

Nowożytna hipoteza zakładająca, że materia składa się z atomów powstała znacznie wcześniej niż pojawiły się eksperymentalne możliwości zarejestrowania pojedynczych atomów. Niemniej jednak od końca XVIII wieku mało kto wątpił, że atomy rzeczywiście istnieją. Stało się to za sprawą bardzo prostych, a zarazem intrygujących eksperymentów wykonywanych przez największe umysły tamtych czasów. Ich wytłumaczenie wydawało się niemal niemożliwe bez tego fundamentalnego założenia.

**JOHN DALTON -
PIONIER MYŚLI ATOMISTYCZNEJ**

Pierwszym człowiekiem, którego koncepcję atomistycznej budowy materii możemy traktować jako w pełni naukową, był angielski fizyk i meteorolog John Dalton. Oczywiście wcześniej również rozważano możliwość ziarnistej budowy materii. W odróżnieniu jednak od koncepcji Daltona tamte były raczej ideami filozoficznymi niż przyrodniczymi i nijak nie dały się sprawdzić doświadczalnie. John Dalton wysnuł natomiast swoją hipotezę w oparciu o eksperymenty fizyczne, które teraz pokrótce omówimy. Zanim to zrobimy, warto jeszcze dodać, że nazwisko Daltona jest również znane poza światem fizyki – w medycynie. Jest tak za sprawą jego badań nad dość uciążliwą wadą wzroku nazywaną dziś daltonizmem, o której czytelnik zapewne słyszał.



Tomasz Sowiński w 2005 roku skończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie fizyki teoretycznej. Obecnie jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. Z zamiłowania zajmuje się popularyzacją nauki.

W roku 2005 był nominowany do nagrody w konkursie Popularyzator Nauki organizowanym przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji oraz Polską Agencję Prasową.

niku spalania siarki albo fosforu waży więcej niż substrat (to, co było przed spaleniem). To zjawisko zaciekało go tak bardzo, że przeprowadził szereg różnych eksperymentów. W końcu zrozumiał, że owa nadwyżka masy bierze się z... powietrza. Okazuje się, że dokładnie tyle, ile przybywa masy po spaleniu, ubywa w masie powietrza, która otacza płomień. To doprowadziło go ostatecznie do odkrycia, że powiet-

Skąd wiemy, że woda to H₂O?

Tomasz Sowiński

PIERWSZE EKSPERYMENTY CHEMICZNE

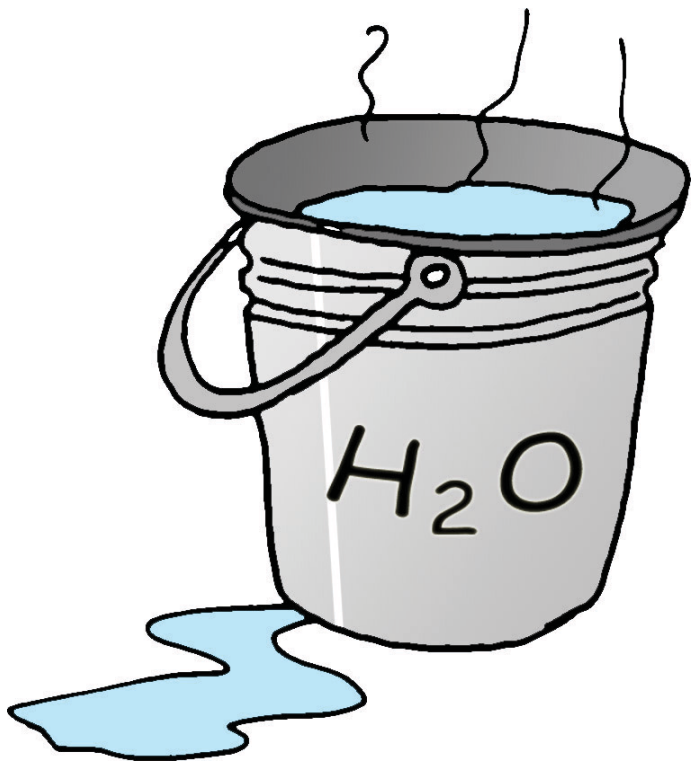
Każdy eksperyment chemiczny polega na łączeniu lub rozłączaniu jednych substancji w inne. Już sam fakt, że tak daje się zrobić, jest bardzo zdumiewający. Jest przecież czymś fenomenalnym, że oto przy spalaniu np. gazowego wodoru w gazowym tlenie, powstaje para wodna. Dwie substancje, które mają różne ciekawe własności, łączą się razem, tworząc jeszcze inną substancję, która ma jeszcze inne własności. Nic więc dziwnego, że takie reakcje chemiczne bardzo interesowały ludzi od dawien dawna. A pod koniec XVIII wieku stało się w końcu możliwe nie tylko ich obserwowanie, ale również ilościowe badanie.

