

Głównym wyzwaniem, jakie stawiamy mechanice kwantowej, jest tłumaczenie zjawisk zachodzących w mikroświecie. Wspominaliśmy już, że efekty tej niezwykłej teorii będą się ujawniały tylko wtedy, gdy doświadczenie jest wykonywane w takich warunkach, że rozmiary przeszkód (lub inaczej rozdzielczość naszej aparatury badawczej) są porównywalne z długością fali materii de Broglie'a odpowiadającej badanemu obiektowi (MT 04/07). Wydawałoby się zatem, że nie jesteśmy w stanie stwierdzić istnienia atomów, które są mniejsze niż niejeden z nas potrafi sobie wyobrazić. Okazuje się jednak, że już na samym początku XIX wieku udało się wykonać eksperymenty, które nie tylko udowodniły istnienie atomów, ale wręcz dały narzędzia pozwalające je rozróżnić. Jak to możliwe?



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.

miotów w idealnej perspektywie. Ta sprytna zabawka pokazała, jak dzięki potędze umysłu każdy może zostać prawie doskonałym architektem i rysownikiem.

Willy Wollaston wykonując bardzo dokładnie doświadczenie Newtona rozszczepienia światła słonecznego, zauważył, że pomiędzy bardzo jasnymi kolorami słonecznej tęczy znajdują się gdzieniedzie

Linie papilarne atomów

Tomasz Sowiński

DOŚWIADCZENIE NEWTONA - REAKTYWACJA

Cała historia zaczyna się w roku 1666 od dobrze nam znanego doświadczenia Newtona z rozszczepieniem światła w pryzmacie. Przypomnijmy, że było to fundamentalne doświadczenie potwierdzające falową naturę światła (MT 03/07). Promieniowanie przepuszczone przez pryzmat, jeśli tylko jest

TEKST TRUDNY



ciemne linie. Oczywiście jako wprawiony i uparty doświadczalnik od razu postawił hipotezę, że jego pryzmat lub ekran, na którym otrzymywał widmo światła, są zanieczyszczone lub uszkodzone. Powtórzył więc doświadczenie kilkakrotnie dla różnych pryzmatów – dużych i małych, dla różnych ekranów – jasnych i ciemnych. Efekt zawsze był identyczny – ciemne miejsca (zwane dziś liniami widmowymi) zawsze znajdowały się pomiędzy tymi samymi kolorami w rozszczepionym widmie. Z tymi doświadczeniami związana jest nawet pewna anegdota. Prawdopodobnie Wollaston tak bardzo nie chciał uwierzyć w istnienie tych ciemnych linii w widmie, że postanowił pojechać na drugi koniec Anglii, aby tam zdobyć odpowiednie pryzmaty i tam powtórzyć swoje doświadczenie. Skutek jednak znów był taki sam – linie widmowe w widmie światła bez wątpienia istnieją!



LINIE FRAUNHOFERA

Niezależnie od Wollastona tego samego odkrycia dokonał w 1814 roku niemiecki fizyk i astronom Joseph von Fraunhofer. On jednak, dzięki zastosowaniu dużo bardziej wyrafinowanych metod, miał możliwość dokładniejszego i ilościowego przeanalizowania widma. Głównym zadaniem, jakie sobie postawił, było zbadanie, w którym dokładnie miejscu widma znajdują się ciemne linie. Aby tego dokonać, Fraunhofer rozszczepione w pryzmacie widmo przepuszczał przez miniteleskop. Dzięki temu uzyskiwał bardzo duży rozkład kątowy rozszczepionego widma. By dodatkowo zwiększyć swoją zdolność percepcji światła (w XIX wieku jedynym przyrządem do rejestrowania światła było oko), wkładał swoją głowę do szczelnie oklejonego pudła i obserwował światło przez małą szczelinę w jednej ze ścianek. Takie właśnie urządzenie: pryzmat + teleskop + szczelina obserwacyjna nazywamy dziś **spektrometrem**.

