

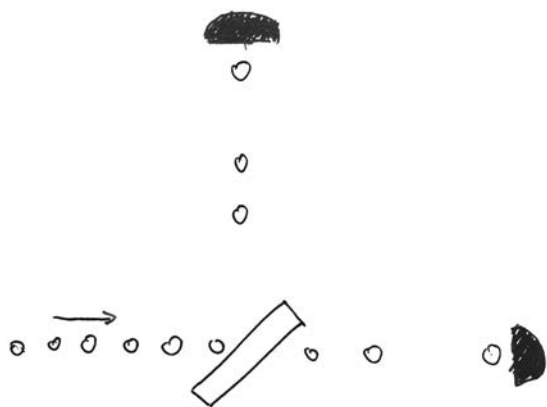
# Kwantechizm czyli klatka na ludzi\*

Andrzej Dragan

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Wyobraźmy sobie strumień światła padający na szybę. Każda szyba przepuszcza tylko część światła, a resztę odbija albo pochłania. Wystarczy spojrzeć na własne odbicie w oknie. To, ile dokładnie światła się odbija, a ile przechodzi przez szybę zależy od szczegółów materiału, z którego wykonane jest szkło. Dla uproszczenia wyobraźmy sobie, że mamy szkło, które odbija i przepuszcza dokładnie po połowie padającego światła.

Przyjmijmy też, że światło ma jeden określony kolor, na przykład czerwony. Z teorii Plancka wynika, że strumień światła składa się z ogromnej liczby niepodzielnych i identycznych fotonów. Właściwości światła, takie jak kierunek poruszania się albo kolor, muszą więc w jednakowy sposób charakteryzować każdy z identycznych fotonów z których składa się wiązka. Czyli mówiąc ludzkim głosem, każdy z tych fotonów musi poruszać się w tę samą stronę i mieć ten sam czerwony kolor, co reszta. Fotony są obiektami niezwykle prostymi i w rozważanym przypadku wszystkie one powinny być po prostu identyczne. Schemat naszego eksperymentu myślowego przedstawia poniższy rysunek, na którym zana-

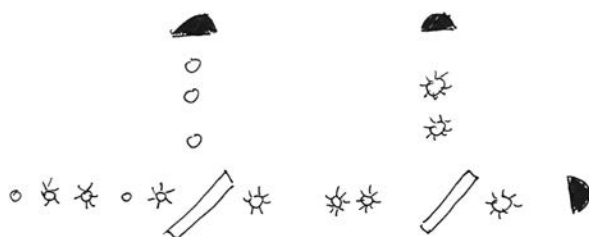


czone są fotony padające na półprzepuszczalną szybę.

Połowa z nich się odbija, a reszta przechodzi na drugą stronę wpadając do specjalnych detektorów, które

rejestrują każdy wpadający foton, jednocześnie go pochłaniając. A teraz trudne pytanie: skoro połowa fotonów ulega odbiciu, a połowa przechodzi przez szkło, to co decyduje o tym, jak zachowa się konkretny foton, skoro wszystkie one są identyczne? Pomyślmy nad tym przez moment.

Niby proste pytanie, a dręczyło Einsteina do samej śmierci. Einstein był przekonany, że fotony muszą się od siebie czymś różnić. I to owe różnice muszą powodować, że niektóre fotony się odbijają, a inne nie. Wyobraźmy sobie na przykład, że niektóre fotony miałyby włosy, a inne nie. Może to owe włosy, albo jakieś inne ukryte cechy, decydują o tym, że dany foton będzie się odbijać od szyby? Wyobraźmy sobie, że tak właśnie jest, a kawałek szkła przepuszcza jedynie fotony owłosione, a łyse odbija. Tylko, że wtedy kolejna, identyczna płytko szklana umieszczona na drodze odfiltrowanych owłosionych fotonów powinna spowodować, że wszystkie one ponownie przez nią przejdą... Eksperyment pokazuje



jednak, że dzieje się inaczej: znów połowa padających fotonów ulega odbiciu, a połowa przechodzi przez szkło.

