

Sformułowany przez Balmera w 1885 roku wzór określający położenie linii widmowych atomu wodoru (MT 05/07) był dla ówczesnych fizyków niesamowitą zagadką. Nie było żadnego racjonalnego wytłumaczenia, dlaczego akurat taki wzór jest dobry i dlaczego tak doskonale zgadza się on z doświadczeniem. Dodatkowych problemów przysparzało również zrozumienie samej struktury, według której miałyby być zbudowane atomy. Rozwiązanie tych dwóch niezmiernie ciekawych problemów przypadło młodemu i niezwykle utalentowanemu fizykowi Nielsowi Bohrowi, który w 1913 roku przedstawił swoją hipotezę budowy atomu. Aby jednak móc docenić znaczenie bohrowskiej koncepcji atomu, musimy się cofnąć w czasie do początku XIX wieku, gdy nowoczesne teorie atomistyczne dopiero były w fazie raczkowania. Poszukiwanie najdrobniejszych i najbardziej elementarnych cegiełek materii było bowiem zawsze jednym z najbardziej frapujących zajęć, jakie zajmowało fizyków.



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 zamiłowaniem 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.

Warto w tym miejscu na marginesie dodać, że rozwiązanie tego problemu stało się podwaliną stworzenia całkowicie nowego gmachu fizyki teoretycznej, zwanego **mechaniką statystyczną**, o której na pewno jeszcze kiedyś sobie opowiemy. Na zachętę tylko dodam, że jest z nią związanych bardzo wiele ciekawych eksperymentów myślowych, paradoksów i niesety również nieszczyć ludzkich – jeden z ojców mechaniki statystycznej, Ludwig Boltzmann, doznał psychicznego załamania na skutek nieuznania jego prac przez ówczesnych mu fizyków i odebrał sobie życie.

Sama koncepcja, że atomy tak jak każda inna materia podlega doskonale sprawdzonym prawom dynamiki i że ich wewnętrzna struktura nie podlegają doświadczałnemu sprawdzeniu, wydawała się słuszna i skutecznie kończyła każdą naukową dyskusję. Doskonale wpisywała się ona bowiem w newtonowską prostotę, a zarazem przewidywalność świata. Zmianę w myśleniu przyniosły dopiero pionierskie badania nad prądem elektrycznym w XIX wieku.

Odkrycie elektronu i struktura atomu

Tomasz Sowiński

KLASYCZNA IDEA ATOMU

Od czasów Newtona funkcjonował w fizyce pogląd, że atomy to nic innego jak sztywne, jednorodne kulki. Atomy, choć niezmiernie małe, podlegają według tej koncepcji dokładnie tym samym prawom fizyki co wszystkie inne ciała, tzn. w każdej chwili każdy z nich ma dokładnie określone położenie i prędkość, a jego dynamiką rządzą trzy zasady Newtona. Jedynym bardzo istotnym problemem związanym z takim rozumieniem sprawy, z którego notabene zaczęto sobie zdawać sprawę na dobre dopiero w XVIII wieku, była praktyczna niemożność opisu z atomowego punktu widzenia żadnego makroskopowego procesu. Wynikało to z faktu, że wypisanie równań ruchu dla każdego atomu, z których złożone jest dane ciało (choć teoretycznie możliwe), nie jest wykonalne w praktyce ze względu na ich astronomiczną liczbę. Nie mówiąc już o rozwiązaniu tych równań i przewidywaniu tym samym trajektorii każdego z atomów.

WYŁADOWANIA ELEKTRYCZNE W GAZACH

Wiek XIX, jak na wiek pary i elektryczności przystało, był obfity w wiele doświadczeń zarówno nad przepływem prądu elektrycznego w ciałach stałych i cieczech, jak i nad wyładowaniami elektrycznymi w gazach. Zaskakujące w tej całej sytuacji jest jednak to, że choć eksperymenty te były wykonywane z fenomenalną dokładnością, to przez długi czas nie było wiadomo, co tak naprawdę jest odpowiedzialne za przepływ prądu elektrycznego. Wiadomo było jedynie tyle, że ma to jakiś związek z poruszającą się materią naładowaną elektrostatycznie. Najbardziej istotne w wyjaśnieniu tego problemu okazały się eksperymenty związane z wyładowaniami elektrycznymi w rozrzedzonych gazach. Eksperymenty takie przeprowadza się w specjalnych szklanych komorach, w których na dwóch końcach umieszcza się końcówki przewodów elektrycznych wychodzących na zewnątrz z komory. Jeśli teraz pomiędzy końcami tych

