

Przez ostatnich kilka odcinków naszej opowiastki zachwalaliśmy teorię budowy atomu sformułowaną w 1913 roku przez Nielsa Bohra. Nie było oczywiście w tym nic dziwnego, bo jak pamiętamy, propozycja tego młodego duńskiego fizyka pozwoliła wyjaśnić wiele niewytłumaczalnych ówczasie wyników doświadczeń. Była poza tym pierwszą udaną próbą odpowiedzi dlaczego w ogóle atomy istnieją. Regułą odkryć naukowych jest jednak to, że na każde zjawisko wyjaśnione przez nową teorię przypada kilka nowych pytań, na które odpowiedź wydaje się nieosiągalna. Tak też się stało z fenomenalną teorią Nielsa Bohra.

SUKCESY TEORETYCZNE TEORII BOHRA

Budowa atomu zaproponowana przez Nielsa Bohra była niewątpliwie wielkim przełomem myślowym w dziejach nowożytnej fizyki. Zanim zatem przejdziemy do ostrego skrytykowania tej teorii, oddajmy dziejową sprawiedliwość i pokażmy największe jej sukcesy. Najlepiej jest to zrobić, przypominając, jak wyglądała sytuacja naukowa przed sformu-



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 populary-

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

Bohra obchodził ten problem poprzez wprowadzenie koncepcji orbity stacjonarnej (MT 10/2007), na której znajdujący się elektron nie promieniuje. Dzięki tej sztuczce była przynajmniej jakaś teoretyczna przesłanka, dlaczego atomy w ogóle mogą istnieć.

Wraz z teorią Bohra przyszło również wyjaśnienie, dlaczego atomy są takie małe i tylko takie małe. Do tej pory nie było żadnego teoretycznego powodu, dla którego atomy nie mogłyby być dowolnych rozmiarów. Oparta na klasycznej fizyce teoria Rutherforda nie rozróżniała bowiem małych i dużych atomów i wszystkie traktowała jako równoprawne. Jedną bowiem z fundamentalnych cech fizyki klasycznej jest jej uniwersalność ze względu na skalę problemu. Ta uniwersalność początkowo była uważana za wielką zaletę nowoczesnej fizyki, która narodziła się wraz z pracami Galileusza. Zaletę dlatego, że pozwoliła

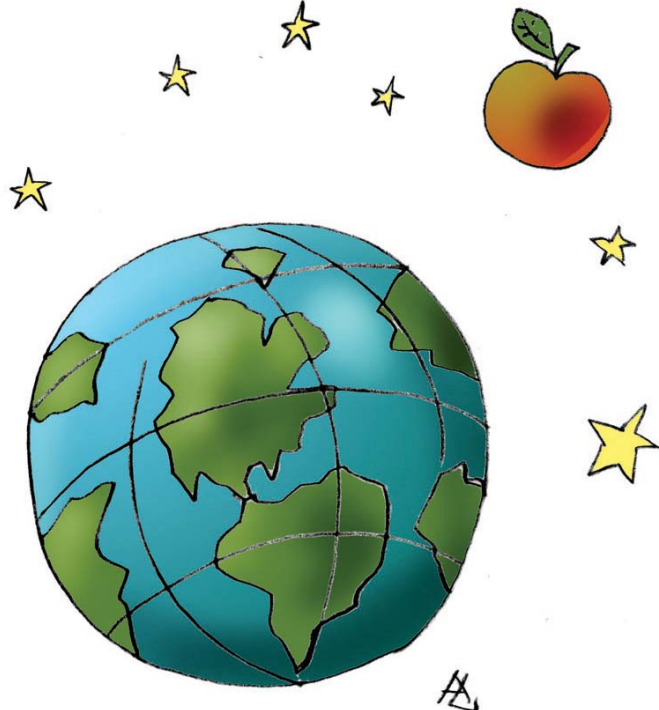
Atom Bohra – sukces czy porażka?

Tomasz Sowiński

waniem tej teorii i co się zmieniło po jej ogłoszeniu. To pozwoli nam lepiej zrozumieć, dlaczego nie mogła ona od razu tłumaczyć wszystkiego.