To, co zauważył Fraunhofer, przeszło jego najśmielsze oczekiwania. Linii widmowych, czyli tych zaćmiennionych miejsc w widmie, było bardzo dużo. Rozłożone jakby zupełnie przypadkowo, jedne jaśniejsze inne ciemniejsze. Niektóre jakby zupełnie czarne. Wykonując to doświadczenie wielokrotnie i w różny sposób, Fraunhofer potwierdził to, co Wollaston chciał jakby powiedzieć, ale nie umiał tego ująć w słowa – eksperymenty wykazują ponad wszelką wątpliwość, że ciemne linie w widmie światła mają swoje źródło w samym świetle i na pewno nie są skutkiem żadnych optycznych złudzeń czy niedoskonałości przyrządów pomiarowych. Światło pochodzące ze Słońca jest mieszaniną promieniowania o wielu barwach, ale z jakiegoś dziwnego powodu natężenie niektórych kolorów jest mniejsze lub nie ma ich w ogóle.

BADANIE ŚWIATŁA PRZY SPALANIU

Kolejną cegiełką w naszej krótkiej opowieści są doświadczenia Gustava Kirchhoffa, które wykonał on w roku 1859 wraz z Robertem Bunsenem. Ci dwaj naukowcy do perfekcji opanowali wytwarzanie kolorowych płomieni poprzez rozgrzewanie do dużych temperatur różnych substancji w palniku wymyślonym przez Bunsena (palniki tego typu dzięki swojej niezawodności są stosowane do dzisiejszych czasów). Zapewne każdy czytelnik widział bardzo efektowne żółtopomarańczowe płomienie powstające podczas rozgrzewania soli kuchennej. Jeśli nie miał takiej okazji, to zachęcam przy zachowaniu dużej ostrożności do „posolenia” płomienia nad kuchenką gazową.

Kirchhoff i Bunsen za pomocą wymyślonego przez Fraunhofera spektrometru obserwowali światło powstające przy nagrzewaniu oparów różnych substancji. Dzięki temu mieli możliwość dokładnego spraw-



Aby dodatkowo zwiększyć swoją zdolność percepcji światła...

zenia, jak ma się światło powstające podczas takiego grzania do światła słonecznego. Okazuje się, że oba rodzaje światła dramatycznie się różnią.

Widmo światła, które powstawało podczas podgrzewania, jest jakby zupełną odwrotnością światła słonecznego. Przypomnijmy, że w tym drugim po rozszczepieniu w widmie znajdują się prawie wszystkie barwy tęczy, a tylko niektórych kolorów jest jakby mniej. Ujawnia się to w postaci owych czarnych linii. Widmo światła powstającego podczas rozgrzewania substancji jest natomiast właściwie całe czarne, a tylko gdzieśgdzie znajdują się wąskie linie o danym kolorze (nazywamy je liniami emisyjnymi danej substancji). Krótko mówiąc, Słońce świeci wszystkimi (poza nielicznymi wyjątkami) kolorami tęczy, a powstające przy spalaniu gazy jedynie niektórymi. Czy istnieje zatem jakkolwiek związek pomiędzy tymi, jakby się zdawało, dwoma typami świecenia?

PODSTAWOWE PRAWA SPEKTROSKOPII KIRCHHOFFA

Odpowiedzi na to pytanie udzielił już sam Kirchhoff, który bardzo szybko zrozumiał, jak należy rozwiązać tę łamigłówkę. Wszystko za sprawą łaskawej przyrody, która podsunęła podpowiedź w najmniej oczekiwanym miejscu. Choć oczywiście bez rozległej wiedzy Kirchhoffa jej odczytanie nie byłoby możliwe.

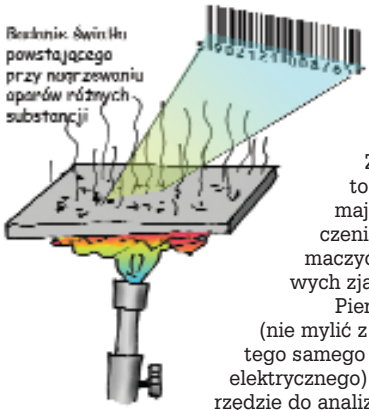
Dogłębna analiza linii widmowych Słońca otrzymanych przez Fraunhofera pozwala zauważyć, że na długości fali 589 nm (takie światło ma barwę żółtopomarańczową) istnieją dwie bardzo wyraźne i blisko siebie położone ciemne linie widmowe. Zostały one nazwane przez Fraunhofera literą D. Okazuje się, że dokładnie takie same dwie linie, dokładnie na tej samej długości fali, znajdują się w widmie podgrzanych do dużej temperatury kryształków sodu. Kirchhoff wiedział, że to nie może być przypadek i postawił bardzo śmiałą hipotezę, że zarówno za świecenie tylko w postaci linii D kryształków sodu, jak i za nieświecenie w tej długości fali Słońca odpowiedzialny jest ten sam mechanizm i jeden pierwiastek sód! Aby potwierdzić tę hipotezę, Kirchhoff musiał wykazać, że również innym ciemnym liniom z widma Słońca odpowiadają linie emisyjne jakichś innych pierwiastków. Okazało się, że rzeczywiście tak jest!

