Polaryzacja to fundamentalna własność każdej fali elektromagnetycznej, określająca kierunek drgań pola elektrycznego podczas propagacji. Dzięki polaryzatorom możemy wytwarzać spolaryzowane wiązki światła. Jeśli zjawisko polaryzacji światła chcemy wytłumaczyć w języku fotonów, to musimy założyć, że każdy z nich ma w jakiś sposób zakodowaną informację o polaryzacji światła, której jest nośnikiem. Inaczej bowiem działanie polaryzatora nie byłoby zrozumiałe. Tak powstała nazwana przez nas „teoria strzałki na plecach" (MT 10/09). Szybko jednak okazało się, że nasze rozważania prowadzą na manowce... czyżby?

Foton ze strzałką na plecach cz. II

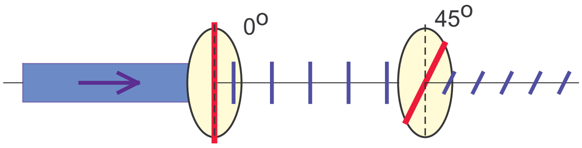
Tomasz Sowiński

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.

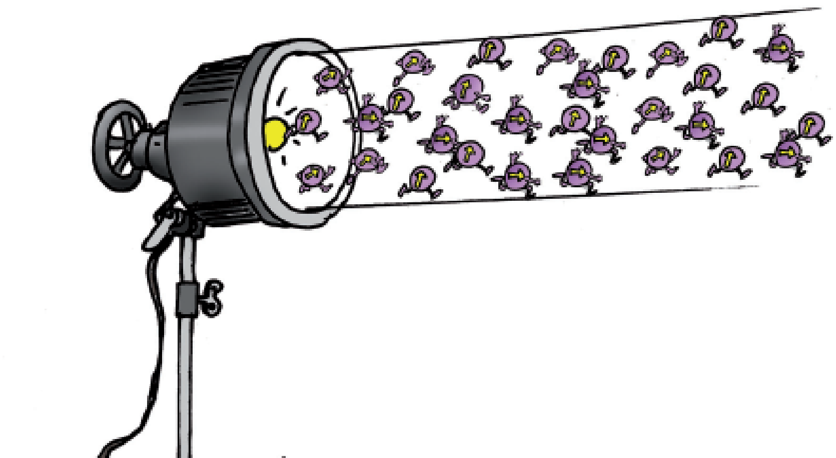
TEKST ŚREDNIO TRUDNY

DWA POLARYZATORY

Skoncentrujmy się na problemie, który ostatnim razem pozostawiliśmy bez odpowiedzi. Światło, które nie jest spolaryzowane, przepuszczamy przez polaryzator ustawiony w kierunku pionowym. Dzięki temu za polaryzatorem otrzymujemy światło spolaryzowane w tym właśnie kierunku. Następnie pada ono na kolejny polaryzator, który jest tym razem ustawiony pod kątem 45° stopni do pionu. Jak już to sobie wyjaśniliśmy, doświadczenie przekonuje, że wtedy na drugą stronę polaryzatora przechodzi dokładnie połowa padającego promieniowania, a druga połowa jest pochłaniana. Dodatkowo światło, które zostało przepuszczone na drugą stronę, ma polaryzację zgodną z ustawieniem osi polaryzatora, przez który przeszło. Krótko mówiąc, polaryzacja została obrócona o 45°. Schematycznie wygląda to tak jak na poniższym rysunku