W mojej ocenie największym sukcesem bohrowskiej koncepcji budowy atomu było to, że tłumaczyła, dlaczego w ogóle atomy mogą istnieć. Sformułowany przez Rutherforda kilka lat wcześniej model planetarny (MT 08/2007) był przecież całkowicie absurdalny. Jak Czytelnik zapewne pamięta, był on oparty całkowicie na fizyce klasycznej i podobieństwie, jakie istnieje między siłami elektrostatycznymi a grawitacyjnymi. Tym samym całkowicie przemilczany został w nim problem promieniowania elektromagnetycznego, które wysyła każda elektrycznie naładowana i przyspieszana cząstka. A jak wynikało z teoretycznych obliczeń, promieniowanie to sprawiałoby, że atom w ciągu ułamka sekundy ulegałby destrukcji na skutek zderzenia elektronu z jądrem atomu. Model

bardzo ujednocilić prawa przyrody obowiązujące we Wszechświecie i tym samym doprowadzić do wytłumaczenia wielu ciekawych zjawisk. To ujednoczenie praw przyrody jako pierwszy na wielką skalę wykorzystali dobrze nam znany sir Isaac Newton (MT 03/2006). Sformułowane przez niego prawo powszechnego ciążenia pozwoliło wreszcie zrozumieć, że spadającym jabłkiem z drzewa i krążącym wokół Ziemi Księżycem rządzi dokładnie to samo prawo przyrody – prawo grawitacji. Podobnie było z prawami elektrodynamiki skompletowanymi przez Jamesa Clarka Maxwella (MT 04/2006). Tłumaczyły one zarówno fakt przyciągania igły magnetycznej przez magnes, jak i zmianę jej ustawienia pod wpływem ziemskiego pola magnetycznego. Zjawisko dziwnego ustawienia ogona lecącej w kosmosie komety, świecącej zorzy polarnej czy grzmiących piorunów w deszczowy dzień miały to samo źródło w prawach elektrodynami-



Prawo grawitacji

ki. Elektrodynamika klasyczna i mechanika newtonowska stały się dwoma fundamentalnymi nogami fizyki na wiele, wiele lat. Akceptacja tych dwóch uniwersalnych ze względu na skalę problemu teorii w konsekwencji prowadziła natychmiast do uniwersalności rozmiaru atomu. Gdyby naturą atomów rządziła fizyka klasyczna, atom dowolnej wielkości spokojnie mógłby istnieć (MT 09/2007). A jednak nie istnieje!

Dopiero mechanika kwantowa, której jednym z pierwszych praw był postulat kwantowania Bohra, pozwalała odróżnić obiekty mikroskopowe od makroskopowych. Od tej pory było możliwe postawienie dość klarownej granicy pomiędzy obiektami dużymi, którymi rządzi fizyka klasyczna, a małymi, którymi rządzi mechanika kwantowa. Atomy, jako obiekty małe, musiały „się słuchać” tej drugiej i tym samym nie za bardzo mogły być obiektami dużymi. Gdyby bowiem takimi były, ulegałyby natychmiastowemu zniszczeniu.

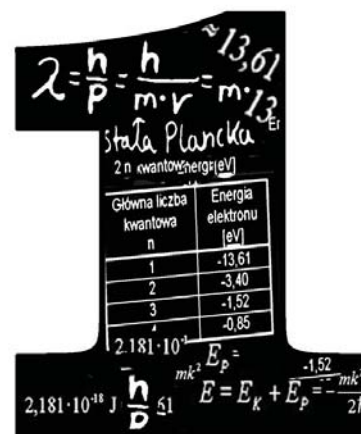
SUKCESY PRAKTYCZNE TEORII BOHRA

Przedstawione przed chwilą problemy, wyjaśnione przez model Bohra, miały charakter bardzo fundamentalny, ale zarazem mało praktyczny. Można powiedzieć, że były one głównym argumentem za tym, że teorię Bohra trzeba traktować dość poważnie. Jak bowiem wspominaliśmy, była to pierwsza niesprzeczna sama ze sobą teoria, która w sposób kompleksowy tłumaczyła sam fakt istnienia atomów.

Kropkę nad i postawiły natomiast rachunki teoretyczne, mające wielkie konsekwencje praktyczne. Z postulatu Bohra można bowiem wyliczyć, jakie energie może mieć elektron, znajdując się na poszczególnych dozwolonych orbitach i tym samym jakie fotony mogą być emitowane przez poszczególne atomy (MT 12/2007). To spostrzeżenie pozwoliło raz na zawsze rozstrzygnąć problem linii widmowych, wytłumaczyć teoretycznie ich położenie w widmie i ostatecznie dowieść, że teoria Bohra jest prawdziwa. Jak pamiętamy, zaskakująco dziwny i właściwie wzięty

z sufitu doświadczalny wzór Rydberga (MT 05/2007), który określał położenie linii widmowych dla atomu wodoru, okazał się prostą konsekwencją postulatu kwantowania Bohra i założenia, że przeskakiwaniu elektronu z orbity na orbitę towarzyszy emisja lub pochłonięcie fotonu o określonej energii. To właśnie teoria Bohra jako pierwsza w sposób dość jasny i prosty, a zarazem dający dobre przewidywania wyników doświadczeń, tłumaczyła, jak oddziałuje ze sobą materia i światło na poziomie atomowym. Do tej pory znane były tylko mechanizmy oddziaływania elektronów ze światłem (zjawisko fotoelektryczne i efekt Comptona). Teraz opis ten był przeniesiony na oddziaływanie z całymi atomami, a dokładniej mówiąc, elektronami w nich uwięzionymi.

