płonąć godzinami jak knot świecy, wykorzystując jako paliwo cały zapas tłuszczu w ciele. To również wyjaśnia przyczynę, dla której jedyne pozostałe części ciała to stopy i ręce – zawierają one bardzo mało tłuszczu, zatem ogień pozostawia je nietknięte.

A jak to się dzieje, że reszta pomieszczenia zawsze jest nienaruszona? Słyszeliśmy o ogniu wymykającym się spod kontroli i budynkach spopielonych aż do gołej ziemi, gdyż ogień podobno rozprzestrzenia się i niszczy wszystko, co znajdzie na swojej drodze. Jeśli jednak poważnie się nad tym zastanowimy, przekonamy się, że to nieprawda.

Większość pożarów tkwi w miejscu i spala to, co znajduje się powyżej, a nie po bokach. O ile sufit nie jest bardzo nisko, ogień po wyczerpaniu się zapasu paliwa zwykle nie ma już co trawić. Pomyśl, w jaki sposób możesz stać tuż obok ogniska albo trzymać płonąca zapalną, nie parząc przy tym skóry. Albo pomyśl o wszystkich podręcznikach w laboratoriach chemicznych na całym świecie, tkwiących o parę centymetrów od palników Bunsena, a żaden nie płonie. Możesz przytrzymać kawałek papierowej chusteczki o trzy centymetry od płomienia, a mimo to papier się nie zajmie. Nawet jeśli przesuniesz ją przez sam płomień, tylko się ogrzeje.

Pożary, które rzeczywiście się rozprzestrzeniają i trafiają na pierwsze strony gazet, zwykle powstają w rezultacie bezpośredniego kontaktu. Pożar lasu szerzy się, ponieważ drzewa stykają się ze sobą albo wiatr przenosi płomień z jednego miejsca na inne. Wbrew instynktownemu przeświadczeniu pożar niełatwo rozprzestrzenia się w powietrzu – w przeciwnym razie atmosfera płonęłaby za każdym razem, kiedy zapalamy ogień w kuchence albo papierosa.

O ile tylko jest coś, co roznieci ogień, odkrycie ofiary SHC wcale nie budzi podejrzeń i w istocie zgadza się z uczciwą nauką. Okazuje się, że w większości szczegółowych doniesień na temat SHC istnieją oczywiste źródło zapłonu.

Na przykład śmierć Nicole Millet (20 lutego 1725 roku we francuskim mieście Reims) często przytacza się jako przykład samozapłonu, ponieważ jej zwęglone na wiór zwłoki znaleziono na podłodze, a uszkodzenia naokoło były nieznaczne. Należy wziąć pod uwagę to, że Millet solidnie popijała i z butelką alkoholu podeszła, żeby „ogrząć się przy ogniu”¹³⁸. Hmm.

Podobnie było z Mary Reeser (2 lipca 1951 roku w St. Petersburg na Florydzie), którą znaleziono spaloną w hotelu, a w pokoju również było mało zniszczeń oprócz samego fotela¹³⁹. Po przeprowadzeniu śledztwa agencji FBI doszli jednak do wniosku, że Reeser zażywała tabletki nasenne, które sprawiły, że zapadła w sen, paląc papierosa¹⁴⁰. Hmm.

Jako naukowcy musimy zachowywać sceptycyzm, zwłaszcza wobec dziwnych twierdzeń. W większości przypadków okazuje się, że choć człowiek może się zapalić, to nie ma w tym nic samoistnego. A mimo to...

Nie wiem, czy może dojść do samozapalenia się człowieka. Prawie wszystkie takie twierdzenia mają, jak się okazało, oczywiste przyczyny, ale nie mogą zignorować faktu, że w jednym czy dwóch przypadkach takiej przyczyny nie było. Spośród kilkuset udokumentowanych SHC w dziejach jest garstka takich, które wydają się przeczyć logice.

Jednym z nich jest przypadek śmierci Roberta Francisa Baileya (13 września 1967 roku w londyńskiej dzielnicy Lambeth). Grupa osób przechadzająca się w pobliżu zrujnowanego domu w Londynie zauważyła migoczące wewnątrz jasno światło i wezwała straż pożarną, która w ciągu kilku minut przybyła na miejsce. Jak wynika z raportu dowódcy brygady Johna Stacey’a, kiedy strażacy weszli do środka, znaleźli ciało Baileya zwinięte na podłodze, z dziesięciocentymetrową raną brzucha, z której wydobywał się huczący płomień. Budynek był odcięty od sieci elektrycznej i gazowniczej, nigdzie też nie było widać zapalek¹⁴¹. Jak zatem powstał ogień i dlaczego buchał z wnętrza zmarłego?

Jest również relacja Raymonda Reeda, który podczas drugiej wojny światowej służył w 9. batalionie Królewskich Fizylierów Walijskich. Sam Reed się nie zapalił, ale wspominał, jak pewnego wieczoru szedł przez pole w hrabstwie Dorset, a stojąca w pobliżu owca wybuchła¹⁴². Ona przypuszczalnie nie paliła papierosa w łóżku.

Jest też pochodzący z 1867 roku przypadek pana Watta z Garston, którego zwłoki nagle zapaliły się w kościelnej krypcie długi czas po jego zgonie na dur brzuszny¹⁴³. Zatem nie dość, że to mało prawdopodobne, by palił w łóżku – on spoczywał zamknięty w trumnie.

Relacje takie jak powyższe, jeśli mamy im wierzyć (a to potężne „jeśli”), trudno ująć w ramy racjonalnego rozumowania. Efekt knota wyjaśniałby kwestię szczątków, lecz nie wydaje się, by istniało źródło zapłonu.

Bądźmy jednak ostrożni. Sam fakt, że nie mamy wyjaśnienia jakiegos zjawiska, nie oznacza, iż mamy przyjąć wyjaśnienie zmyślone. Tych relacji nie da się wyjaśnić, lecz rozsądnie jest stwierdzić, że nie znamy wyjaśnienia, zamiast wysuwać hipotezę, która nam się podoba. Nie ma powodu, by zakładać istnienie SHC, dopóki nie znajdziemy dowodów bezpośrednio potwierdzających to zjawisko. W przeciwnym razie moglibyśmy twierdzić, że każdy pożar o niewyjaśnionej przyczynie to rezultat samoistnego zapłonu.

W każdej relacji świadków samozapłonu istnieje jednak pewien szczegół, który można by zakwalifikować jako potencjalny dowód. Otóż zawsze podaje się, że płomienie mają jaskrawoniebieską barwę i wydobywają się z brzucha.

W 1993 roku Günter Gassmann i Dieter Glindemann wykazali, że w ludzkich jelitach może powstawać związek chemiczny, zwany fosforowodorem (PH_3)¹⁴⁴. Sam fosforowodór nie jest łatwopalny, lecz jeśli dwie jego cząsteczki połączą się ze sobą, powstaje dwufosforowodór (P_2H_4), który jest. Dwufosforowodór w obecności tlenu może samoistnie się zapalić i spalić również inne gazy w bliskim sąsiedztwie. Głównym gazem we wnętrzu ciała człowieka jest metan (CH_4), znajdujący się głównie w jelitach i znany z tego, że pali się niebieskim płomieniem.

Dwufosforowodór często powstaje w warunkach panujących na moczarach i dlatego ludzie niekiedy opowiadają o błękitnych płomykach wokół bagien i cmentarzy. Tak zwane błędne ogniki są w rzeczywistości płomieniami metanu, roznieconymi przez chemiczne przemiany fosforu.

Nie znamy na razie mechanizmu powodującego powstawanie dwufosforowodoru w jelitach, lecz gdyby taki istniał i gdyby powstały związek wszedł w kontakt z tlenem, i gdyby doszło do tego w obecności dostatecznej ilości metanu, niewykluczone, że zaistniałaby mała szansa wybuchu ognia.

Szczerza i naukowa odpowiedź na pytanie, czy samozapłon człowieka może nastąpić, nadal brzmi: „Nie wiemy”. Dwufosforowodór podsuwa nam kuszącą możliwość, ale spekulacje to jeszcze nie dowody. Możemy tylko powiedzieć, że jeśli to zjawisko naprawdę występuje w przyrodzie, to z prawdopodobieństwem jeden na miliard.

Wyłożyłem jasno przyjacielom, że gdybym przypadkiem jako jeden z nielicznych padł śmiertelną ofiarą samozapłonu, muszą sfilmować cały epizod, żeby inni naukowcy mogli się czegoś dowiedzieć. Zatem gdybyśmy się spotkali i gdybym akurat uskarżał się na żołądek, miejcie kamery w pogotowiu.

[120](#) Nathwani A.C. *et al.*, *Polonium-210 poisoning: a first-hand account*, „The Lancet”, t. 388, nr 10049 (2016), s. 1075–1080.

[121](#) Adamson R.H., *The acute lethal dose 50 (LD50) of caffeine in albino rats*, „Regulatory Toxicology and Pharmacology”, r. 80 (2016), s. 274–276.

[122](#) Welsome E., *The Plutonium Files: America's Secret Medical Experiments in the Cold War*, The Dial Press, Nowy Jork 1999.

[123](#) Olów: Sujatha K. *et al.*, *Lead acetate induced neurotoxicity in Wistar albino rats: A pathological, immunological, and ultrastructural study*, „Journal of Pharma and Bio Science”, nr 2 (2011), s. 459–462. Uwaga: zakłada się, że chodzi o octan ołowiu. Tal: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, *Toxicological Profile for Thallium*, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta 1992. Dostępne na stronie: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp.asp?id=309&tid=49> (dostęp: 18.08.2017). Uwaga: dla dokładniejszego porównania z ołowiem zakłada się, że chodzi o octan talu. Arsen: H. Marquardt *et al.*, *Toxicology*, Academic Press, Cambridge 1999. Fosfor: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, *Toxicological Profile for White Phosphorus*, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta 1997. Dostępne na stronie: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp103-c2.pdf> (dostęp: 18.08.2017). Uwaga: wydaje się, że podana wartość pochodzi z: Lee C.C., *Mammalian Toxicity of Munition compounds. Phase I: Acute Oral Toxicity, Primary Skin and Eye Irritation, Dermal Sensitization, and Disposition and Metabolism*, Report No. 1, AD B011150, Midwest Research Institute, Kansas City 1975.

[124](#) Ela S., *Experimental study of toxic properties of dimethylcadmium*, „Gigiena Truda i Professional'nye Zabolevaniya”, nr 6 (1991), s. 14–17.

[125](#) Barash J.R., Arnon S.S., *A novel strain of clostridium botulinum that produces Type B and Type H botulinum toxins*, „The Journal of Infectious Diseases”, r. 29, nr 2 (2014), s. 183–191.

[126](#) *Botox OnabotulinumtoxinA, Botox*. Dostępne na stronie: <http://www.botox.com> (dostęp: 18.08.2017).

[127](#) C.H. Mayo, wywiad udzielony „Northwestern Health Journal” (grudzień 1924).

[128](#) Busacchi V., *Vincenzo Menghini and the discovery of iron in the blood*, „Bullettino delle science mediche”, r. 130, nr 2 (1958), s. 202–205.

[129](#) Kinne-Saffran E., Kinne R.K., *Vitalism and synthesis of urea. From Friedrich Wöhler to Hans A. Krebs*, „American Journal of Nephrology”, r. 19, nr 2 (1999), s. 290–294.

[130](#) Antman K.H., *Introduction: The history of arsenic trioxide in cancer therapy*, „The Oncologist”, r. 6, nr 2 (2001), s. 1–2.

[131](#) Lloyd N.C., *The composition of Ehrlich's salvarsan: Resolution of a century-old debate*, „Angewandte Chemie”, r. 44, nr 6 (2005), s. 941–944.