Pomimo wielu prób, ani w tym, ani w żadnym podobnym eksperymencie, nie udało się sprowokować fotonów do zmiany zachowania — zawsze odbijała się połowa, czyli proporcje ani drgnęły. Nie udało się też dostrzec w ich zachowaniu żadnej prawidłowości. Statystyka pomiarów niczym nie różniła się od statystyki czysto losowej.

Być może jednak nasz kawałek szkła wcale nie jest statycznym przedmiotem, a jakieś ukryte dynamiczne procesy zachodzące wewnątrz odpowiadają za to, że fo-

\* Andrzej Dragan *Kwantechizm czyli klatka na ludzi*, Fabuła Fraza 2019, fragment rozdziału 7.

ton padający w danej chwili zachowa się inaczej niż kolejny identyczny foton lądujący na powierzchni szkła chwilę później? Okazuje się, że znów nic z tego. Zaraz okaże się, że taka ewentualność również nie daje się łatwo obronić. Ale zanim do tego dojdziemy, wysłuchajmy, co na temat zachowania pojedynczych fotonów mówi mechanika kwantowa.

A mówi ona rzecz, od której włos się jeży: przyczyna takiego, a nie innego zachowania pojedynczego fotonu w ogóle nie istnieje. Foton zachowuje się w sposób fundamentalnie nieprzewidywalny i nie ma w procesie padania na szkło niczego, co decydowałoby o jego przyszłych losach. Proces odbicia bądź przejścia fotonu przez szkło jest fundamentalnie losowy, czyli *niedeterministyczny*.

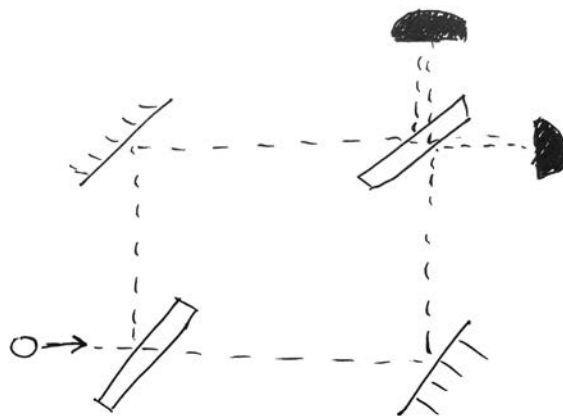
Chwila, chwila. Zwolnijmy na moment i zastanówmy się, coż takiego wygaduje mechanika kwantowa. Cała wcześniejsza klasyczna fizyka nie była niczym innym, jak skuteczną metodą przewidywania przyszłości. Na przykład prawa mechaniki Newtona pozwalały przewidzieć, gdzie upadnie kula wystrzelona z armaty. Nawet jeśli w rzutach monetą raz wypada orzeł, a raz reszka, to słusznie podejrzewamy, że zmienność wynika tylko z tego, że moneta podrzucana jest za każdym razem trochę inaczej. A nawet bardzo drobna różnica w początkowych parametrach rzutu może doprowadzić do zmiany wyniku. I dlatego wyniki rzutu mogą być różne.

Mechanika kwantowa mówi jednak coś więcej: jeśli przepuścimy pojedynczy foton przez kawałek szkła, po czym powtórzymy identyczny pod każdym względem eksperyment. Nie podobny. Nie prawie taki sam. Identyczny. To otrzymane wyniki mogą okazać się inne niż chwilę wcześniej. Mechanika kwantowa mówi, że absolutnie nic nie decyduje o tym, co stanie się w takim eksperymencie z pojedynczym fotonem. Nie chodzi więc tylko o naszą niepełną wiedzę o fotonie. I to właśnie nie dawało Einsteinowi spokoju i dlatego do znużenia powtarzał on, że *Bóg nie gra w kości, Bóg nie gra w kości*.

