

Pogodzenie się z myślą, że światło w zależności od wykonywanego eksperymentu zachowuje się albo jak fala, albo jak strumień cząstek, nie jest łatwe. Nawet jeśli zaakceptujemy to, że w jednych doświadczeniach światło jest falą, a w innych jest strumieniem fotonów, to nadal nie uciekamy od poważnych problemów teoretycznych. Można bowiem postawić sobie pytanie, co się dzieje, gdy zbudujemy taki układ eksperymentalny, w którym światło musi być zarówno strumieniem cząstek, jak i falą. Niemożliwe? A jednak!



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.

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

Fale kontra cząstki

Tomasz Sowiński

FOTON LUB / I FALA

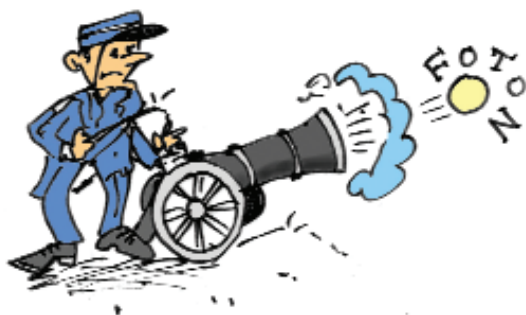
Punktem wyjścia naszego eksperymentu myślowego jest klasyczne doświadczenie Younga (MT 03/2007). Światło wysłane przez źródło dociera do przeszkody, w której są dwie szczeliny. W związku z tym na ekranie za przeszkodą tworzy się obraz interferencyjny. Są tam miejsca bardzo dobrze oświetlone i miejsca, gdzie światło w ogóle nie dociera. Krótko mówiąc, do tej chwili wszystko dzieje się tak, jak przewiduje to teoria oparta na falowej naturze światła.

Następnie wykonujemy małą modyfikację naszego układu pomiarowego. W miejscu ekranu ustawiamy cały zbiór elementów światłoczułych – małych czujników, które mają taką własność, że po ich oświetleniu zaczyna przez nie płynąć prąd elektryczny. Takie światłoczułe elementy są dziś powszechnie wykorzystywane np. przy budowie baterii słonecznych lub w mechanizmach, które po zmroku automatycznie zapalają światła latarni. Oczywiście prąd płynie jedynie przez te elementy, które są oświetlone. Przez te, do których światło nie dociera, prąd nie płynie. Tym samym mamy (przynajmniej teoretyczną) możliwość do-

kładnego sprawdzenia, do którego punktu naszego ulepszonego ekranu dociera światło, a do którego nie.

W tym miejscu trzeba koniecznie powiedzieć, dlaczego taka podmiana zwykłego ekranu na ekran z fotoczułkami jest czymś więcej niż tylko ulepszoną metodą detekcji docierającego promieniowania. Otóż takie elementy światłoczułe, zwane ze względu na swoją specyficzną budowę również fotodiodami, działają na zasadzie zjawiska fotoelektrycznego, które było jednym z koronnych argumentów za tym, że światło jest strumieniem fotonów. Krótko mówiąc, to pojedynczy foton wchodzący w skład strumienia światła docierającego do fotodiody wybija uwięziony w niej elektron. Ten następnie uczestniczy w przepływie prądu. Oczywiście przepływający prąd składa się z bardzo wielu elektronów, bo w strumieniu światła jest bardzo wiele fotonów, które je wybijają. Jedno jednak jest pewne: nie można wytłumaczyć działania fotodiody za pomocą falowej natury światła. Ta bowiem, jak już wspominaliśmy o tym dawniej (MT 01/2007), prowadzi do przewidywanych ilościowych niezgodnych z eksperymentami. Działanie fotodiody można wytłumaczyć jedynie przy założeniu, że światło jest strumieniem fotonów.

Uważny czytelnik zauważy na pewno, jak sprytnie wymyślony jest nasz układ doświadczalny. Światło padając na przeszkodę z dwoma szczelinami, rozchodzi się dalej zgodnie z falową naturą. Dzięki temu tworzy się obraz interferencyjny. Jednak do sprawdzenia, gdzie tak naprawdę światło dotarło, używamy bardzo subtelnego urządzenia składającego się z elementów światłoczułych. Te działają tylko dlatego, że światło jest strumieniem fotonów. Gdyby światło było jedynie falą, to nie moglibyśmy go zarejestrować na ekranie, bo tam są czujniki fotonów. Gdyby światło było jedynie strumieniem fotonów, to również nie moglibyśmy



Być może korpuskuły materii (np. elektrony) wykazują własności falowe.

ich zarejestrować w miejscu, gdzie normalnie powstają prążki interferencyjne, bo te tworzą się jedynie w zjawiskach falowych. Pytanie samo się narzuca...