[132](#) Chauhan H.P., *Synthesis, spectroscopic characterization and antibacterial activity of antimony(III)bis(dialkylthiocarbamate)alkylthiocarbonates*, „Spectrochimica Acta. Part A”, r. 81, nr 1 (2011), s. 417–423; *Education in Chemistry – Cerium*, „Royal Society of Chemistry”. Dostępne na stronie: <https://eic.rsc.org/elements/cerium/2020005.article> (dostęp: 18.08.2017).

[133](#) *Getting a tiny bit of this element on your skin will make you reek of garlic for weeks, io9* (13 sierpnia 2015). Dostępne na stronie: <http://io9.gizmodo.com/getting-a-tiny-bit-of-this-element-on-your-skinwill-ma-1723949124> (dostęp: 18.08.2017).

[134](#) Hambrecht R. *et al.*, *Managing your angina symptoms with nitroglycerin*, „Circulation”, nr 127 (2013).

[135](#) Ramachandran V.S., *Encyclopedia of the Human Brain*, Academic Press, Cambridge 2002.

136 Bartholin T., *Historiarum anatomicarum rariorum centuria I et II* (1654). Dostępne na stronie: <https://books.google.nl/books?id=NtLAd44hZ4UC&printsec=frontcover&dq=%22Historiarum+anatomicarum+rariorum+centuria+I%22&hl=en&sa=X&sjid=IE8DAAAIAIAJ&pg=3085.1265930&hl=en> (dostęp: 18.08.2017).

137 *New light on human torch mystery*, *BBC News* (31.08.1998). Dostępne na stronie: http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/158853.stm (dostęp: 18.08.2017).

138 Harrison M., *Fire from Heaven: A Study of Spontaneous Combustion in Human Beings*, Skoob Books, Londyn 1990.

139 *Cause of fire killing woman still mystery*, „St. Petersburg Times”, cz. 2 (4.07.1951). Dostępne na stronie: <https://news.google.com/newspapers?nid=888&dat=19510704&id=rwRZAAAIAIAJ&sjid=IE8DAAAIAIAJ&pg=3085.1265930&hl=en> (dostęp: 18.08.2017).

140 Haslam G., 1951, *July 1: Mary Reeser's fiery death, Anomalies: The Strange and Unexplained*. Dostępne na stronie: <http://anomalyinfo.com/Stories/1951-july-1-mary-reesers-strange-death> (dostęp: 18.08.2017).

141 Arnold L.E., *Ablaze! The Mysterious Fires of Spontaneous Human Combustion*, M. Evans and Co., Nowy Jork 1995.

142 Randles J., Hough P., *Spontaneous Human Combustion*, Robert Hale Ltd, Londyn 2007.

143 Whitley G., *Garston Church (1867–74)*, *Speke Archive Online*. Dostępne na stronie: http://spekearchiveonline.co.uk/garston_church.htm (dostęp: 18 sierpnia 2017).

144 Gassmann G., Glindemann D., *Phosphane (PH₃) in the biosphere*, „Angewandte Chemie”, r. 32, nr 5 (1993), s. 761–763.

Rozdział dwunasty

Dziewięć pierwiastków, które zmieniły świat (oraz jeden, który tego nie zrobił)

NAJDŁUŻSZY EKSPERYMENT W HISTORII

Klasyfikowanie substancji jako ciała stałego, cieczy lub gazu zwykle jest sprawą prostą. Ciała stałe nie mogą płynąć, ciecze płyną, lecz nie dają się sprężyć, a gazy mogą i sprężyć się, i płynąć. Powyższe definicje sprawdzają się w odniesieniu do większości materiałów, ale niektóre nie są tym, na co wyglądają, co wiedzie nas do pewnej substancji chemicznej, ostatecznej rekordzistki – smoły naftowej.

Smoła naftowa, zwana niekiedy asfaltem, to lepkie, czarne pozostałości po destylacji ropy naftowej. Używamy jej do budowy dróg, a interesującą czyni ją fakt, że choć wygląda jak ciało stałe, nie jest nim. Drogi, którymi jeździsz, są zbudowane z cieczy.

W 1902 roku nieznanymi z nazwiska naukowiec ze Szkockiego Muzeum Królewskiego w Edynburgu wlał próbkę gorącej smoły do szklanego lejka i pozostawił ją do ostygnięcia. Przez ponad sto lat smoła sączyła się przez lejek, a do naczynia pod nim wpadły dwie krople¹⁴⁵. Oglądana gołym okiem, wygląda jak zestalona, czarna maź, ale w istocie to najbardziej lepka ciecz znana ludzkości.

Podobną wersję eksperymentu z nieco rzadszą smolą rozpoczęto w 1927 roku w Uniwersytecie Queensland w Brisbane. Ta od chwili rozpoczęcia eksperymentu uroniła dziewięć kropli, a ostatnia z nich spadła w 2014 roku.

Kamery filmujące techniką poklatkową rejestrowały powolne pełzanie tych cieczy, ale nikt nigdy nie widział dokładnego momentu spadania kropli. Nie ma jednak powodu do rozpacz. Na stronie <http://www.thetenthwatch.com/feed> możesz obserwować transmisję na żywo z eksperymentu w Brisbane i przyglądać się, jak z wolna formuje się dziesiąta kropla cieczy. Zapraszam.

Oba eksperymenty przetrwały obie wojny światowe, przeżyły powstanie i upadek Związku Radzieckiego oraz premiery wszystkich części filmu *Szybcy i wściekli*, co czyni je najdłuższymi doświadczeniami naukowymi w dziejach. Jeśli jednak zechcesz przez chwilę pofilozofować, moglibyśmy wysunąć argument, że pewien eksperyment trwał jeszcze dłużej, my zaś tkwimy w samym jego centrum.

Co się stanie, jeśli weźmiemy zapas pierwiastków, jaki znajduje się na całej planecie, zlepimy je w kulę krążącą wokół jakiejś gwiazdy w zapadłym zakątku kosmosu i pozostawimy na 4,5 miliarda lat? Co się będzie działo w jądrze planety i na jej powierzchni?

Ludzie to późno pojawiające się produkty długiego ciągu reakcji chemicznych, przebiegających z udziałem pierwiastków istniejących na długo przed tym, jak na Ziemi zawiąły dinozaury. Historia pierwiastków jest również historią nas samych, a układ okresowy występował na każdym jej etapie bez względu na to, czy o tym wiedzieliśmy, czy nie.

Tak więc w ostatnim rozdziale chcę prześledzić, które pierwiastki były kluczowe dla naszego rozwoju i które wywarły największy wpływ na ten eksperyment zwany ludzkością.

CYNKU, WRÓĆ!

W serialu *Simpsonowie* jest odcinek, w którym Bart musi obejrzeć film o dzieciaku imieniem Jimmy, pragnącym żyć w świecie pozbawionym cynku. Bohater wkrótce się przekonuje, że akumulator w jego samochodzie nie działa, co uniemożliwia mu poderwanie dziewczyny imieniem Betty. Mało tego: znika obrotowa tarcza w jego telefonie oraz iglica w pistolecie, którego bohater chce użyć w celu popełnienia samobójstwa. Jimmy zniecacka budzi się z okrzykiem „Cynku, wróć!”, po czym wydaje westchnienie ulgi. To wszystko było tylko przerażającym snem¹⁴⁶.

Jest to doskonała satyra na filmy uczące gry w hokeja, popularne w latach pięćdziesiątych XX wieku, kiedy nikomu nawet nie marzyło się życie w świecie bez cynku. Znam pewną osobę, która jako ulubiony pierwiastek wymienia cynk, choć większość ludzi chyba mało o nim wie.

To samo odnosi się do większości pierwiastków w układzie okresowym. Wiemy, że istnieją, ale ich działaniom nie poświęcamy wiele uwagi. Jeśli cierpi się na niewydolność nerek, powinno się odczuwać wdzięczność wobec cyrkonu, ponieważ służy on w dializatorach do absorbowania jonów. Palacze tytoniu wiele zawdzięczają cerowi, gdyż to jeden z niewielu metali wytwarzających iskry umożliwiające działanie zapalniczek. Pracownicy branży spawalniczej używają okularów ochronnych z domieszką praeodymu, powstrzymującego żółtą część widma światła. A pracownicy zakładów produkujących panele słoneczne na pewno za ekscytujący pierwiastek uznają ruten, gdyż absorbuje on światło słoneczne lepiej niż jakikolwiek inny. Kuchenka mikrofalowa do podgrzewania potraw nie działa bez samaru. Wieczne pióra, którymi piszą w szkołach uczniowie, mają stalówki z irydu. W kontynentalnej części Europy płaci się banknotami pokrytymi europem, co umożliwia wykrywanie fałszyfikatów.

Każdy ma swój ulubiony pierwiastek (a jeśli nie jest nim fosfor, to chyba coś z tobą nie tak?), ale możemy argumentować, że niektóre odegrały rolę ważniejszą od innych.

Moglibyśmy na przykład stwierdzić, że glin był ważniejszy od selenu. Pierwszego używa się w budownictwie i przemyśle samochodowym, a drugiego – do odbarwiania szkła i zwalczania łupieżu. (Po napisaniu tych słów cieszę się widokiem za okienną szybą, przegarniając palcami bujną i zdrową czuprynę).

Jeśli pominiemy oczywiste i nudne pierwiastki, jak wdychany przez nas tlen albo żelazo w jądrze naszej planety, to które wskażemy jako te najbardziej kluczowe w ewolucji naszej kultury, polityki i technologii? Które uczyniły nasz świat takim, jaki jest, które zaś potajemnie wpływają na nasze codzienne życie, choć tego nawet nie dostrzegamy?

Trudno było zestawiać tę listę, ponieważ kiedy tylko dokonywałem konkretnego wyboru, natychmiast czułem, że jakiś ważny pierwiastek pominałem. Problem w tym, że każdy z nich jest szczególnie. No, powiedzmy, że wszystkie z wyjątkiem jednego.

HONOROWA WZMIANKA

Pierwotnie zamierzałem napisać ten rozdział w postaci konwencjonalnej listy dziesięciu czołowych pierwiastków, lecz w końcu zdecydowałem się na dziewięć. A to dlatego, że jest jeden pierwiastek zasługujący na bardzo specjalną wzmiankę, który niezupełnie pasuje do pozostałych.

W trakcie zbierania materiału naukowego do książki poznałem historie i charakterystyki wszystkich 118 znanych pierwiastków. Każdy z nich jest niepowtarzalny, ponieważ odegrał ważną rolę w historii chemii albo ma jakąś wyróżniającą go właściwość, która czyni go idealnym do określonego zastosowania.

Zdołałem wymienić w tej książce wszystkie pierwiastki przynajmniej raz z wyjątkiem tego o liczbie atomowej 66 – dysprozu. Najmniej potrzebnego pierwiastka na świecie.

Dysproz wyizolował w 1886 roku Paul Émile Lecoq na gzymsie swojego kominka, co akurat wydaje się odpowiednim miejscem¹⁴⁷. Jeśli w ogóle istnieje taki „kominkowy” pierwiastek, to właśnie ten. Prawdopodobnie istnieje w jakimś celu, choć nikt nie wie w jakim.

Dysproz nie jest ani specjalnie rzadki, ani specjalnie pospolity. Reaguje z wodą, lecz nie tak dobrze jak metale z grupy 1. Można go wykorzystywać do budowy laserów, lecz nie dorównują one tym

zbudowanym przy użyciu helu lub neonu. Niekiedy stosuje się go w prętach sterujących reakcją jądrową w reaktorach, mających zapobiegać powstawaniu zbyt dużej ilości ciepła, ale ten efekt można uzyskać za pomocą indu lub kadmu. Dysproz ulega swoim przeciwnikom w każdej konkurencji.

Na pewno gdzieś istnieje naukowiec zajmujący się dysprozem i podczas lektury tych słów toczy pianę z ust. Mimo to dysproz nie wydaje się pod żadnym względem wyjątkowy, przez co staje się dosyć ciekawy.

