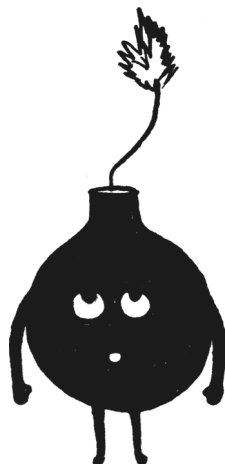


Pomiar bez oddziaływania

Krzysztof DRACHAL*

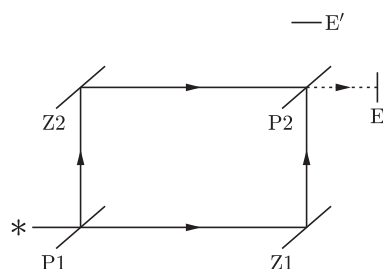
Bałagan w arsenale



Sztab generalny pewnego zamorskiego kraju zamówił pewną liczbę bomb uruchamianych fotodetektorami wykrywającymi fotony o pewnej charakterystycznej częstotliwości. Niestety, z uwagi na panujący w wojsku tego kraju bałagan okazało się, że nie wszystkie bomby są sprawne. Jeżeli bomba jest sprawna, to absorbuje ona padający na nią foton i wybucha. Jeżeli zaś jest wadliwa, to uruchamiający zapłon detektor fotonów nie działa i nie wykrywa fotonów, więc padający na nią foton nie może wywołać eksplozji. Bomb nie da się rozebrać, można tylko oświetlać ich fotodetektory. Jak w tej sytuacji odróżnić bomby sprawne od wadliwych?

Na gruncie fizyki klasycznej (i zdrowego rozsądku) rozwiązanie jest bardzo proste, ale mało efektywne: należy oświetlić bomby odpowiednimi fotonami, a wtedy sprawne wybuchną (bo ich czujniki zadziałają), a wadliwe nie (bo ich czujniki nie wykryją fotonów). Zniszczymy jednak wtedy wszystkie działające bomby, a to z pewnością nie poprawi potencjału obronnego rozważanego kraju. Czy można wymyślić jakąś lepszą metodę, skoro informację o sprawności bomby uzyskuje się wyłącznie poprzez detekcję fotonu (lub jej brak)?

Dualizm korpuskularno-falowy



Rys. 1. Interferometr Macha-Zehndera.

Przypatrzmy się najpierw pewnemu zaskakującemu eksperymentowi, wykorzystującemu tzw. interferometr Macha-Zehndera, przedstawiony schematycznie na rysunku 1. Po raz pierwszy skonstruowali go Ludwig Mach (syn sławnego Ernsta Macha, autora tzw. zasady Macha, która stanowiła inspirację przy formułowaniu ogólnej teorii względności przez Einsteina) i Ludwig Zehnder (uczeń Wilhelma Röntgena). Jest to przyrząd, w którym promień światła jest rozdzielany na dwie części na płytce półprzepuszczalnej (światłdzielącej) P1. Zwierciadła Z1 i Z2 odbijają padające na nie promienie, które spotykają się na płytce półprzepuszczalnej P2. Na razie zakładamy jedynie falową naturę światła, z czego wynika, że dwa rozważane promienie ulegną przy spotkaniu interferencji. Rzeczywiście, na ekranie E zaobserwujemy obraz, ale na ekranie E' żadnego obrazu nie będzie. Dzieje się tak dlatego, że w kierunku E' obraz interferencyjny jest wygaszany. Ten wynik znanego eksperymentu można wyjaśnić tylko poprzez falową naturę światła. Na gruncie teorii czysto korpuskularnej, traktującej promień świetlny jako strumień cząstek, takie wyjaśnienie nie jest możliwe.