JAKI BĘDZIE WYNIK EKSPERYMENTU?

Chyba nikt nie będzie zaskoczony, jeśli powiem, że w wyniku pomiaru na tak zbudowanym układzie doświadczalnym dzieje się to, czego się najbardziej obawiamy, ale i spodziewamy. Po pierwsze, część fotodiod będzie wykazywała, że do nich ponad wszelką wątpliwość docierają jakieś fotony, bo będzie przez nie płynął prąd elektryczny. Będą oczywiście również i takie fotodiody, do których żadne fotony nie docierają. Po drugie, te fotodiody, do których docierają fotony, będą znajdowały się dokładnie w tych miejscach ekranu, w których pojawiłyby się prążki interferencyjne po rozproszeniu fali na przeszkodzie z dwoma szczelinami! Dziwne, prawda? Krótko mówiąc, światło jest w tym eksperymencie RÓWNOCZEŚNIE falą i strumieniem fotonów!

NATURA ŚWIATŁA



POJEDYNCZE FOTONY

Cała nasza historia nabierze rumieńców, gdy powiem, że w dzisiejszych czasach potrafimy wykonać fotodiody zdumiewająco czułe, tzw. fotodiody lawinowe. Każdy wybity przez foton elektron jest w takiej diodzie przyspieszany do bardzo dużych energii za pomocą pola elektrycznego. Dzięki temu wybija on kolejne elektrony i powoduje tym samym zwiększenie liczby elektronów biorących udział w przepływie prądu. Ta operacja jest powielana wielokrotnie i ostatecznie powoduje, że płynie na tyle duży prąd, iż jesteśmy go w stanie zmierzyć. To oznacza, że taka fotodioda mogłaby nawet zarejestrować pojedynczy foton, gdyby na nią padł! Krótko mówiąc, wykorzystując takie fotodiody, moglibyśmy zbudować np. licznik fotonów.

Również wytwarzanie pojedynczych fotonów stało się w ostatnich czasach możliwe. Choć wydaje się, że to opowiadanie raczej z filmów science fiction, to szczerą prawdą jest, iż wykorzystując najnowsze technologie (wymyślone właśnie na potrzeby tych eksperymentów), fizycy potrafia dziś w laboratoriach zbudować urządzenia, które w ustalonych odstępach czasu wysyłają pojedyncze fotony.

To otwiera nam całkowicie nowe możliwości w naszym, jakkolwiek by patrzeć, dość prymitywnym eksperymencie. Od razu narzuca się pytanie, co stałoby się, gdyśmy zamienili nasze źródło światła na źródło pojedynczych fotonów, a fotodiody na superdokładne fotodiody lawinowe. Pytanie brzmi: Gdzie po wysłaniu pojedynczego fotonu zostanie on zarejestrowany na ekranie? No bo jeden foton chyba nie może być falą...

TO TYLKO FOTODIODA LAWINOWA!



HIPOTEZA DE BROGLIE'A

Zanim odpowiemy na to pytanie, chciałbym na chwilę zrobić małą dygresję o młodym doktorancie fizyki z Francji Louisie de Broglie. Był to pierwszy i jak na razie ostatni fizyk w historii, który otrzymał Nagrodę Nobla (1929 r.) za swoją rozprawę doktorską.

Louis de Broglie był bardzo zdolnym studentem zafascynowanym pracami Plancka i Einsteina o kwantowej naturze promieniowania. Był jednym z tych pierwszych, którzy od razu przyjęli do wiadomości, że światło w zależności od eksperymentu może wykazywać naturę falową lub ziarnistą. Hipoteza, którą postawił w swojej rozprawie doktorskiej z 1924 roku, była bardzo śmiała i nie było wówczas żadnych przesłanek, aby ją w ogóle rozważać. Hipoteza brzmiała: **skoro fala świetlna wykazuje w pewnych eksperymentach własności korpuskularne, to być może korpuskuły materii (np. elektrony) wykazują w jakichś eksperymentach własności falowe.**

