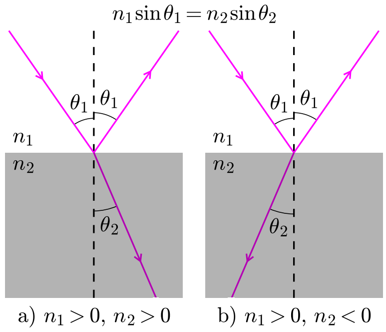
Metamateriały – postępy w optyce

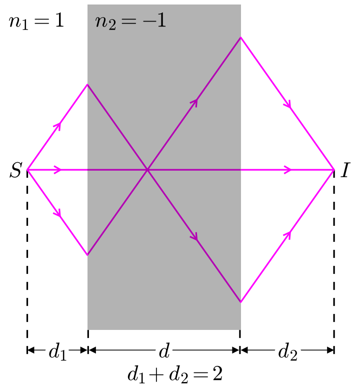
Władysław Marek SAJ[*]

Załamanie światła jest zjawiskiem dobrze znanym, tak jak opisujące je prawo Snella (rys. 1a). Można jednak zadać pytanie: dlaczego światło po przejściu do innego ośrodka załamuje się akurat w tę stronę, a nie w drugą, jak na rys. 1b. Odpowiedź wymaga w tym momencie odwołania się do bardziej podstawowych praw fizyki takich jak równania Maxwella lub zasada Fermata. Można na ich podstawie stwierdzić, że kierunek załamania światła przy przejściu z jednego ośrodka do drugiego zależy od znaku ich współczynników załamania. Tak więc światło przy przejściu z ośrodka o dodatnim współczynniku załamania do ośrodka o ujemnym współczynniku załamania (lub vice versa) ulegnie *ujemnemu załamaniu* (rys. 1b).



Rys. 1. Załamanie światła przy padaniu na a) zwykły materiał b) metamateriał o współczynniku załamania mniejszym od zera.

Materiałów o ujemnym współczynniku załamania n nie spotykamy w przyrodzie. Jednak fundamentalne prawa fizyki nie wykluczają takiej możliwości, co pierwszy wskazał rosyjski uczony Wiktor Wiesiełago w roku 1967. Wykazał on też, że płaska płytka z materiału o $n = -1$ zachowuje się podobnie do soczewki, ogniskując światło z punktu bliskiego jednej płaszczyźnie płytki w punkcie po drugiej stronie – właśnie dzięki ujemnemu załamaniu (rys. 2). To samo zjawisko prowadzi do efektu jak na rysunku 3: włożona do „metawody" łyżeczka „łamałaby się" w naszych oczach w kierunku przeciwnym do tego, do którego przywykliśmy.

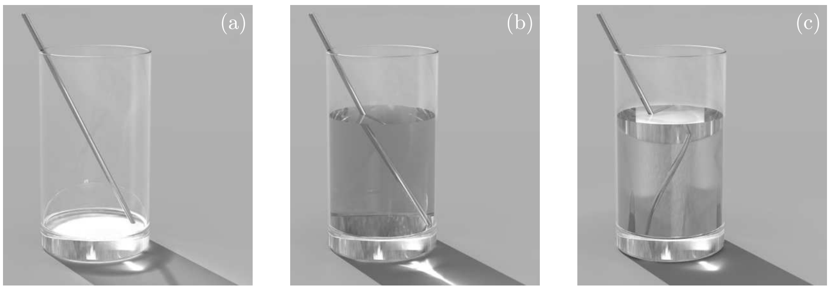


Rys. 2. Ogniskowanie światła przez płytkę płaskorównoległą z metamateriału. Pominięto promienie odbite. Punkt S to źródło, a punkt I to jego obraz.

Skąd miałby pochodzić ujemny znak współczynnika załamania światła czyli fali elektromagnetycznej? Jego wartość bezwzględna jest równa zawsze pierwiastkowi z iloczynu dwóch liczb: przenikalności elektrycznej ε i przenikalności magnetycznej μ, które opisują pojedynczo oddziaływanie odpowiednich pól z materią. Jednak w przypadku gdy obydwa te parametry są mniejsze od zera, również współczynnik załamania jest ujemny. Taki ośrodek nazywamy *metamateriałem o ujemnym współczynniku załamania*, zwykle w skrócie *metamateriałem*.