Niniejszym ogłaszam dysproz jedynym pierwiastkiem, który można by wymazać z historii człowieka i absolutnie nic by się nie zmieniło. Pozdrawiamy cię, dysprozie, najnudniejszy pierwiastku w układzie okresowym.

A teraz podążajmy dalej w dół listy.

PIERWIASTEK WIEKÓW

To oczywiste, że należy zacząć od węgla. Jest dla naszego świata kluczowy, a przez to wręcz monotony. Rozejrzyj się po pokoju – prawdopodobnie 90 procent przedmiotów w zasięgu twojego wzroku składa się z węgla lub ze składników wyekstrahowanych przy jego użyciu albo korzysta z zasilania energią uzyskaną z węgla. To pierwiastek, który zdefiniował ludzkość.

Istniejemy od setek tysięcy lat, lecz to, co nazywamy cywilizacją, zaczęło się od manipulowania metalami. Epoka kamienia stanowiła prymitywne zaranie naszego gatunku, a punktami zwrotnymi stały się epoki brązu i żelaza.

Zanim opanowaliśmy sztukę metalurgii, jedynymi znanymi nam metalami były złoto i czasem srebro, więc wszystkie materiały budowlane, oręż i narzędzia pochodziły z rozbijania skał. Aż w pewnym okresie między rokiem 8000 a 3000 p.n.e. wszystko się zmieniło.

Większość metali występuje w przyrodzie w formach związanych z tlenem, ale tlen tworzy mocniejsze wiązania z węglem. To oznacza, że jeśli zmieszamy dostateczną ilość węgla z naszym tlenkiem metalu (skałą) i dodamy trochę energii (podgrzejemy mieszaninę), wszystko ulegnie przeobrażeniu i powstanie dwutlenek węgla oraz czysty metal. Ta technika, zwana wytopianiem, stała się najważniejszą reakcją chemiczną od czasu samego spalania.

Dawni technolodzy, kimkolwiek byli, odkryli, że prażenie skał w obecności węgla daje w rezultacie metal. Najpierw zaczęliśmy ekstrahować miedź i cynę, co dało nam brąz. Następnie nauczyliśmy się uzyskiwać za pomocą ognia wyższe wartości temperatury i zaczęliśmy ekstrahować żelazo, prawdopodobnie tylko to znajdowane w postaci meteorytów.

Do XIX wieku spalaliśmy sam węgiel jako opał i używaliśmy go do zasilania silników parowych. Węgiel ma przewagę nad innymi paliwami, ponieważ nie pozostawia po sobie niemiłych resztek, tylko spala się z wytworzeniem niewidzialnego gazu. Cóż to zatem może szkodzić?

Dzisiaj nadal korzystamy z opalanych węglem elektrowni, dlatego używany przez nas prąd najprawdopodobniej również został wytworzony z węgla. Dopiero w ciągu ostatnich sześćdziesięciu lat zdaliśmy sobie sprawę, że cały CO₂ ma tę niedogodną cechę, iż absorbuje promieniowanie podczerwone i w miarę upływania kolejnych dekad powoli podgrzewa atmosferę.

Na korzyść należy zapisać to, że węgiel stanowi również podstawę chemii polimerów. Weź długi łańcuch atomów węgla, użyj wodoru dla upewnienia się, że każdy z nich ma prawidłową liczbę wiązań, i jeśli zmieszasz te marnie łańcuchy ze sobą, otrzymasz w końcu plastik.

Wyobraź sobie świat bez plastiku, metali albo powszechnie dostępnej elektryczności, a zaczniesz dostrzegać, dlaczego węgiel jest taki ważny.

Wszelchonność węgla wynika z jego umiejscowienia w układzie okresowym. Znajduje się on w górnym rzędzie, czyli ma niewielkie atomy zdolne do tworzenia mocnych wiązań, w czwartej kolumnie, a więc ma cztery dostępne elektrony wiążące.

Pierwiastek taki jak fluor również znajduje się w górnym rzędzie, lecz tylko jeden elektron dzieli go od wypełnienia powłoki elektronowej, co oznacza, że tworzy on tylko jedno wiązanie i na tym koniec. Węgiel zaś ma miejsca dla czterech elektronów, czyli może utworzyć cztery wiązania z innymi atomami, a wszystkie mocne. Inne pierwiastki tworzące mnogie wiązania są zwykle za duże, by te

wiązania były mocne, zatem węgiel tworzy najlepsze w obu światach i dlatego spotykamy go we wszystkim – od naszych błon komórkowych aż po telefony komórkowe.

Węgiel dał nam potrzebne materiały oraz energię do manipulowania nimi, a teraz jego obecność w powietrzu grozi wytrąceniem naszego klimatu ze stanu równowagi. Jeśli chcemy wytypować pierwiastek, który zmienił historię człowieka bardziej niż jakikolwiek inny, to jest nim węgiel.

PROWIANC DLA IMPERIUM

Na początku XIX wieku brytyjska armia była rozrzucona po całym świecie. Wojny napoleońskie dobiegały kresu, kończyła się era niewolnictwa, a imperium wchodziło w „złoty wiek”. Admirałowie i generałowie tej bezwzględnej maszyny militarnej stanęli jednak w obliczu problemu. O sile imperium przesądza jego zaopatrzenie w prowiant. Jak dostarczyć żywność tysiącom ludzi w rejonach odległych od miejsca jej wyprodukowania?

Rozwiązanie znalazł francuski wynalazca Philippe de Girard, który opracował metodę próżniowego zamykania żywności w cynowej puszcze. Po przetestowaniu wynalazku na kilku brytyjskich naukowcach pomysł sprzedano inżynierowi Bryanowi Donkinowi, który przystąpił do ulepszania tej metody.

Donkin był już wcześniej wybitnym rzemieślnikiem, którego rad zasięgano podczas prac nad maszyną różnicową Babbage'a i mostem wiszącym Telforda, wynalazł również skromne wieczne pióro. Chociaż opracowanie tego wynalazku niekiedy przypisuje się mylnie Johnowi Loudowi w 1888 roku, Donkin miał już patent w roku 1803¹⁴⁸. Po prostu właściwie pojmujemy historię pióra, ludzie.

Do 1813 roku Donkin opracował już metodę takiego sposobu formowania cynowych puszek, który umożliwiał zamknięcie w środku żywności bez domieszek powietrza, co oznaczało, że jej trwałość będzie można liczyć w latach i znieśie ona transport na odległość tak dużą, jak będzie trzeba.

Po tym, jak królowa Charlotta spróbowała konserwowanej peklowanej wołowiny i pochwaliła jej smak, Donkin zaczął produkować cynowe puszki na skalę masową i sprzedawać je marynarce. Cynowe puszki umożliwiały wielu krajom prowiantowanie wojsk podczas obu wojen światowych, również dzisiaj sprzedaje się je na całym świecie w liczbie ponad 40 miliardów rocznie¹⁴⁹. Chociaż wiele puszek produkuje się dzisiaj ze stali, cynowa powłoka chroni je przed korozją.

Cyna jest pierwiastkiem wyjątkowym nie tylko z powodu swoich zastosowań w postaci czystego metalu, lecz także sposobu, w jaki modyfikuje inne metale, z którymi zostanie zmieszana w formie stopu.

Jej miękkość to jeden z powodów, dla których miesza się ją z miedzią, żeby powstał brąz. W połączeniu z ołowiem tworzy stop, z którego aż do niedawna produkowano większość sztućców. Jeśli doda się do mieszaniny odrobinę więcej ołowiu, otrzyma się lut, stop służący w elektronice jako „klej” do łączenia drutów. Brąz dzwonowy do odlewania dzwonów to stop cyny z miedzią. Spiż armatni do odlewania dział to stop cyny z miedzią i cynkiem. Blacha biała do pokrywania dachów to znowu cyna zmieszana z ołowiem. Łożyska kulkowe zwykle produkuje się z cyny oraz miedzi i żelaza. Używany w teleskopach galinstan to mieszanina cyny z galem oraz indem. Taką listę można by wydłużać. Cyna to wspaniały modyfikator układu okresowego.

Cyna nie jest tak rozpowszechniona jak żelazo, ale zdecydowanie góruje nad nim odpornością na rdzę, a ponieważ łatwo można ją wydobywać i nią manipulować, może z nią pracować każdy, od najbogatszego monarchy aż po najniższe warstwy społeczne. Podczas gdy armie i politycy mogą sobie cenić pierwiastki takie jak złoto, cyna zawsze była pierwiastkiem pospółstwa. Chociaż, pamiętajmy, złoto też jest ważne.

WSZYSTKO, CO BŁYSZCZY

Barwa złota na przestrzeni dziejów skłaniała wiele kultur do otaczania tego metalu czcią, często kojarzono go też ze Słońcem (a srebro – z Księżycem). Kolor ten powstaje z powodu dużych przerw między orbitalami w atomach złota, w wyniku czego światło widzialne, gdy pada na metal, traci mnóstwo energii. Barwy o największej energii, takie jak fiolet, błękit i zieleń, są absorbowane przez

powierzchnię metalu, a fale nadające barwę żółtą i pomarańczową odbijają się od niej. Odcień żółty/pomarańczowy mają również ceź i miedź, ale nic nie może się równać ze złotem.

Z rozdziału trzeciego dowiedzieliśmy się, że złoto odegrało zasadniczą rolę w odkryciu jądra atomu, a zatem samej współczesnej chemii. Użyto go dlatego, że złoto jest najbardziej kowalnym z dostępnych metali, tak miękkim, iż 28 gramów wystarczy do sporządzenia drutu o długości dziewięciokrotnie przewyższającej wysokość Mount Everestu¹⁵⁰.

To dzięki tej łatwości formowania oraz blaskowi złoto od czasów prehistorycznych znajduje zastosowanie w jubilerstwie (by nie wspomnieć o fackie, iż nie śniedzieje). Podczas gdy inne metale stopniowo reagują z tlenem, złoto zachowuje swój połysk na zawsze.

Jest ono również bardzo rzadkim metalem. Gdyby zebrać wszystkie złoża złota na świecie, ważyłyby ogółem około 170 tysięcy ton. Ta ilość ledwie wypełniłaby trzy baseny pływackie wielkości olimpijskiej¹⁵¹.

To właśnie połączenie kowalności, rzadkości, trwałości i piękna sprawia, że złoto jest tak cenne. Można je sprzedać w każdym zakątku świata bez względu na miejscowe obyczaje, ponieważ wszyscy je cenią.

W Finlandii jako środek płatniczy akceptowano skóry wiewiórek, a w Etiopii aż do XX wieku – bryły soli¹⁵². Dokądkolwiek się pojedzie, napotka się różne waluty, ale złoto zawsze i wszędzie cieszyło się szacunkiem, co czyni z niego jedyną prawdziwą walutę międzynarodową.

Aleksander Wielki poprowadził armię Greków na podbój imperium perskiego – największego na świecie – żeby zrabować jego złoto. Gajusz Juliusz Cezar uczynił to samo z zachodnią Europą. Po nim zaś król Hiszpanii Ferdynand Aragoński, który wysłał wszystkie konkwistadorów, żeby rabowali złoto w obu Amerykach (wszyscy wiemy, co wynikło z tej historii).

Pierwszych złotych monet używano w Chinach w VI wieku p.n.e., ale do początku wieku XIX wszystkie duże państwa na świecie (jak na ironię, z wyjątkiem Chin) używały złota jako standardowego przelicznika w transakcjach krajowych i międzynarodowych. Ze względu na unikatowość tego metalu i jego masę złote monety są jednak bardzo niepraktyczne, toteż banki zaczęły drukować umowy opiewające na określoną ilość czystego złota. Na tym polegał sam wynalazek współczesnego pieniądza.

