

Przyszedł najwyższy czas, aby odkryć jedną z najbardziej tajemniczych własności, jaką mają fotony. Przygotowani dwuodcinkowym wstępem o polaryzacji fal elektromagnetycznych jesteśmy w końcu gotowi, aby poznać jeden z najbardziej niesamowitych wniosków, jaki płynie z mechaniki kwantowej.



Tomasz Sowiński jest fizykiem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN i na Wydziale Biologii i Nauk o Środowisku UKSW. W 2005 roku skończył studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

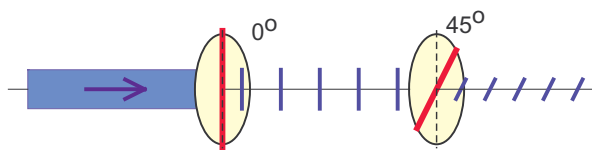
w zakresie fizyki teoretycznej, a trzy lata później uzyskał tam stopień naukowy doktora. Od lat zajmuje się popularyzacją nauk przyrodniczych. W roku 2008 otrzymał tytuł Mistrza Popularyzacji Nauki „Złoty Umysł” w konkursie Prezesa Polskiej Akademii Nauk.

Foton ze strzałką na plecach cz. III

Tomasz Sowiński

O POLARYZACJI RAZ JESZCZE

Przypomnijmy, że naszym głównym celem, jaki stawiamy sobie od dwóch miesięcy, jest wytłumaczenie eksperymentu ze światłem niespolaryzowanym przepuszczanym przez dwa polaryzatory ustawione jeden za drugim.



Pierwszy polaryzator sprawia, że otrzymujemy wiązkę światła spolaryzowanego pionowo. Następnie tę wiązkę przepuszczamy przez kolejny polaryzator – tym razem obrócony pod kątem 45° do pionu. W wyniku takiego eksperymentu ze światła spolaryzowanego pionowo otrzymujemy światło spolaryzowane skośnie z dwukrotnie zmniejszonym natężeniem (MT 10/2009). Wiemy, że tak jest, bo przekonuje nas o tym doświadczenie.