Pionierem w tej dziedzinie był wybitny francuski chemik Antoine Lavoisier. Notabene stracony na gilotynie podczas Wielkiej Rewolucji Francuskiej. Lavoisier badał reakcję spalania różnych substancji. Jako pierwszy zauważył, że substancja powstająca w wy-

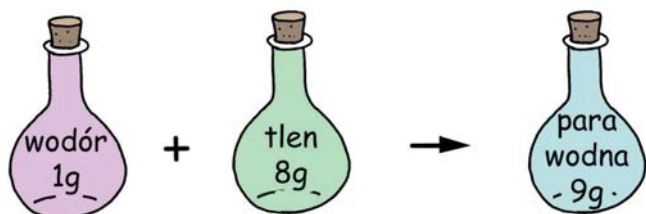
rze jest mieszaniną różnych gazów, z których jeden (tlen) jest niezbędny w procesie spalania i łączy się z substancją, która się spala.

Lavoisier doszedł tym sposobem do prawa zachowania masy, które głosi, że „**suma mas wszystkich substratów przed reakcją chemiczną jest równa sumie mas wszystkich produktów po reakcji chemicznej**”. Choć dziś prawo to wydaje nam się oczywiste, należy pamiętać, że w tamtych czasach były to pionierskie rezultaty o fenomenalnym znaczeniu. Z punktu widzenia sprawiedliwości dziejowej należy dodać, że do podobnych rezultatów doszedł całkowicie niezależnie rosyjski chemik i poeta Michaił Łomonosow i to parę lat przed Lavoisierem. Nie jest oczywiście w tym nic dziwnego, bo musimy pamiętać, że na przełomie XVIII i XIX wieku oddziaływanie naukowe pomiędzy wschodnią a zachodnią częścią Europy ze względów politycznych było bardzo słabe.

Kolejnym milowym krokiem w badaniach chemicznych były prace innego francuskiego chemika,

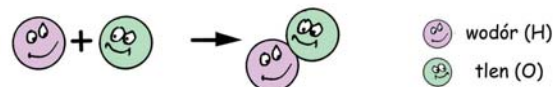


Joseph Proust. Wynik jego eksperymentów najłatwiej jest zrozumieć na przykładzie reakcji chemicznej powstawania wody. Woda, jak już wcześniej wspominaliśmy, powstaje podczas spalania wodoru. Doświadczenie przekonuje, że spalanie wodoru w tlenie odbywa się zawsze w tych samych stosunkach masowych. Tzn. aby spalić 1 gram wodoru, należy dostarczyć 8 gramów tlenu, a w wyniku tego spalania powstanie 9 gramów pary wodnej. Sam fakt, że masa pary wodnej jest równa sumie mas tlenu i wodoru, nie jest dla nas niczym nadzwyczajnym – ot zwykły przejaw działania prawa Lavoisiera. Kluczowym stwierdzeniem jest jednak to, że nie można spalić wodoru w tlenie w innych proporcjach. Gdybyśmy np. mieli do dyspozycji 2 gramy wodoru i dostarczyli do niego tylko 8 gramów tlenu, to wcale nie powstanie 10 gramów pary wodnej! Powstanie dokładnie 9 gramów wody i jeden gram wodoru zostanie niespalony. Ta obserwacja bardzo zaciekaowała Prousta i sprawdził on, czy podobną własność mają inne reakcje chemiczne. Okazało się, że zawsze podczas łączenia się substancji występują one w tych samych proporcjach masowych. Oczywiście dla różnych substancji proporcje te mogą być inne, np. amoniak powstaje z połączenia gazowego azotu i gazowego wodoru w proporcjach masowych 3 do 14. Zawsze jednak jest tak, że dana reakcja zachodzi w ustalonych proporcjach. Stąd wynika, że każda substancja chemiczna ma ściśle określony skład chemiczny – składa się ze ściśle określonych porcji wchodzących substratów. Ta obserwacja jest dziś znana jako **prawo stałych stosunków masowych**. Prawo to stało się fundamentem, na którym Dalton zbudował teorię atomistyczną.



