



## „Dziwny jest ten świat”

*Krzysztof Sacha*

*Instytut Fizyki UJ*

Rozwój nauki, w szczególności fizyki, przyczynił się do ogromnego postępu technologicznego, którego świadkami jesteśmy w dzisiejszych czasach. Odkrycia naukowe pozwalają łatwiej żyć, mniej chorować, szybciej podróżować, mieć nieograniczony dostęp do informacji. Nauka oprócz praktycznego wymiaru ma jednak jeszcze jedno oblicze – kształtuje światopogląd. Oba wymiary odkryć naukowych przeplatają się wzajemnie, często trudno uświadomić sobie, że to, jak widzimy i odbieramy otaczający nas świat, zależy od tego, jak wiedza ukształtowała nasz światopogląd. Przykłady można oczywiście mnożyć. Przypomnijmy choćby dzieło Mikołaja Kopernika. Dzisiaj czymś naturalnym jest, że Ziemia i inne planety Układu Słonecznego krążą wokół Słońca, ale pamiętajmy, że wiele pokoleń (aż do XVI wieku) żyło i umierało ze świadomością, że Ziemia jest centrum Wszechświata.

Z lekcji fizyki wszyscy znamy prawo ruchu Newtona

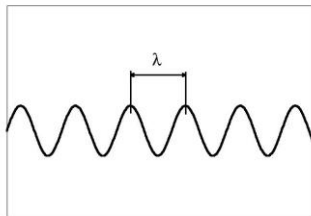
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}, \quad (1)$$

które wiąże przyspieszenie  $\vec{a}$  ciała o masie  $m$  z siłą  $\vec{F}$  przyłożoną do tego ciała. Prawo Newtona pozwala obliczyć położenie i prędkość ciała w chwili późniejszej pod warunkiem, że znamy położenie i prędkość w chwili obecnej. Dzięki Newtonowi możemy wyznaczyć ruch rzuconej piłki, ruch samochodów, planet, statków kosmicznych i wielu innych ciał. To z pozoru niewinne prawo ma jednak daleko bardziej idące konsekwencje. Wynika z niego, że jeżeli znamy terażniejszość, jesteśmy w stanie przewidzieć przyszłość. Oczywiście w praktyce nie jest to możliwe, ponieważ nie potrafimy dokładnie „zmierzyć terażniejszości”. Nawet najbardziej precyzyjny przyrząd dokonuje pomiaru ze skończoną dokładnością, a więc i „teraźniejszość” jesteśmy w stanie określić tylko z pewnym błędem. Początkowy błąd – nawet bardzo mały – szybko będzie się powiększał i po krótkim czasie okaże się, że o jakimkolwiek przewidywaniu przyszłości nie może być mowy.

Nie jesteśmy w stanie przewidzieć przyszłości, bo nie potrafimy zmierzyć dokładnie „stanu terażniejszości”, jednak reperkusje prawa Newtona pozostają. Teraźniejszość jest określona nawet bez naszej wiedzy, a więc i przyszłość jest już ustalona. Nic nie potrafimy zmienić, bo wszystko zostało już ukartowane. Można by takie wnioski wyciągać, gdyby mechanika klasyczna była ostateczną teorią opisującą nasz świat. Istnieje jednak bardziej fundamentalna teoria, której konse-

kwencje są odmienne. Teoria ta nosi nazwę „mechanika kwantowa” (bądź „mechanika falowa”). Aby wyjaśnić choć w przybliżeniu mechanikę kwantową, musimy przypomnieć sobie, co to jest fala.

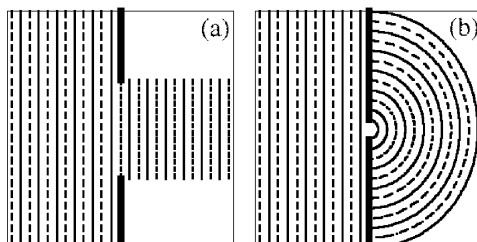
Z falami spotykamy się na co dzień: gdy rzucimy kamień do wody, mówimy, że na wodzie rozchodzą się fale mechaniczne, słyszymy dzięki falom dźwiękowym, widzimy tylko dlatego, że istnieją fale elektromagnetyczne, choć czasem trudno nam uwierzyć, że za zmysł widzenia odpowiedzialne są fale. Światło wydobywające się z latarki skłonni byśmy traktować raczej jako wiązkę promieni, które kończą swoją propagację, kiedy trafią na przeszkodę, niż jako rozchodzącą się falę. Zupełnie inaczej postrzegamy dźwięk – nie musimy zwracać się w kierunku konkretnej osoby, aby nas ona usłyszała, dźwięk bowiem rozprzestrzenia się wszędzie. Co wyróżnia zatem tak odmienne postrzeganie dźwięku i światła? Różnica leży w wartości parametru zwanego długością fali. Jeśli zrobilibyśmy zdjęcie fali (**rysunek 1**), to odległość między dwoma sąsiednimi maksimami jest właśnie długością fali  $\lambda$ .



