

W XX wieku fizyka zdecydowanie wykroczyła poza zasięg zjawisk dostępnych bezpośrednio postrzeganiu zmysłowemu. Niemal automatycznie pociągnęło to za sobą utratę naoczności wielu koncepcji pojęciowych fizyki współczesnej. Popularyzatorzy fizyki starają się oczywiście zrobić na tym interes i przedstawiają niektóre trudniejsze zagadnienia w sposób paradoksalny. Czytelnik, któremu się mówi na przykład, że fizyka nie wie, czym jest elektron — cząstką czy falą — albo patrzy na tę naukę z pogodnym sceptycyzmem, albo oburza się i usiłuje sposobem chałupniczym wymyślić jakąś nową teorię. W każdym razie jest on skutecznie zaszczerpiony przeciwko próbom prawidłowego wyjaśnienia mu tego „paradoksu”. Tymczasem problem „cząstki czy fale?” narodził się bardzo dawno, jeszcze w końcu XVII wieku. W r. 1678 Christian Huyghens przedłożył Akademii Paryskiej swój *Traktat o świetle*, w którym wypowiedział pogląd, że światło ma naturę falową (uważał on, że są to fale podłużne, ale ten element został skorygowany po odkryciu zjawiska polaryzacji światła). Nieco wcześniej Newton wydał swoją *Optykę*, w której zajął stanowisko przeciwne. Według niego światło to strumień cząstek emitowanych przez widziane obiekty. Należy zresztą podkreślić, że sam Newton sformułował tę hipotezę w sposób bardzo ostrożny, ale jego autorytet był tak wielki, iż jego następcy trzymali się jej w sposób znacznie bardziej dogmatyczny niż jej twórca.

Obie hipotezy współlistniały w ciągu wieku XVIII, a w pierwszych jego dziesięcioleciach wykonano szereg doświadczeń (między innymi słynne eksperymenty Younga), które wykazały, że istotnie światło ma naturę falową. Po wynalezieniu siatki dyfrakcyjnej można już było mierzyć długość fal świetlnych z rosnącą dokładnością. W tej sytuacji nawet najbardziej zagorzali zwolennicy teorii Newtona musieli złożyć broń i wydawało się, że sprawa jest ostatecznie rozstrzygnięta. Tym bardziej, że udało się, dzięki Maxwellowi, włączyć zjawiska świetlne do obszernej i pięknej teorii elektromagnetyzmu.

Jednakże na przełomie XIX i XX stulecia, głównie dzięki pracom Lenarda, wykryto i wstępnie zbadano zjawisko fotoelektryczne. Polega ono, jak wszyscy wiemy, na tym, że światło padające na powierzchnię ciała wybija zeń elektrony, przy czym energia tych fotoelektronów nie zależy od natężenia światła, zależy natomiast od długości jego fali. Z punktu widzenia teorii falowej jest to wynik zupełnie niezrozumiały, energia w ruchu falowym jest bowiem proporcjonalna do kwadratu amplitudy drgań, natomiast nie ma żadnego związku z długością fali. W r. 1905 Einstein, wykorzystując wprowadzone kilka lat wcześniej przez Plancka pojęcie kwantu energii, wyjaśnił zjawisko fotoelektryczne zakładając, że światło jest strumieniem fotonów — a więc pewnych cząstek, których energia jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali odpowiedniego światła, jest zatem wprost proporcjonalna do jego częstości. Tak więc okazało się, ku powszechnemu zaskoczeniu, że część zjawisk związanych ze światłem wyjaśnia teoria falowa, a część teoria korpuskularna. (Dotyczy to oczywiście nie tylko fal świetlnych, ale w ogóle wszystkich fal elektromagnetycznych). Można by skrótowo, a więc niezbyt precyzyjnie, powiedzieć, że foton jest emitowany i absorbowany jak cząstka, a rozchodzi się jak fala.