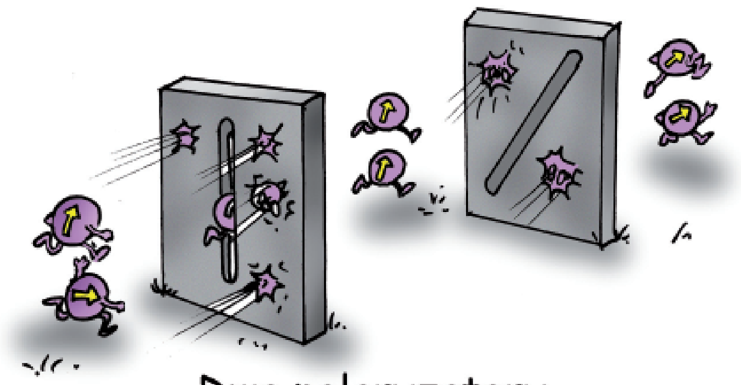
Wytłumaczenie wyniku takiego eksperymentu „teorią strzałki na plecach" nie jest łatwe. Przypomnijmy, że zgodnie z nią każdy foton ma zakodowaną informację o polaryzacji światła, którego jest nośnikiem. Takie założenie zupełnie wystarczało, aby zrozumieć pierwszą część naszego eksperymentu. Światło wychodzące ze źródła nie jest spolaryzowane w żadnym kierunku. Jest mieszaniną światła o wszystkich możliwych polaryzacjach. W języku fotonowym można powiedzieć, że składa się z fotonów z różnie ustawionymi strzałkami na plecach. Gdy zbliżają się one do polaryzatora, wtedy porównują kierunek swoich strzałek z kierunkiem ustawienia polaryzatora. Te z nich, które mają polaryzację zgodną, przelatują na drugą stronę. Te, które mają strzałkę w innym kierunku, zostają zatrzymane.



Światło wychodzące ze źródła

No dobrze. Ale co z drugą częścią naszego eksperymentu? Wszystkie fotony po wyjściu z pierwszego polaryzatora mają polaryzację (tzn. strzałkę) ustawioną

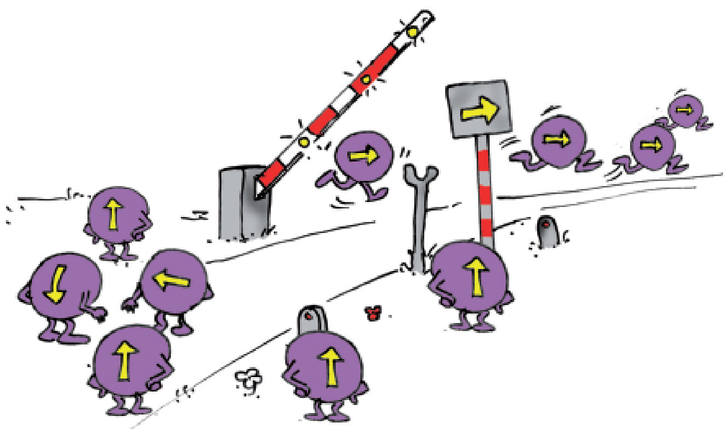
*Niestety machanie rękami już nam nie wystarczy.
Musimy zgłębić ten problem troszkę bardziej matematycznie.*



Dwa polaryzatory

pionowo i zbliżają się do polaryzatora ustawionego pod kątem 45° do pionu. Skoro z doświadczenia wiemy, że połowa światła przechodzi na drugą stronę, a połowa zostaje zatrzymana, podobnie musi być z fotonami. Choć wszystkie fotony zbliżające się do polaryzatora są identyczne, to połowa z nich zostanie przepuszczona na drugą stronę, a połowa zostanie zatrzymana.

Sytuacja jest jakby bardzo podobna do zjawiska na płytce światłodzielącej (MT 06/2009). Pamiętacie? Tam również połowa fotonów była przepuszczana, a połowa zatrzymywana, choć wszystkie fotony były identyczne. Tutaj sprawa jest troszkę bardziej skomplikowana, bo fotony dodatkowo mają obróconą polaryzację.



Teoria strzałki na plecach

No dobrze, spróbujmy teraz to wszystko troszkę przeanalizować dokładniej. Niestety machanie rękami już nam nie wystarczy. Musimy zgłębić ten problem troszkę bardziej matematycznie.

TROSZKĘ MATEMATYKI

Na początek, aby w ogóle zorientować się, co się dzieje, spróbujmy opisać działanie polaryzatora w języku falowym, tzn. przy założeniu, że światło jest falą. Tłumaczenie tym sposobem było całkiem proste w przypadku płytki światłodzielącej. Może i teraz będzie łatwe?