**Rysunek 1.** Rysunek przedstawia wykres fali w przestrzeni w pewnej chwili w czasie. Odległość między sąsiednimi maksimami, jak zaznaczono na rysunku, odpowiada długości fali  $\lambda$

Jeśli fala trafia na przeszkodę (lub przechodzi przez otwór), której rozmiary są znacznie większe niż długość fali, jak ma to miejsce w przypadku światła padającego na otaczające nas przedmioty, propagację fali możemy traktować jako propagację promieni (**rysunek 2a**). Jeśli natomiast wielkość przeszkody staje się porównywalna z długością fali (dźwięk), opis przy użyciu promieni załamuje się, ponieważ fala ulega silnemu ugięciu na przeszkodzie (**rysunek 2b**). O naturze falowej światła możemy się łatwo przekonać, gdy popatrzymy na źródło światła przez bardzo wąską szczelinę wykonaną np. z aluminiowej folii naciętej zyletką. Światło, przechodząc przez szczelinę, ulega „rozmazaniu”, można nawet zaobserwować jasne i ciemne prążki dyfrakcyjne. Ciekawe jest to, że ewolucja wybrała dla nas dwa bardzo różne narzędzia komunikacji: dźwięk, który nie pozwala na określenie dokładnego położenia, ale świetnie nadaje się do przekazywania infor-

macji między ludźmi, i światło, które znakomicie pozwala określić położenie obiektów, ale jest mniej wygodne do komunikacji, ponieważ w tym przypadku konieczny jest wzrokowy kontakt między osobami.



**Rysunek 2.** Część (a) przedstawia propagację fali przez otwór w przesłonie, którego rozmiary są znacznie większe niż długość fali. Fala praktycznie nie ulega ugięciu, zatem w pełni usprawiedliwione jest użycie pojęcia „promień” w tym przypadku. W części (b) prezentowana jest sytuacja, gdy rozmiar otworu staje się porównywalny z długością fali. Fala ulega silnemu ugięciu i nie możemy powiedzieć, że – tak jak w części (a) – wiązka równoległych promieni przechodzi przez otwór w przesłonie

Jeśli wokół nas jest tyle różnych fal (mechaniczne, akustyczne, elektromagnetyczne), to naturalne staje się pytanie, czy materia – coś namacalnego i trwałego – to również fala? Pytanie takie zadał na początku XX wieku francuski fizyk Louis de Broglie, stawiając następnie hipotezę, że z ruchem ciała o masie  $m$  i prędkością  $v$  związana jest fala o długości

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (2)$$

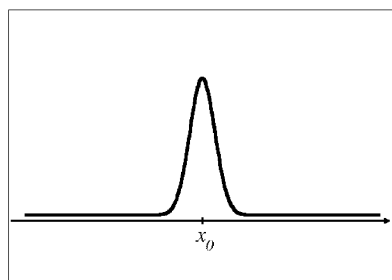
gdzie  $h$  jest tzw. stałą Plancka. W kilka lat później Davisson i Germer przeprowadzili doświadczenie, podczas którego zaobserwowali interferencję fal materii, kiedy wiązka elektronów przechodziła przez wąskie szczeliny, jakie tworzyły płaszczyzny sieci krystalicznej. Był to tego typu obraz, jaki można obserwować, patrząc na źródło światła przez wąską szczelinę.

Jeśli elektrony mogą zachowywać się jak fala, rodzi się pytanie, dlaczego rozglądając się dookoła, nie widzimy efektów interferencji np. krzesła z taborettem? Odpowiedzi należy szukać w wartości długości fali  $\lambda$ . Upraszczając znacznie rzeczywistą sytuację, założmy, że jestem ciałem punktowym o masie  $m = 70$  kg, które porusza się z prędkością  $v = 1$  m/s. Ze względu na to, że stała Plancka ma bardzo małą wartość ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J s), długość fali związanej ze mną jest niezwykle mała, wynosi  $\lambda = 9,4 \cdot 10^{-34}$  cm. Jest to niewyobrażalnie mała wartość – dla przykładu rozmiar najmniejszego atomu jest 10 bilion bilionów razy większy! Gdy porównamy długość fali z rozmiarami otaczających nas obiektów, nie po-

winniśmy się dziwić, że patrząc na siebie nawzajem, nie obserwujemy efektów falowych. Zupełnie wystarczy, jeżeli będziemy mówić, że poruszamy się jak „promienie”.

