

Sto lat wiary w elementarną strukturę materii

Piotr ZALEWSKI

Ponad dwa i pół tysiąca lat temu Tales z Miletu zauważył, że cała materia występuje w trzech stanach skupienia, a ponieważ to samo można powiedzieć o wodzie, uznał wodę za jedyny składnik całej materii. Była to pierwsza znana nam próba wyjaśnienia różnorodności otaczającego nas świata za pomocą odwołania się do struktury zbudowanej z prostej (prostych) substancji. Pogląd ten ewoluował, napotykając po drodze problem zmienności i mnogości. Według Heraklita z Efezu jedyne, czego doświadczamy, to permanentna zmienność świata, zbudowanego z obdarzonego wiecznym ruchem ognia, natomiast według eleatów, Parmenidesa i jego najwybitniejszego ucznia, Zenona z Elei, jakkolwiek zmienność jest niemożliwa. W piątym wieku p.n.e. Empedokles z Agrigentum pogodził pogląd eleatów: „nie może nic powstać z tego, czego nie ma, jest niemożliwe i niesłychane, by to, co jest, zginęło” z obserwowaną zmiennością rzeczy, odnosząc go jedynie do substancji prostych, dopuszczając natomiast istnienie i zmienność substancji złożonych. Musiał jednak zrezygnować z jednej pierwotnej materii uznając za pierwotne cztery, wcześniej oddzielnie pretendujące do tego miana żywioły: wodę, powietrze, ogień i ziemię.

Następny wiek przyniósł nowy pogląd na strukturę materii i odtąd współistnieją one ze zmiennym szczęściem i w zmiennej formie, aż po dzień dzisiejszy. Tak Empedokles, jak i jego poprzednicy oraz jemu współcześni uważali materię za ciągłą, a więc podzielną w nieskończoność. Nowy pogląd zrodził się z pytania, dlaczego w procesie permanentnych zmian materia nie ściera się na pył, z którego nic już nie może powstać? Jak wyjaśnić względną trwałość rzeczy? Rozwiązanie zaproponował Leucyp z Miletu, a rozwinął Demokryt z Abdery. Uznali oni, (a) że materia nie może być podzielna w nieskończoność, a więc muszą istnieć najmniejsze, niepodzielne już składniki, które w związku z tym nazwali „nie dzielącymi się”, czyli atomami. W konsekwencji (b) musi istnieć pustka pomiędzy atomami umożliwiającą ich ruch. Wreszcie (c) atomy są niezniszczalne i (d) pozbawione struktury. Atomy różnią się tylko (e) wielkością i kształtem. Poglądy atomistyczne przejął i rozpropagował żyjący na przełomie III i II wieku p.n.e. Epikur z Samos tworząc mechanistyczny obraz świata pozbawiony ingerencji jakichkolwiek sił nadprzyrodzonych, natomiast o sześćdziesiąt lat starszy Arystoteles zdecydowanie się im sprzeciwiał, odrzucając – jak wszyscy poza atomistami – możliwość istnienia pustki jako pogląd wewnętrznie sprzeczny. Poglądy Arystotelesa, który do czterech żywiołów dodał niebiański eter, przejęła filozofia średniowieczna.

Większość informacji o atomistycznych poglądach starożytnych Greków pochodzi z odnalezionego w 1417 roku dzieła „De Rerum Natura” (O naturze wszechrzeczy) napisanego w I w. p.n.e. przez rzymskiego poetę Lukrecjusza. W połączeniu z epikurejskim światopoglądem deistycznym atomizm nie miał racji bytu w średniowiecznej Europie. Odżył w XVII wieku dzięki francuskiemu księdzu katolickiemu Pierre Gassنديemu, który sprzeciwiał się arystotelizmowi uznając istnienie atomów poruszających się w próżni. Pogląd ten pogodził ze średniowiecznym światopoglądem chrześcijańskim, uznając Boga za stwórcę atomów. W 1661 roku Robert Boyle (w trzy lata po opublikowaniu „Exercitationes Paradoxicae Adversus Aristoteles” Gassنديego) wydał słynne dzieło „The Sceptical Chymist”, w którym odrzucił koncepcję czterech żywiołów na rzecz filozofii korpuskularnej. Unikał słowa atom jako zdecydowany przeciwnik epikureizmu. Wprowadził pierwiastki chemiczne w postaci „prima materia”, niepodzielnych korpuskuł, którym Bóg nadał ruch.