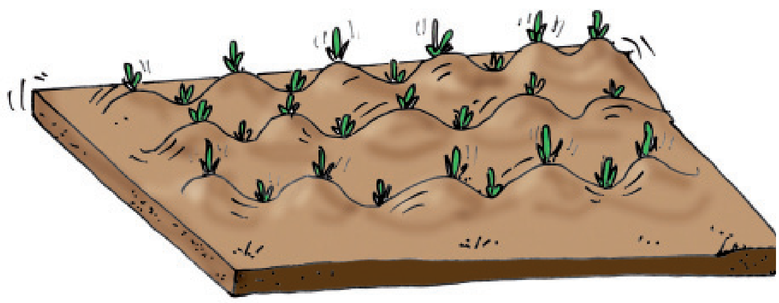
W obrazie falowym zasadę działania polaryzatora można zrozumieć, jeśli odwołamy się do języka matematycznego. Aby wszystko było w miarę proste, na początku zastanówmy się, jak można matematycznie opisać polaryzację światła. Jak pamiętamy, polaryzacja to kierunek, w którym drga pole elektryczne w propagującej się fali elektromagnetycznej. Pole elektryczne jest wektorem, więc rzeczywiście ma ono jakiś konkretny kierunek. Załóżmy dla przykładu, że fala elektromagnetyczna rozchodzi się w kierunku Z, a pole elektryczne drga w niej w kierunku Y (umownie kierunek ten będziemy nazywali „pionowym"). Wtedy zmieniające się pole elektryczne możemy zapisać w postaci

$$\vec{E}(z) = E_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \cdot \vec{e}_{\updownarrow}$$

Przeanalizujmy ten wzór dokładnie. Opisuje on, jak zmienia się wektor pola elektrycznego $\vec{E}$, gdy przesuwamy się w kierunku propagacji Z. Po pierwsze widać, że jest to sinusoida, której okres jest równy λ (proszę to sprawdzić samodzielnie). Mówiąc językiem fizyki, λ jest zatem długością rozważanej przez nas fali elektromagnetycznej. Parametr E_0 opisuje amplitudę tej fali – jest to maksymalna wartość, jaką może osiągnąć pole elektryczne. Na samym końcu stoi tajemniczy wektor $\vec{e}_{\updownarrow}$. Jest to wektor, który mówi, w którym kierunku drga pole elektryczne. Ponieważ zgodnie z naszymi założeniami pole ma drgać w kierunku Y, wektor ten ma następujące współrzędne

$$\vec{e}_{\updownarrow} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Całkowicie analogicznie możemy opisywać falę elektromagnetyczną, której polaryzacja jest „pozioma". W takiej fali pole elektryczne drga w kierunku



Drgające pole elektryczne

zgodnym z osią X. Jeśli fala ta różni się od poprzedniej jedynie polaryzacją, to ma taką samą długość i taką samą amplitudę. Jedyna różnica jest w kierunku drgań pola. Zmieniające się w tej fali pole elektryczne możemy zatem zapisać w postaci

$$\vec{E}(z) = E_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \cdot \vec{e}_{\leftrightarrow}$$

Tym razem wektor $\vec{e}_{\leftrightarrow}$ wskazujący kierunek polaryzacji ma oczywiście następujące współrzędne

$$\vec{e}_{\leftrightarrow} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Warto dodać, że wektory $\vec{e}_{\updownarrow}$ i $\vec{e}_{\leftrightarrow}$ mają długość równą 1. Jest to oczywiście konsekwencja naszej umowy mówiącej, że cała informacja o amplitudzie drgań pola będzie zawarta w parametrze E_0.

POUCZAJĄCA LEKCJA

Zanim przejdziemy dalej, zatrzymajmy się w tym miejscu na chwilę, bo przyda nam się pewna pouczająca lekcja. Spróbujmy za pomocą zdobytej już wiedzy sprawdzić, jak w tym języku można wytłumaczyć najprostsze doświadczenie z polaryzatorem. Załóżmy, że mamy do czynienia z idealną mieszaniną dwóch rodzajów światła: spolaryzowanego „pionowo" i spolaryzowanego „poziomo". Załóżmy przy tym, że natężenie i długość każdego z nich są takie same, tzn. obie fale różnią się jedynie kierunkiem polaryzacji. W takiej sytuacji możemy oczywiście napisać, że sumaryczna fala ma pole elektryczne drgające wg wzoru

$$\vec{E}_{in}(z) = E_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \cdot \vec{e}_{\leftrightarrow} + E_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \cdot \vec{e}_{\updownarrow}$$