Aby lepiej sobie uzmysłowić istotę problemu, przed którym stanęła fizyka, przypomnijmy sobie, że rozchodzenie się fal można wyjaśnić zasadą Huyghensa. Weźmy pod uwagę czoło fali. Zgodnie z zasadą Huyghensa każdy punkt jej powierzchni jest źródłem rozchodzącej się fali kulistej, a więc fali, której czołem jest powierzchnia kuli. Biorąc pod uwagę, że dotyczy to każdego punktu, widać, iż nowe czoło fali będzie obwiednią wszystkich czoł fali cząstkowych. Rozpatrzmy teraz pojedynczy atom emitujący foton, czyli falę świetlną. Zgodnie z zasadą Huyghensa fala ta będzie się rozchodzić jednakowo we wszystkich kierunkach, jeśli ośrodek otaczający rozważany atom jest izotropowy optycznie. Otoczmy emitujący atom urządzeniami rejestrującymi fotony. Przekonamy się, że w pewnej chwili wyemitowany foton zostanie pochłonięty przez jedno z tych urządzeń. Mimo więc tego, że odpowiednia fala rozchodziła się jednakowo we wszystkich kierunkach, jeden z nich został jednak wyróżniony przez fakt, iż znajduje się on na linii łączącej emitujący atom z urządzeniem, które zarejestrowało foton. Jeżeli jednak będziemy to doświadczenie powtarzać, przekonamy się, że w rzeczywistości żaden kierunek nie jest wyróżniony, gdyż po pewnym czasie w każdym kierunku liczba zarejestrowanych fotonów będzie taka sama. Nic dziwnego — odpowie mi na to Czytelnik — Po prostu indywidualny foton jest emitowany zawsze w określonym kierunku, ale każdy na ogół w innym, wobec tego dla dużej liczby fotonów zaobserwujemy rozkład izotropowy.





Rozwiązanie zadania F 22

Warunek stabilności konstrukcji ceglanej jest oczywisty: położenie środka ciężkości żadnego zespołu cegieł nie może wystawać w poziomie poza podstawę cegły, na której ten zespół bezpośrednio się opiera.

Zadanie najłatwiej rozwiązać konstruując budowlę „od góry”. Wyobraźmy sobie N cegieł ustawionych pionowo, jedna na drugiej.

Kolejno, zaczynając od góry, każdą cegłę, wraz z cegłami ustawionymi na niej, przesuwamy w kierunku poziomym o pewien odcinek.

Długość tego odcinka wyznaczamy ze wspomnianego warunku na położenie środka ciężkości. Za jednostkę długości przyjmijmy połowę długości cegły L .

Pierwszą cegłę „od góry” możemy wysunąć o połowę jej długości. Drugą cegłę „od góry” możemy wysunąć na odcinek x_2 licząc od krawędzi podstawy trzeciej cegły, gdzie x_2 spełnia równanie:

$$\frac{m \cdot x_2 + m \cdot (x_2 - L)}{2m} = 0, \quad (m - \text{masa cegły})$$

Stąd, $x_2 = L/2$, tzn. drugą cegłę wysuwamy o $1/4$ jej długości. Natomiast koniec pierwszej cegły wystaje poza podstawę o odcinek $x_1 + x_2 = 3/2L$.

Odpowiedni warunek dla trzeciej cegły wynosi:

$$\frac{2m \cdot x_3 + m(x_3 - L)}{2m + m} = 0 \rightarrow x_3 = \frac{1}{3} L$$

Ogólnie, i -tą cegłę możemy wysunąć o odcinek x_i , taki że

$$\frac{(i-1)m \cdot x_i + m(x_i - L)}{(i-1)m + m} = 0 \rightarrow x_i = \frac{1}{i} L.$$

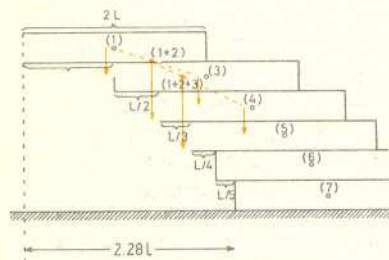
Ostatecznie, po odpowiednim przesunięciu N cegieł, koniec pierwszej cegły zostanie wysunięty na odległość:

$$x = \sum_{i=1}^{N-1} x_i = L \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{i}.$$

Uwaga: otrzymany szereg (tzw. szereg harmoniczny) jest rozbieżny:

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{i} \approx \ln N + 0,5772.$$

