

Otoczający nas świat wydaje się całkiem dobrze uporządkowany i działający wg ściśle określonych, zgodnych ze zdrowym rozsądkiem reguł. Zagłębiając się jednak w szczegóły, dochodzimy do wniosków, o których nie śniło się nawet filozofom.



**Tomasz Sowiński** jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. W 2005 roku skończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie fizyki teoretycznej, a trzy lata później uzyskał tam stopień naukowy doktora. Od lat zajmuje się popularyzacją nauk przyrodniczych. W roku 2008 otrzymał tytuł Mistrza Popularyzacji Nauki „Złoty Umysł” w konkursie Prezesa Polskiej Akademii Nauk.

*Tomasz Sowiński*

# Paradoks na kawałku szkła

## ZASADA KORESPONDENCJI

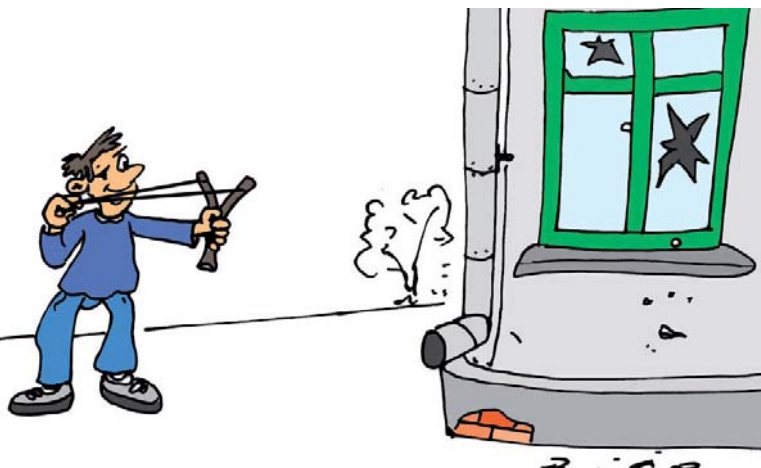
Kiedy powstała mechanika kwantowa opisująca zjawiska zachodzące w mikroświecie, jednym z podstawowych problemów, nad którym ludzie się koncentrowali, było sprawdzanie, jakie warunki muszą być spełnione, aby opis kwantowy dawał te same przewidywania co opis dotychczas znanymi prawami klasycznymi. Wspominaliśmy już o tym, przywołując słynną zasadę korespondencji, która głosi, że dla obiektów makroskopowych musi istnieć jakiś sposób, aby z opisu kwantowo-mechanicznego odtworzyć prawa klasyczne, które opisują zachowanie się tych ciał. Takie żądanie wynika z dwóch elementarnych obserwacji. Po pierwsze, zachowanie ciał makroskopowych jest dobrze opisywane przez fizykę klasyczną. Po drugie, mechanika kwantowa jest teorią bardziej podstawową niż mechanika klasyczna. Skoro

zatem wiemy, że klasyczne prawa są prawidłowe, a jednocześnie prawa mikroskopowe są bardziej fundamentalne, to z tych drugich musi dać się wyprowadzić te pierwsze.

Oczywiście działanie w drugą stronę, tzn. wyprowadzenie praw mikroskopowych z makroskopowych nie jest możliwe. Gdyby bowiem było to możliwe, to nie byłoby żadnej potrzeby formułowania mechaniki kwantowej – cała wiedza byłaby zawarta w prawach klasycznych. Nauczni doświadczaniem wiemy jednak, że istnieją w przyrodzie zjawiska, które absolutnie są sprzeczne z prawami klasycznymi. Mechanika kwantowa wychodzi zatem poza obszar klasyczny, ale w pewnym sensie zawiera go w sobie.

Wyprowadzenie praw klasycznych z mechaniki kwantowej w wielu sytuacjach jest bardzo trudne. W niektórych przypadkach do dziś nie do końca wiadomo, jak należy tego dokonać. Problemy natury matematycznej są bowiem tak zawiłe, że nawet doskonała znajomość działania mechaniki kwantowej nie wystarcza. Nadal jednak ufamy, że zasada korespondencji musi być spełniona i jakoś musi się dać takie przejście graniczne wykonać.