WIEDZA I WŁADZA

Niektóre pierwiastki cierpią na rozdwojenie jaźni. Ta sama substancja może przynosić światu wielkie korzyści, lecz także powodować niekończące się cierpienia. Nie ma drugiego pierwiastka, któremu można by przypisać oświecenie lub uśmiercenie tyłu ludzi, ilu ma na swoich koncie ółów.

Po wyekstrahowaniu z rudy ółów ma postać matowego metalu i trzy istotne właściwości: gęstość (co oznacza, że trudno go złamać), kowalność (dzięki której daje się giąć) oraz odporność na korozję (to zaś sprawia, że można go narażać na kontakt z wodą).

Rzymianie wydobywali ółów na wielką skalę, ponieważ używali go do wytwarzania rur i budowy wodociągów. Żelazo mniej się do tego nadaje, gdyż rdzewieje, zatem zużycie ółowiu sięgało tysięcy ton rocznie. Samego pomysłu dostarczania wody wprost do ludzkich domów nie badano należycie aż do pojawienia się rzymskiego systemu wodociągowego. Nawet angielskie słowo „hydraulic” (*plumber*) pochodzi od łacińskiej nazwy ółowiu – *plumbum* – ponieważ specjaliści od rur siłą rzeczy byli ekspertami w obróbce ółowiu.

Ze względu na toksyczność ółowiu niektórzy spekulują, że ółowica przyczyniła się do upadku i ostatecznej klęski imperium rzymskiego¹⁵³. Wydaje się to jednak mało prawdopodobne, gdyż zatrucie ółowiem było już znaną chorobą, a ółów zwykle nie rozpuszcza się w wodzie dostatecznie dobrze, by osiągnąć niebezpieczne stężenie¹⁵⁴. Możliwe, że sok z winogron, wrzący w ogromnych, ółowianych kadziach, mógłby wywołać zatrucie ółowiem u niektórych przedstawicieli arystokracji, ale to w najlepszym razie tylko spekulacja. Mało prawdopodobne, by ółów spowodował upadek rzymskiej cywilizacji, ale nie martw się – i tak odpowiadała za śmierć milionów ludzi rocznie.

W XIII wieku Chińczycy zdali sobie sprawę, że niewielka rura napełniona prochem strzelniczym pod wpływem jego wybuchu może wyrzucać pocisk z wielką prędkością – tak wynaleziono broń palną. Ta technologia rozprzestrzeniła się w europejskich armiach, a najlepszym metalem do odlewania kul

okazał się ołów – nie tylko ze względu na dostępność i łatwość obróbki, lecz także dużą gęstość, sprawiającą, że po wystrzeleniu z lufy pocisk leciał po linii prostej. Żaden metal nie pozwalał tak dobrze się kształtować, będąc przy tym na tyle gęstym, by utrzymywać trajektorię lotu.

Nikt nie wie, ile kul produkuje się dzisiaj na świecie, ale ta liczba prawdopodobnie przekracza 10 miliardów rocznie – po jednej kuli na każdego człowieka. Trudno byłoby wymyślić broń, która uśmierciła więcej ludzi niż karabiny strzelające ołowianymi pociskami.

Ołów jednak potrafił zdziałać też cuda. W 1440 roku Johannes Gutenberg poszukiwał sposobu szybkiego przekazywania informacji. Do tamtego czasu wszystkie teksty i książki trzeba było kopiować ręcznie. Gdyby dało się do tej pracy zaprząć maszynę, przygotowanie książki byłoby kwestią dni, a nie miesięcy.

Rezultatem tych prac stała się prasa drukarska, możliwa do skonstruowania wyłącznie dzięki ołowiu (stopionemu z odrobiną cyny). Kowalność ołowiu umożliwiła bowiem rzeźbienie w nim precyzyjnych kształtów drukowanych liter. Inne metale też dawały się formować, ale gęstość ołowiu oznaczała, że wielokrotne uderzenia o kartę papieru nie powodowały jego zużycia¹⁵⁵. Te same cechy, które pomagały ołowiu zabijać, pomogły mu stać się narzędziem edukacji.

PIJ DO DNA

W naszych czasach ludzie żyją dłużej. To oczywiście dobrze. Jedyne mankamenty polega na tym, że częściej zapadamy na choroby związane z wiekiem, co z kolei doprowadziło do wielkiego zamętu i siania strachu przed wyraźnym wzrostem liczby zachorowań na nowotwory i choroby serca. Słyszałem, że obwinia się o to wszystko – od produktów żywnościowych modyfikowanych genetycznie (GMO) aż do (przewrotnym trafem) samych leków do chemioterapii, ale naprawdę rzecz sprowadza się do suchych danych liczbowych.

Ludzie umierają. Przykro mi, że to ci obwieszczę. Mamy delikatne ciała, które nie powstały po to, by trwać bez końca. W miarę starzenia się funkcjonujemy gorzej i rośnie ryzyko, że umrzemy na przykład na raka lub choroby serca. Jediną przyczyną obserwowanego przez nas zauważalnego wzrostu umieralności na te choroby jest fakt, że ludzie żyją dostatecznie długo, by na nie umrzeć. Choroby związane z wiekiem istnieją równie długo jak ludzkie ciało; to tylko większość przeważnie kończyła życie przed osiągnięciem odpowiedniego wieku.

Śmierć zawsze jest przykra, ale rzekłbym, że choroby związane z wiekiem to sprawiedliwa cena za spodziewaną długość życia przekraczającą 80 lat. W połowie XIX wieku spodziewana długość życia wynosiła 42 lata, głównie dlatego, że ludzie marli w dzieciństwie, co obniżało średnią¹⁵⁶. Jediną przyczyną tego, że możemy dzisiaj cieszyć się życiem dłużej, jest prosta. I niewiele ma wspólnego z dietą bezglutenową lub ćwiczeniami metodą Pilatesa. Polega na tym, że pokonaliśmy największego wśród światowych morderców. Nie umieramy już z powodu zakażeń.

W latach czterdziestych XIX wieku setki milionów zmogła dżuma dymienicza. Szacuje się, że w latach 1817–1917 38 milionów ludzi umarło na cholera¹⁵⁷. Odra i ospa spowodowały na całym świecie więcej zgonów niż którakolwiek z wojen, a nie każ mi zaczynać podobnych wyliczeń dotyczących polio lub malarii¹⁵⁸. W wielu częściach świata te choroby nadal szaleją, ale na Zachodzie na szczęście je wykorzeniliśmy. Mówiąc całkiem szczerze, powinniśmy być wdzięczni za śmierć ze starości. Wielu nie ma bowiem takiego szczęścia.

Przyczyna, że co roku nie widzimy wybuchających epidemii, sprowadza się do dwóch rzeczy: szczepień oraz pierwiastka o liczbie atomowej 17, czyli chloru.

Pierwsze użycie chloru na szeroką skalę miało miejsce podczas pierwszej wojny światowej, kiedy niemiecki chemik Fritz Haber zastosował go jako broń chemiczną. W 1915 roku osobiście nadzorował instalowanie pięciu tysięcy zbiorników z chlorem wzdłuż siedmiokilometrowego odcinka frontu zachodniego, a gdy wiatr zaczął wiać w odpowiednim kierunku, Haber rozkazał je otworzyć.

Chlor to gęsty, zielony gaz płynący po powierzchni ziemi niczym ciecz. Unoszony przez wiatr dotarł na pozycje armii brytyjskiej i wypełnił znajdujące się tam okopy, po czym uduślił i oślepił tysiące ludzi.

Według Hermanna Lutkego 1 maja 1915 roku wydano przyjęcie na cześć Habera jako wyraz pochwały jego prostego, a skutecznego zastosowania właściwości chemicznych chloru. Kilka godzin po

przyjęciu żona Habera, Clara (uznana pacyfistka), wyszła do ogrodu ze służbowym rewolwerem męża i strzeliła sobie w pierś; po chwili skonała w ramionach syna¹⁵⁹. Pod tym względem chlor ma reputację podobną do ołowiu, lecz – podobnie jak w przypadku ołowiu – można z niego zrobić znacznie lepszy użytek.

Ponieważ chlor jest śmiertelny dla żywych organizmów, można – pod warunkiem właściwego obchodzenia się z nim – używać go do niszczenia patogenów mogących w przeciwnym razie zabić się w naszych źródłach wody. W Wielkiej Brytanii przeciętna osoba zużywa dziennie około 340 litrów wody, która musi być czysta, żeby nie doszło do rozprzestrzeniania się chorób¹⁶⁰. Nawet woda używana w toaletach musi być zdatna do picia, gdyby bowiem zawierała jakieś szkodliwe składniki, mogłyby one unieść się w powietrze podczas splukiwania.

Chlorowanie wody ma kilka alternatyw, na przykład przepuszczanie przez nią pęcherzyków ozonu, mimo to pozostaje główną metodą wybieraną we wszystkich krajach europejskich i na całym obszarze Stanów Zjednoczonych. Jej działanie polega na tym, że chlor po rozpuszczeniu się w wodzie tworzy kwas podchlorawy (HOCl), który działa śmiertelnie. Właśnie ten związek cię zabije, jeśli nieszczęśliwie wciągniesz do płuc gazowy chlor. Łatwo daje się on jednak usuwać z wody, więc jeśli wpompujemy go do wody pitnej, uśmierci w niej wszystkie drobnoustroje, po czym będzie można usunąć nadmiar za pomocą węgla aktywowanego.

Chociaż fluoryzowanie wody wzbudziło kontrowersje (głównie ze względu na to, że wprowadzono je przed ukończeniem długofalowych badań), nikt nie sprzeciwia się jej chlorowaniu. I to jemu w dużej mierze zawdzięczamy to, że jeszcze żyjemy.

SREBRNY EKLAN

Każdy pisarz zajmujący się literaturą faktu, bez względu na swój deklarowany obiektywizm, podczas pisania ulega pewnym tendencjom i nasyca treść książki osobistymi poglądami, często nie zdając sobie z tego sprawy. A skoro o tym mowa, może jest tak, że po prostu nie cierpisz selera? Niemal cała udokumentowana historia pochodzi z relacji naocznych świadków i wspomnień, przez co trudno ją zweryfikować.

To uległo zmianie w 1717 roku, kiedy niemiecki chemik Johann Schulze zostawił na parapecie okna butelkę z azotanem srebra i kredą. Schulze postawił tam naczynie wskutek roztargnienia, a kiedy po kilku minutach je podniósł, zaszokowany stwierdził, że zawartość zmieniła barwę na brązową oprócz cienkiej, białej smugi zawieszanej w roztworze¹⁶¹. Wyjrzał przez okno, żeby sprawdzić, co mogło zareagować z roztworem, i ujrzał wiszący w oknie kawałek nici dokładnie tego samego kształtu, co biała smuga wewnątrz butelki.

Tam, gdzie światło słoneczne padało na azotan srebra, związek ściemniał, lecz tam, gdzie coś przesłoniło słońce, płyn zachował biały kolor. Schulze zrobił oto pierwszą fotografię, w dodatku płynną. Jeśli przypomnimy sobie odkrycie promieniotwórczości przez Henriego Becquerela, to się zdziwimy, ile razy pozostawienie gdzieś leżącego słoika doprowadziło do wiekopomnych wniosków.

Atomy srebra mogą się wiązać w roztworze z resztami kwasu azotowego, ale po otrzymaniu odrobiny energii mogą się od nich oddzielać i tworzyć czysty metal. Grudka czystego srebra połyskuje jasnym blaskiem, lecz sproszkowane srebro jest ciemnobrązowe i dokładnie pokazuje miejsce, w którym padło na nie światło.

Jednakże to francuski wynalazca Joseph Nicéphore Niépce uświadomił sobie, że jeśli nałoży związek srebra na papierową kartkę i kupi na niej obraz z kamery otworkowej (*camera obscura*), stworzy czarno-białą kopię rzuconego obrazu. W 1829 roku wykorzystał tę technikę do zrobienia pierwszej na świecie właściwej fotografii z okna swojej sypialni – *Widok z okna w Le Gras* – której czas naświetlania wyniósł 8 godzin.

