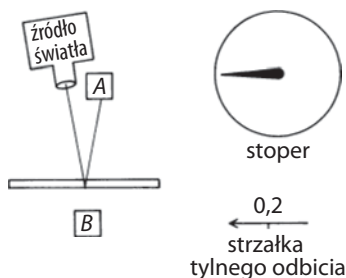
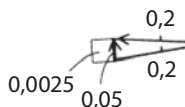


Aby narysować strzałkę tylnego odbicia, wyobraźmy sobie foton opuszczający źródło światła (wskazówki stopera się obracają), przechodzący przez przednią powierzchnię i odbijający się od tylnej powierzchni, a potem docierający do A (wskazówka stopera się zatrzymuje). Tym razem wskazówka stopera pokazuje niemal ten sam kierunek, gdyż foton odbijający się od tylnej powierzchni szkła niewiele później dociera do A – przechodzi przez niezwykle cienką warstwę szkła. Rysujemy teraz małą strzałkę o długości 0,2 w tym samym kierunku co wskazówka stopera (patrz rysunek 11).



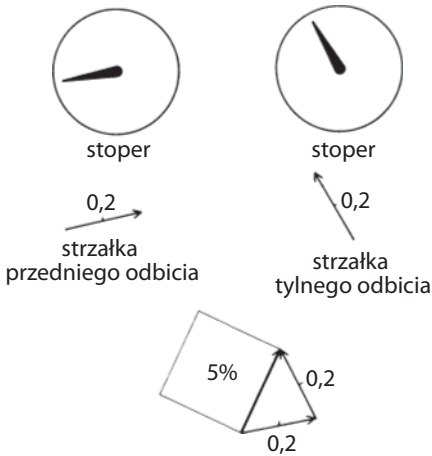
Rysunek 11. Foton odbijający się od tylnej powierzchni cienkiej tafli szkła osiąga punkt A nieco później. Wskazówka stopera pokazuje więc nieco inny kierunek niż podczas pomiaru odbicia od przedniej powierzchni. Strzałka „tylnego odbicia” ma ten sam kierunek co wskazówka stopera

Połączmy teraz dwie strzałki. Ponieważ obie mają taką samą długość, ale wskazują niemal przeciwnie kierunki, długość strzałki wypadkowej będzie bliska zeru, a kwadrat tej długości będzie jeszcze bliższy zeru. Tak więc prawdopodobieństwo, że światło odbije się od nieskończenie cienkiej warstwy szkła, jest w zasadzie równe zeru (patrz rysunek 12).



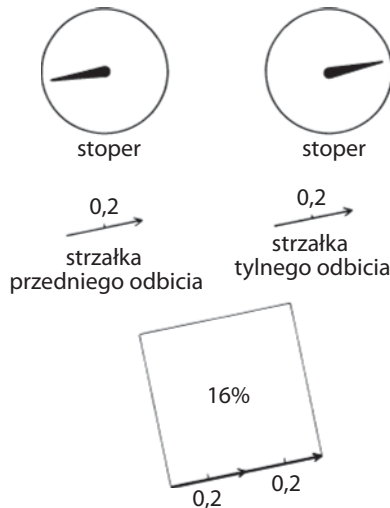
Rysunek 12. Strzałka wypadkowa, której kwadrat reprezentuje prawdopodobieństwo odbicia od niezwykle cienkiej tafli szkła, jest rysowana przez dodanie strzałki przedniego odbicia i strzałki tylnego odbicia. Wynik jest bliski zeru

Gdy zastąpimy najcieńszą tafelę szkła nieco grubszą, foton odbijający się od tylnej powierzchni dotrze do A trochę później niż w pierwszym przykładzie. Wskazówka stopera obróci się więc przed zatrzymaniem nieco dalej, a strzałka tylnego odbicia będzie pod nieco większym kątem względem strzałki przedniego odbicia. Strzałka wypadkowa jest nieco dłuższa, a jej kwadrat odpowiednio większy (patrz rysunek 13).



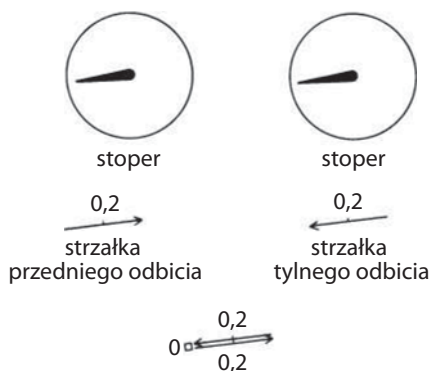
Rysunek 13. Strzałka wypadkowa dla nieco grubszej szklanej tafli jest trochę dłuższa z uwagi na względny kąt między strzałkami, które odpowiadają odbiciom od przedniej i tylnej powierzchni. Jest tak, ponieważ foton potrzebuje więcej czasu na odbicie się od tylnej powierzchni i dotarcie do A

Weźmy inny przykład i popatrzmy na przypadek, w którym szkło jest dostatecznie grube, aby wskazówka stopera zrobiła dodatkowy półobrot w czasie odbijania się fotonu od tylnej powierzchni. Tym razem strzałka tylnego odbicia wskazuje ostatecznie dokładnie ten sam kierunek co strzałka przedniego odbicia. Gdy połączymy obie strzałki, otrzymamy strzałkę wypadkową o długości 0,4, której kwadrat wynosi 0,16, reprezentując prawdopodobieństwo 16% (patrz rysunek 14).



