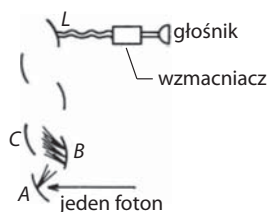


Newton uważał, że światło składa się z cząstek – nazwał je „korpuskułami” i miał rację (ale rozumowanie, którego użył, aby dojść do tego wniosku, było błędne). Wiemy, że światło składa się z cząstek, gdyż możemy wziąć bardzo czuły przyrząd, który „stuka”, gdy światło na niego zaświeci, a gdy światło przygasa, stuknięcia pozostają tak samo głośne, ale jest ich po prostu mniej. Tak więc światło jest czymś podobnym do kropli deszczu – każdy mały kawałek światła nosi nazwę fotonu – i jeśli światło jest jednobarwne, wszystkie te „krople deszczu” mają taką samą wielkość.

Ludzkie oko to bardzo dobry przyrząd: wystarczy tylko około pięciu lub sześciu fotonów, aby aktywować komórkę nerwową i wysłać komunikat do mózgu. Gdybyśmy jeszcze trochę ewoluowali, tak abyśmy mogli widzieć z dziesięć razy większą czułością, niepotrzebna byłaby cała ta dyskusja – widzielibyśmy bardzo blade światło jednego koloru jako ciąg sporadycznych małych błysków o jednakowym natężeniu.

Możecie się zastanawiać, jak można wykryć pojedynczy foton. Przyrząd, który potrafi to zrobić, jest nazywany fotopowielaczem. Opiszę w skrócie, jak on działa. Gdy foton uderza w metalową płytę *A* umieszczoną u dołu (rysunek 1), powoduje, że elektron zostaje wybity z jednego z atomów płyty. Wolny elektron jest silnie przyciągany przez płytę *B* (która ma ładunek dodatni) i uderza z siłą wystarczającą, aby wyzwolić trzy lub cztery elektrony. Każdy elektron wybity z płyty *B* jest przyciągany przez płytę *C* (która jest także naładowana), a ich zderzenie z płytą *C* wybija jeszcze więcej elektronów. Ten proces powtarza się dziesięć lub dwanaście razy, aż miliardy elektronów, w liczbie wystarczającej do wywołania mierzalnego prądu elektrycznego, uderzają w ostatnią płytę *L*. Ten prąd można wzmocnić zwykłym wzmacniaczem i wysłać przez głośnik, tak aby uzyskać słyszalne stuknięcia. Za każdym razem, gdy foton danego koloru uderzą w fotopowielacz, słychać stuknięcie o takiej samej głośności.



Rysunek 1. Fotopowielacz może wykryć pojedynczy foton. Gdy foton uderza w płytę *A*, elektron zostaje z niej wybity i przyciągnięty przez naładowaną dodatnio płytę *B*, uwalniając więcej elektronów. Proces powtarza się aż do czasu, gdy miliardy elektronów uderzają w ostatnią płytę *L*, powodując przepływ prądu elektrycznego, który jest wzmocniany zwykłym wzmacniaczem. Jeśli do wzmacniacza podłączony jest głośnik, przy każdym uderzeniu fotonu danego koloru w płytę *A* słychać stuknięcie o takiej samej głośności

Jeśli umieścicie razem wiele fotopowielaczy i pozwolicie, aby jakieś przyćmione światło świeciło w różnych kierunkach, to światło biegnące do jednego lub drugiego

fotopowielacza spowoduje stuknięcie o pełnym napięciu. Mamy tu wszystko albo nic: jeśli jeden fotopowielacz zostanie uruchomiony w danym momencie, żaden inny nie uruchomi się w tym samym momencie (poza rzadkim przypadkiem, gdy dwa fotony opuszczą źródło światła w tym samym czasie). Nie ma rozbitcia światła na „połówki cząstek”, które wędrują w różne miejsca.

Chcę podkreślić, że światło występuje właśnie w tej postaci – cząstek. Bardzo ważna jest wiedza, że światło zachowuje się jak cząstki, zwłaszcza dla tych, którzy chodzili do szkoły, gdzie zapewne mówiono, że światło zachowuje się jak fala. Ja wam mówię, że *naprawdę* zachowuje się ono jak cząstki.

Możecie powiedzieć, że tylko fotopowielacz wykrywa światło w postaci cząstek, ale nie, każdy przyrząd, który jest dostatecznie czuły, aby wykryć słabe światło, zawsze odkrywał to samo: światło składa się z cząstek.