Teoretycznie, dysponując nieskończoną wieloma cegłami moglibyśmy je tak ustawić, że koniec ostatniej cegły byłby nieskończenie odległy od podstawy cegły „na dole”, a cała konstrukcja nie runęłaby pod wpływem własnego ciężaru. Wartości x dla skończonej liczby cegieł wynoszą przykładowo: dla $N = 6$ $x \approx 2,28 L$ (patrz rysunek), dla $N = 100$ $x \approx 4 L$. Natomiast, ustawienie takiego stosu cegieł, żeby ostatnia wystawała na co najmniej 3 długości cegły, wymagałoby już użycia wszystkich cegieł z wielopiętrowego budynku.



Rozumowanie takie nie jest jednak poprawne. Po pierwsze, z założenia rozważaliśmy zbiór jednakowych atomów, jednakowo usytuowanych przestrzennie, wydawałoby się zatem — zgodnie z zasadą przyczynowości — że wszystkie te atomy emitują światło jednakowo, a więc między innymi w tym samym kierunku. Chcąc utrzymać taką interpretację zjawiska, należałoby przyjąć, że istnieją jakieś dodatkowe, charakteryzujące przebieg tego zjawiska, ukryte zmienne, których na obecnym etapie rozwoju fizyki jeszcze nie znamy. Wówczas pozornie takie same atomy, różniące się wartością tego ukrytego parametru (czy parametrów), emitowałyby światło w różnych kierunkach.

I to jednak rozumowanie zawodzi. Powtórzmy klasyczne doświadczenie Younga. W doświadczeniu tym, jak wiadomo, źródło światła spójnego oświetla dwa otwory w nieprzezroczystej przysłonie, za którą w pewnej odległości znajduje się ekran. Na ekranie tym pojawia się wówczas, jak wiemy, pewien układ plam jasnych i ciemnych, których położenie i jasność możemy całkowicie opisać stosując zasady falowej teorii światła. Istotnymi cechami tego obrazu jest to, że oświetlone są także niektóre części ekranu, które pozostałyby w cieniu, gdyby światło rozchodziło się po liniach prostych, oraz to, że jeżeli zasłonimy jeden z otworów, cała struktura tego obrazu ulega radykalnej zmianie. W szczególności można się przekonać, że obraz obserwowany przy dwu otworach odsłoniętych nie jest sumą dwu obrazów uzyskanych przez kolejne przysłanianie jednego z otworów i odsłanianie drugiego.

Tak więc w zjawisku, jeśli się można tak wyrazić, biorą udział dwa podstawowe mechanizmy falowe: ugięcie na krawędziach otworów oraz interferencja dwu fal biegnących z dwu otworów. W rezultacie sumują się nie natężenia światła pochodzącego z każdego z dwu otworów, lecz same fale, które w pewnych miejscach wygaszają się, a w pewnych wzmacniają.

Gdybyśmy chcieli przebieg tego zjawiska opisać w ramach teorii korpuskularnej światła, musielibyśmy przyjąć, że foton w jakiś sposób biegnie ku obu otworom naraz, przechodzi przez oba otwory naraz, ugina się na ich krawędziach, po czym „materializuje się” na ekranie w jego określonym punkcie. Nie wiemy z góry, który to będzie punkt. Wiemy tylko, jakie jest prawdopodobieństwo, że właśnie ten punkt zostanie wybrany przez foton. Prawdopodobieństwo to jest tym większe, im większe natężenie światła obserwujemy w danym punkcie przeprowadzając doświadczenie Younga. Jeśli liczba fotonów jest bardzo duża, układają się one na ekranie wedle praw statystycznych: w miejscach jaśniejszych jest więcej fotonów niż w ciemniejszych. To, co z punktu widzenia pojedynczego fotonu jest określone tylko jako pewne prawdopodobieństwo, składa się na całkowicie zdeterminowany obraz interferencyjny. Można by więc powiedzieć, że „tor” pojedynczego fotonu jest wyznaczony w sposób statystyczny, ale prawdopodobieństwo wyboru takiego „toru” jest ściśle zdeterminowane przez warunki doświadczalne.