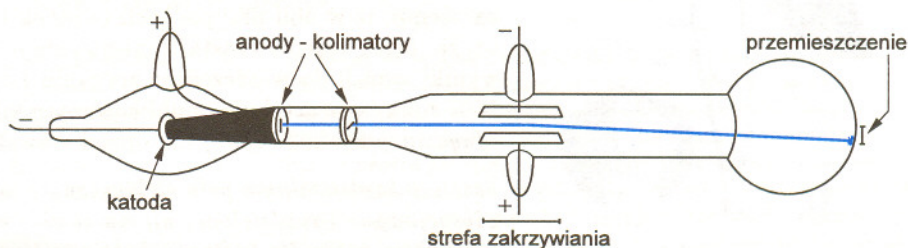
Ugruntowanie się poglądu atomistycznego w chemii zawdzięczamy Johnowi Daltonowi, który publikując w 1809 roku „A New System of Chemistry” zapostulował istnienie podstawowych cząstek (ultimate particles), które dla każdego jednorodnego ciała są doskonale identyczne co do wagi, kształtu itp. Następnie przekonywał o ważności i przewadze wyznaczenia względnych mas podstawowych cząstek, tak prostych, jak i złożonych ciał, liczby elementarnych cząstek składających się na cząstkę złożoną oraz liczby mniej złożonych cząstek



biorących udział w formowaniu się cząstek bardziej złożonych. Program ten udało mu się przeprowadzić w odniesieniu do dwudziestu znanych mu pierwiastków i szeregu substancji złożonych. Popenił jednak sporo błędów, które poprawił dwa lata później Amadeo Avogadro, wykorzystując zaobserwowany przez Luisa J. Gay-Lussaca fakt łączenia się gazów w prostych stosunkach objętościowych. Avogadro zapostulował, że w tej samej objętości w tych samych warunkach znajduje się tyle samo cząsteczek (molekuł). W ten sposób wykazał, że atomy gazów nieszlachetnych w normalnych warunkach łączą się w pary i podał prawidłowe stosunki mas atomowych. Choć na dokładne wyznaczenie liczby Avogadro trzeba było poczekać sto lat, atomy na stałe zagościły w chemii. Ich liczba jednak niepokojąco rosła. Dodatkowo masy atomowe okazały się bliskie wielokrotności masy atomu wodoru, a własności chemiczne pierwiastków wydawały się periodycznie zależeć od tych mas. Informacje te udało się uporządkować Dmitrijowi Mendelejewowi w 1869 roku w postaci używanego do dziś układu okresowego pierwiastków. Mendelejew zostawił w swoim układzie kilka wolnych miejsc, które zgodnie z jego przewidywaniem zostały wypełnione przez nowo odkryte pierwiastki, jak german, gal czy skand. Było to wielkim sukcesem atomowej teorii pierwiastków chemicznych, ale nasuwało pytanie o przyczynę obserwowanej harmonii, poddając jednocześnie w wątpliwość brak struktury czy nominalną niepodzielność atomów.

Zostawmy jednak chemię i zajmijmy się fizyką. Okazuje się, że fizycy (podobnie zresztą jak większość chemików) nie wierzyli w realność atomów, traktując je jedynie jako wygodne narzędzie służące do ilościowego opisu reakcji chemicznych. Co prawda dzięki Davidowi Bernoulliemu (1700–1782), Jamesowi C. Maxwellowi (1831–1879), Johannesowi D. Van der Waalsowi (1837–1923) czy wreszcie Ludwigiowi E. Boltzmannowi (1844–1906) rozwinęto kinetyczną teorię materii, lecz nie potrafiiono wskazać dowodu fizycznego istnienia atomów. Odlóżmy jednak i ten wątek, gdyż będzie on tematem przewodnim następnego numeru *Delty*.

Fizycy XIX wieku bardziej niż strukturą materii byli zafascynowani elektrycznością i magnetyzmem. W 1855 roku Heinrich Geissler konstruuje pompę próżniową i za jej pomocą uzyskuje po raz pierwszy rurę próżniową. Zgodnie ze swymi zainteresowaniami fizycy rozpoczynają badania przepływu prądu przez rozrzedzone gazy. Obserwują tajemniczą poświatę pojawiającą się w rurze pod wpływem przyłożonego napięcia. Jej wygląd zmienia się w miarę zmniejszania ciśnienia gazu. Świetlista, liliowa linia najpierw upodabnia się do czegoś przypominającego dżdżownicę, której pierścienie stopniowo znikają począwszy od katody, aż wreszcie świecenie gazu zanika, ale prąd nadal płynie, a na końcu rury przeciwnym do katody pojawia się zielonkawa poświata. Wstawienie przeszkody wewnątrz tuby powoduje pojawienie się ostrego cienia w tej zielonkawej poświacie, co świadczy o występowaniu w tubie jakiegoś rodzaju promieniowania wydobywającego się z katody. Zjawisko to zostaje nazwane promieniowaniem katodowym. W 1858 roku Julius Plücker obserwuje zakrzywianie się tych promieni w polu magnetycznym.



