

Fotony to zdumiewające cząstki. Mielśmy już nieraz okazję przekonać się, jak niesamowite mają one zdolności. Pamiętacie na przykład eksperyment Macha-Zendera? Dzięki niemu doszliśmy do wniosku, że fotony potrafią sprawdzić, co się dzieje na ścieżce, którą wcale nie podążają (MT 08-09/2009). Zbliżamy się do odkrycia kolejnej zdumiewającej umiejętności fotonów. Ale zanim do tego dojdziemy, musimy poznać jeszcze jedną ich własność.



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. I

Tomasz Sowiński

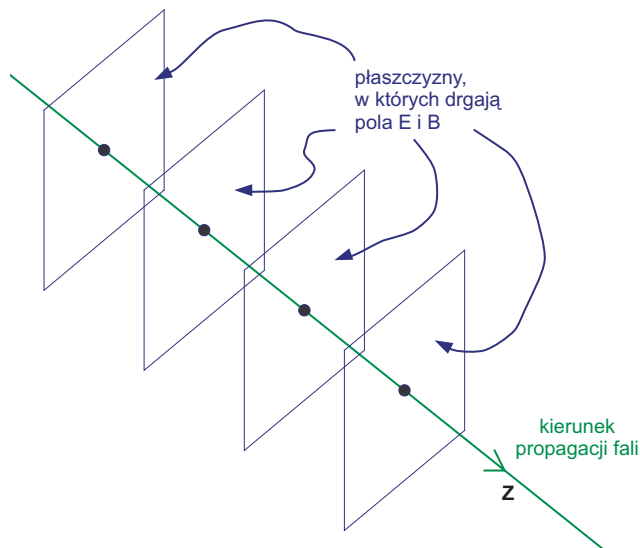
POLARYZACJA ŚWIATEŁA

Zrozumienie kolejnej niesamowitej własności fotonów nie jest możliwe bez zrozumienia pewnej własności fal elektromagnetycznych, którą zawsze skrętnie omijaliśmy. Do tej pory mówiliśmy tylko, i nie było w tym oczywiście żadnego kłamstwa, że fala elektromagnetyczna to nic innego jak zaburzenia pola elektrycznego i magnetycznego rozchodzące się w przestrzeni z prędkością światła. Wyobrażaliśmy sobie, że są to zaburzenia bardzo podobne do tych, jakie rozchodzą się na powierzchni wody. Jednak chyba każdy z nas czuł, że to nie jest to samo; że fala elektromagnetyczna to coś innego, bardziej skomplikowanego. I rzeczywiście tak jest. Przyszedł zatem czas, aby zgłębić, jak te niesamowite zaburzenia rzeczywiście wyglądają i jak się rozchodzą.

Jedną z podstawowych własności fali elektromagnetycznej jest jej tzw. POLARYZACJA. Aby zrozumieć to pojęcie, należy sobie najpierw uświadomić fakt, że drgania, którym podlega pole elektryczne i magnetyczne w fali elektromagnetycznej, nie są dowolne. Są na nie nałożone pewne ograniczenia, które wynikają wprost z praw Maxwella. Ograniczenia te muszą być oczywiście bezwzględnie spełnione.

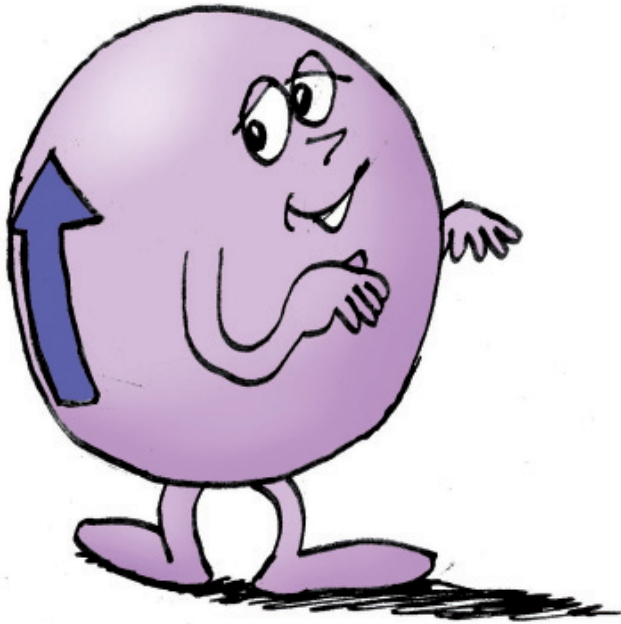
W innym przypadku bowiem fala nie mogłaby być falą elektromagnetyczną, bo nie spełniałaby podstawowych praw elektrodynamiki.