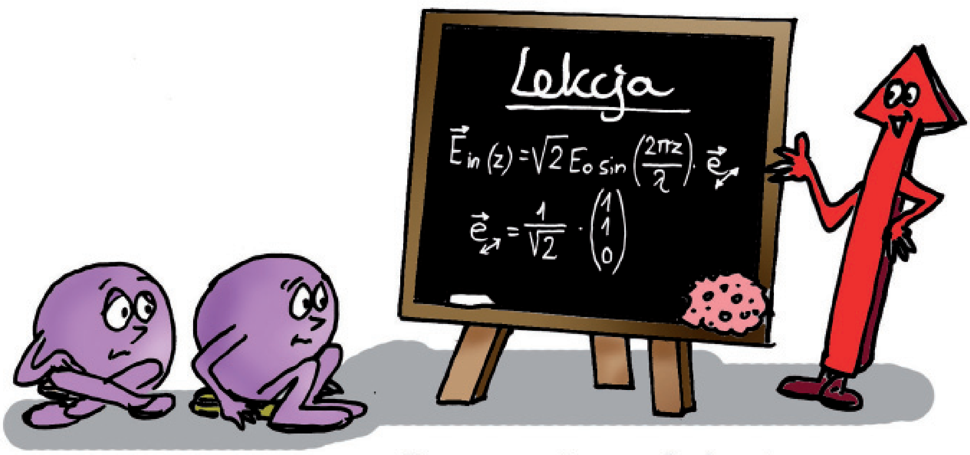
Indeksu „in" użyłem do oznaczenia fali początkowej.

Z doświadczenia wiemy, że polaryzator ustawiony poziomo przepuszcza falę, która jest „poziomo" spolaryzowana, a tę spolaryzowaną w kierunku prostopadłym do osi polaryzatora (w tym przypadku „pionową") pochłania. Jeśli zatem rozważana przez nas fala pada na taki polaryzator, to po drugiej stronie pozostanie fala, którą można opisać wzorem

$$\vec{E}_{out}(z) = E_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \cdot \vec{e}_{\leftrightarrow}$$

Indeks „out" oznacza tutaj falę, która została przez polaryzator przepuszczona.

W języku matematycznym zatem działanie polaryzatora oznacza dokładnie to samo o co nam chodzi: przepuszczanie światła spolaryzowanego zgodnie z osią polaryzatora i pochłanianie tego, które jest spolaryzowane w kierunku prostopadłym.



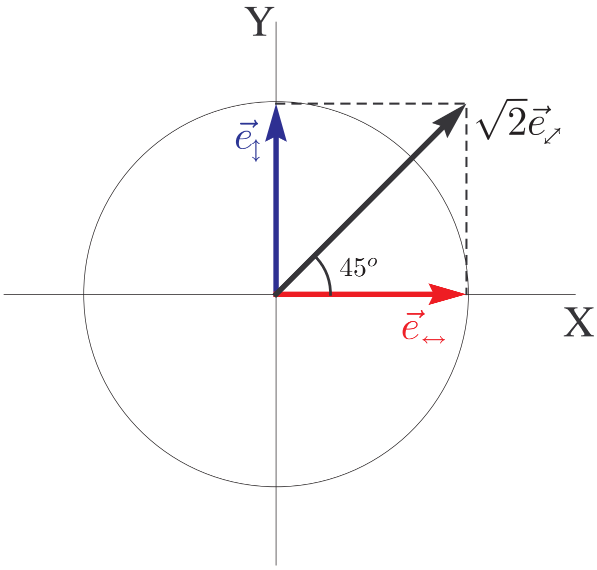
Pouczająca lekcja

PO CO TO WSZYSTKO?

W tym miejscu może się wydawać, że cały ten formalizm matematyczny był zupełnie niepotrzebny, bo to wszystko już wiedzieliśmy wcześniej i to bez tego całego matematycznego pasztetu. A jednak jest pewien zysk. Aby to zrozumieć, wróćmy jeszcze na chwilę do naszej fali padającej $\vec{E}_{in}$. Zauważmy, że oba składniki różnią się od siebie tylko i wyłącznie wektorami wskazującymi polaryzację. Można zatem całą tę falę zapisać w uproszczonej postaci

$$\vec{E}_{in}(z) = E_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \cdot (\vec{e}_{\updownarrow} + \vec{e}_{\leftrightarrow})$$

Dodawanie dwóch wektorów o jednostkowej długości, które są ustawione pod kątem prostym do siebie, umie zapewne wykonać każdy. Suma takich dwóch wektorów to nic innego jak wektor ustawiony pod kątem 45° stopni do osi X i Y.