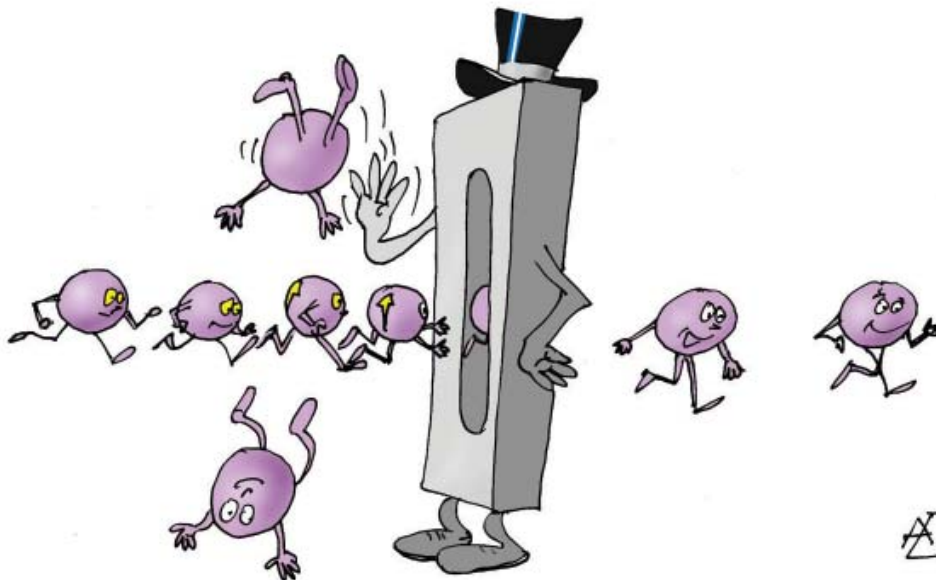
OPIS W JĘZYKU FALI

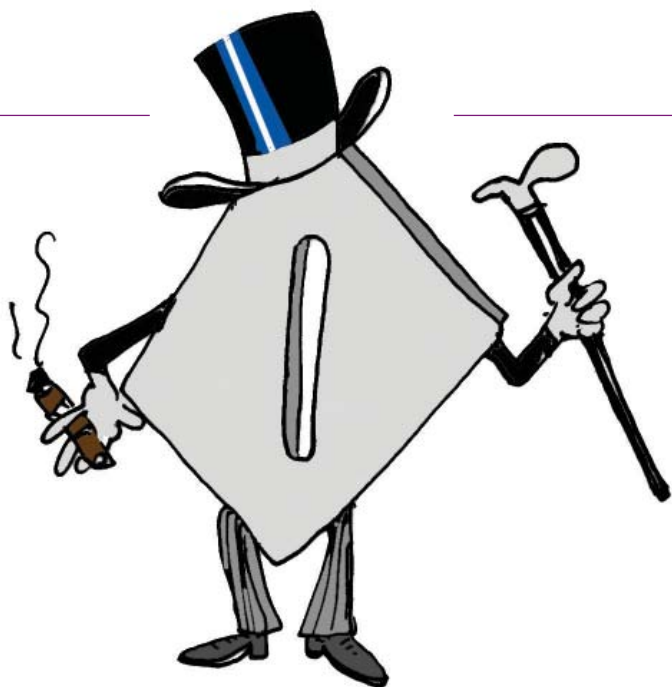
Poprzednim razem dość skrupulatnie wytłumaczyliśmy sobie, jak przebieg tego doświadczenia można wytłumaczyć, zakładając, że światło jest falą elektromagnetyczną. Musieliśmy się w tym celu posłużyć dość ścisłym wywodem matematycznym, który doprowadził nas do bardzo ciekawego wniosku. Otóż fala elektromagnetyczna spolaryzowana np. pionowo ↓ może być bez większego problemu traktowana jak złożenie dwóch fal o polaryzacjach skośnych ↘ i ↙. Wynikało to bezpośrednio z prawa dodawania wektorów polaryzacyjnych

$$\vec{e}_\downarrow = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (\vec{e}_{\searrow} + \vec{e}_{\swarrow})$$

POLARYZATOR JEST PRYMITYWNY, ALE I CWANY

Taki opis całkowicie tłumaczy zachowanie się drugiego polaryzatora, który jest obrócony pod kątem 45° do pionu. Wystarczy przyjąć bardzo prymitywną zasadę działania polaryzatora. Otóż polaryzator tak naprawdę rozróżnia tylko dwa kierunki: zgodny z osią jego polaryzacji i prostopadły do tego kierunku. Falę, która jest spolaryzowana w kierunku zgodnym, przepuszcza na drugą stronę. Falę, która jest spolaryzowana w kierunku prostopadłym, pochłania. Gdy na

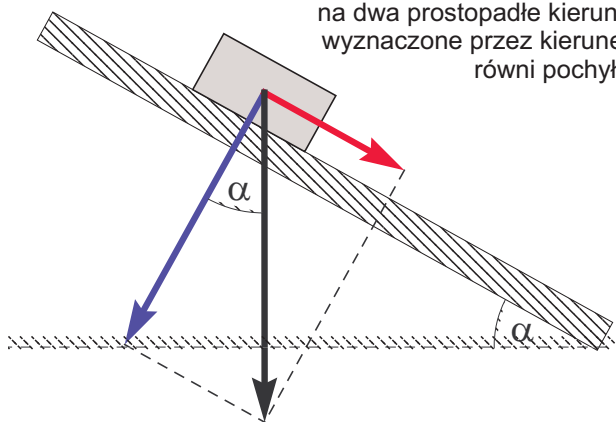




polaryzator pada natomiast fala spolaryzowana w jakimś innym kierunku, to polaryzator jakby rozkładał ją „w locie” na dwa swoje ulubione kierunki. On po prostu każdą padającą falę dzieli na dwie części: część zgodną z jego osią, którą przepuszcza i część prostopadłą, którą całkowicie pochłania.