Oczekiwanie, że ktokolwiek po prostu przyjmie tak zaskakujące twierdzenia na wiarę byłoby czystą bezczelnością. Powróćmy więc do rozsądnie brzmiącej hipotezy, że nawet jeśli poszczególne fotony niczym się od siebie nie różnią, to wewnątrz szkła przebiega jakiś dynamiczny proces, który sprawia, że przy każdym kolejnym padającym fotonie, warunki eksperymentu podlegają niewielkim, ale istotnym zmianom. Być może stoją za tym na przykład termiczne drgania atomów?

Aby sprawdzić, czy to możliwe, rozważmy nieco zmodyfikowaną wersję naszego doświadczenia. Umieścimy na drodze dwóch rozdzielonych wiązek światła dwa idealne lustra, które skierują wiązki na drugi kawa-

łek szkła, jak przedstawia to poniższy rysunek. Zaraz za



tą drugą płytkę szklaną, na której wiązki ponownie się nakładają, umieścimy dwa detektory mierzące natężenie padającego światła. Jakie będą ich odczyty, gdy oświetlimy dolną płytkę szklaną silnym strumieniem światła?

Wydawać by się mogło na pierwszy rzut oka, że detektory wskażą identyczne natężenia stanowiące połowę natężenia pierwotnej wiązki. Okazuje się jednak, o czymś zapomnieliśmy. Można tak skonstruować nasz eksperyment, żeby całe światło wpadało wyłącznie do dolnego detektora. Jak to możliwe?

Pamiętajmy, że obie wiązki po ponownym nałożeniu na drugiej płytce szklanej, będą ze sobą *interferować*. Są bowiem falami i te fale będą się na siebie nakładać na drugim kawałku szkła. Światło wpadające do górnego detektora może dotrzeć tam na dwa sposoby. W trakcie podróży górną drogą dochodzi do trzykrotnego odbicia światła: najpierw od pierwszego kawałka szkła, później od lustra i wreszcie od drugiej szybki. Natomiast druga, dolna droga wymaga tylko jednego odbicia — od lustra, ale za to światło dwukrotnie przejdzie przez szklane płytki.

Światło podróżując przez szkło trochę spowalnia i dlatego fala podróżująca dołem będzie nieco opóźniona w stosunku do fali podróżującej górą. Opóźnienie to zależy od grubości użytych płytek szklanych. Można tak dobrać te grubości, żeby górki fali światła podróżującej górną drogą trafiły dokładnie na dołki fali światła podróżującej dołem. Dojdzie wówczas do destruktywnej interferencji, w wyniku której górny detektor pozostanie kompletnie nieoświetlony.

Skoro więc światło nie wpada do górnego detektora, to musi wpaść do dolnego. Bo energia nie może po prostu zniknąć. Przyjmijmy więc, że w taki właśnie sposób skonstruowaliśmy nasz układ szkieł i lusterek, nazywany *interferometrem Macha-Zehndera*, że całe światło zawsze ląduje w dolnym detektorze.

Czas na najciekawsze pytanie: co stanie się z pojedynczym fotonem wpuszczonym do interferometru? Jakie będą jego dalsze losy? Jak słusznie zauwa-

żył pewien komentator zawodów jeździeckich, *teraz wszystko w rękach konia*.

Wydawać by się mogło, że foton musi w jakiś sposób „zdecydować się” na jedną z dróg. Pod nieobecność innych fotonów, z którymi mógłby interferować, powinien równie często wpadać do jednego, jak i do drugiego detektora, gdy będziemy wielokrotnie powtarzać eksperyment. Co prawda, niezbyt wiadomo, co miałyby decydować o wyborze przez foton tej, a nie innej drogi, ale czy przychodzi nam do głowy jakieś inne rozwiązanie?