Są w przyrodzie proste zjawiska, których wytłumaczenie na gruncie klasycznym wydaje się bardzo proste i oczywiste. Gdy jednak próbujemy wytłumaczyć je na gruncie kwantowym, dochodzimy do zaskakujących i paradoksalnych wniosków, które wydają się całkowicie burzyć nasz porządek myślenia. I choć w pierwszym odruchu sprawia to, że chcemy mechanikę kwantową odrzucić i uznać za jakieś nieporozumienie, to przy dłuższym zastanowieniu dochodzimy do wniosku, że otrzymany wynik jest właściwie zgodny z wynikiem klasycznym poza kilkoma wyjątkami, które (o zgrozo jak zawsze) są potwierdzone przez eksperymenty. Ostatecznie jesteśmy zatem raczej zachęceni do odrzucenia naszych wewnętrznych przekonań.



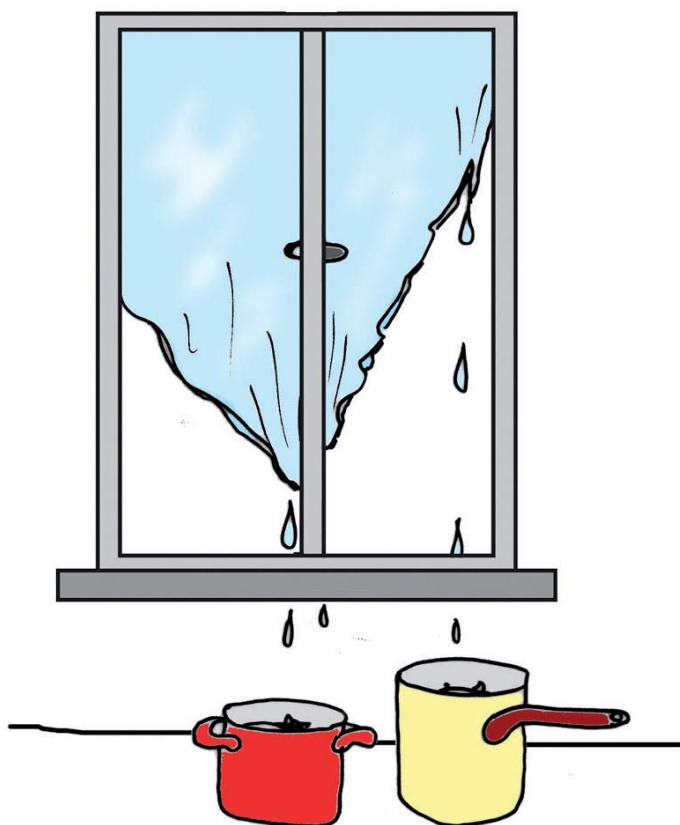
zachowanie ciał makroskopowych jest dobrze opisywane przez fizykę klasyczną



## szyba potrafi zadziwić

### SZYBA POTRAFI ZADZIWIĆ

Każdy z nas na pewno niejednokrotnie patrzył przez okno, czy to w domu, czy w samochodzie. Centralną częścią każdego okna jest oczywiście szyba zrobiona ze szkła – zdumiewającej formy materii, która przepuszcza (choć może nie idealnie) światło na drugą stronę. Sam fakt, że coś takiego jak szkło istnieje, jest już dużą ciekawostką dla każdego przyrodnika. Szkło jest bowiem CIECZĄ! Tak, tak. To ciecz, która jest bardzo przechłodzona i w związku z tym ma bardzo dużą lepkość. Lepkość tak dużą, że wydaje



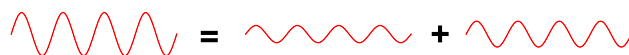
szkło to ciecz, która jest bardzo przechłodzona i w związku z tym posiada bardzo dużą lepkość.

się, że jest ciałem stałym. Struktura mikroskopowa szkła nie różni się jednak niczym od struktury cieczy i w niczym nie przypomina ciała stałego. Dziś skupimy się na tej fenomenalnej własności szkła, która polega na przepuszczaniu światła na drugą stronę.