Warto w tym miejscu dodać, że taki podział jest zawsze możliwy. Każdy bowiem wektor leżący na płaszczyźnie możemy zawsze zapisać jako sumę dwóch dowolnie wybranych, ale prostopadłych do siebie wektorów, które również leżą w tej płaszczyźnie. I choć może to wydawać się zaskakujące, to przypomnijcie sobie, jak rozwiązujemy zadanie z równią pochyłą! Tam przecież właśnie zawsze rozkładamy siły na dwa prostopadłe kierunki – kierunek wzdłuż podłoża równi i kierunek doń prostopadły. I można to przecież zrobić zawsze, niezależnie od kąta, pod jakim ustawiona jest równia. W tym przypadku jest dokładnie tak samo. Rozkładamy wektor polaryzacji na dwa prostopadłe do siebie kierunki, które w tym przypadku są wybrane przez polaryzator.

Rozkład siły ciężkości na dwa prostopadłe kierunki wyznaczone przez kierunek równi pochyłej



A JAK TO JEST Z FOTONAMI?

Działanie polaryzatora w języku falowym jest chyba teraz już całkowicie jasne i okazało się bardzo proste. Przypomnijmy: polaryzator rozdziela każdą padającą falę na dwa kierunki – zgodny i prostopadły

do osi polaryzatora. Następnie pierwszą część przepuszcza, a drugą pochłania. A jak to wyjaśnić w języku fotonów? Co się dzieje z fotonami trafiającymi do polaryzatora?

Zgodnie z naszą wyjściową hipotezą, każdy foton oprócz energii i pędu ma również zakodowaną informację o polaryzacji fali, którą niesie. Hipotezę tę nazwaliśmy teorią „strzałki na plecach”. Nazwa wzięła się z naszego wyobrażenia o fotonach jako małych kulczkach. Każda z tych kulczek ma na plecach narysowaną strzałkę, określającą kierunek polaryzacji fali, której kulczka jest nośnikiem. Oczywiście trzeba pamiętać, że to wyobrażenie nie ma nic wspólnego z rzeczywistością – fotony to nie kulczki i nie mają żadnych strzałek. Ale do celów pobudzenia naszej wyobraźni tak możemy sobie o nich myśleć.

FOTONY SĄ NIEPODZIELNE

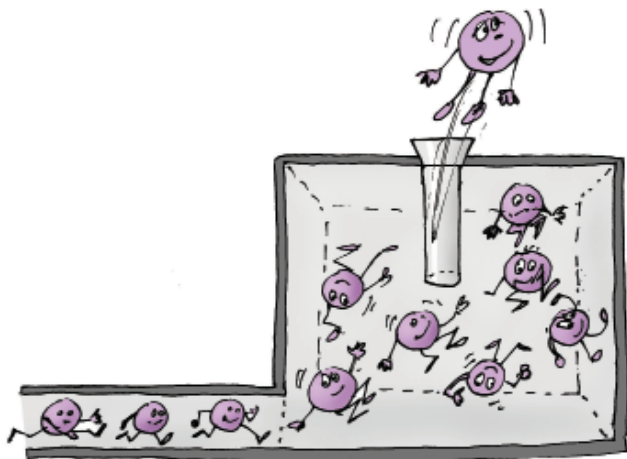
Foton to nic innego jak mała porcja promieniowania elektromagnetycznego. Jest to porcja niepodzielna; nie może istnieć pół czy ćwierć fotonu! Liczba fotonów jest zawsze całkowita. Może warto powiedzieć, co mam przez to na myśli. Otóż, ta porcja promieniowania jest niepodzielna w tym sensie, że jeśli fala ma określoną częstość ν , to foton ma energię $E=h \cdot \nu$, gdzie h jest stałą Plancka (patrz MT 01/2007). Cała energia fali o określonej częstości musi być całkowitą wielokrotnością energii fotonu E . Inaczej mówiąc, energia fotonu, który jest nośnikiem promieniowania o określonej częstości, nie może być rozłożona na dwa fotony o mniejszej energii. I nie jest to wcale tylko taka teoretyczna dywagacja, a fakt doświadczalny. Oto potrafimy wykonywać dziś eksperymenty, które polegają na wytwarzaniu i manipulowaniu pojedynczymi fotonami. Potrafimy też zaobserwować bardzo subtelne zjawiska, które są bezpośrednią konsekwencją ziarnistej natury promieniowania. Gdyby fotony nie były niepodzielne, to zjawisk tych po prostu nie obserwowalibyśmy. I nie chodzi mi tylko o starodawne zjawisko fotoelektryczne, ale o bardziej niesamowite zjawiska, jakie zachodzą w mikroświecie. Na pewno będziemy mieli okazję jeszcze o tym porozmawiać.