Okazuje się, że musi nam przyjść do głowy inne rozwiązanie, bo nasze wnioski są kompletnie sprzeczne z wynikami eksperymentu. Okazuje się, że nawet używając pojedynczych fotonów nie da się „obudzić” górnego detektora. Za każdym razem porcja światła zostanie zarejestrowana w dolnym detektorze. To oczywiście przy założeniu, że grubości płytek szklanych cały czas dobrane są w szczególności sposób, jak to wcześniej ustaliliśmy. Foton *zawsze* wylądowuje na dole, ani razu na górze! Eksperyment można powtarzać do woli.

Wygląda to znowu na efekt interferencyjny, który zachodził w przypadku silnych wiązek. Tylko z czym niby jeden foton miałby interferować, skoro niczego nie ma w pobliżu. Z samym sobą?!

Jak by to powiedzieć... trudno znaleźć jakiegokolwiek inne wyjaśnienie. Mając do dyspozycji dwa alternatywne sposoby przebycia interferometru, foton zachowuje się tak, jak gdyby podróżował dwiema drogami *równocześnie*! Obie alternatywne ścieżki interferują dokładnie w taki sposób, w jaki interferowały dwie fale świetlne powstałe w wyniku rozszczepienia na pierwszej płytce szklanej. I w wyniku tej interferencji foton lądowuje na koniec w dolnym detektorze.

Z tego, co powiedzieliśmy mogłoby wynikać, że z jednego fotonu robią się dwa, co wydaje się przeczyć postulatowi niepodzielności fotonu. Aby sprawdzić, czy foton aby się nie rozdwa, wystarczy po-

nownie postawić na jego drodze (drogach?) dwa detektory pochłaniające światło umieszczone tuż za pierwszą płytką szklaną. Zadaniem urządzeń pomiarowych będzie sprawdzenie, którędy na *prawdę* podróżuje foton. I znów stanie się coś zadziwiającego: klikać będzie *zawsze* tylko jeden detektor, czasami górny, a czasami dolny. Obydwa nigdy. Sytuacja wygląda zupełnie tak, jak gdyby foton zorientowawszy się, że jest pod obserwacją, postanowił nie siać zgorszenia i zlokalizować się tylko w jednym z dwóch detektorów. Gdy natomiast nikt nie patrzy, foton zachowuje się ponownie tak, jak gdyby podróżował obiema drogami *na raz*. Czyli jak żona (lub mąż), która zmienia swoje zachowanie w zależności od tego, czy jest pod obserwacją, czy też nie.

I teraz możemy już powrócić do poprzedniego pytania — co decyduje o tym, który z dwóch detektorów umieszczonych tuż za pierwszą płytką, złapie padający na nią pojedynczy foton? Czy może za to odpowiadać jakiś nieznan dynamiczny proces zachodzący w szkle w chwili, gdy pada na niego foton? Jakaś fluktuacja?

Otóż nasze spostrzeżenie, że po usunięciu dwóch detektorów umieszczonych tuż za pierwszą płytką foton zachowuje się tak, jak gdyby poruszał się *równocześnie* górną i dolną drogą, wskazuje na to, że w chwili padania na pierwszą płytkę foton *wcale* nie podejmuje decyzji, czy ma się odbić, czy przejść. Realizowane są oba scenariusze. Dopiero gdy wsuniemy w drogę fotonu dwa detektory, foton „zdecyduje się” na jedną z możliwych dróg.

Oznacza to, że dopiero akt pomiaru sprawia, że foton jest tu albo tam, natomiast przed pomiarem położenie fotonu nie jest *wcale* dobrze określone. Gdyby foton podejmował decyzję o swoich dalszych losach już w chwili padania na płytkę szklaną, nie mogłoby przecież dojść później do interferencji! I dlatego zirytowany Niels Bohr odrzekł kiedyś Einsteinowi, powtarzającemu w kółko, że *Bóg nie gra w kości: przestań wreszcie mówić Bogu, co ma robić*.