Jak widać z rysunku, jeśli podzielimy go jeszcze przez $\sqrt{2}$, to będzie to wektor, który ma długość równą 1. Oznaczymy go symbolem $\vec{e}_{\nearrow}$. Jak łatwo sprawdzić we współrzędnych kartezjańskich, ma on następujące składowe

$$\vec{e}_{\nearrow} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix}1\\1\\0\end{pmatrix}$$

To wszystko razem oznacza, że falę padającą $\vec{E}_{in}$ można zapisać w postaci

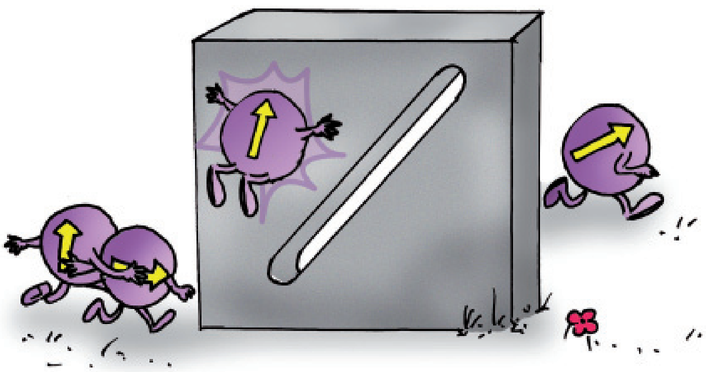
$$\vec{E}_{in}(z) = \sqrt{2}E_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \cdot \vec{e}_{\nearrow}$$

Chwileczkę! Ale to jest przecież nic innego jak fala spolaryzowana w kierunku obróconym pod kątem 45° do pionu (będziemy ją nazywali „skośną"). Jak wynika bowiem z naszego wzoru, w takiej fali pole elektryczne drga wzdłuż kierunku wyznaczonego przez wektor $\vec{e}_{\nearrow}$, czyli drga właśnie tak, jak wyobrażalibyśmy to sobie w „skośnej" polaryzacji. Nawet ten nieszczęsny $\sqrt{2}$ dobrze, że się pojawił. Natężenie światła jest bowiem proporcjonalne do kwadratu amplitudy fali. Fale początkowe miały amplitudę równą E_0 , czyli natężenie światła każdej z nich było równe E_0^2 . Jak łatwo sprawdzić, fala, którą otrzymaliśmy, ma natężenie dwukrotnie większe. Tak jak być powinno, aby być w zgodzie z zasadą zachowania energii.

Cała nasza analiza musi oznaczać, że jeśli taką falę przepuścilibyśmy przez polaryzator ustawiony pod kątem 45°, to cała przejdzie na drugą stronę. Czy to nie jest niesamowite? Na początku mieliśmy dwie fale spolaryzowane „poziomo" i „pionowo". Wydawało się zatem, że nie ma żadnej składowej o „skośnej" polaryzacji. A tu proszę bardzo! Złożenie tych dwóch fal dało w rezultacie falę, która jest dokładnie spolaryzowana pod kątem 45°.

WYJAŚNIENIE EKSPERYMENTU

Wyjaśnienie naszego wyjściowego eksperymentu w języku falowym nie jest już teraz dla nas żadną trudnością. Jak pamiętamy, w tym eksperymencie fala spolaryzowana pionowo pada na polaryzator obrócony pod kątem 45°. W wyniku tego doświadczenia przez polaryzator przechodzi połowa światła i ma obróconą polaryzację.