O ile naturalnych metamateriałów, albo materiałów z ujemną tylko przenikalnością magnetyczną nie znamy, o tyle ujemna przenikalność elektryczna jest charakterystyczna dla plazmy, czyli ośrodka ze swobodnie poruszającymi się nośnikami prądu jak np. elektrony. Plazma występuje np. w metalach, ale także na przykład wysoko w atmosferze, w tzw. jonosferze. Okazuje się, że w ośrodku, którego przenikalności są różnych znaków, fala elektromagnetyczna nie może się rozchodzić i w efekcie odbija się od niego. W ten właśnie sposób jonosfera umożliwia transatlantycką łączność radiową – ogranicza możliwość ucieczki fal w przestrzeń kosmiczną [1].

Nie tylko kierunek załamania ulega odwróceniu w przypadku ośrodka o $n < 0$. Jeżeli przyjrzymy się fali o pojedynczej częstości, stwierdzimy, że kierunek, w którym poruszają się grzbiety sinusoidy jest przeciwny do kierunku, w którym porusza się maksimum impulsu złożonego z fal o wielu częstościach, co fizycy formułują matematycznie jako przeciwne znaki prędkości fazowej i grupowej [2]. Także optyczny efekt Dopplera ulega zmianom. Zanurzeni w metamateriale, oddalające się od nas źródło światła widzielibyśmy jako przesunięte w barwie nie ku czerwieni, lecz ku fioletowi.



Rys. 3. Grafika komputerowa przedstawiająca szklankę (a) pustą, (b) wypełnioną wodą o $n = 1{,}25$ i (c) wypełnioną fikcyjną „metawodą" o $n = -1{,}25$. Dzięki uprzejmości Pana Gunnara Dollinga z Uniwersytetu w Karlsruhe.

[1] Zjawisko to nie było znane, gdy w roku 1901 Guglielmo Marconi pierwszy raz przesłał sygnał radiowy przez Atlantyk `http://physicsweb.org/articles/world/14/12/7`

[2] Animacje tego efektu można zobaczyć na stronie `http://sagar.physics.neu.edu/lhm-intro-1.html` Wektory opisujące płaską fale elektromagnetyczną: elektryczny E, magnetyczny H i falowy k oznaczający kierunek propagacji fazy tworzą w metamateriale układ lewoskrętny (wyznaczany regułą lewej ręki), w przeciwieństwie do prawoskrętnego w zwykłym materiale. Właśnie bezpośrednio stąd wynikają zjawiska pokazane na animacjach i stąd też pochodzi często używana nazwa metamateriału – „materiał leworęczny" (ang. *left handed medium*).

[*]Instytut Geofizyki UW

Rys. 4. Metamateriał mikrofalowy składa się z niewielkich (ok. 1 cm) przewodzących elementów o kształtach jak na rysunku, umieszczonych w periodycznej, trójwymiarowej sieci.

Jak stworzyć metamateriał? Można wykorzystać w tym celu fakt, że światło czy inne fale elektromagnetyczne oddziaływują z wieloma rozrzuconymi w przestrzeni elementami mniejszymi od długości fali jak z jednorodnym ośrodkiem opisywanym przez zmodyfikowane wartości przenikalności elektrycznej i magnetycznej.

Pierwsze powstały metamateriały mikrofalowe. W roku 1996 angielski teoretyk John Pendry opisał oddziaływanie mikrofal z układem metalowych drutów zachodzące jak w przypadku ośrodka o ujemnym ε, a w trzy lata później oddziaływanie z metalowymi koncentrycznymi rolkami z przerwą jak w ośrodku z ujemnym μ. Układy te działały dla pewnych częstości fali dzięki prądom płynącym w metalu i zjawiskom rezonansowym.