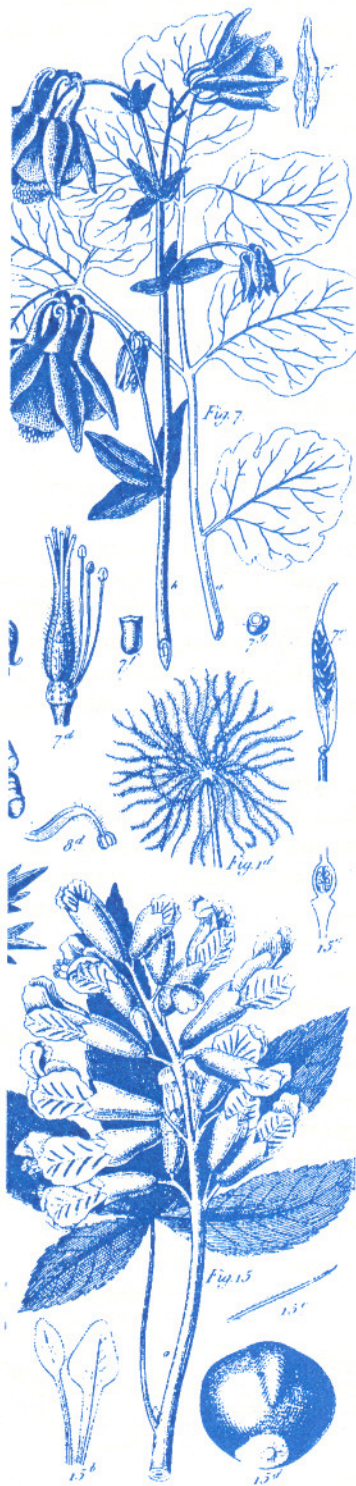
Wynalazek wykorzystujący pompę Geisslera zostaje ulepszony około 1870 roku przez William Crookesa i przechodzi do historii fizyki jako rurka Crookesa. Przez 40 lat promienie katodowe pozostają ciekawostką i zagadką jednocześnie. Krystalizują się dwa poglądy co do ich natury. Fizycy angielscy uważają je za strumień materialnych cząstek obdarzonych ładunkiem elektrycznym, natomiast uczeni niemieccy uznają je za jakąś formę promieniowania lub falę w eterze.

Decydującym argumentem przeciwko hipotezie korpuskularnej wydaje się negatywny wynik podjętej przez Heinricha Hertza w 1892 roku próby odchylenia promieni katodowych polem elektrycznym. W roku 1895 Wilhelm Röntgen za pomocą promieni katodowych odkrywa przenikające materię promienie X. Kilka miesięcy później Henri Becquerel, poszukując natury promieniowania rentgenowskiego, odkrywa naturalną promieniotwórczość. Same promienie katodowe pozostają jednak tajemnicą.

Czas chyba najwyższy przedstawić głównego bohatera tego opowiadania. Joseph John Thomson urodził się 18 grudnia 1856 roku w Cheetham, przedmieściu Manchesteru. W 1880 roku uzyskał stopień bakałarza w Trinity College w Cambridge zajmując drugą lokatę za Josephem Larmorem. W tym samym roku rozpoczął pracę w Cavendish Laboratory, gdzie już cztery lata później, po rezygnacji Johna W. Rayleigha, został profesorem w wieku zaledwie 28 lat. Thomson rozpoczął badania wyładowań w rozrzedzonych gazach. Problematyce tej pozostał wierny do końca aktywności naukowej. W 1897 roku, zbierając wyniki kilkunastu lat badań, udało mu się udowodnić, że promienie katodowe to strumień naładowanych cząstek i to cząstek wchodzących w skład każdej materii. Logiczny ciąg doświadczeń rozpoczyna się ulepszoną wersją eksperymentu Jean-Baptiste Perrina z 1895 roku, wykazującą niezbicie, że promienie katodowe niosą ujemny ładunek elektryczny, gdyż skierowanie ich polem magnetycznym do ekranowanego, metalowego cylindra powoduje jego naładowanie. Kluczowym testem było jednak zaobserwowanie odchylenia promieni katodowych przez słabe pole elektryczne oraz pomiar stosunku ładunku do masy korpuskuł tworzących ich strumień. Thomson wykazał, że powodem negatywnego wyniku próby podjętej przez Hertza było niedostateczne rozrzedzenie gazu, wskutek czego następowało ekranowanie pola elektrycznego przez powstające w gazie jony. Mając do dyspozycji zarówno pole magnetyczne, jak i elektryczne Thomson przystąpił do pomiaru stosunku m/e . Pierwszym etapem było zmierzenie prędkości v przemieszczania się promieni katodowych. Naładowana cząstka poruszająca się w statycznym polu elektrycznym (magnetycznym, prostopadłym do wektora prędkości cząstki) doznaje działania siły eE (evB). W takim razie siły te mogą znosić się, o ile tylko użyje się odpowiednio skierowanych skrzyżowanych pól – elektrycznego i magnetycznego – o natężeniach związanych zależnością $v = E/B$. Znając prędkość łatwo można wyznaczyć stosunek m/e mierząc np. odchylenie h spowodowane przez jednorodne pole elektryczne o natężeniu E występujące na długości d . Ponieważ $h = \frac{eE}{m} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{d}{v}\right)^2$ (rzut ukośny), to $m/e = E/2h \cdot (d/v)^2$.