Kirchhoff swoje przemyślenia zawarł w dwóch następujących prawach spektroskopii:





Prawo I: Każdy pierwiastek chemiczny ma charakterystyczny dla siebie rozkład linii emisyjnych,
Prawo II: Każdy pierwiastek chemiczny może absorbować takie promieniowanie, jakie jest w stanie emitować.



Te dwa prawa przez następne sto lat były fundamentem, na którym zbudowano nowoczesną dziedzinę fizyki – spektroskopię. Zauważmy, że choć są to prawa bardzo proste, mają fundamentalne znaczenie, bo pozwalają wytlumaczyć bardzo wiele ciekawych zjawisk.

Pierwsze prawo Kirchhoffa (nie mylić z pierwszym prawem tego samego Kirchhoffa dla prądu elektrycznego) daje bardzo dobre narzędzie do analizowania, z jakich pierwiastków składa się dana substancja.

Aby dokonać takiej analizy, wystarczy ową substancję podgrzać do bardzo wysokiej temperatury i przebadać widmo jej promieniowania. Widmo to będzie się składało z linii emisyjnych tych pierwiastków, które wchodziły w skład tej substancji. A ponieważ każdy pierwiastek ma charakterystyczny dla siebie rozkład linii, to odpowiedź na pytanie „z czego składa się dana substancja” nie może zostać sfalszowana. Linie widmowe są więc czymś w rodzaju „**odcisków palców**” dla atomów.

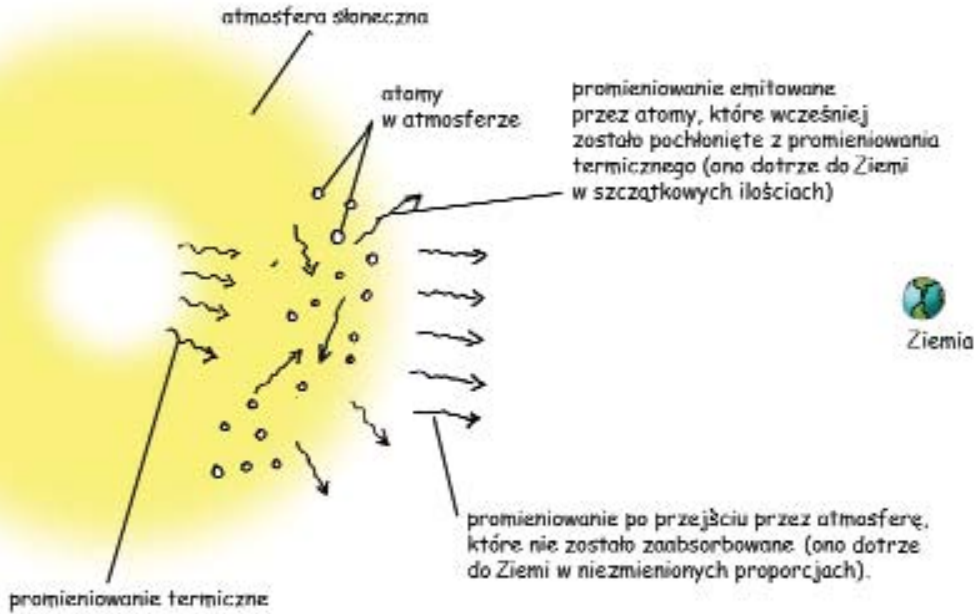
Drugie prawo tłumaczy, dlaczego w widmie Słońca ciemne linie znajdują się dokładnie w tym samym miejscu co linie emisyjne różnych pierwiastków. Jest to po prostu dowód na to, że w górnych warstwach atmosfery Słońca znajdują się właśnie te pierwiastki. Jak już kiedyś wspominaliśmy, powierzchnia Słońca jest bardzo gorąca, dzięki czemu emituje ona