Tak przynajmniej brzmi oficjalna wersja. W 1777 roku inny naukowiec już odkrył, że można z użyciem amoniaku uchwycić obrazy tworzące się na kartce pod wpływem roztworu srebra. Ów naukowiec odgadł również przyczynę tego zjawiska, ale nie dążył do jego zbadania, odmawiając samemu sobie tytułu wynalazcy fotografii. Tym naukowcem (nie zmyślam!) był nie kto inny, tylko Carl Scheele.

W następnym stuleciu odkryliśmy, że inne związki srebra reagują szybciej niż azotan, a dzięki zastosowaniu soczewek mogliśmy zwiększyć natężenie światła i stworzyć obrazy w konkretnych momentach. Nie musieliśmy już odtąd polegać na ustnych lub pisemnych relacjach, żeby móc przechowywać informacje – srebro umożliwiało nam uchwycenie prawdziwego stanu rzeczy na obrazach.

Historycy spierają się o to, kto wykorzystał fotografię i nawinał taśmę filmową na rolki, lecz wydaje się, że patent na pierwszą kamerę filmową zarejestrował w 1876 roku niejaki Wordsworth Donisthorpe¹⁶². Użył jej do nakręcenia kilkusekundowego filmu na Trafalgar Square i zapoczątkował tym samym historię kina, które nadal nazywamy „srebrnym ekranem” od pierwiastka biorącego udział w całym procesie.

Fotografia kolorowa również opiera się na srebrze oraz na dodatkowych związkach chemicznych, reagujących na różne częstotliwości fali świetlnej. Kiedy czerwone światło pada na warstwę filmu, zawierającą substancję wrażliwą na czerwony wycinek widma światła, powoduje wytrącanie się srebrnego proszku. To samo dzieje się pod wpływem niebieskiego światła w warstwie „niebieskowiązliwej” oraz zielonego w warstwie „zielonej”. W rezultacie otrzymuje się obraz czarno-biały tam, gdzie powinna być czerwień, drugi tam, gdzie powinien być błękit, i trzeci w miejscach zielonych. Poprzez obróbkę w prawidłowej kolejności każdej warstwy z użyciem odpowiedniego barwnika można odtworzyć kolory wyjściowego obrazu.

Ze względu na wszechobecność fotografii i filmu trudno sobie wyobrazić świat tych technologii pozbawiony. Polegamy na nich, gdyż dostarczają nam wiarygodnych informacji, a to wszystko zawdzięczamy srebru. W ostatnich latach wynalezienie komputerowej edycji zdjęć i cyfrowych aparatów fotograficznych cokolwiek zmieniło sytuację, lecz pierwotnie w wyrażeniu „fotografia nie kłamie” tkwiła sama prawda.

NISZCZYCIEL ŚWIATÓW

Naukowe podstawy działania bomb jądrowych bardzo długo były ściśle tajne. Po wygłoszeniu przez chemika noblistę Linusa Paulinga publicznego wykładu na ten temat w gabinecie uczonego zjawił się agent FBI, żeby go przesłuchać i dowiedzieć się, skąd tak doskonale zna szczegóły działania bomby. Pauling udzielił dość chłodnej odpowiedzi: „Nikt mi tego nie powiedział. Sam wydedukowałem”¹⁶³. Dzisiaj projekt bomby atomowej jest dobrze znany i wiadomo, że najważniejszą rolę odgrywa w niej uran.

Atomy uranu zawierają w jądrze 92 protony i zazwyczaj 146 neutronów, co daje ogółem 238 cząstek. Około 0,7 procent atomów uranu ma zamiast tego 143 neutrony, tworząc izotop uran-235. Taka kombinacja protonów i neutronów jest niestabilna i kiedy jądro się rozpada, wyrzuca neutrony. Lecące neutrony są absorbowane przez inne jądra atomów uranu, które stają się w wyniku tego niestabilne i również ulegają rozszczepieniu.

Jeśli ma się 1 kilogram uranu, większość neutronów może uciec przez powierzchnię metalu, lecz jeśli ma się 47 kilogramów, czyli ilość nazywaną masą krytyczną, neutrony w centralnej części próbki nie uciekają. Uwalniana energia narasta, reakcje rozszczepienia ulegają zwielokrotnieniu i w rezultacie dochodzi do wybuchu jądrowego.

Można śmiało powiedzieć, że w światowej polityce do 1945 roku dominowało złoto, lecz później z pewnością zawładnął nią uran. Mając 47 kilogramów tego pierwiastka, można zakończyć wojnę i rozpocząć kolejną.

6 sierpnia 1945 roku nad Hiroszimą zdetonowano bombę uranową, która uśmierciła przeszło 80 tysięcy ludzi. Trzy dni później bombę plutonową (z uranem w roli czynnika inicjującego) zrzucono na Nagasaki, zabijając 40 tysięcy ludzi. Spowodowało to zakończenie drugiej wojny światowej.

Dzięki możliwości posługiwania się uranem Stany Zjednoczone stały się najpotężniejszym państwem na Ziemi. Tęgo rodzaju siła stanowi zachętę, by ją podważyć. Po czterech latach od zbombardowania Hiroszimy i Nagasaki ZSRR zademonstrował własne możliwości w zakresie zbrojeń jądrowych i tak rozpoczęła się zimna wojna, kształtując technologiczny, kulturowy i ekonomiczny obraz XX wieku.

Większość dzisiejszej broni jądrowej bazuje na plutonie, ale uran nadal stanowi w niej element inicjujący. Nawiasem mówiąc, nietrudno go zdobyć. Uranu używano do produkcji glazurowanej zastawy stołowej marki Fiesta (to brzmi komicznie, ale rząd USA w okresie zimnej wojny nakazał skonfiskowanie tych artykułów). Trudność stanowi wydobycie tych 0,7 procent atomów, które nadają się do rozszczepiania.

W chwili gdy piszę tę książkę, konieczną do tego technologią dysponuje dziewięć krajów, a największe zapasy mają Stany Zjednoczone i Rosja. Dokładna liczba głowic bojowych nie jest znana, ale szacuje się, że w każdym z tych dwóch krajów znacznie przekracza pięć tysięcy¹⁶⁴. Z takim arsenałem można unicestwić całe życie na Ziemi wiele setek razy.

Fizykiem koordynującym prace nad wynalezieniem broni jądrowej był Robert Oppenheimer. Zapytano go kiedyś w trakcie wywiadu, jakie wrażenia wzbudził w nim widok pierwszego próbnego wybuchu bomby jądrowej, noszącego kodową nazwę „Trinity” (Trójca). Jego odpowiedź mogła zmrozić krew w żyłach:

Wiedzieliśmy, że świat nie będzie już taki sam. Parę osób się śmiało, kilka płakało. Większość milczała. Przypomniałem sobie wers z Bhagawadgity, świętej księgi hinduizmu. Wisznu próbuje nakłonić Księcia, aby ten spełnił swoje obowiązki, a żeby mu zaimponować, przybiera swoją wieloramienną postać i mówi: „Teraz stałem się Śmiercią, niszczycielem światów”. Przypuszczam, że wszyscy myśleliśmy podobnie, w ten czy inny sposób¹⁶⁵.

CHCEMY INFORMACJI... INFORMACJI... INFORMACJI

Krzem znajduje się w układzie okresowym zaraz pod węglem i odznacza się podobną do niego strukturą elektronową. Jedyna różnica polega na tym, że jest większy, zatem nie tworzy równie silnych wiązań.

Krzem może tworzyć kryształy podobne do diamentów i odznaczające się porównywalną odpornością, ale daje się również rozciągać do postaci plastycznych łańcuchów, z których największą sławę zyskał sobie żel silikonowy, odpowiedzialny za pomyślny rozwój hollywoodzkiej kariery niektórych osób. Jednakże główne zastosowanie krzemu sytuuje go w ośrodkach sterowania wszystkich posiadanych przez ciebie urządzeń elektronicznych.

Jeśli XIX wiek zapisał się na kartach historii rewolucją przemysłową i wynalezieniem silnika spalinowego, to wiek XX zapamiętamy jako epokę rewolucji krzemowej i tranzystora, czyli wynalazku, o którym wielu nigdy nie słyszało.

Tranzystor, wynaleziony w 1947 roku przez Waltera Brattaina, Williama Shockleya i Johna Bardeena (ten ostatni jako jedyny dwukrotnie zdobył Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki), jest dla komputera tym, czym cegła dla domu. Twój smartfon zawiera około 3 miliardów tranzystorów, a laptop – 70 razy więcej.

Zadanie tranzystora polega na przepuszczaniu prądu w pewnych okolicznościach i blokowaniu przepływu w innych. To samo w sobie brzmi przyziemnie, ale jeśli połączyć dostateczną liczbę tranzystorów według skomplikowanego wzorca, otrzyma się mikroukład. Poprzez zaprogramowanie serii instrukcji dla owych tranzystorów w formie kodu zero-jedynkowego możemy im nakazywać włączanie i wyłączanie przepływu prądu, co umożliwia nam sterowanie obwodami i przechowywanie informacji.

Problem ze skonstruowaniem tranzystora z metalu polega na tym, że metale zawsze przewodzą. Nietmetale zaś są zawsze izolatorami. Żeby stworzyć coś zdolnego do włączania i wyłączania przepływu prądu w różnych sytuacjach, potrzeba pierwiastka sytuującego się w połowie drogi między metalem a nietmetalem. Tu właśnie wkracza krzem.

Atomy krzemu są duże, więc z natury nieco przypominają metal, ale ich kształt ma więcej wspólnego z nietmetalami, takimi jak węgiel i bor. Te hybrydowe właściwości czynią krzem

półprzewodnikiem, a jego kryształy stanowią trzon tranzystorów. Ponadto krzem jest też kluczowym składnikiem szkła, zatem daje nam światłowody potrzebne do budowy internetu. Nie wspominając już o szybach w oknach.

Większość światłowodów wyprodukowała jedna firma o nazwie 3M; ich szkło jest tak przejrzyste, że gdyby to ono, a nie woda morska, tworzyło ocean, można byłoby z idealną wyrazistością dojrzeć dno.

Po wynalezieniu tranzystora William Shockley założył w latach pięćdziesiątych XX wieku firmę w Kalifornii, gdzie prowadził badania we współpracy z wydziałem informatyki Uniwersytetu Stanforda¹⁶⁶. Przed pojawieniem się jego wynalazku wszystkie komputery bazowały na elementach mechanicznych i zajmowały całe pomieszczenia. To krzem stworzył możliwość wyprodukowania komputerów mieszczących się na biurku.

W miarę gwałtownego wzrostu zainteresowania krzemem w podobnym tempie zaczęła rozwijać się miejscowa gospodarka i dzisiaj w sąsiedztwie firmy Shockleya mieszczą się główne siedziby koncernów: Apple, eBay, Facebook, Google, Intel, Netflix, Yahoo i Visa. Znajdują się one w południowej części San Francisco, zwanej doliną Santa Clara, lepiej znanej pod nazwą pochodzącą od pierwiastka, który stworzył ten region – Dolina Krzemowa.

Krzem umożliwia nam przeprowadzanie obliczeń wymagających mnóstwa dni roboczych i działanie wszystkich urządzeń od zegarków elektronicznych do telefonów komórkowych, chociaż ta technologia rodzi dylemat moralny związany z innym pierwiastkiem – tantalem.

Tantal pod wpływem prądu wibruje, co nadaje mu oczywiste znaczenie w telefonach komórkowych. 70 procent światowych złóż tantalu znajduje się w Demokratycznej Republice Kongo, kraju, którego gospodarka opiera się na wydobyciu i eksporcie tego pierwiastka. Handel tantalem stanowił zarzewie wojny domowej, która szalała tam w latach 1994–2002 i zyskała miano najkrwawszego konfliktu od czasów drugiej wojny światowej¹⁶⁷. Nasze relacje z pierwiastkami niekiedy okazują się dość mroczne pod względem etycznym.