Prędkość v okazała się zależeć od stopnia rozrzedzenia gazu i od różnicy potencjałów między katodą a anodą. Zawsze jednak była rzędu prędkości światła, ale istotnie od niej mniejsza. Natomiast stosunek m/e nie wykazywał zależności ani od prędkości v , ani od stopnia rozrzedzenia gazu, ani od rodzaju gazu, ani od materiału katody. W dodatku stosunek ten okazał się prawie 2000 razy mniejszy niż analogiczny stosunek dla atomu wodoru (zmierzony dzięki prawom elektrolizy odkrytym w 1833 roku przez Michaela Faradaya). Przy założeniu, iż w obu przypadkach ładunek jest ten sam (co do wartości), oznacza to, że obserwujemy cząstki o niezwykle małej masie. Thomson przedstawił wyniki swoich doświadczeń na zebraniu Royal Institution w dniu 30 kwietnia 1897 roku, a w artykule opublikowanym kilka miesięcy później w *Philosophical Magazine*, 44, 293 (1897) tak opisał wnioski płynące z przeprowadzonych badań:

Jeżeli w bardzo silnym polu elektrycznym w pobliżu katody molekuly gazu są zdysocjowane i rozdzielone, nie na zwykłe atomy chemiczne, ale na atomy pierwotne, które dla krótkości będziemy nazywać korpuskułami; i jeżeli te korpuskuły są elektrycznie naładowane i odrzucane od katody przez pole elektryczne, to powinny się one zachowywać dokładnie tak jak promienie katodowe.[...] w takim razie promienie katodowe są nowym stanem materii: stanem, w którym cała materia – to znaczy materia pochodząca z różnych źródeł jak wodór, tlen, itp. – jest jednego i tego samego rodzaju, będąc tą substancją, z której zbudowane są wszystkie pierwiastki chemiczne.



Odkryte przez Thomsona korpuskuły zostały niemal natychmiast nazwane elektronami. Termin ten wymyślił George J. Stoney na oznaczenie elementarnego ładunku, o istnieniu którego wydawały się świadczyć prawa elektrolizy. Za swoje odkrycie Thomson otrzymał w roku 1906 Nagrodę Nobla z fizyki. A co my z tego mamy? Chyba łatwiej wyliczyć, czego z tego nie mamy. Podam tylko jeden, ale za to najważniejszy, moim zdaniem, wątek (w wielkim skrócie). Pojęcie elektronu miało kapitalne znaczenie dla odkrycia mechaniki kwantowej, która „dojrzała” w 1927 roku – równo 30 lat po odkryciu elektronu. W tym właśnie roku Werner Heisenberg, twórca mechaniki macierzowej uwalniającej model atomu Bohra od pomieszania pojęć klasycznych i kwantowych, usiłując matematycznie opisać trajektorię elektronu w komorze Wilsona, odkrywa zasadę nieoznaczoności; odbywa się konferencja Solvaya w Brukseli, na której (w czasie posiłków) okazuje się, że mechanika macierzowa, równanie Schrödingera, rozkłady prawdopodobieństwa Borna oraz zasada nieoznaczoności splatają się w jedną spójną teorię; w końcu Clinton J. Davisson i Lester Germer w Stanach Zjednoczonych oraz George P. Thomson (syn J.J.) w Anglii wykazują doświadczalnie falową naturę elektronu, zgodnie z hipotezą de Broglie’a i właśnie ukonstytuowaną mechaniką kwantową. (W ten sposób Thomson ojciec wykazał, że istnieje cząstka elektron, a Thomson syn, że jest on również falą, ale zupełnie inną, niż to sobie pod koniec XIX wieku wyobrażano.) Odkrycia te były bardzo cenne. Nagrody Nobla otrzymali: w 1929 roku Louis-Victor P.R. de Broglie, w 1932 roku Werner Heisenberg, w 1933 roku Erwin Schrödinger, w 1937 roku Clinton J. Davisson i George P. Thomson, a w 1954 roku Max Born. Natomiast Niels H.D. Bohr w 1927 roku był już od pięciu lat noblistą. Warto dodać, że jego modelowi atomu wodoru, w którym elektronom wolno przebywać tylko na wyróżnionych orbitach, przyświecała nie tyle (udana) próba wyjaśnienia struktury widmowej promieniowania atomu wodoru, co atomistyczna troska o jego trwałość. Wyrosła z tego modelu mechanika kwantowa w elegancki sposób wyjaśnia nie tylko trwałość atomów, ale również własności chemiczne pierwiastków, wiązania chemiczne, strukturę i własności ciał stałych itp., itd. Dzięki niej 50 lat po odkryciu elektronu powstaje pierwsze złącze półprzewodnikowe, a następnie tranzystor.