Wyjaśnienie eksperymentu

Pokażmy, że w formalizmie, który przed chwilą pokazałem, jest to oczywiste. Na początku mamy bowiem falę padającą, którą można zapisać wzorem

$$\vec{E}_{in}(z) = E_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \cdot \vec{e}_{\updownarrow}$$

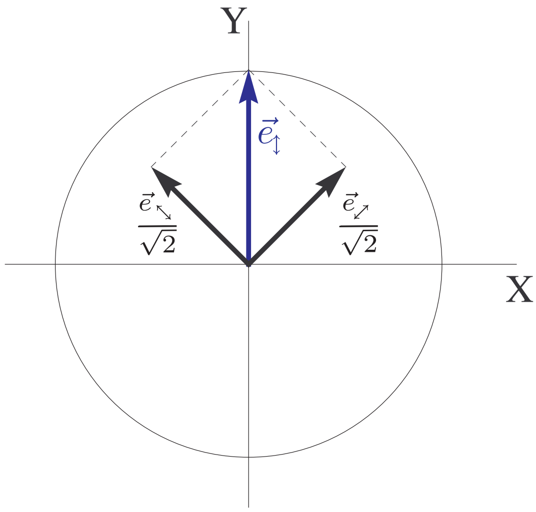
Natężenie tej fali to E_0^2. Ponieważ fala ta pada na polaryzator obrócony, musimy przekształcić wyrażający ją wzór do postaci takiej, aby zawierał on wektory polaryzacji zgodne z osiami polaryzatora. Można to zrobić następująco

$$\vec{e}_{\updownarrow} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/2 \\ 1/2 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1/2 \\ 1/2 \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \vec{e}_{\nearrow} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \vec{e}_{\nwarrow}$$

gdzie wektory polaryzacyjne mają następujące składowe

$$\vec{e}_{\nearrow} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \vec{e}_{\nwarrow} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Graficznie wygląda to tak



Fala padająca $\vec{E}_{in}$ wyrażona przez takie wektory polaryzacyjne ma zatem postać

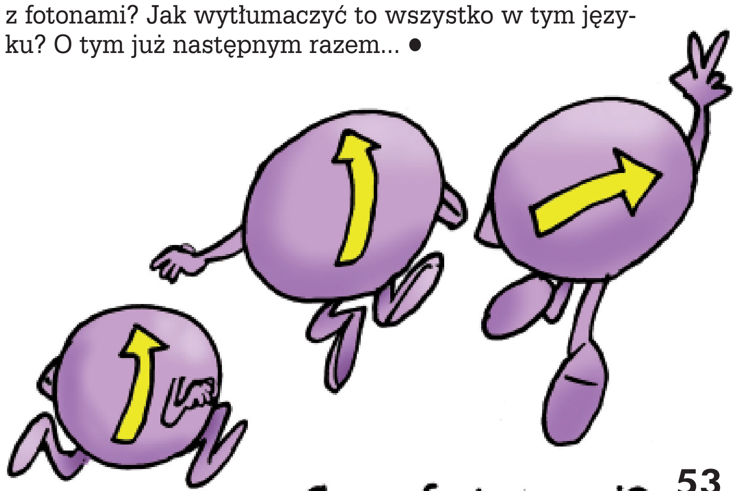
$$\vec{E}_{in}(z) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \cdot (\vec{e}_{\nearrow} + \vec{e}_{\nwarrow})$$

Wszystko jest zatem jasne. Polaryzator ustawiony pod kątem 45° przepuści połowę (kwadrat amplitudy) światła spolaryzowanego „pionowo" i obróci jego polaryzację. Druga połowa jest spolaryzowana w kierunku prostopadłym do osi polaryzatora i dlatego zostanie pochłonięta.

Warto w tym miejscu dodać coś, co jest zapewne dla każdego Czytelnika oczywiste. Jeśli wybierzemy dwa prostopadłe do siebie kierunki (np. „pionowy" i „poziomy") i wybierzemy wektory jednostkowe w tych kierunkach, to każdy wektor leżący w płaszczyźnie rozpiętej przez te wektory daje się zapisać jako ich pewna suma. Matematycznie mówiąc, każdy wektor daje się rozłożyć na te wektory bazowe. Aby zatem sprawdzić, jaka część światła zostanie przez polaryzator przepuszczona, wystarczy rozłożyć jego polaryzację na kierunek zgodny z osią polaryzatora i kierunek do niego prostopadły. Dokładnie tak jak zrobiliśmy to w rozważanym przez nas eksperymencie.

A CO Z FOTONAMI?

No dobrze... w końcu nauczyliśmy się czegoś konkretnego o falach i polaryzatorach. Teraz możemy rozwiązywać różne zadania z tym związane. Ale co z fotonami? Jak wytłumaczyć to wszystko w tym języku? O tym już następnym razem... ●



Co z fotonami?