ZBAWCA ŚWIATÓW

W latach trzydziestych XX wieku pierwiastkiem przyszłości okrzyknięto wodór. Można go łatwo uzyskać i transportować, a gdy się spala, jedynym jego produktem ubocznym jest woda. To najczystsze, najbardziej zielone paliwo, jakie tylko można sobie wyobrazić.

Ponadto jego niska gęstość sprawia, że idealnie nadaje się do wytwarzania siły nośnej. Żeby samolot mógł przemieścić przestworza, musi się mocno rozpędzić, a napełniony wodorem sterowiec uniesie się bez pomocy i zachęty. Hel jest mniej reaktywny, a przez to bezpieczniejszy, lecz kiedy w 1925 roku Stany Zjednoczone zaczęły gromadzić jego zapasy w Narodowych Zasobach Helu w Amarillo, agencje europejskie zwróciły się ku wodorowi jako oczywistej alternatywie.

Rząd Niemiec szczególnie pragnął okiełznać technologię związaną z wodorem. W 1931 roku rozpoczął budowę największego na świecie sterowca klasy zeppelin, LZ-129 „Hindenburg”, istnego cudu inżynierii chemicznej i aeronautycznej. Jednakże 6 maja 1937 roku „Hindenburg”, przycumowany do ziemi na terenie bazy powietrznej marynarki w Lakehurst, zapalił się. Nikt nie wie, jak wybuchł ogień (samozapłon zeppelinu?), lecz w ciągu niecałych 30 sekund całe 200 tysięcy metrów sześciennych wodoru spłonęło¹⁶⁸.

Katastrofę sfilmowano kamerą, a towarzyszący zdjęciom komentarz Herberta Morrisona, który zawałał: „Ludzie, to okropne!”, przeszedł do historii. Ludzkość ujrzała, jak wygląda płonący wodór, i era sterowców dobiegła końca, zanim na dobre się zaczęła.

Przez kilka dekad świat nie miał okazji słyszeć często o wodorze do chwili, gdy w 1961 roku ZSRR zdetonował Car-bombę (patrz rozdział czwarty). Nie była to bomba uranowa starego typu, tylko wodorowa, a różnica między nimi była oczywista. Chmura w kształcie grzyba wzbijała się w niebo na wysokość 64 kilometrów, a bomby zrzucone pod koniec drugiej wojny światowej wyglądały przy niej jak niegroźne petardy.

Szczegóły działania bomby wodorowej nadal są ściśle tajne, zatem – pamiętając o tym, co się przydarzyło Linusowi Paulingowi – darowałem sobie dociekania na ten temat. Podczas pisania tej

książki sprawdziłem cenę plutonu oraz ilość talu, potrzebną do uśmiercenia człowieka. Uznałem więc, że lepiej będzie zachować ostrożność i zaniechać pytań, jak zbudować bombę wodorową.

Zasadnicze założenie da się jednak zrozumieć bez trudu. Einsteirowskie równanie $E = mc^2$ informuje nas, że uzyskamy energię z atomu, gdy poddamy go reakcji rozszczepienia. Zaskoczenie może budzić fakt, że proces odwrotny, czyli fuzja jąder atomowych, uwalnia jeszcze więcej energii (przyczyna tego stanu rzeczy tkwi w mechanice kwantowej).

Działanie bomby (jak sądzę) dzieli się na dwa etapy. Najpierw zostaje uruchomiona konwencjonalna bomba uranowa, a ciepło wydzielone podczas wybuchu sprawia, że zawarte w kapsule atomy wodoru ulegają fuzji i przekształcają się w hel, tworząc przy tym miniaturowe Słońce. Stąd bierze się budząca groźbę moc, którą ukazują zdjęcia zrobione po wybuchu Car-bomby.

Jeśli połączymy to z przerażającym końcem „Hindenburga”, okaże się, że wodór w oczach opinii publicznej zyskał reputację pierwiastka z piekła rodem. Nie powinniśmy jednak z niego rezygnować. W przyszłości może się okazać, że będziemy od niego całkowicie zależni.

Energia fuzji wodoru niekoniciecznie uwalnia się jednorazowo. W taki sam sposób, jak można zbliżać do siebie uranowe pręty, żeby wytwarzać ciepło zamiast eksplozji, powinno być możliwe łączenie jąder wodoru w kontrolowanych warunkach. Elektrownie jądrowe bazujące na reakcji fuzji nie wytwarzałyby toksycznych produktów, położyłyby kres naszej zależności od paliw kopalnych oraz konfliktom zbrojnym o dostęp do nich, a jednocześnie zapewniłyby nieograniczone zaopatrzenie planety w energię, a także powstrzymałyby spowodowane przez człowieka zmiany klimatyczne. Fuzja wodoru mogłaby naprawdę stać się dla ludzkości kluczem do rozwiązania wszystkich problemów. Istnieje tylko jeden mały szkopuł – nie potrafimy jej przeprowadzić.

Żeby zmusić atomy wodoru do fuzji, trzeba je ogrzać na tyle szybko, by zaczęły się zderzać. To zaś wymaga energii i wszystkie dostępne nam reaktory bazujące na reakcji fuzji pochłaniają więcej energii na rozruch, niż da się jej z nich uzyskać w celu wykorzystania.

Dotychczas zdołaliśmy przeprowadzić tylko jedną reakcję fuzji o dodatnim bilansie energetycznym – w kalifornijskim Narodowym Zakładzie Zapłonu w 2013 roku. W tej placówce grupa naukowców pod kierunkiem człowieka, który autentycznie nazywa się Omar Hurricane¹⁶⁹, bombardowała próbki wodoru wiązkami światła z laserów i pobudzała je do fuzji. Pan Hurricane i jego zespół są pierwszymi i jedynymi dotychczas ludźmi, którym udało się uzyskać z reakcji fuzji więcej energii, niż w nią włożyli¹⁷⁰. To technologia niedoskonała i niewystarczająca do zaopatrzenia świata w energię, lecz zapowiada się obiecująco.

Jest coś, co może się okazać jeszcze ważniejsze. Ponieważ wodór pięknie pali się w obecności tlenu, stanowi doskonałe paliwo raketowe. Te ogromne zbiorniki po obu stronach wystrzeliwanych statków kosmicznych nie są napełnione benzyną, tylko chemikaliami wytwarzającymi wodór i tlen.

Wodór to nie tylko pierwiastek, który może ocalić świat, lecz może on również pomóc nam w opuszczeniu naszego świata na dobre. A wcześniej lub później będziemy musieli to uczynić.

Na razie przeżywamy złoty wiek, w którym możemy czerpać pierwiastki z ziemi, gdzie obficie występują, ale to nie może trwać wiecznie. Przy założeniu, że naszej planety nie unicestwi jakaś asteroida (a trochę się z tym spóźnia), zużyjemy w końcu wszystkie zasoby, jakie Ziemia uprzemienie dla nam do dyspozycji.

Jeśli nasz gatunek chce przetrwać, będziemy musieli przenieść się gdzieś indziej, a to znaczy, że powinniśmy wyruszyć na poszukiwania. A w tym celu potrzebujemy wodoru, naszego biletu na podróż kosmicznym ekspresem.

OSTATNIA MYŚL

Każdy pierwiastek w układzie okresowym ma swoją historię do opowiedzenia, a jej przebieg zależy od nas. Mamy obowiązek nie nadużywać tej władzy. Wątpię jednak, byśmy to zrobili.

Patrząc na układ okresowy, widzę pomnik upamiętniający to, jak daleko zaszliśmy i ile się nauczyliśmy w tak krótkim czasie. Dzięki nauce posiadliśmy zdolność zrozumienia Wszechświata i wykorzystania jego zasobów w zdumiewających przedsięwzięciach. Naprawdę wierzę w to, że nauka ocali nasz gatunek.

-
- 145 *Pitch Drop Demonstration*, National Museums Scotland. Dostępne na stronie: <https://www.nms.ac.uk/explore-our-collections/stories/science-and-technology/made-in-scotland-changing-the-world/scottish-science-innovations/pitch-drop-demonstration> (dostęp: 9.09.2017).
- 146 Bart kochankiem, *Simpsonowie*, s. 3, odc. 16, reż. C. Baeza (data pierwszej emisji: 13.02.1992).
- 147 Emsley J., *Nature's Building Blocks: An A-Z Guide to the Elements*, Oxford University Press, Oksford 2001.
- 148 Barrett E., Mingo J., *Not Another Apple for the Teacher: Hundreds of Fascinating Facts from the World of Education*, Conari Press, Newburyport, MA, 2002.
- 149 *The story of how the tin can nearly wasn't*, BBC News (21.04.2013). Dostępne na stronie: <http://www.bbc.com/news/magazine-21689069> (dostęp: 18.08.2017).
- 150 Adaptacja z: *Gold fun facts, American Museum of Natural History*. Dostępne na stronie: <http://www.amnh.org/exhibitions/gold/eureka/gold-fun-facts> (dostęp: 18.08.2017).
- 151 Adaptacja z: O'Connell R. et al., *GFMS Gold Survey 2016*, Thomson Reuters, Nowy Jork 2016.
- 152 *The history of money, The Mint of Finland*. Dostępne na stronie: https://www.suomenrahapaja.fi/eng/about_money/the_history_of_money (dostęp: 18.08.2017); Green E.M., *Lady Midrash: Poems Reclaiming the Voices of Biblical Women*, Wipf and Stock, Eugene 2016.
- 153 Nriagu J.O., *Saturnine gout among Roman aristocrats – did lead poisoning contribute to the fall of the empire?*, „New England Journal of Medicine”, nr 308 (1983), s. 660–663.
- 154 Needleman H., *Low level lead exposure: History and discovery*, „Annals of Epidemiology”, r. 19, nr 4 (2009), s. 235–238; Delile H. et al., *Lead in ancient Rome's city waters*, „PNAS”, r. 11, nr 18 (2014), s. 6594–6599.
- 155 Childress D., *Johannes Gutenberg and the Printing Press*, Twenty First Century Books, Minneapolis 2008.
- 156 Gallop A., *Mortality improvements and evolution of life expectancies, Actuary, Pensions Policy, Demography and Statistics*, Government Actuary's Department, Londyn 2006.
- 157 Beardsley G.W., *The 1832 cholera epidemic*, „Early America Review”, r. 4, nr 1 (2000).
- 158 *Measles i Frequently asked questions and answers on smallpox*, World Health Organization. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs286/en/> oraz <http://www.who.int/csr/disease/smallpox/faq/en> (dostęp: 18.08.2017).
- 159 Charles D., *Between Genius and Genocide: The Tragedy of Fritz Haber, Father of Chemical Warfare*, Jonathan Cape, Londyn 2005.
- 160 *How much water does the average person use at home per day?*, United States Geological Survey. Dostępne na stronie: <https://water.usgs.gov/edu/ga-home-percapita.html> (dostęp: 18.08.2017).
- 161 Garrett T.P., *The wonderful development of photography*, „The Art World”, r. 2, nr 5 (1917), s. 489–491.
- 162 Herbert S., *Wordsworth Donisthorpe, Who's Who of Victorian Cinema* (2000). Dostępne na stronie: <http://www.victorian-cinema.net/donisthorpe> (dostęp: 18.08.2017).
- 163 Watson J., *DNA: tajemnica życia*, przekł. J. Turkowska, P. Turkowski, CiS, W.A.B., Warszawa 2005.
- 164 *U.S. Nuclear Weapons Capability, 2017 Index of U.S. Military Strength* (2017). Dostępne na stronie: <http://index.heritage.org/military/2017/assessments/us-military-power/u-s-nuclear-weapons-capability> (dostęp: 18.08.2017).