W wielu opracowaniach można znaleźć pogląd, że odkrywając elektron Thomson uniemożliwił odkrycie niepodzielnego atomu Demokryta. Rzeczywiście, atomy pierwiastków chemicznych nie spełniają co najmniej trzech starożytnych postulatów. Nie są ani niepodzielne, ani pozbawione struktury, ani niezniszczalne. Niektórzy, wskazując na izotopy (do których odkrycia J.J. Thomson również się przyczynił) argumentują dodatkowo, że atomy jednego pierwiastka nawet nie są identyczne. Pogląd ten jest w najlepszym razie niebezpiecznym skrótem myślowym, gdyż postulaty Demokryta świetnie spełniają właśnie elektrony (co zresztą było jasne dla samego odkrywcy, jak widać z przytoczonego fragmentu jego pracy). „Nadużycia” dopuścił się Dalton zbyt pochopnie nazywając podstawowe jednostki pierwiastków chemicznych atomami. Elektron jest obecnie „najstarszym” atomem Demokryta i nadal, po stu latach od odkrycia, pozostaje elementarny. Jak długo jeszcze? Chyba to nie jest dobre pytanie do jubilata.

Odkrycie pierwszego elementarnego składnika materii można uznać za początek fizyki cząstek elementarnych. Nazwa ta jednak pojawiła się ponad 50 lat później, kiedy zaczęto odkrywać cząstki, których nie można znaleźć ani w jądrze atomowym, ani w produktach jego rozpadu. Kryterium to spełnia odkryty w 1936 roku przez Paula Andersona mion, zachowujący się jak ciężki elektron, nie spełnia natomiast (również przez niego odkryty w 1932 roku) pozyton – pierwsza antycząstka (pasująca do tajemniczego drugiego rozwiązania równania Diraca dla elektronu), gdyż pozytony, choć znalezione zostały w promieniowaniu kosmicznym, są również produktem rozpadu jądrowego β^+ , tak jak elektrony rozpadu β^- . Początkowo sądzono, że mion jest cząstką odpowiedzialną za wiązanie nukleonów w jądrze, zapostulowaną przez Yukawę w 1935 roku, gdyż miał odpowiednią masę. Od początku

wydawał się jednak za słabo oddziaływać z materią jądrową, ale udowodniono to dopiero w 1947 roku. W tym samym roku znaleziono w promieniowaniu kosmicznym zarówno poszukiwany nośnik sił jądrowych nazywany obecnie mezonem π lub po prostu pionem, jak i zupełnie nowe cząstki nazwane później cząstkami dziwnymi. W ten sposób rozwiązał się worek z hadronami, a dziedzinę badającą jego zawartość zaczęto nazywać fizyką cząstek elementarnych. Hadrony, podobnie jak wcześniej atomy w chemii, zaczęły mnożyć się jak przysłowiowe króliki, co w końcu doprowadziło najpierw do hipotezy, a następnie odkrycia ich składników – kwarków. Tak więc nazwa „fizyka cząstek elementarnych” pojawiła się w wyniku odkrycia obiektów, które wcale elementarne nie są. Tak czy inaczej możemy uznać, że w tym roku mamy okrągłą rocznicę, jak nie 100, to 50 lat tej dziedziny fizyki.