Opisane tu rozumowanie zawiera szereg milczących założeń, jak na przykład to, że możemy operować pojedynczymi fotonami, przedstawia więc daleko posuniętą ekstrapolację rzeczywistych warunków eksperymentalnych. Jednakże podstawowa idea na tym nie cierpi.

W latach dwudziestych naszego stulecia, dzięki pracy jednego właściwie pokolenia fizyków, wśród których należy wymienić przede wszystkim Bohra, de Broglie’a, Schrödingera, Heisenberga, Diraca, Pauliego i Borna, powstała mechanika kwantowa. Opiera się ona na idei, że fotony nie są wyróżnionymi obiektami fizycznymi wykazującymi dwoistą naturę falowo-korpuskularną, lecz że jest to powszechna właściwość materii. Innymi słowy, każdy obiekt na przykład elektron, proton, jądro atomowe czy też atom, jest zarazem i cząstką, i falą. Albo też może należałoby powiedzieć: ani cząstką (klasyczną), ani też falą (klasyczną), lecz czymś nowym, co można by nazwać cząstką falową. Idea ta została wielokrotnie potwierdzona eksperymentalnie. Zaobserwowano zjawiska interferencyjne dla strumienia elektronów czy też neutronów. Dzięki tym zjawiskom możliwe było skonstruowanie tak ważnych narzędzi, jak na przykład mikroskop elektronowy. Cząstka falowa, gdy badamy ją przy pomocy pewnego przyrządu, ujawnia nam jedną z dwu swoistych „twarzy”: przedstawia się albo jako cząstka, albo też jako fala. Obie te „twarze” cząstki falowej są w niej jednak zawsze jednocześnie obecne. Łatwość dostrzeżenia w doświadczeniu jednej z tych „twarzy” zależy jednak od tego, jaka długość fali odpowiada danej cząstce falowej.

Weźmy na przykład zjawisko ugięcia. Wiemy, że rozmiary stożka ugięcia przy przechodzeniu światła przez otwór są tym mniejsze, im mniejsza jest długość fali świetlnej. W miarę więc jak zmniejsza się długość fali światła, maleje też prawdopodobieństwo zaobserwowania fotonu, który odchyła się w wyniku ugięcia od kierunku prostej łączącej źródło światła z otworem. Foton taki rozchodzi się więc „prawie” jak klasyczna cząstka. To samo dotyczy też innych cząstek falowych,



takich jak elektrony czy nukleony, jądra atomowe czy atomy, cząsteczki czy wreszcie makroskopowe bryłki materii. Rzecz w tym, że w miarę jak przechodzimy tym szeregiem w tej kolejności, w której go tu przedstawiliśmy, przechodzimy — przy ustalonej prędkości obiektu — do coraz to mniejszych długości fal. Na przykład długość fali bryłki materii o masie jednego grama, poruszającej się z prędkością rzędu 1 cm/s, wynosi około 10^{-16} cm! Tego więc rzędu są wielkości charakteryzujące na przykład rozmiary stożka ugięcia. W praktyce znaczy to, że obiekt taki porusza się po prostu po liniach prostych i jego własności falowe są dla nas zupełnie nieobserwowalne. Tym się tłumaczy fakt, że nie obserwujemy w skali makroskopowej zjawisk charakterystycznych dla cząstek falowych. Ponieważ zaś budowane przez nas modele, które mają mieć cechę naoczności, opierać się muszą z konieczności na naszym codziennym doświadczeniu zmysłowym, przeto ten zupełnie nowy rodzaj obiektu, którym są cząstki falowe, jest dla nas trudno, a może nawet zupełnie, niewyobrażalny.

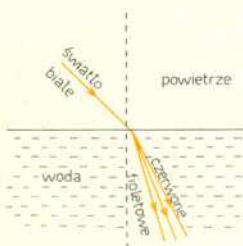
Niech Ci więc, Czytelniku, pozostanie ta pocięcha, że gdybyś był elektronem, nie miałbyś żadnych trudności z wyobrażeniem sobie cząstki falowej. Ale ponieważ jesteś — w tym wypadku na nieszczęście — tworem makroskopowym o całkiem sporej masie, musisz się zadowolić świadomością, że istnieje spójna logicznie teoria, mechanika kwantowa, w której równaniach ukryte są zarówno fale, jak i cząstki a właściwie ani fale, ani cząstki, lecz właśnie cząstki falowe. Zachowanie się tych cząstek nie stanowi więc tajemnicy dla naszego rozumienia świata, choć istnieją przeszkody, aby sobie to zachowanie się wyobrazić.