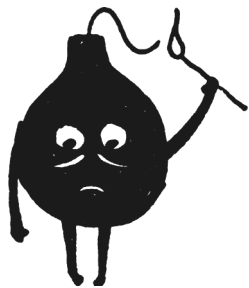
W historii fizyki długo toczono spory o to, czy światło jest falą, czy może ma naturę cząsteczkową (korpuskularną). Ostatecznie fizycy zgodzili się, że foton ma naturę dwojaką: w pewnych sytuacjach zachowuje się jak cząstka, w pewnych natomiast jak fala. Nazywa się to dualizmem korpuskularno-falowym. W 1924 roku Louis de Broglie postawił hipotezę, że taki dualizm dotyczy wszystkich fizycznych obiektów. W przypadku fotonu, który ma zerową masę, dualizm ten jest łatwy do zauważenia, w przypadku elektronów też daje się go wykryć, ale w przypadku obiektów o dużej masie aspekty natury falowej są tak słabe, że praktycznie niezauważalne w codziennym życiu. Postulat de Broglie'a stwierdza, że każdemu obiektowi materialnemu można przypisać falę materii o długości $\lambda = \frac{h}{p}$, gdzie h oznacza stałą Plancka, natomiast p pęd obiektu. Fala ta opisuje amplitudę gęstości prawdopodobieństwa znalezienia obiektu w danym miejscu w danej chwili.

Skoro cząstki materii mają własności falowe, odpowiedni interferometr Macha-Zehndera będzie działał także dla elektronów, które bez większych obiekcji wyobrażamy sobie jako cząstki (czyli zlokalizowane w przestrzeni porcje energii i pędu). Mało tego, wyniki eksperymentu, czyli liczba zliczeń cząstek w danym miejscu ekranu, pozostają niezmienione, nawet gdy wypuszczamy ze źródła elektrony lub fotony w coraz większych odstępach czasu (wtedy bowiem wypuszczamy raczej pojedyncze cząstki aniżeli strumień cząstek,

Przystępne omówienie postulatów mechaniki kwantowej można znaleźć w wielu książkach, np. w [1].

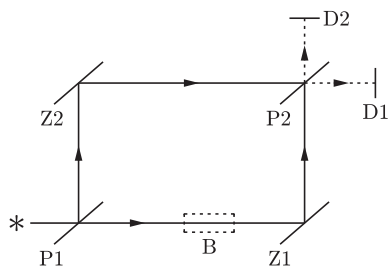
*Wydział Matematyki i Nauk Informatycznych, Politechnika Warszawska





łatwiejszy do wyobrażenia sobie jako pewna fala). A zatem nawet pojedyncza cząstka, a nie tylko ich strumień, przejawia własności falowe. Musimy jednak zdecydować, którą naturę cząstki obserwujemy: falową czy korpuskularną. Obecność w interferometrze płytki półprzepuszczalnej, w losowy sposób dzielącej początkową wiązkę cząstek, wskazuje na słuszność opisu falowego. Zgodnie z nim pojedyncza cząstka zachowuje się tak, jakby jednocześnie (!) przechodziła przez dwie różne (!) drogi. Jeżeli jednak umieścimy w interferometrze detektory stwierdzające, którą drogą cząstka „rzeczywiście” przeszła, trzeba będzie odwołać się do opisu korpuskularnego, a obraz interferencyjny zniknie. Fizycy mówią wtedy, że następuje *kolaps funkcji falowej*.

Fizyk kwantowy zrobi to lepiej



Rys. 2. Przyrząd Elitzura–Vaidmana.

Avshalom Elitzur i Lev Vaidman w 1993 roku zaproponowali, jak wykonać „pomiar bez oddziaływania”, który, w naszym przypadku, pozwoli stwierdzić sprawność części bomb bez ich niszczenia [2]. Na jednej z dwóch dróg, którymi może biec foton (przyjmijmy, że dolnej), umieszczamy testowaną bombę B. Za drugą płytką światłodzielną umieszczamy dwa detektory fotonów, D1 i D2. Przyrząd ten jest przedstawiony schematycznie na rysunku 2.

Umieszczenie w przyrządzie sprawnej bomby jest równoważne dodaniu do układu detektora fotonów. Jeśli zaś bomba jest niesprawna, cały układ zachowuje się, jakby żadnego dodatkowego elementu w nim nie było.