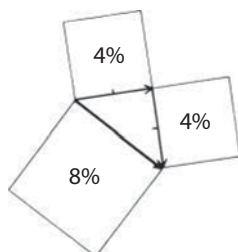
Rysunek 14. Gdy warstwa szkła jest dostatecznie gruba, aby pozwolić wskazówce stopera mierzącej tylne odbicie fotonu na wykonanie połowy obrotu, strzałki przedniego odbicia i tylnego odbicia wskazują ten sam kierunek, a w wyniku tego strzałka wypadkowa ma długość 0,4, co reprezentuje prawdopodobieństwo 16%

Jeśli powiększymy grubość szkła na tyle, aby wskazówka stopera mogła wykonać *pełny* obrót, mierząc czas trajektorii odpowiadającej odbiciu od tylnej ścianki, nasze dwie strzałki znów będą skierowane w przeciwnych kierunkach, a strzałka wypadkowa będzie równa zeru (patrz rysunek 15). Ta sytuacja wciąż się powtarza za każdym razem, gdy grubość szkła jest wystarczająca, aby wskazówka stopera mierząca odbicie od tylnej powierzchni wykonała kolejny pełny obrót.



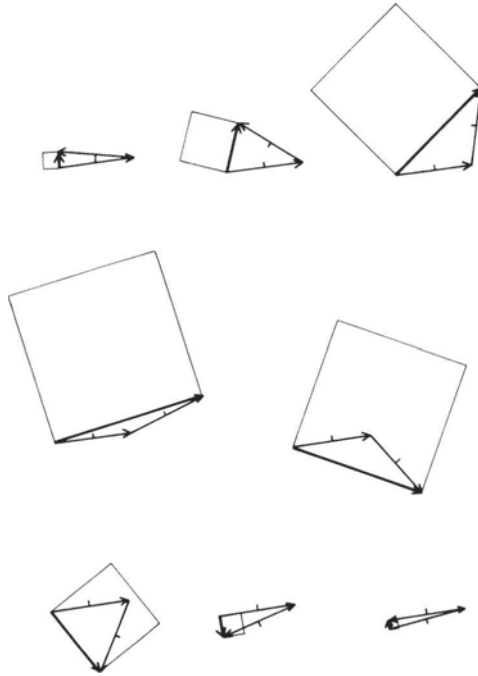
Rysunek 15. Gdy szklana tafła ma odpowiednią grubość, aby wskazówka stopera wykonała jeden lub więcej pełnych obrotów, strzałka wypadkowa ponownie jest zerowa i nie ma żadnego odbicia

Jeśli grubość szkła jest wystarczająca, aby wskazówka stopera mierząca odbicie fotonu od tylnej ścianki obróciła się o jedną czwartą lub trzy czwarte pełnego obrotu, to dwie strzałki utworzą kąt prosty. W tym przypadku strzałka wypadkowa jest przeciwprostokątną trójkąta prostokątnego i zgodnie z twierdzeniem Pitagorasa jej kwadrat jest równy sumie kwadratów pozostałych boków. Tu mamy wartość prawdziwą „dwa razy dziennie” – $4\% + 4\%$ daje 8% (patrz rysunek 16).



Rysunek 16. Gdy strzałki przedniego odbicia i tylnego odbicia tworzą kąt prosty, strzałka wypadkowa jest przeciwprostokątną trójkąta prostokątnego. Jej kwadrat jest więc sumą kwadratów dwóch strzałek – 8%

Zauważmy, że w miarę stopniowego zwiększania grubości szkła strzałka przedniego odbicia wskazuje ten sam kierunek, zaś strzałka tylnego odbicia stopniowo zmienia swój kierunek. Zmiana względnego kierunku dwóch strzałek sprawia, że strzałka wypadkowa przechodzi powtarzający się cykl o długości od zera do 0,4, a więc *kwadrat* wynikowej strzałki przechodzi powtarzający się cykl od zera do 16%, co obserwowaliśmy podczas naszych eksperymentów (patrz rysunek 17).



Rysunek 17. Gdy cienka szklana tafła zastępowana jest przez grubsze tafle, wskazówka stopera mierzącego czas tylnego odbicia fotonu nieco bardziej się obraca i względny kąt między strzałkami przedniego odbicia i tylnego odbicia się zmienia. Powoduje to zmiany długości strzałki wypadkowej, a jej kwadrat zmienia się od 0 do 16% i z powrotem do 0, i tak w kółko

Pokazałem właśnie, jak dziwna cecha częściowego odbicia może zostać dokładnie obliczona dzięki narysowaniu kilku przekłutych strzałek na kartce papieru. Techniczne określenie tych strzałek to „amplitudy prawdopodobieństwa” i czuje się bardziej dostojnie, gdy mówię o „obliczaniu amplitudy prawdopodobieństwa zdarzenia”. Ale wolę być bardziej uczciwy i mówić, że szukamy strzałki, której kwadrat długości odpowiada prawdopodobieństwu jakiegoś zdarzenia.

Przed ukończeniem tego pierwszego wykładu chciałbym wam powiedzieć o kolorach, które widzicie na bańkach mydlanych. Albo jeszcze lepiej, gdy patrząc na