Teoretyczne i praktyczne konsekwencje modelu zaproponowanego przez Bohra sprawiały wrażenie kompletności opisu. Takie przedstawienie sukcesów tej teorii przekonuje, że w teorii Bohra jest wiele prawdy o prawach przyrody. Teraz przyszedł czas na przedstawienie wielu sprzeczności teorii Bohra z doświadczeniem, które pokazują, jak tej prawdy jest jednak nadal mało odkryte.



Kropka nad „i”

NATURA BŁĘDÓW MODELU BOHRA

Wszystkie niedoskonałości modelu Bohra są związane z wynikami doświadczeń. Gdybyśmy nie zwracali uwagi na to, jakie wnioski płyną z eksperymentów, to do modelu Bohra nie mogłoby być żadnych zastrzeżeń. Podkreślenie tego faktu jest bardzo ważne, gdyż jest to pierwszy historyczny model budowy atomu, który ma tę własność. Jak już wspominaliśmy, wszystkie wcześniejsze modele były wewnętrznie sprzeczne, bo były niezgodne z prawami fizyki, na których się opierały. Najlepszym przykładem jest oczywiście model Rutherforda, który próbował tłumaczyć budowę atomów za pomocą klasycznych praw, a przy głębszej analizie teoretycznej okazał się całkowicie z nimi sprzeczny. Model Bohra był pozbawiony tej wady. Wszystkie założenia poczynione przy jego konstruowaniu, były zachowane do samego końca. Zatem teoretycznie model ten był pozbawiony jakichkolwiek braków. Miał on jednak bardzo poważne wady doświadczalne – nie wszystkie wyniki doświadczeń były takie, jak przewidywała koncepcja Bohra budowy atomu. Co w takim razie model Bohra wyjaśnia źle?

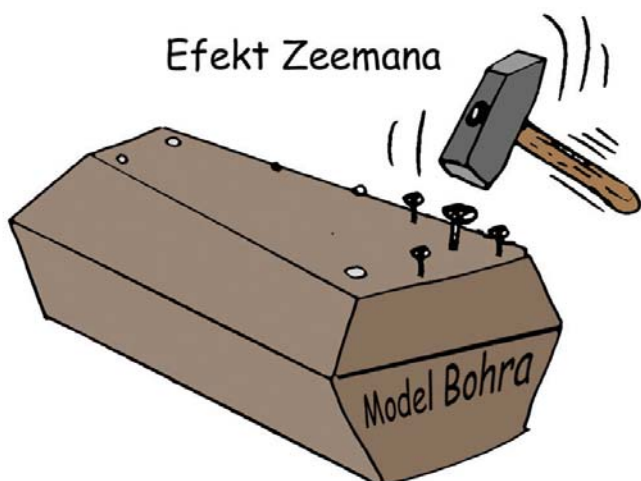
PIERWSZA WPADKA - LINIE WIDMOWE

Główny problem, na którym poległ model Bohra, była próba wyjaśnienia położenia linii widmowych dla atomów zawierających więcej niż jeden elektron. Jak pamiętamy, wielkim sukcesem modelu było wyjaśnienie, dlaczego linie widmowe atomu wodoru spełniają empiryczny wzór Rydberga i dlaczego w ogóle one powstają. Samo zatem się narzucało, aby ten schemat myślenia zastosować do atomów innych pierwiastków. Każdy pierwiastek ma przecież swój indywidualny „odcisk palca” w postaci linii widmowych (MT 05/2007). Skoro model Bohra dobrze przewiduje ich położenie dla wodoru, to dlaczego miałyby być inaczej dla innych pierwiastków? Wydaje się sprawą bardzo prostą uogólnienie bohrowskiego pomysłu na inne atomy. Jedyne, co się przecież zmienia, to liczba protonów w jądrze atomu. Np. gdybyśmy chcieli zastosować model Bohra do atomu helu, należałoby zmienić tylko ładunek jądra (pomnożyć go dwa razy), z którym oddziałują elektrony. Taki zabieg powinien wyjaśnić, dlaczego zmienia się położenie linii widmowych. I rzeczywiście wyjaśnia (zainteresowany Czytelnik powinien wrócić w tym miejscu do wzoru Rydberga i sprawdzić, co stanie się z energiami emitowanych fotonów, gdy jądro atomu będzie miało dwa razy większy ładunek). Model Bohra jednoznacznie przewiduje, gdzie powinny znajdować się linie widmowe helu. Problem jest jednak w tym, że doświadczenie pokazuje, iż znajdują się one w innym miejscu!! Nie ulega żadnej wątpliwości – model Bohra nie potrafi przewidzieć położenia linii widmowych dla innych atomów niż atom wodoru, a czym atom cięższy, tym rozbieżność z doświadczeniem większa.