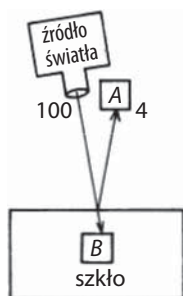
Zakładam, że znacie własności światła w codziennych okolicznościach – takie rzeczy jak to, że porusza się ono po linii prostej, że załamuje się, przechodząc przez wodę; odbija się od takiej powierzchni lustra, a ką, pod którym światło pada na powierzchnię, jest równy kątowni, pod którym ją opuszcza; że światło można rozdzielić na kolory i możecie zobaczyć piękne kolory na kałuży, gdy na jej powierzchni jest nieco oleju; że soczewka skupia światło i tak dalej. Będę wykorzystywał te zjawiska, które już znacie, do ilustracji naprawdę dziwnego zachowania światła. Będę wyjaśniał te znajome zjawiska w języku elektrodynamiki kwantowej. Powiedziałem już wam o fotopowielaczu, aby zilustrować podstawowe zjawisko, którego być może nie znaliście – że światło składa się z cząstek – ale teraz mam nadzieję, że jest już wam znane!

Wydaje mi się, że znacie zjawisko częściowego odbicia światła od powierzchni wody. Jest wiele romantycznych obrazów blasku Księżycy odbijającego się od jeziora (i wiele przypadków, gdy wpędziliście się w kłopoty z *powodu* światła księżycowego odbijającego się od jeziora!). Gdy popatrzymy na wodę, możemy zobaczyć, co jest pod powierzchnią (zwłaszcza w dzień), ale widać także odbicie od powierzchni. Innym przykładem jest szkło: jeśli macie w pokoju zapaloną lampę i patrzycie przez okno w ciągu dnia, możecie zobaczyć to, co jest na zewnątrz, a także blade odbicie lampy w pokoju. Wobec tego światło częściowo zostaje odbite od powierzchni szkła.

Zanim przejdziemy dalej, chciałbym, abyście wiedzieli o uproszczeniu, którego dokonam, aby je później poprawić: gdy mówię o częściowym odbiciu światła od szkła, będę udawał, że światło jest odbijane tylko przez *powierzchnię* szkła. W rzeczywistości kawałek szkła jest potworem ogromnie skomplikowanym – kręci się w nim bardzo dużo elektronów. Gdy foton pada, wchodzi w interakcję z elektronami w *całym* szkłe, a nie tylko z tymi na powierzchni. Fotony i elektrony wykonują rodzaj tańca, a ostateczny jego wynik jest taki sam, jakby foton uderzył tylko w powierzchnię. Tak więc pozwólcie, że zostaną na razie przy tym uproszczeniu. Potem pokażę, co naprawdę dzieje się wewnątrz szkła, abyście mogli zrozumieć, że wynik będzie taki sam.

Teraz opiszę eksperyment i podam wam jego zaskakujące wyniki. W tym eksperymencie niektóre fotony tego samego koloru – powiedzmy światło czerwone –

są emitowane ze źródła światła (rysunek 2) w kierunku szklanej tafli. Fotopowielacz jest umieszczony w punkcie *A*, nad szkłem, aby złapać fotony, które są odbijane przez przednią powierzchnię. Aby zmierzyć, ile fotonów przechodzi przez tę powierzchnię, wewnątrz szkła, w punkcie *B*, umieszczony jest drugi fotopowielacz. Pomińmy oczywiste trudności związane z umieszczeniem fotopowielacza wewnątrz szklanej tafli bloku. Jakie są wyniki tego eksperymentu?

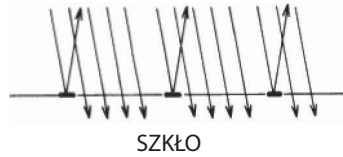


Rysunek 2. Eksperyment mający na celu zmierzenie częściowego odbicia światła na powierzchni szkła. Na każde 100 fotonów, które opuszczają źródło światła, 4 są odbijane przez przednią powierzchnię szkła i docierają do fotopowielacza *A*, pozostałych 96 fotonów przechodzi przez przednią powierzchnię i dociera do fotopowielacza *B*

Na każde 100 fotonów, które padają prosto na szkło pod kątem 90° , średnio 4 docierają do *A*, a 96 do *B*. Tak więc „częściowe odbicie” od tej powierzchni oznacza, że tylko 4% fotonów zostaje odbitych przez przednią powierzchnię szkła, a pozostałe 96% przez nią przechodzi. Już mamy poważną trudność: jak światło może być częściowo odbite? Każdy foton dociera do *A* lub *B* – jak foton „podejmuje decyzję”, czy powinien iść do *A*, czy do *B*? (Słuchacze śmieją się). To może brzmieć jak dowcip, ale nie możemy tylko się śmiać. Musimy wytłumaczyć to, korzystając z teorii! Częściowe odbicie jest samo głęboką tajemnicą i stanowiło bardzo trudny problem dla Newtona.