Pierwsze ograniczenie jest proste: fala elektromagnetyczna jest zawsze falą poprzeczną. To znaczy, że pola elektryczne i magnetyczne mogą drgać jedynie w kierunkach prostopadłych do kierunku rozchodzenia się fali. Jeśli fala rozchodzi się np. w kierunku osi Z, to w każdym punkcie przestrzeni drgania pól na pewno leżą w płaszczyźnie do tego kierunku prostopadłej, czyli w tym przypadku w płaszczyźnie X-Y. Podobnie jest z falami na jeziorze – fala rozchodzi się po powierzchni, a drga w kierunku prostopadłym (pionowym).



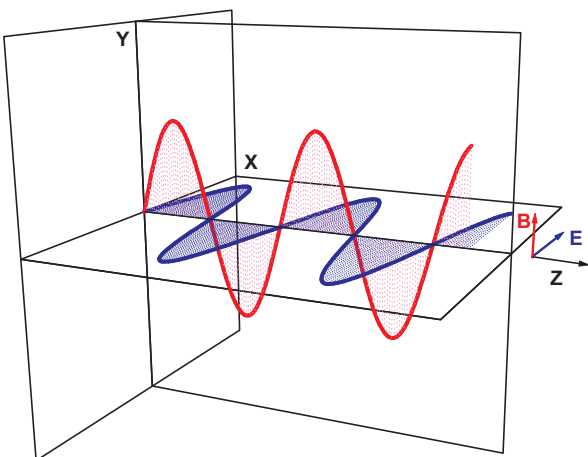
Poprzeczność nie jest jednak jedynym ograniczeniem na propagację fali elektromagnetycznej. Drugi warunek jest jeszcze silniejszy. Mówi on, że drgające pole elektryczne i magnetyczne są nie tylko prostopadłe do kierunku propagacji, ale również są prostopadłe do siebie, a ich oscylacyjne zmiany są zawsze zgodne w fazie.

Przedstawmy to obrazowo. Załóżmy, że fala rozchodzi się w kierunku osi Z. Jeśli w jakimś punkcie przestrzeni wektor natężenia pola elektrycznego E drga w kierunku osi X, to w tym punkcie wektor indukcji magnetycznej B drga na pewno w kierunku osi Y. Drga przy tym tak, aby osiągać maksymalną i minimalną wartość dokładnie w tych samych momentach,



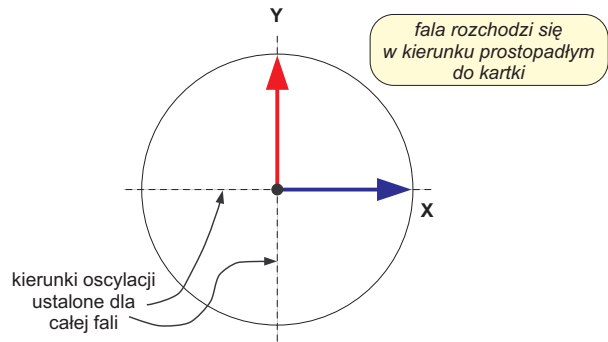
w których osiąga je wektor natężenia pola elektrycznego. Wektor wskazujący kierunek propagacji fali oraz wektory pól elektrycznego i magnetycznego są zawsze do siebie wzajemnie prostopadłe.