promieniowanie termiczne odpowiadające ciału doskonale czarnemu o takiej temperaturze, jaka jest na powierzchni naszej gwiazdy (MT 12/06). Zgodnie z rozkładem Plancka promieniowanie takie zawiera wszystkie możliwe barwy. Światło wydostając się z powierzchni przedziera się przez atmosferę Słońca, która oczywiście jest niczym innym jak skupiskiem pewnych, a priori nieznanych, substancji. Zgodnie z drugim prawem atomy wchodzące w skład tych substancji mają zdolność pochłaniania takich długości fali promieniowania, jakie są w stanie same emitować. Promieniowanie o odpowiedniej dla danego pierwiastka długości fali jest zatem pochłaniane i dociera do Ziemi znacznie osłabione. Ten fakt obserwujemy jako właśnie ciemne linie w widmie promieniowania słonecznego.

Warto w tym miejscu dla jasności dodać, że promieniowanie pochłonięte przez atomy może oczywiście być również wyemitowane. Emisja ta jednak odbywa się we wszystkich możliwych kierunkach (a nie tylko w kierunku Ziemi). Tym samym do Ziemi dociera rzeczywiście mniej promieniowania, niż dotarłoby, gdyby nie zachodził proces pochłonięcia z emisją. Schematycznie widać to na rysunku u dołu strony.

ODKRYCIE KOSMICZNEGO PIERWIASTKA

Można powiedzieć, że istnienie ciemnych linii w widmie promieniowania słonecznego jest dowodem na to, że na Słońcu znajdują się pierwiastki, które im odpowiadają. Uzmysłowanie sobie tego faktu było nie tylko odkryciem naukowym, ale również wielkim przełomem filozoficznym. Od tamtej pory wiemy bowiem, że ten kosmiczny olbrzym, Słońce, składa się dokładnie z takiej samej materii jak ciała na Ziemi. W atmosferze Słońca bez wątpienia istnieją takie powszechnie znane pierwiastki jak wodór, wapń, rtęć, itd... Odpowiadające im linie widmowe są bowiem odciskiem w widmie promieniowania naszej gwiazdy.



Linie widmowe są czymś w rodzaju „odcisków palców” dla atomów.

W roku 1868 podczas całkowitego zaćmienia Słońca w Indiach francuski astronom Pierre Janssen zauważył w widmie promieniowania korony słonecznej ciemną linię widmową o długości fali 587,6 nm, która nie pasowała do żadnego z ówczesnie znanych pierwiastków chemicznych. Niespełna dwa miesiące później istnienie tej tajemniczej linii widmowej zostało potwierdzone przez innych astronomów. Tym sposobem odkryto, że na Słońcu znajduje się pewien dziwny pierwiastek, który nie występuje na Ziemi. Pierwiastek ten nazwano HELLIUM (po polsku HEL) na cześć greckiego boga Słońca Heliosa.

Dopiero w roku 1895 udało się odkryć hel na Ziemi, który występuje na naszej planecie w śladowych ilościach. Na Słońcu jest go przeszło 24% i jest drugim po wodorze (73%) głównym składnikiem, z którego składa się nasza najbliższa gwiazda.

Stwierdzenie doświadczalne faktu, że na gwiazdzie oddalonej o 150 mln km od Ziemi znajdują się pierwiastki dokładnie takie same jak na Ziemi i przede wszystkim odkrycie nowego pierwiastka helu najpierw na Słońcu, a później na Ziemi, są niewątpliwym triumfem praw spektroskopii Kirchhoffa. Do dziś jest to jedyna dostępna nam metoda badania odległych od naszego Układu Słonecznego gwiazd. Nie mamy bowiem obecnie, i w moim przekonaniu jeszcze bardzo długo nie będziemy mieli, żadnych innych możliwości badania odległych obiektów kosmicznych jak tylko poprzez obserwowanie promieniowania, które do nas dociera. A fakt, że tylko dzięki obserwacjom światła dowiedzieliśmy się już tak dużo o Wszechświecie (wiemy np. z czego zbudowane są konkretne gwiazdy, jak długo będą świecić, czy są stare, czy młode, itd.), jest niewątpliwym sukcesem współczesnej nauki.

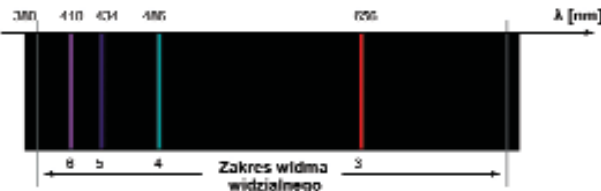
CO NA TO WSZYSTKO FIZYK TEORETYK?