Przyczyną małej wartości  $\lambda$  jest duża masa: 70 kg to ogromna wartość, jeżeli porównamy ją z masą elektronu równą  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg. Uważny czytelnik zauważy, że z wzoru (2), wynika iż zmniejszenie prędkości  $v$ , z jaką się poruszamy, powoduje zwiększenie długości fali  $\lambda$ . Załóżmy, że chcemy zmniejszyć prędkość na tyle, żeby długość fali stała się porównywalna z szerokością drzwi. Wymagana w tym przypadku prędkość musiałaby być tak mała, że pokonanie odległości równej kilku metrom zajęłoby nam nieporównywalnie więcej czasu niż wiek Wszechświata. Utwierdza to nas w przekonaniu, że nie jesteśmy w stanie zaobserwować efektów falowych otaczających nas obiektów za pomocą zmysłów.

Pozostaje jeszcze pytanie, co to są fale materii? Fale na wodzie to zaburzenie rozchodzące się w cieczy, w przypadku fali dźwiękowej mamy do czynienia z zaburzeniem rozchodzącym się w powietrzu. Fale elektromagnetyczne nie wymagają żadnego ośrodka do rozchodzenia się, ponieważ są to drgania pola elektrycznego i magnetycznego. Cóż to są więc fale materii? Odpowiedź jest nie mniej szokująca niż sam fakt, że w odniesieniu do materii zaczęliśmy używać pojęcia „fala”. Otóż okazuje się, że fale materii należy traktować jako fale prawdopodobieństwa! Oznacza to, że jeśli zapytamy, gdzie w danej chwili znajduje się pewne ciało, to nie jesteśmy w stanie podać definitywnej odpowiedzi. Możemy jedynie stwierdzić, z jakim prawdopodobieństwem w danym miejscu możemy je zaobserwować. Położenia elektronu nie da się zaznaczyć przez nakreślenie jednego punktu w przestrzeni. Możemy powiedzieć, że elektron jest zlokalizowany wokół pewnego punktu, tylko wtedy gdy prawdopodobieństwo wokół tego punktu przyjmuje dużą wartość, a w pozostałym obszarze jest znikomo małe (**rysunek 3**).



**Rysunek 3.** Wykres amplitudy fali prawdopodobieństwa w przestrzeni. Duża wartość amplitudy wokół punktu  $x_0$  oznacza, że cząstka z dużym prawdopodobieństwem jest zlokalizowana wokół punktu  $x_0$

Z prawa Newtona wynika, że znając terażniejszość, możemy przewidzieć przyszłość. Okazuje się jednak, że nie potrafimy dokonać dokładnego pomiaru „stanu terażniejszości”, a więc i przewidywanie przyszłości wymyka się nam. Oczywiście terażniejszość jest określona nawet bez naszej wiedzy, a więc przyszłość jest już zdeterminowana. Powiedzieliśmy także, że istnieje teoria bardziej fundamentalna niż teoria Newtona, nosząca nazwę mechaniki kwantowej. W ramach mechaniki kwantowej już sama terażniejszość o jakiej myślał Newton, nie jest określona, cóż więc mówić o przyszłości?

Mechanika kwantowa z pewnością może wydawać się absurdalną, ponieważ przywykliśmy do tego, jak wygląda świat postrzegany zmysłami. Mogę zapewnić, że elektron też na pewno bardzo by się „zdziwił”, gdyby mógł spojrzeć na świat naszymi oczami. Siła przyzwyczajenia jest ogromna. Trzeba wysiłku, żeby wyrwać się z przyzwyczajenia i zobaczyć świat inaczej, świat różnorodny, bogatszy, niesamowity. Aby rozumieć fizykę i ujrzeć jej piękno, musimy być wytrwali. Trzeba sporo wysiłku, żeby wejść na szczyt, ale widok, który wtedy się otwiera, jest niesamowity, czego wam wszystkim serdecznie życzę.

[1] G. Białkowski, *Mechanika Kwantowa – o czym to jest?*, WSiP, Warszawa 1989