Krótko mówiąc, ten młody szaleniec twierdził, że z każdą cząstką materii (i to nie tylko z cząstkami elementarnymi, ale również np. z piłką futbolową albo samochodem) związana jest pewna fala – **fala materii**. Skoro jest to fala, to musi mieć oczywiście swoją częstość, długość i wynikającą z nich prędkość rozchodzenia. A jeśli wszystko ma się trzymać całości, czyli aby fotony były traktowane w swoim dualizmie tak samo jak wszystkie inne cząstki, to związek pędu i energii z częstością i długością fali powinien być taki sam zarówno dla światła, jak i materii. Przypomnijmy jednak, że związki te dla światła były znane od czasów słynnej pracy Maksa Plancka. Później z wielkimi sukcesami wykorzystywali je przecież zarówno Einstein, jak i Compton. Mają one następującą postać:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad v = \frac{E}{h}$$

gdzie p i E są odpowiednio pędem i energią kinetyczną cząstki, a λ i v długością i częstością fali stowarzyszonej z tą cząstką. Nie da się ukryć, że hipoteza pos-



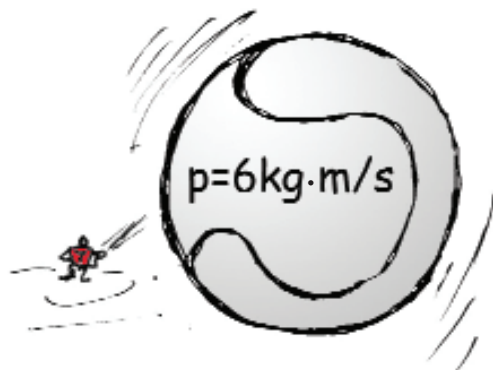
tawiona przez de Broglie'a była bardzo śmiała. Pikanterii dodaje fakt, że młody i zdolny fizyk postawił na szali swój doktorat i dobrze zapowiadającą się przyszłość. Musiał więc przyjąć czas na sprawdzenie doświadczalne tej dziwnej koncepcji.

EKSTREMALNIE DZIWNA FAŁA

Najpierw zastanówmy się, jakie to wyrefinowane eksperymenty należałoby zrobić, aby potwierdzić istnienie fal materii. Przecież wszystkie dotychczas znane nam pomiary i obserwacje drobin materii jednoznacznie pokazywały, że nie są to żadne fale, ale cząstki „z krwi i kości”. Nie rozplywają się przecież w przestrzeni. A nawet jeśliby się rozplywały, to co takiego mogłyby drgać? No i kluczowe pytanie: dlaczego nie widzimy w życiu codziennym żadnych efektów związanych z falową naturą materii?

Odpowiedzi na ostatnie pytanie udzielił już sam de Broglie. Zauważmy, że długość fali materii stowarzyszonej z daną cząstką jest odwrotnie proporcjonalna do jej pędu. A pęd cząstki to nic innego jak jej masa pomnożona przez prędkość. Dla przykładu piłka baseballowa, która ma masę 0,15 kg i leci z prędkością ok. 40 m/s, ma pęd

$$p = 6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$



Jeśli uwzględnimy fakt, że stała Plancka wynosi

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$$

to fala materii stowarzyszona z piłką będzie miała długość

$$\lambda = 1,1 \cdot 10^{-34} \text{ m}$$

Łatwo też sprawdzić, że częstość tej fali wynosi

$$\nu = 1,8 \cdot 10^{35} \text{ Hz}$$

To oznacza, że długość fali związana z lecącą piłką jest dużo mniejsza od promienia protonu (10^{-15} m). Częstość fali jest natomiast tak duża, że pomiaru odstępu czasu pomiędzy kolejnymi drganiem nie dokonałby nawet najdokładniejszy zegar atomowy, który drga z częstością zaledwie 10^{16} Hz. Nic więc dziwnego, że nie jesteśmy w stanie zaobserwować żadnych efektów z tak ekstremalnie patologiczną falą.

O tym już wspominaliśmy. Zjawiska falowe można dostrzec dopiero wtedy, gdy rozmiary przeszkód są porównywalne z długością fali. W tym przypadku nie ma o tym po prostu mowy. Czy zatem da się w ogóle to zaobserwować dla jakiegokolwiek ciała?