FOTON KONTRA POLARYZATOR

Zapewne zastanawiasz się, Drogi Czytelniku, dlaczego w tym miejscu postanowiłem jeszcze raz tak bardzo podkreślić, że fotony są niepodzielnymi porcjami promieniowania elektromagnetycznego. Czy to może mieć jakiś związek z działaniem polaryzatorów? Otóż tak! I to wielki...

Wróćmy do początku, do eksperymentu z dwoma polaryzatorami. Fala elektromagnetyczna za pierwszym polaryzatorami ma polaryzację pionową. Pada ona na polaryzator obrócony pod kątem 45° do pionu. Skoro fala padająca jest strumieniem fotonów, to znaczy, że każdy z nich ma strzałkę ustawioną pionowo. Dolatuje on do polaryzatora i mu się „ładnie” przedstawia, pokazując swoją strzałkę. Polaryzator nie rozumie jednak jego strzałki, bo on potrafi tylko myśleć w kategoriach dwóch kierunków: zgodnym z osią polaryzatora i prostopadłym do niego. A nadlatujący foton jest dla niego ustawiony skośnie.

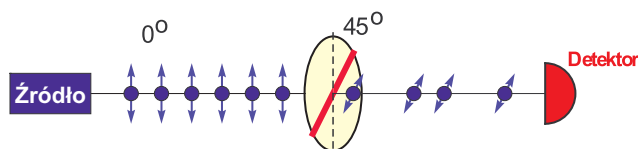
Polaryzator bardzo chętnie rozłożyłby kierunek wskaźwany przez foton na swoje dwa ulubione. I połowę fotonu przepuścił na drugą stronę, a połowę pochłoniął. ALE NIE MOŻE TEGO ZROBIĆ! Bo fotony są niepodzielne. Cóż zatem ma zrobić? Jeśli foton przepuści, to źle, jak go pochłonie, to również źle... Tym bardziej że za tym fotonem lecą już następne i dylemat znów się pojawia.



Maszyna losująca

Możemy oczywiście sobie wyobrazić, że polaryzator jest troszkę bardziej cwany. Tzn. jak leci strumień fotonów, to jeden z nich przepuści i obróci jego polaryzację, a następny pochłonie. I tak na zmianę. Tym sposobem rzeczywiście przepuści połowę promieniowania. Problem polega na tym, że polaryzator w takim przypadku musiałby gdzieś sobie zapisywać, co zrobił ostatnio z fotonem, aby wiedzieć, co zrobić z kolejnym. Bo fotony są przecież identyczne. Polaryzator musiałby mieć zatem coś w rodzaju pamięci, notatnika. Czegoś, gdzie mógłby zapisać swoje poprzednie decyzje. Ale czegoś takiego oczywiście nie ma. Musi zatem decydować na bieżąco, wraz z przylatywaniem kolejnych fotonów.