Choć opowieść ta może wydać nam się już kompletna, bo zakończyła się wielkim triumfem nauki doświadczalnej, to jako fizyk teoretyk nie mogę się zgodzić, aby opowiadanie zakończyć już w tym momencie. Sam bowiem fakt, że coś udało nam się zrozumieć na gruncie doświadczalnym, nie oznacza, że powinniśmy odetchnąć z ulgą i uznać, że wszystko jest jasne. Bo pytanie, jakie rodzi się od razu w głowie, brzmi: **właściwie dlaczego atomy miałyby mieć taką możliwość, że emitują promieniowanie?** A jeśli zadaliśmy już to pytanie, to od razu nasuwa się kolejne: **Jaka to zdumiewająca własność sprawia, że atomy mogą emitować promieniowanie tylko o określonej długości fali, a nie w postaci całego widma?** Sam fakt, że każdy pierwiastek ma swój „odcisk palca”, który jest unikalny i niepowtarzalny, brzmi przynajmniej tajemniczo, a na pewno nie jest wytłumaczony przez prawa Kirchhoffa. Czy istnieje jakiś powód, że linie widmowe różnych pierwiastków mają właśnie taki, a nie inny rozkład linii widmowych?

WZÓR BALMERA

Pierwszą osobą, która rzuciła światło na tak postawione pytania, był szwedzki fizyk i matematyk Johann Balmer, który gruntownie przestudiował widmo emisyjne najbliższego pierwiastka WODORU. Wo-

dór ma bardzo proste widmo emisyjne, które składa się (w widzialnej części promieniowania) jedynie z czterech linii. Schematyczne widmo wodoru przedstawia poniższy rysunek:



Linie widmowe atomu wodoru odkryte przez Johanna Balmera w 1885 roku

Balmer zauważył, że długości fali odpowiadające kolejnym liniom emisyjnym wodoru mogłyby być ze sobą połączone w jednym wzorze. Otóż jeśli oznaczymy linie widmowe liczbami naturalnymi od 3 do 6 (patrz rysunek), to długości odpowiadającej im fali można wyliczyć ze wzoru

$$\lambda = \Lambda \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

gdzie $\Lambda = 364,6$ nm to tzw. długość Balmera, a n to numer porządkowy linii widmowej. Czytelnik łatwo sprawdzi, że rzeczywisty wzór ten odtwarza położenie linii widmowych dla wodoru. Ale oczywiście wzór ten nie miałby swojej wartości naukowej (bo do każdego danego doświadczalnych można dobrać bardzo wiele różnych wzorów), gdyby nie fakt, że posiada on kilka niepodważalnych i ciekawych własności.

Po pierwsze, zauważmy, że gdyby istniały inne linie widmowe wodoru i wzór Balmera byłby prawdziwy, to rzeczywiście nie moglibyśmy ich zauważyć. Czytelnik łatwo bowiem sprawdzi, że dla liczb naturalnych spoza zakresu 3...7 otrzymana długość fali albo nie ma sensu (tak jest dla $n=1$ i $n=2$), albo leży poza widzialną częścią promieniowania i nie może być zaobserwowana przez ludzkie oko. Linia widmowa o $n=7$ leży na granicy obszaru widzialności i również bardzo trudno byłoby ją zauważyć.

Po drugie, okazuje się, że podobny wzór można napisać dla innych pierwiastków i właściwie nie będzie się on zasadniczo różnił od tego napisanego dla wodoru. Jediną różnicą może być jedynie wartość stałej Λ i ew. inna liczba naturalna stojąca w mianowniku wyrażenia (zamiast 4). Notabene okaże się, że liczba ta może być tylko kwadratem innej liczby naturalnej.

Na koniec dodajmy, że dla wodoru za pomocą bardzo wyrafinowanych metod udało się zaobserwować linie widmowe spoza zakresu widzialnego dla $n > 6$ i ich położenie jest dokładnie takie, jak przewiduje wzór Balmera.

CO TO WSZYSTKO ZNACZY?

W ocenie ówczesnych fizyków nie ulegało żadnym wątpliwości, że za wzorem Balmera stoi jakieś tajemnicze prawo przyrody, które jeszcze nie zostało odkryte. Prawo, które będzie coś więcej mówiło o atomach niż tylko to, że emitują i pochłaniają promieniowanie. Jakie to prawo? ●