Każda fala elektromagnetyczna musi spełniać powyższe warunki, aby być w zgodzie z prawami elektrodynamiki. Najprostszą realizacją tych reguł jest fala spolaryzowana liniowo. Jest to fala, w której pole elektryczne drga w ściśle określonym kierunku. To oczywiście pociąga za sobą fakt, że również pole magnetyczne drga w ściśle określonym kierunku, bo musi być zawsze prostopadłe do elektrycznego. Dlatego właśnie o takiej fali mówimy, że jest spolaryzowana liniowo, bo jest ustalony pewien wyróżniony kierunek, w którym drga pole elektryczne. Taką falę można wyobrazić sobie następująco:



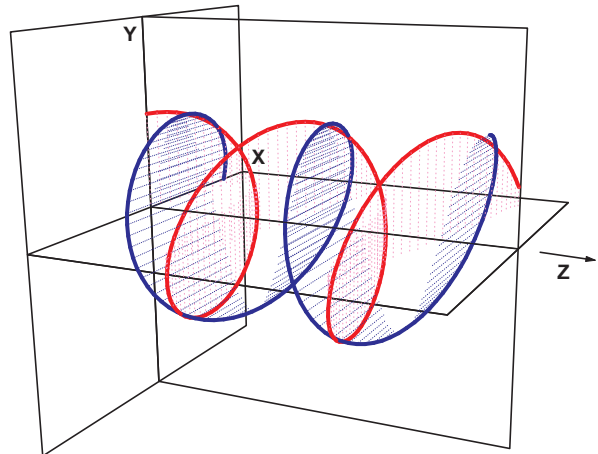
Na tym schematycznym rysunku fala rozchodzi się w kierunku osi Z, pole elektryczne drga w kierunku osi X, a pole magnetyczne Y.

Kierunki te nie zmieniają się podczas propagacji. Łatwo to sprawdzić, patrząc na taką falę z kierunku, w którym się ona rozchodzi. Wtedy zauważymy, że niezależnie od tego, w którym miejscu staniemy, drgania pola elektrycznego i magnetycznego będą się zawsze odbywały w tych samych kierunkach.

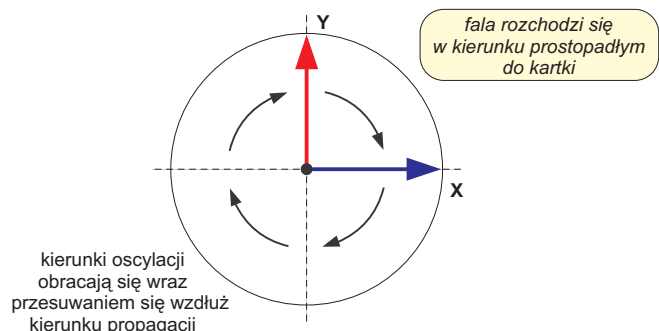


Łatwo jednak można wyobrazić sobie inną, troszkę bardziej skomplikowaną sytuację. W poprzednim przykładzie założyliśmy trochę na wyrost, że pola elektryczne i magnetyczne zawsze drgają w tym samym kierunku. Wymaganie, jakie płynie z praw Maxwella, jest o wiele słabsze. Wymaga ono jedynie, aby pola te były prostopadłe do siebie i do kierunku propagacji. W trakcie propagacji kierunki te mogą się jednak dość dowolnie zmieniać.

Nie będziemy się dłużej nad tym zastanawiali, bo odejdziemy troszkę od tematu, ale dla porządku pokażemy przykład innej fali, która spełnia warunki propagacji, ale nie jest falą spolaryzowaną liniowo.



Fala przedstawiona na naszym schematycznym rysunku rozchodzi się, tak jak poprzednia, w kierunku osi Z. Tak jak poprzednio pole elektryczne jest w każdym punkcie prostopadłe do pola magnetycznego i pola te drgają względem siebie w fazie. Niemniej jednak kierunki drgań zmieniają się wraz z przemieszczaniem się wzdłuż kierunku propagacji. Gdy popatrzymy na taką falę z kierunku, w którym się ona rozchodzi, to zauważymy, że wraz z przesuwaniem się po kierunku propagacji kierunki drgań pól obracają się, tworząc coś w rodzaju helisy.