DOWÓD EKSPERYMENTALNY HIPOTEZY DE BROGLIE'Ń

Aby potwierdzić lub obalić hipotezę de Broglie'a, trzeba wykonać na tyle wyrefinowany eksperyment, aby fala materii, jeśli tylko istnieje, miała szansę doprowadzić do jakiegoś zjawiska falowego. Gdybyśmy chcieli zrobić np. doświadczenie Younga rozproszenia fali materii na dwóch szczelinach, musielibyśmy dobrać odległość pomiędzy szczelinami tak, aby była ona porównywalna z długością fali materii. Czy to w ogóle jest możliwe? Okazuje się, że tak! Jako pierwsi eksperyment tego typu wykonali w roku 1927 Clinton Davisson i Lester Germer z Bell Laboratories w Stanach Zjednoczonych. Ich eksperyment polegał na odbijaniu stosunkowo wolnych elektronów od niklowej płytki. Pęd elektronów był tak dobrany, że długość fali de Broglie'a była porównywalna z odległością między atomami tworzącymi sieć krystaliczną płytki niklu.



W tym miejscu należy się czytelnikowi wyjaśnienie, że zjawisko interferencji fal (np. światła) można zaobserwować nie tylko podczas przechodzenia przez przesłonę ze szczelinami, ale również wtedy, gdy temu zjawisku towarzyszy odbicie fali w przeciwnym kierunku niż dotychczas się rozchodziła. Jedyną różnicą pomiędzy oboma przypadkami jest miejsce powstawania obrazu interferencyjnego (za lub przed przesłoną). Zainteresowany czytelnik znajdzie na ten temat wiele interesujących informacji w Internecie powołując się na hasło „siatka dyfrakcyjna” (ang. diffraction grating).

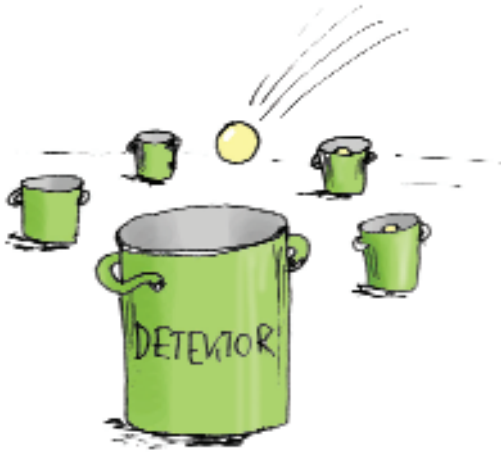
W ten sposób płytka ta tworzyła coś w rodzaju siatki dyfrakcyjnej dla elektronowej fali materii. Pozostało ustawić ekran, który w tym przypadku stanowiły detektory, i sprawdzić, czy powstaje obraz interferencyjny.

PRZEBIEG EKSPERYMENTU DAVISONA-GEMERA

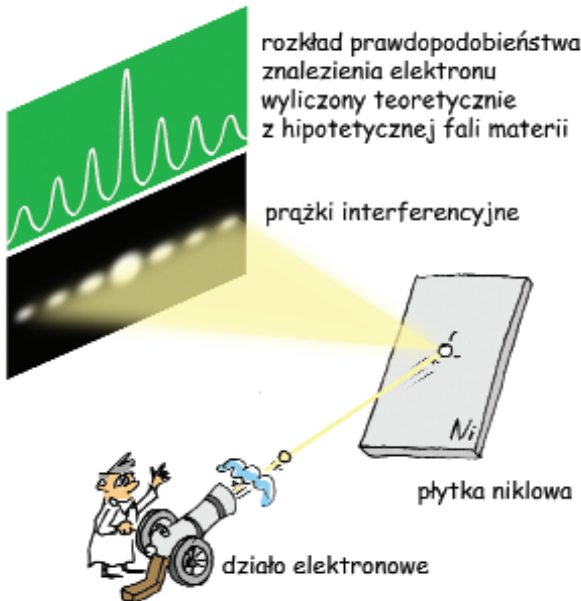
Na niklową płytkę pada jeden elektron wystrzelony z działka elektronowego. Następnie odbija się on w jakimś kierunku i wpada do detektora. Nie ulega wątpliwości, że jeden elektron został wysłany z działka elektronowego i jeden dotarł do jednego z detektorów. Następnie eksperyment powtarzamy z kolejnym elektronem. Sytuacja znów się powtarza, ale o dziwo, elek-

Fale to nic innego jak coś w rodzaju statystycznego rozkładu cząstek w przestrzeni.