### ODBICIE I TRANSMISJA PRZEZ SZYBĘ

Szkło nigdy nie przepuszcza całego padającego na nie światła na drugą stronę. Pewna jego część zostaje odbita. Oczywiście dzieje się to zgodnie z zasadą zachowania energii – energia światła odbitego i tego, które przeszło, w sumie równe są energii światła padającego. Opis w ramach elektrodynamiki klasycznej tego zdumiewającego efektu jest dość prosty. Fala elektromagnetyczna pada na granicę dwóch ośrodków – powietrza i szkła. Na tej granicy dochodzi do odbicia części fali zgodnie z prawem odbicia, a część fali zostaje przepuszczona na drugą stronę (ten efekt nazywamy transmisją). Na drugiej granicy pomiędzy szkłem a powietrzem dochodzi znowu do częściowej transmisji i odbicia; oczywiście tak, aby energia niesiona przez fale była zachowana.

Opis ten jest bardzo prosty i nie ma w nim nic zaskakującego. Każdą bowiem falę można uważać za złożenie dwóch fal o mniejszej amplitudzie. Zauważmy, że jeśli wyobrazimy sobie falę jako sinusoidę o amplitudzie  $A$  daną wzorem:  $y = A \cdot \sin(x)$ , to równie dobrze możemy ją zapisać jako:  $y = B \cdot \sin(x) + C \cdot \sin(x)$ , jeśli tylko  $A = B + C$ . Możemy ją zatem faktycznie zapisać jako złożenie dwóch fal o amplitudach dobranych w taki sposób, aby ich suma była amplitudą fali początkowej. Podział ten jest całkowicie dowolny i teoretycznie niczym niewyróżniony. Oczywiście jest również, że możemy takiego podziału dokonać nie na dwie fale składowe, ale na dowolną ich liczbę. Ważne jest tylko to, aby amplitudy były odpowiednio dobrane.

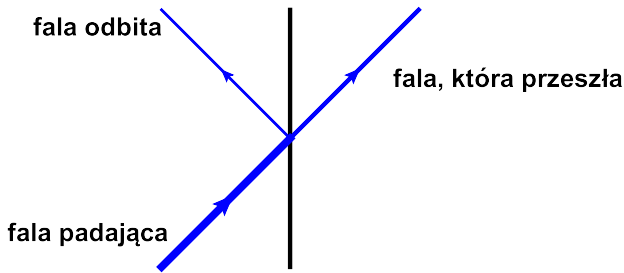


Zanim przejdziemy do dalszej analizy, warto jeszcze powiedzieć, że w rzeczywistości sprawa tego podziału jest trochę bardziej skomplikowana, bo energia, jaką niesie fala, nie jest proporcjonalna do amplitudy fali, ale do jej kwadratu. To narzuca dodatkowe warunki na możliwości podzielenia fali, tak aby uczynić zadość zasadzie zachowania energii. Ale nie jest to teraz dla nas tak bardzo istotne, gdyż i tak nie będziemy w naszym wywodzie niczego dokładnie wyliczali. Jak zawsze najważniejsza jest dla nas sama idea wyvodu.

Sposób, w jaki szyba rozdziela falę padającą na dwie fale o mniejszych amplitudach, z których jedną przepuszcza na drugą stronę, a drugą odbija, zależy wyłącznie od własności szkła, z którego owa szyba jest zrobiona. W zależności od tego, jak bardzo przezroczyste jest szkło, podział ten może następować w różny sposób. Dobrze zrobiona szyba może przepuszczać praktycznie całe padające na nią światło. Szyba specyficznym przyciemniona może znaczną część światła odbijać. Napyłając odpowiednią substancję odbijającą (najczęściej aluminium) na jedną z powierzchni szyby, możemy zmieniać te proporcje wg własnego uznania. W dzisiejszych czasach takie metody sztucznego sterowania współczynnikiem transmisji przez szkło są opracowane do perfekcji i realizowane na wiele różnych sposobów. Wszystko jednak ma ten sam cel – sprawić, aby część padającego promieniowania się odbijała, a pozostała część przechodziła na drugą stronę. Tak specjalnie przygotowane



elementy optyczne nazywa się PŁYTKAMI ŚWIATŁODZIELĄCYMI (ang. beam splitter).