Podstawy teorii tęczy

Dr Zbigniew PŁOCHOCKI

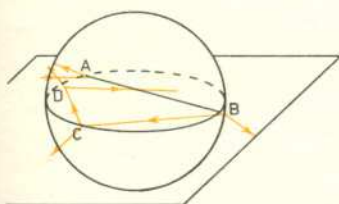
Oprócz tęczy barwnych można czasem też zobaczyć tęczę białą. Powstaje ona w sprzyjających warunkach we mgłę. Warunkujące ją mechanizmy są nieco odmiennie od czynników powodujących powstawanie tęczy barwnych.



Rys. 1

Fizyczne mechanizmy warunkujące powstawanie tęczy są dość złożone. Nie na tyle jednak, by nawet laik nie mógł pokusić się o dokładniejszą analizę zjawiska. Z faktu, że tęcza jest zjawiskiem barwnym, wynika, iż musi być ona konsekwencją rozszczepienia światła słonecznego (białego) na składowe barwne wskutek bądź załamania tegoż światła w kroplach wody (rys. 1), bądź dyfrakcji fal świetlnych na kroplach wody i interferencji wiązek ugiętych. W dokładnej teorii tęczy trzeba uwzględnić obydwie czynniki. Dominujący jest jednak pierwszy. Krople deszczu są zwykle zbyt duże i zbyt od siebie odległe, by dyfrakcja światła na kroplach mogła odgrywać istotną rolę. Dyfrakcja i interferencja światła to mechanizmy niejako dodatkowe, zniekształcające obraz tęczy w widoczny sposób jedynie w dość szczególnych warunkach. Ograniczmy się tu zatem jedynie do omówienia załamania światła w kroplach wody. Tęczę widzimy stojąc tyłem do Słońca. Jej obraz tworzą więc promienie, które w wyniku odbić i załamania w kroplach wody zawracają w kierunku Słońca. Na każdą kroplę pada wiązka w przybliżeniu równoległych promieni świetlnych. Rozważmy jeden z nich. Założymy na początek, że odpowiada mu jedna określona długość fali (barwa widmowa). O kroplach deszczu zakładamy zaś, że mają kształt kuli (co dość dokładnie odpowiada prawdzie).

Niech nasz wybrany promień jednobarwny pada na kulistą kroplę wody w punkcie *A* (rys. 2). Ulega on częściowemu odbiciu, częściowemu zaś załamaniu. Promień załamany biegnąc dalej przez kroplę pada na jej powierzchnię w punkcie *B*, gdzie znów częściowo odbija się, a częściowo załamuje. Sytuacja powtarza się w punktach *C*, *D* itd. Z kropli wybiegają więc promienie załamane w punktach *B*, *C*, *D*, ... Promienie odbite interesować nas nie będą, gdyż niejako krążą one wewnątrz kropli, ulegając systematycznie osłabianiu wskutek kolejnych odbić i załamania. Najjaśniejszą tęczę, tzw. tęczę pierwszego rzędu, tworzą promienie, które uległy jednokrotnemu odbiciu wewnętrznemu, tzn. promienie załamane, wybiegające na przykład z punktu *C*. Znacznie słabszą, ale stosunkowo często dającą się zobaczyć tęczę drugiego rzędu, odwrótnym układzie barw niż tęcza pierwszego rzędu, tworzą promienie, które uległy dwukrotnemu odbiciu wewnętrznemu, np. promień wybiegający z punktu *D*. Bardzo rzadko udaje się zaobserwować jeszcze tęczę trzeciego rzędu, którą tworzą promienie wybiegające z kropli po trzykrotnym kolejnym odbiciu wewnętrznym. Tęczy czwartego rzędu nikt jeszcze nie widział. Naszą analizę ograniczymy do tęczy pierwszego rzędu. W podany poniżej sposób Czytelnik sam może pokusić



Rys. 2