Dla dociekliwych

W tym miejscu bardziej dociekliwemu Czytelnikowi należy się małe wyjaśnienie. Otóż istnieją atomy (inne niż atom wodoru), dla których model Bohra daje poprawne przewidywania. Są to atomy pozbawione wszystkich swoich elektronów poza jednym. Np. takim atomem jest jednokrotnie zjonizowany atom helu albo dwukrotnie zjonizowany atom litu. Innymi egzotycznymi atomami, dla których sprawdza się model Bohra, są tzw. atomy rydbergowskie. W ramach ćwiczenia proponuję Czytelnikowi poszukanie co to są atomy i dlaczego dla nich ten model działa!

Przedstawiony powyżej problem z opisaniem atomów innych niż atomy wodoru może być mało przekonujący, bo łatwo można sobie dać wmówić,



dlaczego model dla nich nie może poprawnie działać. Wystarczy przecież zauważyć, że nie uwzględniliśmy wzajemnego oddziaływania pomiędzy elektronami w takim atomie i już widać, skąd mogą brać się problemy. Wydaje się zatem, że nie jest to luka w modelu, ale jedynie efekt naszego niedbalstwa. Trudno się spodziewać, że gdy nie uwzględnimy czegoś bardzo istotnego (a takim czymś wydaje się oddziaływanie pomiędzy elektronami), to otrzymamy prawidłowe wyniki. Sytuacja jest jednak dużo gorsza, niż może się wydawać. Model Bohra w pewnych warunkach źle opisuje nawet atom wodoru!!

DRUGA WPADKA - DEGENERACJA POZIOMÓW ENERGETYCZNYCH

Innym, bardzo ważnym mankamentem teorii Bohra jest to, że nie tłumaczy on tzw. degeneracji poziomów energetycznych. Czymże jest ta degeneracja? Otóż jak pamiętamy, zgodnie z modelem Bohra elektron może krążyć po orbicie wokół jądra tylko po szczególnie określonych orbitach. Jak sobie pokazaliśmy, na każdej z takich orbit elektron ma ściśle określoną energię (MT 11/2007). To, że elektron ma określoną energię na orbicie, było bardzo ważnym elementem teorii, bo pozwoliło przewidzieć położenie linii widmowych i pośrednio udowodnić słuszność teorii Bohra. Nikt przecież nie jest w stanie bezpośrednio zaobserwować poziomów energetycznych w atomie. Jedyńm sposobem ich „obserwowania” jest badanie przeskoków elektronów pomiędzy nimi, bo prowadzą do emisji bądź pochłonięcia promieniowania.

Poważnym mankamentem modelu Bohra jest przewidywanie, że na każdej dozwolonej orbicie elektron ma ściśle określoną energię, która jest inna od energii na innych orbitach. Inaczej mówiąc, dla każdej dopuszczalnej energii elektronu istnieje dokładnie jeden ściśle określony jego stan – jedna ściśle określona orbita. Gdzie tkwi więc problem? Otóż doświadczenie przekonuje, że w atomie wodoru dla konkretnej energii może istnieć nawet kilka stanów elektronów. Wygląda to tak, jakby istniało kilka dozwolonych orbit, na których elektron ma dokładnie taką samą energię. W tym miejscu nie jest za bardzo istotne, jak się to sprawdza doświadczalnie. Ważne jest, że tak jest i można to sprawdzić! Właśnie to „zwielokrotnienie” poziomów energetycznych nazywamy DEGENERACJĄ POZIOMÓW.

Dla dociekliwych

Jednym ze sposobów badania degeneracji jest pomiar tzw. czasu życia elektronu w danym stanie, czyli średniego czasu, po jakim elektron samoczynnie przeskoczy z tego stanu do stanu podstawowego. Okazuje się np., że w atomie wodoru istnieją dwa stany o energii $-3,4$ eV (pierwszy stan wzbudzony), których czas życia różni się 100 mln razy!!!