**OPIS KLASYCZNY**

Już o tym mówiliśmy, ale podkreślmy jeszcze raz. Z punktu widzenia klasycznej fizyki działanie płytki światłodzielnącej nie jest zaskakujące. Rozdziela ona po prostu (w zgodzie z zasadą zachowania energii) padającą falę elektromagnetyczną na dwie składowe, z których jedną odbija, a drugą przepuszcza dalej. Okazuje się, że jeśli tylko znamy dokładne własności szkła, z którego jest wykonana nasza płytka, takie jak współczynnik załamania światła, przenikalność elektryczna czy jej grubość, to wprost z praw Maxwella można wywnioskować, jaki będzie stosunek pomiędzy amplitudą fali transmitowanej a amplitudą fali odbitej. I choć rachunek nie jest zbyt prosty, to można go doprowadzić do końca i jednoznacznie powiedzieć, jaki ten stosunek jest. Można zatem dokładnie teoretycznie przestudiować działanie takiej płytki. Warto też dodać, że otrzymany wynik jest zgodny z wynikiem eksperymentu. To znaczy, że sama fizyka klasyczna wystarczy, aby prawidłowo wyjaśnić działanie beam splittera, gdy pada na niego fala elektromagnetyczna.

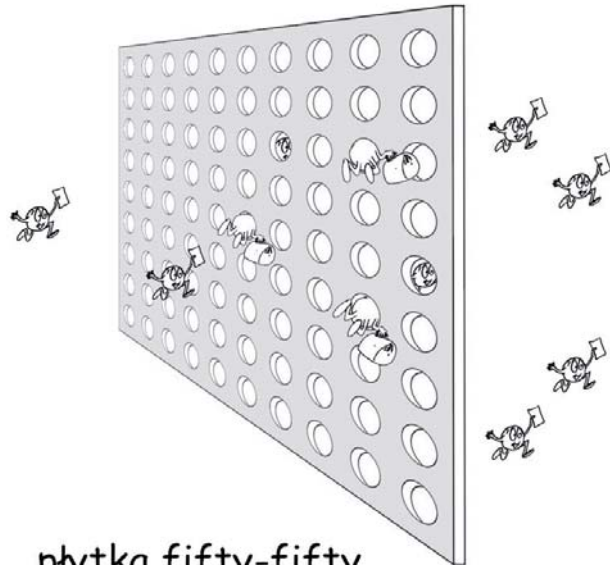
**OPIS KWANTOWY**

Z punktu widzenia mechaniki kwantowej opis działania płytki światłodzielnącej jest bardzo nieintuicyjny. Wychodzimy w nim jak zawsze od założenia, że każda fala elektromagnetyczna może być uważana za strumień bezmasowych cząstek poruszających się z prędkością światła, czyli fotonów. I tu już pojawia się pierwsza subtelność...

Aby to wszystko wyjaśnić w sposób elementarny, ograniczmy się do bardzo szczególnego przypadku tzw. płytki fifty-fifty, tzn. płytki, która jest wykonana w taki sposób, aby dokładnie połowę światła przepuszczała, a połowę odbijała. Taka płytka dzieli po prostu po równo dwie możliwości. Jak wcześniej próbowałem wszystkich przekonać zrobienie takiej płytki w dzisiejszych czasach nie jest bardzo trudne.

Wyobraźmy sobie, że na naszą płytkę pada jakaś fala elektromagnetyczna. W obrazku kwantowym jest to strumień fotonów. Skoro połowa fali jest odbijana, a druga połowa transmitowana, to podobnie musi dziać się z fotonami – połowa z nich przechodzi, a połowa się odbija. Jeśli skupimy się na konkretnym fotonie, który na płytkę pada, to są tylko dwie możliwości – albo przejdzie na drugą stronę, albo się odbije. I choć może jeszcze tego nie widać, to ta kwantowa możliwość rozpatrywania konkretnego fotonu może doprowadzić do bardzo zaskakujących wniosków. Dlaczego?