HIPOTEZA DALTONA

Prawo stosunków masowych sformułowane przez Prousta sprawiło, że wspomniany już przez nas John Dalton zaczął się zastanawiać nad jego istotą. Sam fakt, że różne substancje łączą się, nie jest może tak zaskakujący jak to, że robią to zawsze w tych samych proporcjach. Jakże może być źródło tego fenomenalnego zjawiska? Dalton uznał, że najprostszym sposobem wytłumaczenia tego fenomenu jest przyjęcie, że materia składa się z **ATOMÓW** – małych niepodzielnych drobin, które mogą się łączyć ze sobą, ale nie mogą się rozpadać na mniejsze. Ponieważ nikt nie zauważył, aby wodór albo tlen powstawały podczas łączenia innych substancji, Dalton założył, że te dwie substancje składają się z drobin podstawowych. Para wodna jest natomiast ich połączeniem. Aby być w zgodzie z prawem Lavoisiera, musimy dodatkowo przyjąć, że wodór składa się z atomów, które są **osiem razy lżejsze** niż atomy tlenu. Podczas reakcji spalania **jeden atom wodoru** łączy się z **jednym atomem tlenu** i powstaje **jedna CZĄSTECZKA** pary wodnej, której masa jest równa sumie mas obydwu atomów. Ujednolicając nomenklaturę, można powiedzieć, że wg Daltona wodór i tlen składają się również z cząsteczek, które są **JEDNOATOMOWE**. Zauważmy, że takie założenie całkowicie tłumaczy prawo stosunków masowych Prousta. Jeśli wodoru jest za dużo, to część jego atomów nie ma się z czym połączyć i tym samym część wodoru pozostanie. Podobnie będzie, jeśli weźmiemy więcej tlenu, niż potrzeba. Aby wszystko się przekształciło w parę wodną, potrzebne jest dokładnie tyle samo atomów wodoru co atomów tlenu. Reakcja chemiczna powstawania wody wg Daltona przebiega więc następująco



W tym miejscu trzeba powiedzieć, że intuicja Daltona była dobra, ale niestety za daleko poszedł on w swoim uproszczeniu i przytoczone powyżej rozumowanie, choć poprawne pod względem logicznym, **NIE JEST ZGODNE** z rzeczywistością. Gdybyśmy chcieli zapisać rozumowanie Daltona wzorem chemicznym, to musielibyśmy napisać, że wzór chemiczny wody to HO, a nie tak jak nas uczą w szkole H_2O !!! Widzimy przecież, że wg Daltona jeden atom wodoru łączy się z jednym atomem tlenu i powstaje jedna cząsteczka wody. Inaczej być nie może! No ale woda to jednak H_2O – przynajmniej tak uczą w szkole. Jak zatem rozwiązać ten galimatias? Przecież jakoś ludzkość doszła do tego, że woda to H_2O , prawda?

DOŚWIADCZENIE GAY-LUSSACA

Przyjrzyjmy się teraz bliżej innemu doświadczeniu ilościowemu, które też dotyczy reakcji chemicznej powstawania wody. Oczywiście polega ono również na spalaniu wodoru w tlenie. Tym razem jednak wielkością, która nas interesuje, nie jest masa substratów i produktów, ale ich objętość. Choć taki sposób patrzenia na tę reakcję może wydawać się dość głupi, to wynik okaże się zdumiewający. Otóż, jeśli przy ustalonej temperaturze i ustalonym ciśnieniu zewnętrz-

rznym przeprowadzi się reakcję powstawania wody, to można zauważyć, że zawsze jest tak, że jedna objętość tlenu reaguje z dwoma objętościami wodoru. W wyniku tego powstają zawsze dwie objętości pary wodnej. Aby lepiej to zrozumieć, posłużmy się przykładem. Otóż, jeśli mamy do dyspozycji **dwa litry** gazowego wodoru, to aby go spalić, potrzebujemy dokładnie **jednego litra** tlenu. Jeśli dostarczymy więcej tlenu, to pewna jego część po prostu pozostanie. Jeśli natomiast będzie go za mało, to pozostanie wodór. Po przereagowaniu powstaną dokładnie **dwa litry** pary wodnej. Podkreślmy jeszcze raz, że taki przebieg ma reakcja spalania wodoru, gdy ustalona jest temperatura i ciśnienie gazów.