WPADKA TRZECIA (NOKAUT) - EFEKT ZEEMANA

Gwoździem do trumny modelu Bohra okazały się doświadczenia, które były wykonane jeszcze w XIX wieku przez holenderskiego fizyka Pietera Zeemana, kiedy model Bohra jeszcze nie istniał. Doświad-

czenie polegało na obserwowaniu położenia linii widmowych różnych pierwiastków znajdujących się w silnym polu magnetycznym. Zdumiewającym zjawiskiem, jakie zaobserwował Zeeman, było rozszczepianie się linii widmowych pod wpływem tego pola, tzn. gdy atomy znajdowały się pomiędzy silnymi magnesami. To znane Bohrowi zjawisko było kompletnie niewytłumaczalne na gruncie jego modelu. Nawet dla samego Bohra efekt Zeemana był jednym z argumentów, że jego model nie jest doskonały. Okazał się on jednak dużo trudniejszy do przeskoczenia, niż się początkowo wydawało.



Odrzucenie postulatu absolutnego czasu.

Dla dociekliwych

Za odkrycie efektu rozszczepienia linii widmowych pod wpływem pola magnetycznego Pieter Zeeman otrzymał w roku 1902 Nagrodę Nobla z fizyki. Analogiczne doświadczenie polegające na rozszczepieniu linii widmowych pod wpływem pola elektrycznego zostało odkryte w 1913 roku przez Johannes Starka, co w 1919 roku przyniosło mu również Nagrodę Nobla.

JAK OCENIĆ MODEL BOHRA?

Przyszedł czas na postawienie bardzo trudnego pytania: jak należy oceniać model budowy atomu zaproponowany przez Nielsa Bohra? Zapewne Czytelnik ma bardzo mieszane uczucia, bo jak można ocenić teorię, która działa tak samo często, jak nie działa. Działa zresztą w bardzo ograniczonym zakresie (tylko atom wodoru) i tylko w przybliżeniu (brak degeneracji i rozszczepienia). Można powiedzieć, że model Bohra to taka teoria, której prawdziwość jest bardzo wątpliwa. I rzeczywiście z dzisiejszego punktu widzenia ma ona raczej jedynie wartość dydaktyczną. Jest bowiem oparta na bardzo prostych założeniach, które każdy może zrozumieć i pozwala wyznaczać pewne bardzo ciekawe własności atomów. Nie należy jednak za bardzo brać na serio otrzymywanych wyników i nie uważać ich za ostateczną prawdę.

Przy ocenie modelu Bohra należy mieć w pamięci kontekst historyczny, w którym on powstawał. Przed Bohrem ludzie zupełnie nie wiedzieli, dlaczego atomy mogą istnieć i jakie prawa nimi rządzą. Bohr był pierwszym fizykiem atomistycznym, który odważył się powiedzieć, że prawa fizyki klasycznej nie są absolutne i nie muszą obowiązywać. Przed nim takiego samego kroku dokonał tylko Albert Einstein, odrzucając postulat absolutnego czasu. To właśnie dzięki odwadze Nielsa Bohra otwarte zostały drzwi na nieograniczony ocean nowych możliwości – fizykę kwantową.

DZISIEJSZA MECHANIKA KWANTOWA

Na zakończenie warto podkreślić, że mechanika kwantowa, jaką dziś znamy, diametralnie różni się od tej zaproponowanej przez Nielsa Bohra. Jest to teoria o wiele bardziej zaawansowana koncepcyjnie, a prze-

de wszystkim matematycznie. Jest to teoria używająca całkowicie innego, niespotykanego na co dzień, języka. Języka, o którym w szkole nawet się nie wspomina, a studenci fizyki poznają go na trzecim roku nauki. Ta bardzo zaawansowana teoria pozwala wytłumaczyć wszystkie opisane w tym odcinku i wiele, wiele innych doświadczeń. Właściwie można powiedzieć, że dziś nie znamy żadnego doświadczenia, którego nie potrafilibyśmy wytłumaczyć współczesną mechaniką kwantową. Wiele z tych doświadczeń zostało zresztą najpierw przewidziane przez mechanikę kwantową, a później dopiero odkryte i doświadczalnie potwierdzone z niesamowitą dokładnością. Ze względu jednak na wyrafinowane matematycznie sformułowanie tej teorii naszą podróż musimy przerwać w tym miejscu. Warto jedynie zdawać sobie sprawę, że komputera, czytników CD, GPS, odtwarzaczy MP3 i wielu innych fajnych zabawek nie mielibyśmy, gdyby fizycy nie znali tej fundamentalnej teorii opisującej mikroświat – MECHANIKI KWANTOWEJ. ●



Model Bohra ma dziś wartość jedynie dydaktyczną