Jest kilka możliwych teorii, które można wymyślić, aby wyjaśnić częściowe odbicie światła w szkłe. Jedna z nich mówi, że 96% powierzchni szkła to „dziury”, które przepuszczają światło, a pozostałe 4% jest pokryte małymi „plamkami” materiału odbijającego (rysunek 3). Newton zdawał sobie sprawę, że nie jest to możliwe wyjaśnienie⁽¹⁾. Za chwilę napotkamy dziwną cechę częściowego odbicia, która doprowadzi was do szaleństwa, jeśli pozostaniecie przy teorii „dziur i plamek” – lub przy innej sensownej teorii!

⁽¹⁾ Skąd to wiedział? Newton był wielkim człowiekiem. Napisał: „Ponieważ mogę wypolerować szkło”. Możecie się zastanawiać, skąd mógł to wiedzieć, bo jeśli polerujemy szkło, to nie może ono mieć dziur ani plamek? Newton polerował swoje soczewki oraz lustra i wiedział, do czego tym doprowadzał: robił zadrapania na powierzchni szkła za pomocą coraz drobniejszych proszków. W miarę jak zadrapania robiły się coraz drobniejsze, powierzchnia szkła zmieniała swój wygląd z mdłej szarzyzny (gdyż światło było rozpraszane przez duże zarysowania) do przezroczystej czystości (gdyż niezwykle precyzyjne zadrapania przepuszczały światło). Widział więc, że nie można przyjąć tezy, że na światło wpływają bardzo małe nieregularności, jak zadrapania lub dziurki i plamy. W istocie odkrył, że prawdą jest coś przeciwnego. Najsubtelniejsze zarysowania i wynikające stąd równie małe plamki nie wpływają na światło. Więc teoria dziur i plamek nie jest właściwa.



Rysunek 3. Jedna z teorii tłumaczących częściowe odbicie przez powierzchnię zakłada, że powierzchnia składa się przede wszystkim z „dziur”, które przepuszczają światło, z kilkoma plamkami, które je odbijają

Inna możliwa teoria jest taka, że fotony mają jakiś wewnętrzny mechanizm – „koła” lub „przekładnie”, które wewnętrznie je obracają – tak, że foton zostaje właściwie „skierowany” i przechodzi przez szkło, a ten inaczej skierowany odbija się. Możemy sprawdzić tę teorię, próbując odfiltrować fotony, które nie są właściwie skierowane, umieszczając kilka dodatkowych warstw szkła między źródłem a pierwszą warstwą szkła. Jednak po przejściu przez filtry fotony osiagające szkło *wszystkie* powinny być właściwie skierowane i żaden nie powinien się odbić. Problem z tą teorią polega na tym, że nie jest ona zgodna z eksperymentem: nawet po przejściu przez wiele warstw szkła 4% fotonów osiagających powierzchnię odbijało się od niej.

Spróbujmy, jak tylko możemy, wymyślić sensowną teorię, która umożliwi wyjaśnienie, jak foton „podejmuje decyzję”, czy ma przejść przez szkło, czy się odbić. Nie można przewidzieć, w którą stronę powędruje dany foton. Filozofowie mówili, że jeśli w tych samych okolicznościach nie zawsze mamy ten sam wynik, przewidywania są niemożliwe i nauka upadnie. Oto okoliczności – identyczne fotony zawsze lecą w tym samym kierunku na ten sam kawałek szkła – co daje różne wyniki. Nie możemy przewidzieć, czy dany foton znajdzie się w *A*, czy w *B*. Możemy tylko przewidzieć, że na 100 padających fotonów średnio 4 zostaną odbite przez przednią powierzchnię. Czy to oznacza, że fizyka, nauka o wielkiej dokładności, została zredukowana do obliczania tylko *prawdopodobieństwa* zdarzenia i nie może przewidzieć, co się stanie? Tak. To jest odwrót, ale tak właśnie jest: natura pozwala nam obliczać jedynie *prawdopodobieństwa*. A jednak nauka nie upadła!

Podczas gdy częściowe odbicie przez pojedynczą powierzchnię stanowi głęboką tajemnicę i trudny problem, częściowe odbicie przez dwie lub więcej powierzchni jest absolutnie niepojęte. Pozwólcie, że pokażę dlaczego. Wykonamy drugi eksperyment, w którym pomierzmy częściowe odbicie światła od dwóch powierzchni. Zastąpimy blok szklany bardzo cienką taflą szkła – dwie powierzchnie są względem siebie dokładnie równoległe – i umieścimy fotopowielacz poniżej szklanej tafli, w jednej linii ze źródłem światła. Tym razem fotony mogą się odbijać od przedniej powierzchni lub od tylnej powierzchni, trafiając do punktu *A*, a wszystkie pozostałe trafiają do punktu *B* (patrz rysunek 4). Moglibyśmy oczekiwać, że powierzchnia przednia odbije