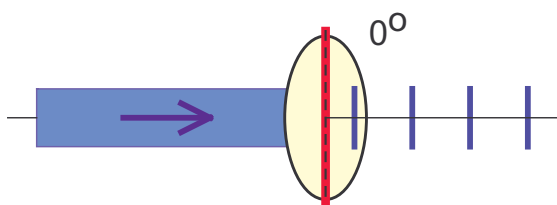
Taką falę, w której kierunki polaryzacji obracają się wraz z przesuwaniem się po kierunku propagacji, nazywamy falą spolaryzowaną kołowo. Ale tak jak powiedziałem, nie będziemy się już dłużej nad tym zatrzymywali. Do naszych potrzeb w zupełności wystarczy pojęcie fali spolaryzowanej liniowo.

JAK SPOLARYZOWAĆ ŚWIATŁO?

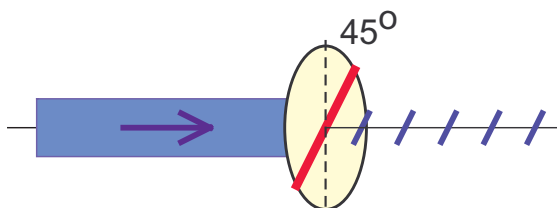
No dobrze. Powiedzieliśmy już, że prawa Maxwella dopuszczają istnienie fal spolaryzowanych liniowo. Ale czy takie fale możemy w ogóle wytworzyć doświadczalnie?

Odpowiedź na to pytanie jest twierdząca. Ludzie nauczyli się wytwarzać światło spolaryzowane już w XIX wieku, kiedy to angielski fizyk William Nicola użył specjalnie przygotowanego kryształu kalcytu do wytworzenia światła spolaryzowanego. Okazuje się, że jeśli na taki kryształ w odpowiedni sposób poświecimy zwykłym światłem, to przepuści on na drugą stronę tylko tę jego składową, która ma polaryzację w określonym kierunku. Pozostałą część światła odbije lub pochłonie. Każde urządzenie, które działa w ten właśnie sposób, że przepuszcza światło tylko o określonej polaryzacji, nazywamy POLARYZATOREM.

W dzisiejszych czasach potrafimy konstruować polaryzatory bardzo różne, przystosowane do fal elektromagnetycznych o różnych częstościach. I wcale nie musimy wdawać się za bardzo w szczegóły konstrukcyjne tych urządzeń, aby zrozumieć ich zasadę działania. Dla nas najważniejszą informacją powinno być to, że polaryzator przepuszcza tylko tę część światła, która jest odpowiednio spolaryzowana. Schematycznie możemy to przedstawić tak jak na poniższym rysunku:

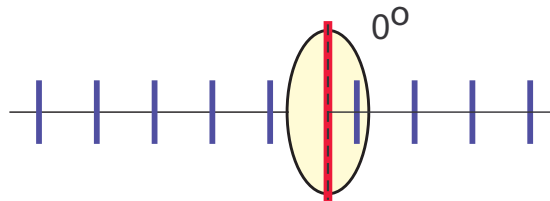


Żółte koło symbolizuje polaryzator, na którym czerwonym kolorem jest zaznaczony kierunek polaryzacji (w tym przypadku pionowy). Padające światło niespolaryzowane po przejściu przez polaryzator jest spolaryzowane w tym kierunku, w którym ustawiony jest polaryzator. Jeśli zatem obrócimy nasz polaryzator np. o 45° , to przejdzie przez niego tylko światło spolaryzowane w tym obróconym kierunku.