Zamiast zastanawiać się, jak to będzie, możemy posłużyć się eksperymentalnymi danymi. Skoro fizycy umieją wytwarzać pojedyncze fotony, to można przecież sprawdzić, co dzieje się, gdy na polaryzator ustawiony pod kątem 45° będziemy wysyłać po jednym fotonie z polaryzacją pionową. Odpowiedź jest bardzo ciekawa. Oto polaryzator średnio przepuści połowę fotonów. Jednak nie robi tego w najprostszy sposób, tzn. naprzemiennie, ale zupełnie przypadkowo. Czasami przepuści dwa pod rząd, czasami kilku pod rząd nie przepuści, itp. Zupełnie nie będzie żadnej w tym regularności. Gdyby zrobić statystykę, to okaże się, że wygląda to tak, jakby polaryzator zupełnie losowo przepuszczał każdy z fotonów osobno, bez zastanawiania się, jak było wcześniej i bez planowania, co zrobić później. Schematycznie możemy to sobie wyobrazić tak jak na poniższym rysunku



Krótko mówiąc, za każdym razem, gdy foton zbliży się do polaryzatora, losuje on, czy foton przepuścić, czy go pochłoniąć. Prawdopodobieństwo każdej możliwości jest takie samo, ale jaki będzie wynik konkretnego losowania, nikt (nawet sam polaryzator) nie wie.

Takie wnioski można wyciągnąć z przeprowadzonego eksperymentu. Ale czy to wszystko można jakoś lepiej zrozumieć? No i jeszcze pozostał problem tej nieszczęsnej polaryzacji, która po przejściu fotonu przez polaryzator zostaje dodatkowo obrócona. Co z nią? Nawet jeśli pogodzimy się z tym, że foton jest losowo przepuszczany lub pochłaniany, to nadal nie wiemy, dlaczego jego polaryzacja miałaby się obrócić.

W języku falowym było to dość jasne. Falę padającą rozkładaliśmy na dwie składowe. Przechodziła ta z nich, która miała polaryzację zgodną z polaryzatorem. Tym samym naturalne było, że nastąpi obrócenie polaryzacji. Ale dlaczego polaryzacja fotonu miałaby się obrócić? Nie widać tu żadnej rozsądnej odpowiedzi.

FOTONOWY MISZMASZ

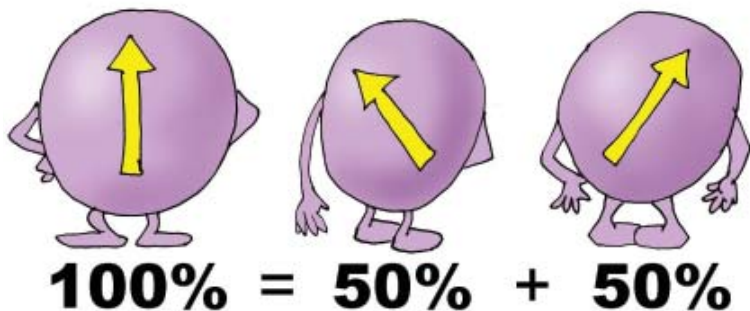
Cała informacja o tym, co stanie się z fotonem, gdy napotka on na swojej drodze polaryzator, musi być zakodowana w samym fotonie, bo polaryzator potrafi rozróżniać tylko dwa kierunki. Skoro foton ma gdzieś w sobie zapisany kierunek polaryzacji fali, której jest nośnikiem, to wydaje się całkiem naturalne, że właśnie porównanie tego kierunku z kierunkiem polaryzatora powinno całkowicie wystarczyć do określenia tego, co się stanie.