165 J. Robert Oppenheimer: 'I am become death, the destroyer of worlds', Plenilune pictures (6.08.2011). Dostępne na stronie: <https://www.youtube.com/watch?v=lb13ynu31ac> (dostęp: 18.08.2017).

166 Shurkin J.N., *Broken Genius: The Rise and Fall of William Shockley, Creator of the Electronic Age*, Macmillan, Londyn 2006.

167 Usanov A. et al., *Coltan, Congo & Conflict: Polinares Case Study*, The Hague Centre for Strategic Studies, nr 21.05.13, Haga 2013; Sutherland E., *Coltan, the Congo and your cell phone: the connection between your mobile phone and human rights abuses in Africa*, MIT (2016). Dostępne na stronie: <http://web.mit.edu/12.000/www/m2016/pdf/coltan.pdf> (dostęp: 18.08.2017).

168 Grossmann D., Ganz C., Russell P., *Zeppelin Hindenburg: An Illustrated History of LZ-129*, The History Press, Stroud 2017.

169 Ang. „huragan” (przyp. tłum.).

170 Hurricane O.A. et al., *Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion*, „Nature”, t. 506 (2014), s. 343–347.

Dodatek I

„Sulfur” przez „f”

Zaszczyt nadania pierwiastkowi nazwy zazwyczaj przypada osobie, która go wyizolowała. Niestety, wybrane przez naukowców kontrowersyjne nazwy mogą stać się kością niezgody.

W 1875 roku francuski chemik Paul Émile Lecoq nazwał nowy pierwiastek galem od łacińskiego słowa *Gallia* – nazwy krainy, w której leży dzisiejsza Francja. Wkrótce jednak wytknięto mu podstęp. Łacińskie słowo *gallus* znaczy bowiem „kogut”, co na francuski tłumaczy się jako Lecoq – nazwisko samego odkrywcy. Być może poprzez nazwanie pierwiastka własnym nazwiskiem uczony chciał je unieśmiertelnić.

W ramach próby rozwiązania takich problemów Międzynarodowa Unia Chemii Czystej i Stosowanej (ang. International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC) wprowadziła surowe reguły nadawania nazw nowym pierwiastkom. Mogą one pochodzić od:

1. postaci mitologicznej (np. tor od imienia skandynawskiego boga Thora);
2. miejsca (np. ren od nazwy rzeki Ren);
3. właściwości pierwiastka (np. brom od greckiego *bromos* oznaczającego fetor);
4. minerału, z którego dany pierwiastek wyizolowano (np. samar od minerału samarskitu);
5. nazwiska naukowca (np. roentgen od Wilhelma Röntgena, odkrywcy promieni X).

Po otrzymaniu propozycji nazwy IUPAC zastanawia się nad nią maksymalnie przez pięć miesięcy, a kiedy udzieli zgody, nazwa zostaje uznana przez międzynarodową społeczność i włączona do uaktualnionej wersji układu okresowego.

W 1990 roku wielu brytyjskich chemików ze zgrozą przyjęło poparcie przez IUPAC amerykańskiej wersji pisowni nazwy siarki (*sulfur*) przez „f” w przeciwieństwie do pisowni brytyjskiej przez „ph” (*sulphur*). W całej książce stosuję pisownię zgodną z tą decyzją.

Postawmy sprawę jasno – IUPAC ma prawo faworyzować wersję *sulfur*. Nie znamy bowiem etymologii tego słowa, a każdy, kto twierdzi inaczej, jest źle poinformowany. Pierwszy udokumentowany przypadek użycia tego wyrazu można znaleźć w pismach Enniusza, poety z II wieku p.n.e., który nazywał ten pierwiastek *sulpureus*. Samo słowo (którego etymologia się nie zachowała) może jednak pochodzić od wyrazu *swefel* (jego etymologia również uległa zatarciu).

Skoro nie znamy pochodzenia tego słowa, nie mamy powodu, by przedkładać jedną wersję pisowni nad inną. Pisanie tej nazwy przez „ph” jest nie tylko kwestią brytyjskiej dumy, lecz także odrzuceniem uzgodnionego standardu międzynarodowego.

Osobiście uważam za irytujący fakt, że muszę pisać nazwy pierwiastków małą literą, a swoje nazwisko – wielką, lecz muszę się do tego dostosować (przynajmniej na kartach tej książki; na mojej stronie internetowej piszę wielką literą, jak mi się żywnie podoba!).

Doszły mnie słuchy, że niektórzy sugerują IUPAC ugodę polegającą na przyjęciu pisowni sulfur przez „f” w zamian za aluminium przez dwa „i” (zgodnie z pisownią brytyjską¹⁷¹). Może warto zauważyć, że angielski naukowiec Humphry Davy, twórca tej nazwy, pierwotnie wybrał wersję aluminum, zatem pisownia amerykańska zyskuje bądź co bądź na autentyczności.

171 Amerykanie piszą *aluminum* (przyp. tłum.).

Dodatek II

Pół protonu?

Im baczniej przyglądamy się cząstkom materii, tym więcej znajdujemy struktur podrzędnych. Atom składa się z elektronów i jądra. Jądro atomu dzieli się na protony i neutrony. Jak poznamy, że naprawdę dotarliśmy do samego dna?

W latach sześćdziesiątych XX wieku fizycy teoretyczni uznali, że nadszedł czas na odwrócenie zagadnienia do góry dnem zamiast normalnie. Jeśli wyjdziemy od podstawowych praw rządzących naturą, to jakie cząstki elementarne powinny się pojawić? Wynikłe z tego pytania ramy teoretyczne, zwane kwantową teorią pola, umożliwiły przewidzenie istnienia zestawu cząstek, z których wszystkie już wykryto, zatem zdecydowanie podążaliśmy właściwym tropem.

Cząstkami elementarnymi okazały się elektrony, a także fotony, cząstki tworzące światło. Istnieje też mnóstwo innych, które nazywają się neutrinami, gluonami i bozonami Higgsa, ale na liście nie ma protonów ani neutronów. Okazuje się bowiem, że same protony i neutrony nie są cząstkami elementarnymi, lecz można je uważać za połączenia trzech cząstek. Protonu nie da się podzielić na pół, lecz można go opisać jako jednostkę składającą się z trzech części. Murray Gell-Mann nazwał owe cząstki kwarkami.

Mimo to nadal błędne byłoby stwierdzenie, że można rozciąć proton na trzy części, ponieważ one by na to nie pozwoliły. Kwarki nie istnieją jako pojedyncze byty, występują wyłącznie parami i trójkami.

Gdyby wziąć proton składający się z trzech kwarków i rozbić go, nie otrzymałoby się trzech pojedynczych kwarków, tylko sześć... Ludzie, tak właśnie wygląda kwantowa teoria pola.

Tak więc chociaż w pewnym sensie można opisać jedną trzecią protonu, to naprawdę nie da się jej uzyskać. Kwarki nigdy nie opuszczają swojego protonu, można więc śmiało mówić o protonach, jak gdyby należały do cząstek elementarnych. Równie dobrze mogłyby nimi być!

Dodatek III

Równanie Schrödingera

Równanie Schrödingera stanowi pełny opis całej naszej wiedzy o poczynaniach danej cząstki. Możemy się zainteresować, jak ta cząstka się zachowa w określonym momencie lub w konkretnym punkcie w przestrzeni. Albo możemy nie interesować się żadną z tych informacji i chcieć tylko się dowiedzieć, jakie wartości energii wchodzą w grę albo jakie ruchy obrotowe cząstki jest w stanie wykonywać.

To oznacza mnóstwo różnych postaci równania Schrödingera oraz rozmaitych sposobów jego zapisywania. Najprostsza postać nosi nazwę uogólnionego równania Schrödingera zależnego od czasu i wygląda następująco:

$$H|\Psi\rangle = i\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t}$$

gdzie i oznacza pierwiastek kwadratowy z -1 . Każda normalna liczba – dodatnia lub ujemna – pomnożona przez samą siebie zawsze daje wynik dodatni. -2×-2 nie równa się -4 , tylko $+4$. To jednak oznacza, że liczba -1 nie ma pierwiastka kwadratowego, zatem musi istnieć inny rodzaj liczb, które mnożone przez siebie dają wyniki ujemne. Nazywa się je liczbami i . Wyjaśnienie w tym miejscu przyczyny wybrania akurat litery i zagmatwałoby tylko sprawę, więc nie będziemy się tym przejmować – to konwencja wynikająca z historii i nie ma ona dla nas znaczenia. Fakt, że musimy stosować w naszym równaniu dziwaczne liczby, może zastanawiać i sprawiać wrażenie jakiegoś oszustwa, ale tak nie jest. Działania natury wykraczają poza nasze normalne doświadczenia, musimy zatem sięgać również po takie liczby, żeby to zrozumieć. Kiedy próbujemy zastosować zwykłe liczby, równanie daje wyniki, które nie odpowiadają rzeczywistości. Wydaje się, że natura używa liczb i , zatem i my musimy to robić.

H nazywamy operatorem Hamiltona (czyli hamiltonianem); oznacza to całkowitą energię rzeczy, którą badamy. Zapisaliśmy tę wartość w postaci jednej litery, ale to skrót. W pełnej postaci hamiltonian to rozwlekły składnik, w którym bierze się pod uwagę masę danej cząstki, jej energię kinetyczną, jej odległość od jądra (nazywaną jej energią potencjalną) i tak dalej, lecz to nadal po prostu oznacza ilość energii posiadanej przez daną cząstkę.

Symbol Ψ (grecka litera psi) oznacza wartość zwaną funkcją falową. To może oznaczać bardzo wiele, ale w kontekście chemii odnosi się do faktu, że prawdopodobna lokalizacja cząstki faluje. Lokalizacja elektronu, z którym nic nie oddziałuje, zamiast przybierać postać konkretnego umiejscowienia w przestrzeni, ma formę przypominającą falę. Funkcja falowa umożliwia uwzględnienie tego stanu rzeczy.

Symbol $|\rangle$ nosi nazwę wektora ket. Mówiąc ogólnie, oznacza stan, w jakim coś się znajduje. W tym przypadku chodzi o stan funkcji falowej cząstki. Odczytana w całości lewa strona równania mówi nam

teraz, że jeśli obliczymy całkowitą energię stanu funkcji falowej i pomnożymy wynik przez ujemną wartość i , otrzymamy coś użytecznego.

Symbol \hbar nazywa się stałą Plancka, która wynosi $1,055 \times 10^{-34}$ dżulosekund. Ta liczba oznacza właściwość Wszechświata, relację energii danej cząstki i jej częstotliwości. Częstotliwość oznacza liczbę drgań czegoś na sekundę, a ponieważ wszystkie cząstki wykonują ruchy drgające, potrzebujemy terminu opisującego relację tych dwóch wartości. Mówiąc konkretnie, jeśli podzielimy energię cząstki przez jej częstotliwość, otrzymamy liczbę zwaną h , wynoszącą w jednostkach układu SI $6,626 \times 10^{-34}$ Js. Do stałej Plancka dochodzi się, dzieląc h przez 2π . Robimy tak dlatego, że wartości 2π często używa się podczas pomiaru częstotliwości, zatem uwzględniamy ją jako element naszej stałej, żeby równania prezentowały się porządniej.

Symbol ∂ nosi nazwę pochodnej cząstkowej. Mówi nam, żeby mierzyć zmiany jednej właściwości, kiedy dzieje się mnóstwo innych rzeczy, a my chcemy się skupić tylko na jednej. W tym przypadku

wyrażenie $\frac{\partial}{\partial t}$ mówi nam, żeby porównywać zmiany czegoś w zależności od czasu (t).

Tak więc całe równanie informuje nas, że jeśli zdołamy obliczyć całkowitą energię cząstki w określonym stanie (lewa strona), będziemy mogli wyliczyć, jak będzie zmieniać się jej zachowanie w miarę upływu czasu (prawa strona).