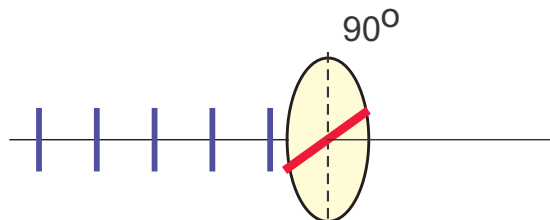


Nie będzie chyba dla nikogo żadnym zaskoczeniem, jeśli powiem, że jeżeli światło spolaryzowane w jakimś kierunku już wcześniej (np. w kierunku pio-

nowym) pada na polaryzator ustawiony w tym właśnie kierunku, to zostanie ono całe przepuszczone na drugą stronę. Jest tak oczywiście dlatego, że światło padające składa się tylko z takiego światła, które jest przepuszczane przez polaryzator. Naturalne jest zatem, że całe musi być przepuszczone.



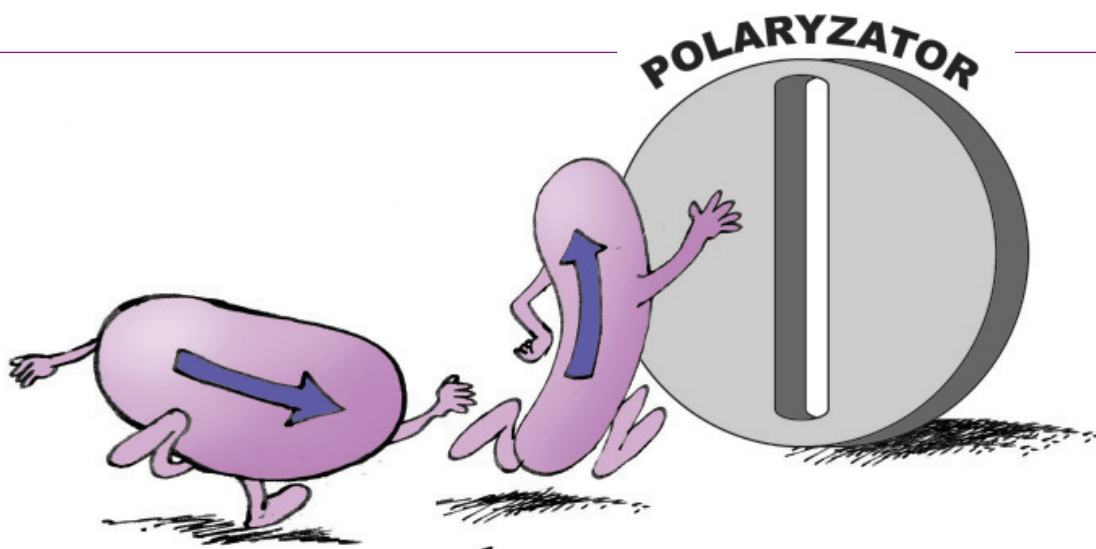
Jeśli natomiast spróbujemy przepuścić światło spolaryzowane w jakimś kierunku przez polaryzator ustawiony do tego kierunku prostopadle, to żadne światło na drugą stronę się nie przedostanie. Takie zachowanie światła również wydaje się całkiem rozsądne, prawda?



Na razie wszystko jest zatem zgodne z naszą intuicją. Pojęcie polaryzacji światła wydaje nam się dość proste. Ot, jest to po prostu kierunek, w którym drga pole elektryczne w rozchodzącej się fali, a dzięki polaryzatorowi możemy rozdzielać światło o różnych polaryzacjach.