Założmy zatem na chwilę, że polaryzator w jakiś dziwny sposób rozkłada kierunek polaryzacji padającego fotonu na dwa swoje ulubione kierunki. Następnie sprawdza, jakie są proporcje pomiędzy tymi kierunkami w owym rozkładzie i na tej podstawie ustala zasady losowania. Dla sytuacji z naszego doświadczenia rozkład ten wygląda tak:

$$\vec{e}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \vec{e}_{\nearrow} + \frac{1}{\sqrt{2}} \vec{e}_{\nwarrow}$$

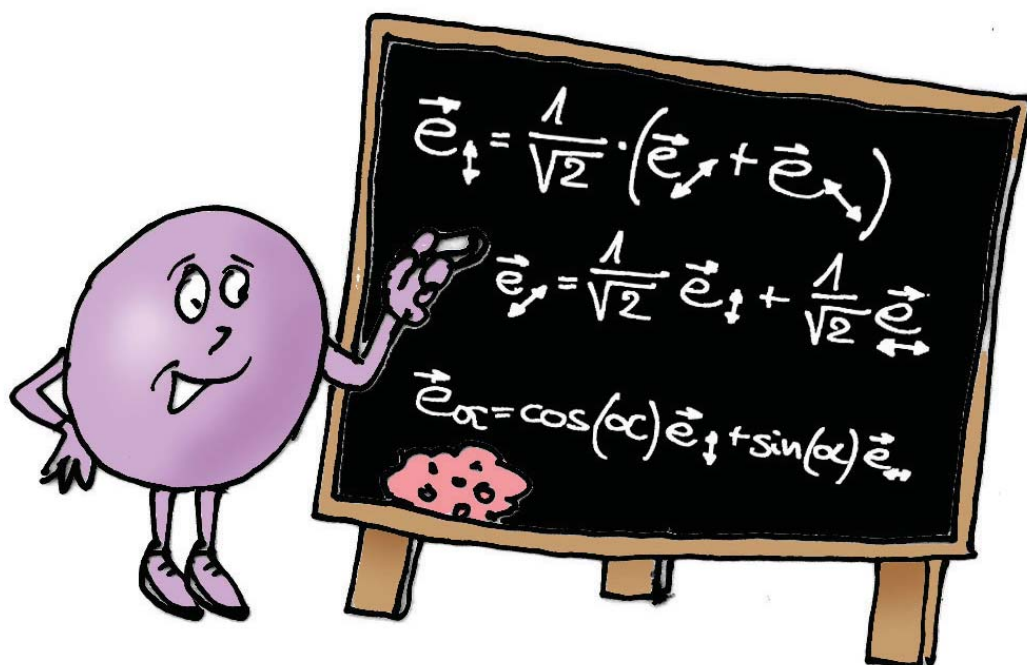
Ponieważ oba kierunki mają taką samą wagę, to losuje on pomiędzy nimi z prawdopodobieństwami 1/2. Jeśli wylosuje kierunek, który jest zgodny z ustawieniem polaryzatora, to foton przepuszcza i ten kierunek polaryzacji ustala. Jeśli jest prostopadły do niego, to foton pochłania. Wygląda to tak, jakby polaryzator urządzał losowanie spośród dwóch składowych polaryzacyjnych pojedynczego fotonu i na tej podstawie wybierał jedną z nich. Widzimy dodatkowo, że prawdopodobieństwo wylosowania danej składowej jest kwadratem wagi, z jaką wchodzi dana składowa.

Ten obrazek przekonuje, że foton o pionowej polaryzacji jest jakby mieszaniną fotonów o innych polaryzacjach. Nie jest to jednak zwykła mieszanina, w której miesza się kilka fotonów i powstaje jeden. Fotony są przecież niepodzielne na mniejsze fotony! Fizycy mówią, że jest to mieszanina probabilistyczna. Foton, który na 100% ma polaryzację pionową, można uważać za foton, który ma polaryzację skośną ↘ w 50% i prostopadłą do niej polaryzację skośną ↗ również w 50%. Działanie polaryzatora w tym języku jest niczym innym jak tylko wylosowaniem konkretnej z nich!