Wyobraźmy sobie, że falą padającą nie jest dowolna fala elektromagnetyczna, ale światło laserowe. Podobnie jak dla każdej innej fali padającej, połowa światła laserowego jest transmitowana, a połowa odbijana. Ale jak doskonale pamiętamy (MT 4-5/2009) światło laserowe to zbiór identycznych pod każdym względem fotonów. Każdy foton jest dokładnie taki sam. A jednak połowa z nich zostaje odbita, a druga połowa przechodzi na drugą stronę. Jak to możliwe? Mam identyczne fotony, lecą w identyczny sposób, identycznie padają na płytkę dzielącą światło, a jednak połowa z nich zachowuje się inaczej niż druga połowa! Można lakonicznie powiedzieć, że prawdopodobieństwo przejścia konkretnego fotonu na drugą stronę wynosi 50%. Podobnie jest z odbiciem. Ale to nie rozwiązuje problemu, bo każdy konkretny foton albo przejdzie, albo zostanie odbity! Nie robi przecież obydwu rzeczy równocześnie. Po chwili następny foton (dokładna kopia poprzedniego) zrobi coś zgoła innego albo zrobi to samo. Właściwie to nie wiemy, co robi, ale wiemy, że gdy wiele fotonów już to zrobi, to licząc sztuka po sztuce zobaczymy, że połowa z nich zrobiła jedno, a druga połowa drugie. Nie ma przy tym żadnej korelacji pomiędzy wyborami, jakich dokonały konkretne fotony. W szczególności zachowanie danego fotonu zupełnie nie zależy od tego, co zrobił foton poprzedni. Przejście każdego fotonu jest niezależne od innych.



**płytki fifty-fifty**  
która jest wykonana w taki sposób, aby dokładnie połowę światła przepuszczała, a połowę odbijała.

W dzisiejszych czasach potrafimy wytwarzać i dokonywać detekcji pojedynczych fotonów. Możemy zatem wysyłać w kierunku płytki pojedyncze fotony i sprawdzać, czy zostanie on odbity lub przepuszczony. Wysyłając kolejny taki sam foton, znów otrzymamy jedno albo drugie. Powtarzając ten eksperyment wielokrotnie, przekonamy się, że za każdym razem, w sposób zupełnie losowy, foton albo jest odbijany, albo przepuszczany. Wygląda to tak, jakby lecący foton, dolatując do płytki światłodzielnącej, rzucał mone-

# Tym razem zatem Einstein NIE MIAŁ RACJI! Pan Bóg niewątpliwie gra w kości!

tą i w zależności od wyniku rzutu wybierał jedną albo drugą drogę. Potwierdza to zresztą ścisły rachunek w ramach formalizmu mechaniki kwantowej. Czyż to nie brzmi jak paradoks?



## PARAMETR UKRYTY

Zjawisko losowego przechodzenia lub odbijania się fotonów od płytki światłodzielnącej jest niewątpliwie bardzo zaskakujące. Nic więc dziwnego, że w czasach, gdy mechanika kwantowa dopiero raczkowała i nie było pewności, że jest ona na pewno poprawna, próbowano rozwiązać ten problem (i problemy do niego podobne), zaprzeczając mechanice kwantowej. Jednym z takich pomysłów była tzw. teoria parametrów ukrytych, do której swój ogromny wkład miał, jakże często przez nas wspomniany, Albert Einstein, który mawiał: „Nie wierzę, że Bóg gra w kości”.