OBRAZ FOTONOWY

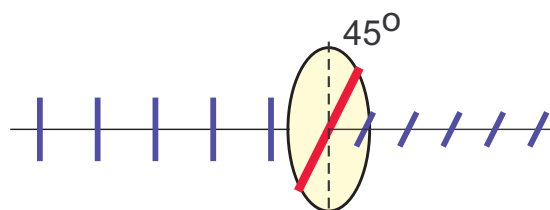
Skoro zatem tak dobrze nam idzie, to zatrzymajmy się teraz na chwilę w tym miejscu i zobaczymy, czy wszystko jest również dobrze w obrazie fotonowym. Jak pamiętamy, każdą falę elektromagnetyczną możemy uważać za strumień fotonów – bezmasowych cząstek poruszających się z prędkością światła. Aby zrozumieć, czym jest polaryzacja w tym języku, odwołajmy się jak zawsze do naszego szablonowego przykładu – światła laserowego, które jest strumieniem identycznych fotonów. Wyobraźmy sobie przy tym dwa promienie spolaryzowanego światła laserowego, które są zmieszane ze sobą, i rozchodzące się w tym samym kierunku. Na przykład jeden o polaryzacji pionowej, a drugi poziomej. Jeśli takim zmiksowanym promieniem poświecimy na polaryzator ustawiony pionowo, to oczywiście na drugą stronę przejdzie tylko składnik spolaryzowany pionowo. Jeśli polaryzator jest skierowany poziomo, to przejdzie składnik spolaryzowany poziomo. To oczywiste! Stąd płynie bardzo naturalny wniosek, że fotony przenoszące falę elektromagnetyczną, oprócz tego, że mają określoną energię i pęd, posiadają również wiedzę o polaryzacji światła, którego są nośnikami. W innym przypadku nie moglibyśmy wytłumaczyć faktu, że światło o różnych polaryzacjach różnie zachowuje się na polaryzatorze.



Wyobraźmy sobie teraz, że przepuszczamy światło spolaryzowane pionowo przez polaryzator ustawiony pod kątem 45° względem pionu. Wynik tak przygotowanego eksperymentu jest wręcz zdumiewający. Okazuje się, że w takim przypadku przez polaryzator zostanie przepuszczona dokładnie połowa

Jeśli wyobraźmy sobie, że każdy foton, oprócz tego, że ma określoną energię i pęd, ma gdzieś „zapisany” kierunek polaryzacji, to sprawa jest prosta. Gdy foton zbliża się do polaryzatora, to porównuje on kierunek swojej polaryzacji z kierunkiem polaryzatora. Jeśli kierunki są zgodne, to przechodzi na drugą stronę. Jeśli kierunek polaryzatora jest prostopadły (np. dla „pionowego” fotonu polaryzator jest „poziomy”), to zostaje pochłonięty. Wygląda to tak, jakby każdy foton na swoich „plecach” niósł wielką strzałkę, która mówi o jego polaryzacji. Zbliżając się do polaryzatora, porównuje on ustawienie swojej strzałki z kierunkiem polaryzatora.

światła. Druga połowa zostanie pochłonięta. Mało tego! Światło, które zostanie przez polaryzator przepuszczone, będzie miało obróconą o 45° polaryzację względem pionu. Polaryzator po prostu obróci polaryzację światła, które przepuści.



GDZIE JEST PROBLEM?

Zapewne zastanawiasz się, Drogi Czytelniku, gdzie jest problem. Jak na razie wszystko jest bowiem zrozumiałe i proste. Nie widać tu nic zdumiewającego, a tym bardziej nic magicznego.

Zamiast się tłumaczyć, może po prostu pokażę Ci wynik troszkę zmodyfikowanego eksperymentu z polaryzatorami. Wtedy zrozumiesz, jak ten nasz piękny i prosty opis polaryzacji w języku fotonów jest... **BŁĘDNY!**

Do tej pory omawialiśmy dwa proste przypadki. W pierwszym światło nie-spolaryzowane przepuszczaliśmy przez polaryzator. Wtedy przez polaryzator przechodziło światło tylko o tej konkretnej polaryzacji. W drugim przepuszczaliśmy światło spolaryzowane przez polaryzator ustawiony albo zgodnie z polaryzacją światła, albo w kierunku do niej prostopadłym. Wtedy na drugą stronę odpowiednio przechodziło całe światło albo całe było pochłaniane. W obrazie fotonowym udało nam się wytłumaczyć takie zachowanie światła teorią „strzałki na plecach”.

No to teraz spróbuj, Drogi Czytelniku, wytłumaczyć wynik tego eksperymentu teorią „strzałki na plecach”. Od razu widać, że to chyba jakiś nonsens. Dlaczego niby połowa fotonów ze strzałkami na plecach miałaby przechodzić na drugą stronę, a druga połowa nie? Odpowiedzi poszukamy następnym razem... •