W roku 2000 grupa naukowców z Uniwersytetu Kalifornijskiego w San Diego [3] stworzyła pierwszy działający metamateriał mikrofalowy o n mniejszym od zera, zbudowany przez połączenie wcześniejszych układów (rys.4). Wzbudziło to nadzieje na zastosowanie podobnych konstrukcji w antenach radarowych i telefonii komórkowej. Kolejny impuls do rozwoju badań dała praca J. Pendry'ego z tego samego roku pokazująca, że płaska płytka idealnego metamateriału nie tylko ogniskuje falę, ale czyni to z superrozdzielczością, obrazując punktowe źródło jako punkt [4], co nie jest prawdziwe w przypadku zwykłej soczewki.

[3] Strona grupy metamateriałowej z uniwersytetu UCSD `http://physics.ucsd.edu/~drs/index.html` tam też można znaleźć ważniejsze publikacje na temat metamateriałów

[4] Prace te zostały przyjęte nie bez kontrowersji: `http://physicsweb.org/articles/world/16/5/3`

Jednak zmniejszenie układu rezonatorów elektromagnetycznych, potrzebnych do wytworzenia metamateriału działającego w zakresie widzialnym, nie jest proste technologicznie. Jest tak dlatego, że elementy musiałyby mieć rozmiary rzędu nanometrów. Dlatego jak na razie niewiele jest metamateriałów pracujących w podczerwieni [5], droga zaś do klarownego metaszkła wydaje się tak daleka, jak wyczerpanie listy odkrywanych fenomenów związanych z istnieniem metamateriałów.

[5] Pierwszy metamateriał optyczny o ε i μ mniejszym od zera powstał w roku 2005: `http://physicsweb.org/articles/news/9/4/11`

Zadania

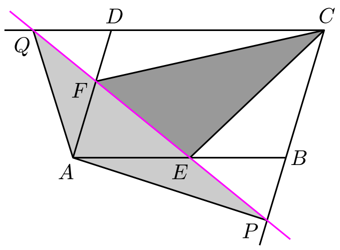
Redaguje Ewa CZUCHRY

F 675. Akrobata porusza się ze stałą poziomą prędkością, przesuwając nogami znajdujący się pod nim walec, leżący na bardzo szorstkim podłożu. Przyjmując, że współczynnik tarcia butów o powierzchnie boczną walca wynosi μ, oszacować największy możliwy kąt α_0 między promieniem walca poprowadzonym z miejsca kontaktu akrobaty z walcem a pionem.
Rozwiązanie na str. 5

F 676. Na gładką poziomą kłodę o promieniu R położono rozłożoną „książkę" składającą się z dwóch kwadratowych płytek o bokach długości $l = 4R$ połączonych nieważkimi zawiasami. Jaki kąt będą tworzyły te płytki w położeniu równowagi?
Rozwiązanie na str. 16

Redaguje Waldemar POMPE

Zadania pochodzą z zawodów trzeciego stopnia I Olimpiady Matematycznej Gimnazjalistów, które odbyły się w marcu 2006 r.



M 1144. Dany jest równoległobok $ABCD$. Punkt E należy do boku AB, a punkt F do boku AD. Prosta EF przecina prostą CB w punkcie P, a prostą CD w punkcie Q. Wykazać, że pole trójkąta CEF jest równe polu trójkąta APQ.
Rozwiązanie na str. 6

M 1145. W przestrzeni danych jest takich n punktów ($n \geqslant 4$), że żadne cztery nie leżą na jednej płaszczyźnie. Każde dwa z tych punktów połączono odcinkiem niebieskim lub czerwonym. Udowodnić, że można tak wybrać jeden z tych kolorów, aby każde dwa punkty były połączone odcinkiem lub łamaną wybranego koloru.
Rozwiązanie na str. 6

M 1146. Dane są różne liczby pierwsze p, q oraz takie dodatnie liczby całkowite a, b, że liczba aq daje resztę 1 przy dzieleniu przez p, a liczba bp daje resztę 1 przy dzieleniu przez q. Wykazać, że $\frac{a}{p} + \frac{b}{q} > 1$.
Rozwiązanie na str. 12