W tym ostatnim przypadku mamy zatem urządzenie, które jest omawianym poprzednio interferometrem Macha–Zehndera. Z uwagi na interferencję fali elektromagnetycznej fotony będą docierać tylko do detektora D1. Prawdopodobieństwo zarejestrowania fotonu w detektorze D2 jest więc równe zero.

Jeżeli bomba jest sprawna, to działający detektor, umieszczony na drodze fotonu, wywołuje kolaps funkcji falowej, foton musi być opisywany jako cząstka, a nie fala, i z prawdopodobieństwem 50% będzie biegł drogą górną, a z prawdopodobieństwem 50% – dolną. Biegący dolną drogą foton spowoduje wybuch bomby, a zatem średnio połowa sprawnych bomb zostanie zniszczona w wyniku zastosowania omawianej procedury. Jeżeli natomiast foton biegł drogą górną, to w płytce światłodzielną P2 nie mogły spotkać się dwie składowe fali prawdopodobieństwa. Nie zaszło zatem zjawisko interferencji, które w interferometrze Macha–Zehndera powoduje, że fotony rejestrowane są tylko w detektorze D1. Tymczasem, w omawianym tu układzie, obecność płytki P2 wymusza uwzględnienie falowej natury fotonu. Płytką P2 dzieli falę na dwie składowe, aż do chwili wykrycia fotonu przez jeden z detektorów D1 lub D2 (prawdopodobieństwo każdego z tych zdarzeń wynosi 50%), kiedy to znów następuje kolaps funkcji falowej. Ponieważ dla niesprawnej bomby wszystkie fotony trafiały do detektora D1, wykrycie jakiegokolwiek fotonu przez detektor D2 oznacza, że badana bomba jest sprawna.

Widzimy, że stosując opisaną wyżej procedurę, można zdiagnozować 25% sprawnych bomb bez ich niszczenia. Wynik ten można jeszcze ulepszyć kosztem większego skomplikowania metody – Czytelnika Wnikliwego odsyłamy do oryginalnej pracy Elitzura i Vaidmana. I choć przedstawiony powyżej wywód jest czysto teoretyczny, doświadczenia (już bez użycia bomb) wykonane przez zespół badaczy w Instytucie Fizyki Eksperymentalnej na Uniwersytecie w Innsbrucku w pełni go potwierdziły [3]. Do mało intuicyjnych przewidywań fizyki kwantowej należy zatem dorzucić jeszcze jedno: w pewnym sensie możliwy jest pomiar bez oddziaływania!

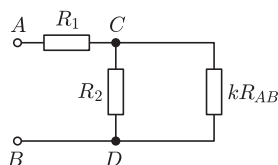
Bibliografia

- [1] R. Penrose, *Droga do rzeczywistości*, Prószyński i S-ka, 2010.
- [2] A.C. Elitzur, L. Vaidman, *Quantum mechanical interaction-free measurements*, Found. Phys. 23 (1993), 987–997.
- [3] P. Kwiat, H. Weinfurter, T. Herzog, A. Zeilinger, M.A. Kasevich, *Interaction-free measurement*, Phys. Rev. Lett. 74 (1995), 4763–4766.



Rozwiązanie zadania F 803.

Z symetrii układu wynika, że jeśli usunie się z niego pierwsze oczko, to opór układu będzie równy kR_{AB} . Zatem można przedstawić go w postaci pokazanej na poniższym rysunku:



Stąd wynika, że R_{AB} spełnia równanie:

$$R_{AB} = R_1 + \frac{R_2 k R_{AB}}{R_2 + k R_{AB}}$$

Zatem:

$$R_{AB} = \frac{R'}{2k},$$

gdzie

$$R' = k(R_1 + R_2) - R_2 +$$

$$+ \sqrt{4kR_1R_2 + (k(R_1 + R_2) - R_2)^2}.$$

(Odrzucamy ujemne rozwiązanie.)