tron wylądował tym razem w innym detektorze. Okazuje się, że choć sytuacja eksperymentalna była dokładnie taka sama, to elektron znalazł się w innym miejscu. Każdy kolejny elektron wpada do jakiegoś detektora, ale wydaje się, że zupełny przypadek sprawia, do którego z nich trafi. Po wykonaniu kilkuset takich doświadczeń stwierdzamy, że każdy kolejny przelot elektronu był zupełnie niezwiązany z poprzed-



nim. Jest jednak coś zdumiewającego w wyniku tego eksperymentu. Jeśli się przypatrzymy liczbie elektronów, które dotarły do każdego konkretnego detektora, to uzyskamy zdumiewający efekt. Po wykonaniu wykresu liczby elektronów, które wpadły do danego detektora, maksima tego wykresu będą znajdowały się dokładnie w miejscach, gdzie powinny wystąpić prążki interferencyjne hipotetycznej fali materii! Schematycznie widać to na poniższym rysunku.



Ten zdumiewający eksperyment pokazuje, że są takie zjawiska, których nie da się wyjaśnić założeniem, że materia składa się z cząstek. Gdyby tak bowiem było, to można by (przynajmniej teoretycznie) za każdym razem przewidzieć położenie elektronu po odbiciu. Doświadczenie przekonuje nas również, że coś w rodzaju fali materii rzeczywiście istnieje, bo w pewnym sensie powstaje obraz interferencyjny.

PODOBNIĘ BĘDZIE Z FOTONAMI

Po opisanu wyniku eksperymentu Davissona-Gemera czytelnik już pewnie domyśla się, jaki będzie rezultat naszego pierwszego eksperymentu myślowego dla światła, w którym połączyliśmy doświadczenie Younga z efektem fotoelektrycznym. Jeśli będziemy w takim eksperymencie wysyłać pojedyncze fotony, to będą one trafiały w, wydawałoby się, przypadkowe miejsca ekranu. Jednak po wykonaniu wielu takich eksperymentów (lub inaczej mówiąc, po wysłaniu normalnego światła, które jest strumieniem wielu fotonów) fotony statystycznie rozłożą się na ekranie tak, aby odpowiadało to położeniu prążków interferencyjnych ich fal materii, czyli wysyłanej fali elektromagnetycznej!

DZIWA MECHANIKA KWANTOWA

Doświadczenie Younga z pojedynczymi fotonami i jego kopia z pojedynczymi elektronami ujawnia nam tym samym bardzo tajemniczą własność przyrody, która objawia się w mikroświecie – tam gdzie rozmiary przeszkód są porównywalne z długością fali de Broglie'a. Okazuje się, że w takich przypadkach cząstki, czy to fotony, czy elektrony, zachowują się całkowicie przypadkowo i przewidzenie wyniku pojedynczego eksperymentu (czyli określenie, gdzie znajdzie się dana cząstka) jest praktycznie niemożliwe. Każda cząstka ląduje, здаwałoby się, w zupełnie przypadkowym detektorze i nie jesteśmy w stanie przewidzieć, w którym. Jednak wszystkie cząstki razem zachowują się tak, aby ostatecznie w każdym detektorze było ich tyle, ile przewiduje wzór interferencyjny ich fal materii. Można powiedzieć, że owa fala określa prawdopodobieństwo, że pojedyncza cząstka wyląduje w danym miejscu. Tam, gdzie ta fala ma maksimum, zostanie zarejestrowanych najwięcej cząstek, jeśli eksperyment będziemy powtarzali. I odwrotnie – tam, gdzie fala zanika, żadna cząstka na pewno nie dotrze.

Jest to kolejna zaskakująca własność mechaniki kwantowej. Okazuje się, że **fale to nic innego jak coś w rodzaju statystycznego rozkładu cząstek w przestrzeni**. Gdy cząstek jest bardzo dużo, to zachowują się one właściwie jak fala, bo odróżnienie ich od siebie jest niemożliwe, a ich statystyczne własności muszą być takie, jak odpowiadająca im fala materii. Gdy jednak cząstek jest mało, to oczywiście nadal posiadają one swoje własności korpuskularne, ale fala opisuje wtedy ich statystyczny rozkład w przestrzeni. Tym sposobem nigdy oczywiście nie wiemy, gdzie znajduje się konkretna cząstka. Wiemy jedynie, jakie jest prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w danym miejscu. ●