przewodów wytworzymy bardzo dużą różnicę potencjałów elektrycznych (duże napięcie), to w pewnym momencie w bańce przy jednej z końcówek (tej z dodatnim potencjałem) zacznie powstawać światło. Dokładna analiza tego zjawiska przekonuje, że za świecenie jest odpowiedzialne coś, co wylatuje z ujemnie naładowanej końcówki (zwananej **katoda**) i leci prostopadło do kierunku tej naładowanej dodatnio (tzw. **anody**). To „coś” zostało nazwane **promienianiem katodowym** i jak się za chwilę okaże, ma to ogromny związek z budową atomu.

PROMIENIOWANIE KATODOWE

Zbadanie własności promieniowania katodowego nie jest prostą sztuką. Trudno jest bowiem zbadać coś, co wydawałoby się nie jest w ogóle do schwytania. Promienie te powstają bowiem na samej powierzchni



chci **katody**, która jest dla nas niedostępna, i ulegają przekształceniu w promieniowanie świetlne przy powierzchni **anody**, która również znajduje się wewnątrz bańki. Nie ma się zatem co dziwić, że pod koniec XIX wieku więcej było spekulacji na temat natury tego promieniowania niż samych doświadczalnych faktów.

Przełom w badaniach dokonał się za sprawą francuskiego fizyka Jeana Baptiste'a Perrina (Nagroda Nobla z fizyki w 1926), który modyfikując troszkę doświadczenie, dosłownie złapał promieniowanie katodowe do odizolowanego metalowego pojemnika (było już bowiem wtedy wiadomo, że promieniowanie katodowe doskonale jest pochłaniane przez metale). Następnie zmierzył, jak na skutek pochłonięcia tych promieni zmieniała się masa i ładunek elektryczny całego pojemnika. W wyniku takich pomiarów Perrin stwierdził ponad wszelką wątpliwość, że promieniowanie katodowe jest czymś, co niesie UJEMNY ładunek elektryczny i jeśli ma masę, to jest ona na pewno zaniedbywalnie mała w porównaniu z masą pojemnika (dysponując bardzo dokładnymi jak na tamte czasy metodami pomiaru masy nie udało się stwierdzić nawet najmniejszej zmiany masy pojemnika).

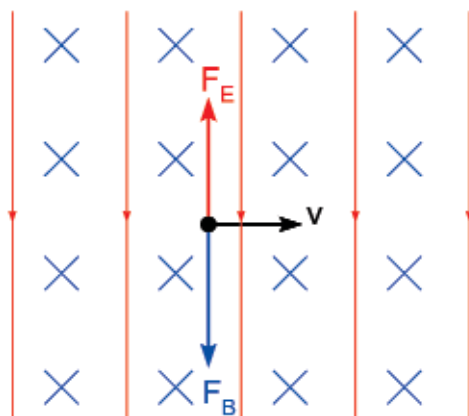


HIPOTEZA ISTNIENIA ELEKTRONU

Wynik pionierskiego doświadczenia Perrina był ewidentnym dowodem na to, że promienie katodowe rzeczywiście istnieją i dodatkowo są obdarzone ładunkiem elektrycznym. Ostateczne rozstrzygnięcie wątpliwości, czym jest to tajemnicze promieniowanie, przyniósł przeprowadzony w 1897 roku eksperyment angielskiego fizyka Josepha Johna Thomsona, który już wtedy był znany na całym świecie jako J.J. Thomson. W roku 1906 otrzymał on Nagrodę Nobla za prace nad przewodnictwem prądu w gazach.

Doświadczenie J.J. Thomsona opiera się na spostrzeżeniu, że wszystkie ciała obdarzone ładunkiem elektrycznym doznają przyspieszenia, gdy znajdują się w polu elektrycznym. Dodatkowo jeśli tylko poruszają się z jakąś prędkością, to również pole magnetyczne wpływa na ich ruch.