Jeśli znamy wartość energii elektronu, możemy przewidzieć, gdzie prawdopodobnie znajdzie się on w dowolnym momencie. Jeśli zaś zrobimy to dla wszystkich trzech wymiarów przestrzeni, otrzymamy opis prawdopodobnych miejsc, w których elektron będzie krążył wokół jądra, czyli jego orbitalu.

Dodatek IV

Zamiana neutronów w protony

W dodatku II zetknęliśmy się już z kwarkami, które mogą okazać się niełatwym zagadnieniem. Mają wiele odmian, ale wszystkie są obdarzone ładunkiem elektrycznym, składającym się na ładunek protonu lub neutronu.

Kwark „górny” (u) ma ładunek o wartości $+2/3$, a kwark „dolny” (d) – o wartości $-1/3$. Kiedy dwa kwarki górne i jeden dolny tworzą trio, ich ładunki łączą się w ogólną wartość $+1$, czyli ładunek protonu. Jeśli kwark górny występuje z dwoma dolnymi, ich ładunki się znoszą i w rezultacie mamy neutron.

Kwarki jednak nie pozostają w obrębie jednego typu. Kwark górny może przekształcić się w dolny i na odwrót. Neutron stanowi kombinację „udd” (górny–dolny–dolny), lecz jeśli jeden z kwarków dolnych przeobrazi się w górny i powstanie „uud” (górny–górny–dolny), będziemy mieli proton. To kwark we wnętrzu cząstki przekształca się i zmienia neutron w proton.

Kiedy tak się dzieje, zmienia się wartość ogólnego ładunku i z jakiegoś powodu Wszechświat traktuje to jako wielkie tabu. Zamiast tworzyć niezrównoważony ładunek, Wszechświat woli raczej zachowywać warunki obojętne, zatem zamienia cząstki.

Kiedy kwark dolny o ładunku $-1/3$ zmienia postać, emituje cząstkę zwaną bozonem W^- , unosząc ładunek o wartości -1 , w wyniku czego pozostawia za sobą ładunek $+2/3$. Bozon W^- szybko dzieli się na elektron zatrzymujący ładunek oraz kolejną cząstkę o nazwie antyneutrino, pozbawioną ładunku. Nie da się opisać całego procesu w prostszy sposób.

Dodatek V

Skale pH i pK_a

Być może spotkałeś się w szkole ze skalą pH. Im większa kwasowość jakiejś substancji, tym mniejsza jest wartość liczbową w skali pH. Dlatego kwasy zwykle mają wartości poniżej 7, a substancje niekwasowe przeważnie 8 albo wyższe. Powodem wprowadzenia tej skali jest fakt, że liczby występujące w chemii kwasów często są niezmiernie małe.

Przypuśćmy, że mamy w litrowej butli 1×10^5 atomów wodoru, a w drugiej 1×10^4 . Pierwsza butla zawiera zatem 100 tysięcy atomów, a druga – 10 tysięcy. Wyraźnie widać, że w pierwszej mamy 10 razy większe stężenie niż w drugiej, ale obie wartości liczbowe są skrajne. Zatem odwołujemy się do prawa logarytmów.

Logarytm to liczba razy, którą trzeba pomnożyć przez siebie jakąś wartość, żeby otrzymać określony wynik. Powiedzmy, że masz liczbę trzy i pomnożyłeś ją przez siebie cztery razy. Po zapisaniu działanie miałoby postać: $3 \times 3 \times 3 \times 3$, a prościej 3^4 . Wynik zaś wynosi 81.

Przypuśćmy jednak, że chcemy przeprowadzić odwrotne obliczenia i dowiedzieć się, ile razy musimy pomnożyć trzy przez siebie, żeby otrzymać 81. Po zapisaniu takie działanie wyglądałoby następująco:

$$\text{Log}_3 81 = 4$$

Innymi słowy, do jakiej potęgi musimy podnieść liczbę trzy, żeby otrzymać 81? Odpowiedź brzmi: 4.

W podanym wcześniej przykładzie mamy jeden roztwór zawierający 100 tysięcy atomów wodoru. Gdybyśmy chcieli wyrazić to w postaci logarytmu, zapisalibyśmy:

$$\text{Log}_{10} 100\,000 = 5$$

Pięć to liczba, z którą o wiele łatwiej się pracuje, więc moglibyśmy opisać ten kwas jako „roztwór o wartości 5”. Ta liczba nie informuje nas bezpośrednio o stężeniu, lecz podaje nam rząd wielkości, z jakim mamy do czynienia.

Roztwór dziesięciokrotnie bardziej rozcieńczony nazwalibyśmy „roztworem o wartości 4”. To przydatny sposób, kiedy mamy do czynienia z ogromną wartością, na przykład stężeniem wynoszącym 1 000 000 000 000 000 000 (trylion), zatem łatwiej nazwać to „roztworem o wartości 18”, niż zapisywać całą liczbę.

A dlaczego skala biegnie do tyłu? Odpowiedź jest taka, że większość kwasów, nawet bardzo stężonych, zawiera tylko niewielką liczbę atomów wodoru na litr. Większość kwasów, jakie prawdopodobnie zdarzy ci się napotkać, plasuje się w przedziale od 0,00001 do 1. Zapisując to w standardowej postaci, używamy potęg ujemnych, tj. od 10^{-6} do 10^{-1} . W tym przypadku wartość 10^{-1} oznacza bardziej stężony roztwór.

Duński chemik Søren Sørensen zaproponował używanie ujemnych logarytmów przy zapisywaniu wartości stężenia kwasów tylko dlatego, że tak wygląda porządniej. Kwas o mniejszym stężeniu otrzymuje wartość:

$$-\text{Log}_{10} 0,00001 = 6$$

Natomiast kwas o większym stężeniu ma wartość:

$$-\text{Log}_{10} 1 = 1$$

Uczony określał ujemny logarytm z danej wartości liczbowej jako jej „potencję”, co naprawdę oznacza „potęgę, do której trzeba podnieść liczbę dziesięć”. Tak więc definiujemy skalę pH następująco:

$$\text{pH} = -\text{Log}_{10} (\text{stężenie jonów wodorowych na litr})$$

Większość kwasów plasuje się w tej skali w zakresie od 1 do 6, ale skala może rosnąć również w drugą stronę. Kwas o stężeniu 10 miałby pH równe 0, a kwas o stężeniu 100 miałby wartość pH -1 .

Skala pK_a działa dokładnie tak samo według tego samego systemu. Tyle że w tej skali zamiast mierzyć stężenie atomów wodoru, mierzymy moc kwasu, tj. jego skłonność do uwalniania protonów do roztworu. Najlepszy sposób wyrażenia tej skłonności polega na określeniu, jaka część pierwotnego kwasu ulega dysocjacji.

Przypuśćmy, że mamy 100 cząsteczek kwasu i tylko jedna z nich się rozdziela. Powiedzielibyśmy, że moc tego kwasu wynosi 1 procent. Z powodów, w które nie będziemy się wgłębiać (pisanie dodatku odnoszącego się do dodatku byłoby trochę niemądre), wyrażamy moc kwasu w postaci ułamka o nazwie K_a . Także i te liczby są zwykle niezmiernie małe.

Ponieważ tylko niewielka liczba atomów wodoru ma odwagę dysocjować, wartości K_a mają postać dużych liczb ujemnych. Obliczamy zatem według metody p ujemny logarytm K_a (czyli moc) i voilà, otrzymujemy w rezultacie skalę pK_a .

Dodatek VI

Grupy w układzie okresowym

Kiedy przeglądamy układ okresowy od lewej do prawej, widzimy, że kilka kolumn (grup) ma nazwy o znaczeniu w dużej mierze historycznym. Grupy od 3 do 10 mają nazwy od pierwiastka znajdującego się na szczycie grupy, np. grupa 10 nosi nazwę „niklowce”, ale wszystkie pozostałe kolumny również mają nieoficjalne przydomki.

- Grupa 1 Metale alkaliczne
- Grupa 2 Metale ziem alkalicznych
- Grupa 3 Skandowce
- Grupa 4 Tytanowce
- Grupa 5 Wanadowce
- Grupa 6 Chromowce
- Grupa 7 Manganowce
- Grupa 8 Żelazowce
- Grupa 9 Kobaltowce
- Grupa 10 Niklowce
- Grupa 11 Miedziowce
- Grupa 12 Cynkowce
- Grupa 13 Borowce
- Grupa 14 Węglowce
- Grupa 15 Azotowce (pniktogeny)
- Grupa 16 Tlenowce (chalkogeny)
- Grupa 17 Fluorowce (halogeny)
- Grupa 18 Helowce (gazy szlachetne)

Podziękowania

Podczas pisania pierwszej książki dowiedziałem się jednej rzeczy – chociaż na okładce widnieje moje nazwisko, treść stanowi efekt współpracy wielu umysłów. Chciałbym zatem podziękować właścicielom kilku z nich.

Przede wszystkim uczniom liceum Northgate za to, że dali mi powód do wstawania wczesnym rankiem i pomogli ruszyć z miejsca całe przedsięwzięcie. Bez nich nie byłoby tej książki. Rock and roll, chłopaki. Rock and roll.

Wielkie i serdeczne dzięki składam mojej agentce Jen Christie za to, że postanowiła dać szansę niezręcznemu pisarzowi, okazała wiele cierpliwości, gdy przeżywałem trudności, i prowadziła mnie przez szalony świat wydawnictw i marketingu, znacznie bardziej skomplikowany od nauki.

Duncan Proudfoot z Little, Brown Book Group jest cudownym człowiekiem, któremu chcę podziękować za to, że natychmiast łapał, co staram się zrobić. Mam szczerą nadzieję, że książka go nie zawiedzie.

Jeśli zaś chodzi o treść, to najbardziej muszę podziękować Elli Catherall za redakcję każdej strony, sprawdzenie faktów naukowych i poprawienie wszystkich 385 błędów. Jeśli ta książka ma jakieś zalety, to wyłącznie jej zasługa.

Dziękuję wydziałowi nauk ścisłych w szkole Northgate (liczy on około dwudziestu pracowników, zatem nie zdołam wymienić tu wszystkich) za tolerancję okazaną mi w okresie, kiedy uczyłem się, jak być nauczycielem. Praca z nimi to przywilej. Bardzo szczególne dzięki składam Hazel i Davidowi, nie tylko za rady, lecz za inspirację oraz przyjaźń.

Muszę też podziękować wielkiemu Seishiemu Shimizu za nauczenie mnie, jak mam rozmawiać i pisać jako naukowiec. Był wspaniałym mentorem i czuję się zaszczycony, że studiowałem pod jego kierunkiem.

Dziękuję Karlowi Dixonowi za lekturę rękopisu i krytyczne uwagi oraz za rozśmieszanie mnie, kiedy przestawałem wierzyć, że moja praca ma jakiegokolwiek zalety, a także za odgrywanie roli Sherlocka Holmesa u boku Watsona takiego jak ja w ciągu tych wielu, wielu lat.

Nieziemskie dzięki kierują też do Mandalyn King za to, że zawsze stawiała sprawy jasno i była wyjątkowa. Szanuję jej opinie bardziej, niż ona o tym wie.

Jeśli chodzi o wcześniejszy okres w moim życiu, to chcę podziękować panu Evansowi za to, że był wspaniałym nauczycielem, oraz Johnowi Millerowi za przekonanie mnie, żebym starał się mu dorównać.

Pragnę też podziękować mojej żonie, chyba najcierpliwszej osobie na świecie. Dziękuję, że pozwoliłaś mi poświęcić tej pracy tyle czasu.

Na koniec chcę podziękować mojemu ojcu, który nauczył mnie, jak ważne jest zadawanie pytań, i zmienił mnie w naukowca.