Tego zdumiewającego odkrycia jako pierwszy dokonał Joseph Gay-Lussac na przełomie XVIII i XIX wieku. Potwierdził on również, że podczas innych reakcji chemicznych zachodzących przy ustalonej temperaturze i ciśnieniu obowiązuje podobne prawo. Poszczególne reakcje mogą się oczywiście różnić od siebie stosunkami objętościowymi. Dla przykładu podczas powstawania amoniaku reagują ze sobą **trzy objętości** gazowego wodoru i **jedna objętość** gazowego azotu, a powstają **dwie objętości** gazowego amoniaku. To, jak się wydaje, uniwersalne prawo reakcji chemicznych nazywamy dziś **prawem stosunków objętościowych**. Wytlumaczenie tak dziwnego zachowania się reagujących gazów było jednym z fundamentalnych zadań, jakie stanęło przed fizyką początków XIX wieku.

HIPOTEZA AVOGADRA

Aby lepiej zrozumieć problem, z jakim mieli do czynienia fizycy dwa wieki temu, postawmy się w ich roli. Oto mamy następujące trzy fakty doświadczalne:

1. podczas reakcji chemicznej zachowuje się masa (Lavoisier)
2. podczas reakcji substancje reagują w ściśle określonych stosunkach masowych (Proust)
3. podczas reakcji w ustalonych warunkach substancje reagują w ściśle określonych stosunkach objętościowych (Gay-Lussac)

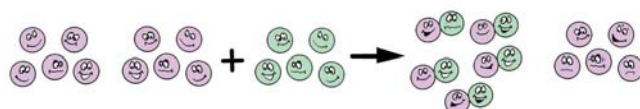
Dodatkowo wiemy, że dwa pierwsze fakty można łatwo wytłumaczyć, stawiając hipotezę o istnieniu atomów i zakładając, że różne substancje składają się z cząsteczek chemicznych, których skład jest ściśle określoną kombinacją różnych atomów. Ale co z trzecim faktem doświadczalnym? Czy w ogóle jest możliwe jego wytłumaczenie?

Włoski fizyk Amadeo Avogadro – profesor na uniwersytecie w Turynie, analizując wszystkie ówczesnie dostępne eksperymenty nad reakcjami chemicznymi i próbując wszystkie te informacje zebrać w jakąś logiczną całość, postawił następującą hipotezę: „**równe objętości różnych gazów znajdujących**

się w tej samej temperaturze i pod tym samym ciśnieniem zawierają dokładnie taką samą liczbę cząsteczek”. To śmiałe stwierdzenie, które dziś nazywamy prawem Avogadra, jest bardzo intrygujące i jeśli jest prawdziwe, niesie wielkie konsekwencje teoretyczne. Mówi ono, ni mniej, ni więcej, tylko tyle, że różne gazy mają bardzo podobne do siebie własności makroskopowe. Jeśli weźmiemy sto cząsteczek gazowego tlenu, sto cząsteczek pary wodnej lub sto cząsteczek gazowego azotu, lub sto cząsteczek jeszcze innego gazu i zamkniemy w pudełku pod ustalonym ciśnieniem i w określonej temperaturze, to gazy te będą zajmowały dokładnie taką samą objętość. Zdumiewające, prawda? Podkreślmy jeszcze raz, że Avogadro stawiając swoją hipotezę, nie wiedział oczywiście, czy atomy i cząsteczki w ogóle istnieją. Opierał się jedynie na atomistycznej hipotezie Daltona. I jak się za chwilę okaże, bardzo ją zrewolucjonizował.

WODA TO NIE HO!

Z hipotezy Avogadra płyną bardzo fundamentalne wnioski, które teraz zaprezentujemy na przykładzie reakcji powstawania wody. Za chwilę wykażemy, że hipoteza ta jest **SPRZECZNA** z doświadczeniem Gay-Lussaca i budową cząsteczki wody zaproponowaną przez Daltona. Jak pamiętamy, wg Daltona cząsteczka wody to połączenie **jednego** atomu wodoru i **jednego** atomu tlenu. Zauważmy, że jeśli prawdziwa jest hipoteza Avogadra, to w dwóch objętościach wodoru jest dwa razy więcej cząsteczek niż w jednej objętości tlenu. Dodatkowo, po zakończeniu reakcji chemicznej powstają dwie objętości pary wodnej, czyli tyle cząsteczek wody, ile było cząsteczek wodoru. To jest jednak niemożliwe. Jeśli bowiem na początku było **dziesięć cząsteczek wodoru**, to musiało być **pięć cząsteczek tlenu**. Nie można z nich zatem utworzyć **dziesięciu cząsteczek wody**, gdyż zabraknie tlenu.