Thomson chcąc wykorzystać ten efekt do zbadania nieznanych promieni, założył najprostszą sytuację, że promieniowanie katodowe to nic innego jak strumień identycznych cząstek posiadających pewien nieznaną ładunek elektryczny i obdarzonych pewną nieznaną masą. Tym samym przepuszczając promienie katodowe przez pole elektryczne i magnetyczne, które były ustawione prostopadłe do siebie i prostopadłe do kierunku lotu promieni, spodziewał się sytuacji, takiej jak przedstawiona na poniższym rysunku



pole magnetyczne
pole elektryczne

Z rysunku wynika jasno, że dobierając odpowiednio wartości indukcji pola magnetycznego (B) i natężenia pola elektrycznego (E), można doprowadzić do sytuacji, w której siły działające na poruszającą się cząstkę o ładunku elektrycznym q będą się równoważyły i będzie się ona poruszała po linii prostej. Ponieważ wartości tych sił dane są odpowiednio wzorami

$$F_B = q \cdot v \cdot B$$

$$F_E = q \cdot E$$

to widać, że doprowadzenie do sytuacji, w której się one równoważą, pozwala wyznaczyć prędkość, z jaką porusza się naładowana cząstka

$$F_E = F_B \Rightarrow v = \frac{E}{B}$$

To pozwoliło Thomsonowi wyznaczyć prędkość z jaką poruszają się hipotetyczne cząstki, których strumień tworzy to tajemnicze promieniowanie katodowe. Jednak był to dopiero pierwszy krok do zrozumienia natury tych cząstek. Kolejnym krokiem było bowiem zbadanie ruchu owych cząstek, gdy działało na nie tylko jedno z tych pól – pole magnetyczne. Ponieważ siła pochodząca od pola magnetycznego działa zawsze prostopadle do prędkości cząstki, to jedynym jej skutkiem może być zmiana kierunku ruchu (cząstka ma ciągle stałą co do wartości prędkość). Dokładna analiza sytuacji przekonuje, że pod wpływem takiej siły cząstka porusza się po łuku okręgu, którego promień dany jest wzorem

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

Ponieważ jednak udało się już wyznaczyć prędkość v cząstki dzięki poprzednim pomiarom, to teraz mierząc promień łuku, po którym porusza się cząstka, można wyznaczyć stosunek masy cząstki do jej ładunku elektrycznego.

Ta wielkość (stosunek masy do ładunku) nie zadowala nas oczywiście w zupełności, bo najlepiej byłoby wyznaczyć każdą z tych wielkości osobno. Niemniej jednak z innych doświadczeń (głównie chemicznych) był już wtedy znany taki stosunek dla różnych jonów, np. dla jonu wodoru był on wyznaczony dzięki procesowi elektrolizy wody. Thomson zatem dobrze wiedział, że wyznaczenie tego stosunku może być pomocne przy postawieniu hipotezy, czym jest ten nieznaną nośnik promieniowania katodowego.

Thomson po przeprowadzeniu wielu serii swoich doświadczeń z różnymi gazami, z katodami zrobionymi z różnych materiałów oraz po przykładaniu różnych napięć, stwierdził z dużą dokładnością, że **stosunek masy do ładunku elektrycznego nośnika promieni katodowych jest uniwersalny!**, tzn. nie zależy on w ogóle od warunków, w jakich przeprowadzane jest doświadczenie. To od razu nasuwa myśl, że nośniki promieni katodowych są takie same w każdej materii – niezależnie przecież od tego, z czego była zrobiona katoda, to zawsze nośnik ma taki sam stosunek. Jakby tego było mało, okazało się również, że ten zmierzony stosunek masy do ładunku elektrycznego jest 2000 RAZY mniejszy od takiego samego stosunku wyznaczonego dla jonów wodoru, który do tej pory

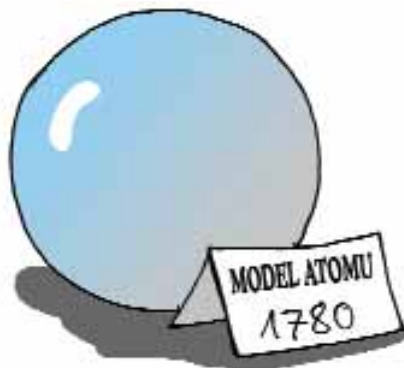
był najmniejszym znanym. To może oznaczać tylko tyle, że albo jon wodoru ma 2000 razy większą masę, albo 2000 razy mniejszy ładunek, albo jakąś kombinację tych dwóch rzeczy razem.