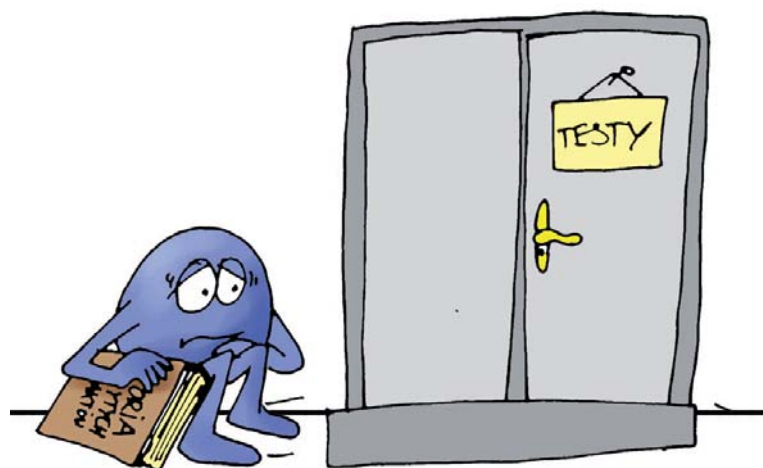
Cóż mówi teoria parametrów ukrytych? Wychodzi ona ze spostrzeżenia, że być może nie wszystko jeszcze wiemy o mikroświecie i być może cząstki elementarne, takie jak foton, mają jakieś dodatkowe właściwości, których nie jesteśmy w stanie obecnie zmierzyć. Mają po prostu zakodowany w sobie pewien dodatkowy parametr, np. coś w rodzaju nieznanego ładunku. Wtedy łatwo jest sobie wyobrazić, że to, co wydaje nam się losowym przechodzeniem fotonów przez płytkę światłodzielną, wcale nie jest losowe, a tak naprawdę zdeterminowane przez wartość tego parametru. Po prostu płytka przepuszcza te fotony, które mają ten parametr mniejszy niż jakaś wartość, a odbija, jeśli jest większy. Możemy sobie wyobrazić ten parametr np. jako „średnicę fotonu”, a płytkę światłodzielną jako otwór o określonym promieniu. Jeśli foton mieści się w otworze, to przechodzi na drugą stronę, jeśli nie, to się odbija.

Teoria parametrów ukrytych jest bardzo atrakcyjna, bo tłumaczy, skąd bierze się losowość w mikroświecie. Losowość, która z punktu widzenia mechaniki kwantowej wydaje się być fundamentalnie zakodowana w przyrodzie z punktu widzenia teorii parametrów jest jedynie skutkiem naszej niewiedzy. Naprawdę pięknie ona to wszystko tłumaczy. Jest tylko jeden problem. Teoria parametrów ukrytych nie przechodzi

testów eksperymentalnych. Okazuje się bowiem, że można zaprojektować odpowiedni eksperyment, w którym fotony mogą przechodzić lub odbijać się od różnych płytek światłodzielnących i tym samym, w zależności od dokonanych wyborów, trafiają do różnych detektorów zliczających fotony. Jeśli eksperyment odpowiednio się zaplanuje, to można teoretycznie wyznaczyć, jaki będzie rozkład fotonów w poszczególnych detektorach po wielokrotnym powtórzeniu eksperymentu. Rozkład ten można przewidzieć zarówno w ramach mechaniki kwantowej, która zakłada, że sposób przejścia fotonu przez płytkę jest za każdym razem losowany, jak i w ramach teorii parametrów ukrytych, która zakłada, że przejście fotonu przez płytkę jest całkowicie zdeterminowane przez pewien parametr, który jest niedostępny naszemu poznaniu. Na szczęście, jak wykazał John Bell, oba przewidywania diametralnie od siebie się różnią, tzn. teorie te nie są równoważne (patrz: Wikipedia → Twierdzenie Bella). Wykonując eksperyment i porównując otrzymany

doświadczalnie rozkład z tymi otrzymanymi teoretycznie, możemy zatem stwierdzić, która z teorii jest poprawna. Pierwszy eksperyment testujący teorię parametrów ukrytych wykonał francuski fizyk Alain Aspect ze swoimi współpracownikami<sup>\*)</sup>. Nie ma żadnych wątpliwości – teoria parametrów ukrytych nie jest prawdziwa! Jej przewidywania nie są zgodne z wynikami eksperymentu. W przeciwieństwie do mechaniki kwantowej, która prawidłowo przewiduje rozkład doświadczalny. Tym razem zatem Einstein NIE MIAŁ RACJI! Pan Bóg niewątpliwie gra w kości! •

<sup>\*)</sup> Aby pozostać w zgodzie z prawdą historyczną, warto dodać, że oryginalne rozumowanie Johna Bella oraz eksperyment Alaina Aspecta dotyczyły innej sytuacji fizycznej niezwiązanej z przechodzeniem fotonów przez płytkę światłodzielną, ale przez tzw. polaryzatory. Niemniej jednak zarówno rozumowanie Bella, jak i doświadczenie Aspecta można z analogicznym rezultatem przeprowadzić dla rozważanej przez nas sytuacji.



Teoria parametrów ukrytych  
nie przechodzi testów  
eksperymentalnych