Może co najwyżej powstać **pięć cząsteczek wody**, a **pięć cząsteczek wodoru** pozostanie nieruszonych. No ale z doświadczenia Gay-Lussaca wynika jednak, że powstanie dokładnie **dziesięć cząsteczek wody**. Jak zatem to wytłumaczyć? A może prawo Avogadra jest błędne?

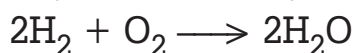
WODA TO H₂O!

Tu właśnie ujawni nam się wielka siła intelektu Avogadra. To właśnie dzięki przeanalizowaniu wielu różnych reakcji chemicznych z udziałem wodoru, tlenu, azotu i innych gazów Avogadro doszedł do swojego prawa i doskonale rozumiał, jak należy rozwiązać powyższy problem. Przejawiał się on bowiem w różnych reakcjach w różny sposób i bardzo często prowadził do sprzeczności. Okazało się, że słabym ogniwem całej konstrukcji jest założenie Daltona, że gazy w wodór czy gazowy tlen składają się z cząsteczek jednoatomowych. Wszystko daje się prosto wytłumaczyć przy założeniu, że cząsteczki te są **DWUATOMO-**

WE. Zauważmy, że jeśli w reakcji powstawania wody dziesięć cząsteczek wodoru ma reagować z pięcioma cząsteczkami tlenu i ma powstać dziesięć cząsteczek wody, to dla cząsteczek dwuatomowych reakcja taka jest możliwa. Przebiega ona wg schematu



Po prostu podczas pojedynczej elementarnej reakcji jedna cząsteczka tlenu (dwa atomy tlenu) reaguje z dwoma cząsteczkami wodoru (cztery atomy wodoru i jeden atom tlenu). W ten sposób powstanie dokładnie dziesięć cząsteczek wody. Tyle, ile trzeba! Jednocześnie dochodzimy do wniosku, że cząsteczka wody składa się z dwóch atomów wodoru i jednego atomu tlenu, czyli H_2O , a nie jak chciał Dalton HO . Chemicznym wzorem możemy tę reakcję napisać tak:



Dodajmy przy tym, że aby być w zgodzie z prawem zachowania masy odkrytym przez Lavoisiera oraz prawem stosunków masowych Prousta, musimy również zmodyfikować stosunki mas poszczególnych atomów. W modelu Daltona atom wodoru był **osiem** razy lżejszy niż atom tlenu. Teraz, aby wszystko się zgadzało, musimy założyć, że atom wodoru jest **szesnaście** razy lżejszy niż atom tlenu. Czytelnik łatwo sprawdzi, że tak jest w istocie.

Warto więc zatem zapamiętać, że choć Johna Daltona uważamy za ojca nowożytnej koncepcji atomistycznej, to sformułowane przez niego reguły powstawania cząsteczek okazały się błędne. Dopiero od czasów Avogadra ludzie zaczęli rozumieć, jaka jest prawdziwa natura reakcji chemicznych. Oczywiście nie umniejsza to w żaden sposób zasług Daltona, gdyż to on był prekursorem całej tej rewolucji.

O WYŻSZOŚCI FIZYKI NAD MATEMATYKĄ

Na zakończenie chciałbym przytoczyć pewną śmieszoną anegdotę opowiadającą o zdarzeniu, które miało prawdopodobnie miejsce dwa wieki temu. Otóż, jak mówi historia, pewnego razu doszło do ostrej wymiany zdań pomiędzy już nam znanym Amadeo Avogadrą a Carlem Gaussem – jednym z najwybitniejszych matematyków, jaki kiedykolwiek stąpał po Ziemi. Dyskusja dotyczyła sporu o to, która z dyscyplin – fizyka czy matematyka – jest królową nauk. Po obu stronach oczywiście padały bardzo ważne argumenty i gdy wydawało się już, że Gauss zwycięży w tej polemicznej walce, Avogadro zaprosił go do swojego laboratorium i wykonał reakcję powstawania wody. Wziął dwa litry wodoru i spalił je w jednym litrze tlenu. W wyniku tego powstały dwa litry pary wodnej. Następnie Avogadro założył ręce i śmiało powiedział: „Jak widać $2+1=2$! I co na to matematyka?”. Mina Gaussa nie była zapewne zbyt wesoła. ●