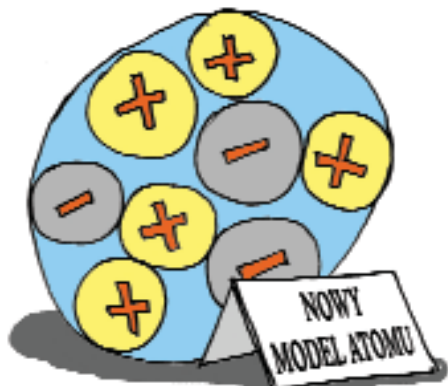
Thomson był przekonany, że odkrył nową cząstkę elementarną. Nazwał ją KORPUSKUŁĄ, a wartość ładunku elektrycznego, którą ona niesie, jednym ELEKTRONEM (w literaturze przyjął się „elektron” jako nazwa dla nowej cząstki). Tym samym Thomson uznawany jest dziś za odkrywcę elektronu. Na marginesie dodajmy, że w roku 1909 w wyrafinowanym eksperymencie Robert Millikan doświadczalnie wykazał, że ładunek elektryczny elektronu jest ŁADUNKIEM ELEMENTARNYM, czyli każdy inny ładunek istniejący swobodnie w przyrodzie musi być całkowitą wielokrotnością ładunku elektronu (Nagroda Nobla z fizyki w 1923 roku).



NOWA KONCEPCJA ATOMU

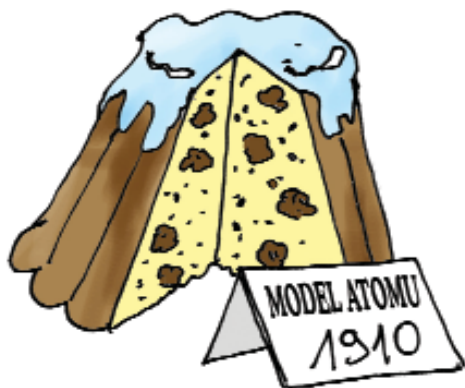
Odkrycie elektronu przez Thomsona bardzo szybko przyniosło przełom w teorii budowy atomu, która, jak już wspominaliśmy, od czasów Newtona bazowała na przekonaniu, że atom jest jednorodną kulą bez żadnej struktury wewnętrznej. Odkrycie Thomsona wydawało się, że stoi w jawnej sprzeczności z taką hipotezą, bo jak zostało wykazane, elektrony znajdują się w każdej materii i istnieją sposoby, aby je z niej wydobyć. Wygląda to tak, jakby elektrony rzeczywiście były jednym ze składników materii. Dodatkowym argumentem były prace innych fizyków, głównie Pietera Zeemana i Hendrika Lorentza (Nagroda Nobla 1902), które jakby sugerowały, że własności atomów zmieniają się pod wpływem zewnętrznego





pola magnetycznego. To ni mniej, ni więcej oznaczało, że atomy wcale nie muszą być pozbawione wewnętrznej struktury, ale mogą być zlepkiem materii o przeciwnych ładunkach elektrycznych, tworzących razem obojętną elektrycznie „kulkę”. Idąc tym tropem, łatwo zauważyć, że gdyby atom wodoru (najprostszego pierwiastka chemicznego) zawierał tylko jeden ujemnie naładowany elektron, to elektron ten musiałby mieć dokładnie przeciwny ładunek (czyli taki sam co do wartości) do dodatniego jonu wodoru, tak aby razem mogły tworzyć obojętny atom. A to znaczy, że jon wodoru ma 2000 razy większą masę od elektronu. Krótko mówiąc, cała masa atomu związana jest praktycznie z dodatnio naładowanymi cząstkami.