Łatwo można się przekonać, że opis ten jest samozgodny. Na przykład w sytuacji, gdy jest odwrotnie, tzn. gdy foton spolaryzowany skośnie pada na polaryzator pionowy, również wszystko się zgadza. Wtedy musimy się posłużyć następującym rozkładem

$$\vec{e}_{\nearrow} = \frac{1}{\sqrt{2}} \vec{e}_{\uparrow} + \frac{1}{\sqrt{2}} \vec{e}_{\leftarrow}$$



Widzimy, że w takiej sytuacji foton padający jest mieszaniną probabilistyczną fotonu pionowego i poziomego (z równymi prawdopodobieństwami) i polaryzator urządzi losowanie. Dokładnie to obserwujemy w doświadczeniu.

INNY PRZYKŁAD

Na zakończenie podajmy inny, bardziej skomplikowany, przykład. Do tej pory rozważaliśmy cztery kierunki polaryzacji: pionowy, poziomy i dwa skośnie obrócone o 45° od pionu. Nic nie stoi jednak na przeszkodzie, aby rozważać kierunki odchylone od pionu o dowolny kąt α . Załóżmy np. że foton o takiej dziwnej polaryzacji pada na polaryzator pionowy. Wtedy musimy kierunek polaryzacji fotonu \vec{e}_{α} rozłożyć na kierunki, z których „umie losować” polaryzator, czyli na pionowy i poziomy. Czytelnik przekona się sam, że taki rozkład ma wtedy postać

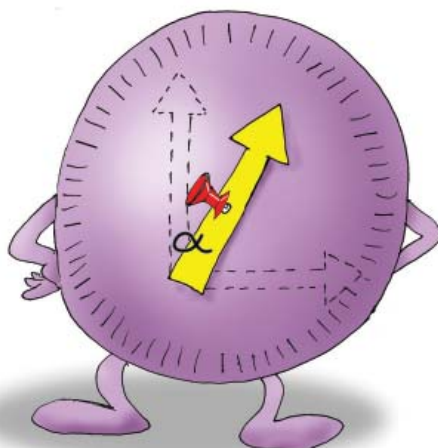
$$\vec{e}_{\alpha} = \cos(\alpha) \vec{e}_{\uparrow} + \sin(\alpha) \vec{e}_{\leftarrow}$$

Na marginesie dodajmy, że dla kąta $\alpha = 45^\circ$ otrzymujemy sytuację poprzednią, o czym łatwo można się przekonać. W każdym razie ten rozkład oznacza, że foton o polaryzacji pod kątem α można uważać za mieszaninę fotonu pionowego i poziomego z prawdopodobieństwami odpowiednio $\cos^2(\alpha)$ i $\sin^2(\alpha)$ (kwadrat wagi, z którą wchodzi dana składowa). To oznacza, że polaryzator ustawiony pionowo dokona aktu losowania właśnie z takimi wagami i tym samym jeśli na polaryzator padnie N foto-

nów, to na drugą stronę polaryzatora zostanie przepuszczonych średnio $N \cdot \cos^2(\alpha)$. Podobnie będzie oczywiście z natężeniem promieniowania – jeśli natężenie fali padającej wynosiło I_0 , to po przejściu będzie równe $I_0 \cdot \cos^2(\alpha)$. Jest to tzw. prawo Malusa odkryte jeszcze w XIX wieku przez francuskiego oficera i fizyka Etienne’a-Louisa Malusa. Można je łatwo uzasadnić w języku falowym, co pozostawiam Czytelnikowi jako ćwiczenie.

Z(A)MIESZANY FOTON

Takie probabilistyczne myślenie o fotonie może wydawać się bardzo dziwne i mało rozsądne. Dlaczego niby foton miałby być jakąś mieszaniną innych fotonów? To brzmi jak jakiś nonsens. Okazuje się jednak, że nikt nie wymyślił innego opisu (choć wielu próbowało), który byłby zgodny z doświadczeniem. Tylko opis w języku prawdopodobieństwa przetrwał jak do tej pory wszystkie testy doświadczalne. Jako fizycy musimy zatem przyjąć taki sposób opisu fotonu. Przynajmniej do czasu, aż podważymy go eksperymentalnie. Ale na to się nie zapowiada... •



Foton o dziwnej polaryzacji