Te wszystkie spekulacje doprowadziły w roku 1902 lorda Kelvina (wł. William Thomson, zbieżność nazwisk całkowicie przypadkowa) do postawienia nowej hipotezy o budowie atomu. Zdaniem Kelvina atom miał mieć strukturę podobną do ciasta z rodzynkami. Ciasto jest odpowiednikiem dodatnio nałado-

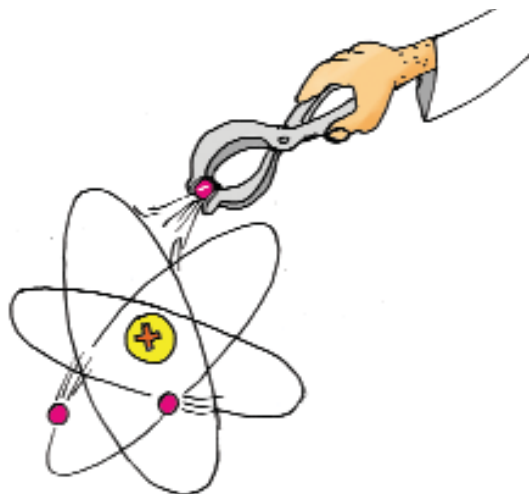


wanej i równomiernie rozłożonej w pewnym małym obszarze masy. Rodzynki to bardzo lekkie elektrony, które są „powtykane” w tę masę. Ta koncepcja została bardzo szybko podchwyciona i rozbudowana przez Thomsona. Choć miała ona ewidentną wadę – nie była w żadnym stopniu sprawdzalna i była czystą hipotezą, to miała bardzo dużo zalet.

Po pierwsze, tłumaczyła (oczywiście tylko jakościowo), skąd biorą się elektrony potrzebne przy wytwarzaniu promieni katodowych. Były to po prostu elektrony wyrwane z wnętrza atomu. Ponieważ w każdym atomie elektrony są takie same, to i własności tych elektronów są takie same. Tym samym promieniowanie katodowe ma ten uniwersalny charakter, który był wielkim odkryciem J.J. Thomsona.

Po drugie, tłumaczyła ona, na czym polega powstawanie jonów różnych atomów. Zgodnie z tą koncepcją jon to nic innego jak zwykły atom, z którego wyrwano (wtedy powstaje jon dodatni) lub do którego dołożono (wtedy powstaje jon ujemny) kilka elektronów. To tłumaczy również, dlaczego różne jony różnych pierwiastków zawsze mają albo ten sam ładunek elektryczny, albo różnią się całkowitą wielokrotnością ładunku elektronu. Nie ma po prostu innej możliwości jak dołożenie lub wyciągnięcie całkowitej liczby elektronów do/z atomu.

No i w końcu taka budowa atomu otwiera furkę do wytłumaczenia doświadczeń, z których najbardziej spektakularnymi były doświadczenia Zeemana. Dzięki teoretycznemu wydzieleniu z wcześniej jednorodnego i całkowicie obojętnego atomu Newtona dwóch części przeciwnie naładowanych, możliwe stało się, aby własności atomu zmieniły się pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego czy elektrycznego. Jeśli bowiem jest tak, że elektrony w tej dodatnio naładowanej masie poruszają się, to zewnętrzne pola będą oczywiście zmieniły ten ruch i tym samym mogą się zmienić same własności atomów. Atom zaczyna więc od tej pory być obiektem, który nie tylko jako całość podlega prawom dynamiki Newtona, ale również dzięki swojej wewnętrznej strukturze zaczyna oddziaływać z zewnętrznymi polami elektromagnetycznymi.



OTWARTE NOWE DRZWI

Doświadczenie J.J. Thomsona i jego hipoteza o atomie jako cieście z rodzynkami stała się podwaliną nowej gałęzi fizyki – atomistyki. Od tej pory zaczęło się bardzo burzliwie zastanawiać i bardzo dogłębnie badać, jaka naprawdę jest struktura atomu. Jednak sam model Thomsona atomu nie przetrwał zbyt długo. Już w roku 1910 Ernest Rutherford wykonał serię doświadczeń i obliczeń, z których jasno wynikało, że atom co prawda ma wewnętrzną strukturę, ale dużo bardziej ciekawą i fascynującą niż prosta cukiernicza analogia. To, jak się okazało, miało doprowadzić do wielkiego zakwestionowania fizyki klasycznej nowymi eksperymentami. ●