



Fizyka niewidzialności

Katarzyna Ostasiewicz

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

„...widzialność zależy od akcji, którą widzialne ciała wywierają na światło. (...) ciało albo absorbuje światło, albo łamie je i odbija, albo robi te wszystkie trzy rzeczy naraz. Jeżeli ani nie absorbuje, ani nie łamie, ani nie odbija światła, wtedy nie jest widzialne”.

Cuda niewidy

Słowa te napisane zostały pod koniec XIX wieku. Herbert George Wells, jeden z prekursorów gatunku *science fiction*, pisarz, który w latach młodości studiował biologię, fizykę i geologię, włożył je w usta szalonego naukowca Griffina. Po czterech latach żmudnych badań Griffinowi udało się wynaleźć „maszynę gazową”, powodującą niewidzialność. Pierwszy eksperyment na żywym stworzeniu – kocie – powiódł się niecałkowicie. Zniknął mianowicie niemal cały kot, prócz *tapetum*, odbijającej światło warstwy wewnątrz kocich oczu. Po dziewiętnastowiecznej Anglii błąkały się zatem nie tylko uśmiechy bez kota (z Cheshire – bohatera *Przygód Alicji w krainie czarów*), ale i samotne kocie oczy. Eksperyment przeprowadzony przez Griffina na samym sobie powiódł się lepiej, o ile za sukces uznać można życie pełne udręk, które stały się udziałem nieszczęsnego niewidzialnego naukowca.

Choć to Wells prawdopodobnie jako pierwszy oparł swoje fantazje na – jakkolwiek cienkiej – a jednak naukowej podstawie, marzenia o niewidzialności obecne były w mitologiach i opowieściach dla najmłodszych już od wieków. Wraz z latającym dywanem, siedmiomilowymi butami i samonakrywającym się stolikiem, czapka-niewidka towarzyszyła dorastaniu milionów dzieci. Obecnie rolę czapki przejmuje peleryna-niewidka, zyskująca na popularności dzięki poczytnej serii książek o młodym czarodzieju, Harrym Potterze. W naturze ludzkiej leży, by próbować realizować dziecięce marzenia, by sięgać poza nie-naruszalne – wydawałoby się – granice rzeczywistości. Również i niewidzialność stała się wyzwaniem, podjętym przez człowieka zarówno w praktycznym jak i pozapraktycznym celu.

Przyjrzyjmy się bliżej próbom, jakie w ostatnich czasach podjęli naukowcy w celu okiełznania (nie)widzialności.

Fizyka (nie)widzialności

Każdy przedmiot, który nie emituje własnego światła, jest widzialny tylko poprzez wpływ, jaki wywiera na padające na nie promieniowanie. Na przykład Słońce wysyła w przestrzeń promieniowanie powstające w jego wnętrzu na

skutek reakcji termojądrowych, natomiast Księżyc widoczny jest na niebie tylko dzięki temu, że rozprasza¹ światło słoneczne. Barwne przedmioty odbijają światło o określonej długości fali, odpowiadającej ich barwom, a pochłaniają kolory dopełniające. Błyszczące powierzchnie odbijają padające promienie w jednym kierunku, natomiast powierzchnie matowe – rozpraszają je. Coś, co pochłaniałoby całe padające na nie światło i nie emitowało wtórnego promieniowania w zakresie widzialnym, byłoby postrzegane jako czarny cień na otaczającym tle. Choć ludzkie oko jest wrażliwe na promieniowanie tylko z zakresu długości fal mniej więcej od 400 do 700 nanometrów, to pojęcie „widzialności” czy „niewidzialności” można rozszerzyć na inne zakresy widma promieniowania elektromagnetycznego. I tak kamery podczerwieni pomagają „widzieć” promieniowanie o długościach fali większych od światła widzialnego, czyli promieniowanie termiczne; liczniki Geigera wykrywają wysokoenergetyczne fotony promieniowania gamma, a rozmaite inne detektory wrażliwe są na różne częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego.

Oko radaru

Pierwsze nowoczesne próby uczynienia przedmiotów niewidzialnymi dotyczyły samolotów. Jak niestety większość wynalazków człowieka, niemal od zarania swojej historii latające maszyny wykorzystywane były do celów wojennych. Pierwszy, trwający 12 sekund kontrolowany przelot samolotu napędzanego silnikiem spalinowym, udało się wykonać w 1903 roku braciom Wright. Zaledwie osiem lat później z nieba poczęły spadać bomby. Pierwsze cztery, ręcznie wyrzucone z pokładu samolotu małe bomby, spadły na głowy tureckich żołnierzy w trakcie wojny Włoch z Imperium Osmańskim. Od tej chwili rozwój lotnictwa bojowego następował w zawrotnym tempie, a w czasie drugiej wojny światowej to właśnie w powietrzu odbyła się cała słynna „bitwa o Anglię”.

Wobec liczebnej przewagi niemieckiej nadzieją Anglików była sieć stacji radarowych, wzniesionych wzdłuż południowego i wschodniego wybrzeża kraju – Chain Home (Łańcuch Obrony Kraju). Radary wysyłały w przestrzeń fale radiowe i rejestrowały promieniowanie odbite od nadlatujących samolotów znajdujących się w odległości ponad 160 km.

Coraz lepsza technologia radarowa zapoczątkowała trwający po dziś dzień wyścig zbrojeń w tym zakresie. Aby „oślepić” radar należało skonstruować urządzenie, które albo pochłaniałoby padające na nie promieniowanie, albo je rozpraszało we wszystkich możliwych kierunkach, znacznie osłabiając sygnał. Współcześnie w arsenalach wielu krajów znajdują się samoloty wykonane w tak zwanej technologii *stealth* (ang. skradać się). Pokrycie tych maszyn dobiera się specjalnie tak, by pochłaniało ono jak największą część padających na nie fal radarowych. Najskuteczniejsze jednakże jest zastosowanie takiej geome-

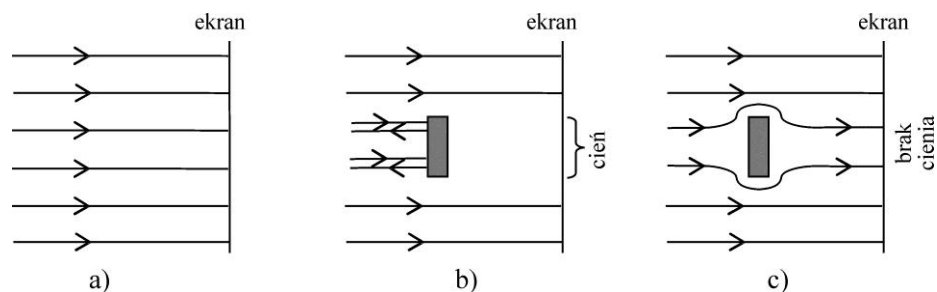
¹ Czyli odbija w różnych kierunkach: jest to tzw. „odbicie rozproszone”.

trii, która zmniejszałaby powierzchnię odbicia i powodowałaby odbijanie fal w kierunku innym niż ten, z którego przyszły. Służą temu płaskie, krzywoliniowe kształty. Najbardziej znanym przykładem takiego samolotu jest słynny „Duch”, amerykański bombowiec *B-22 Spirit*.

Zniknąć z „oczu” radaru jest stosunkowo prosto. Dlaczego? Zauważmy jeden ważny szczegół. Aby uczynić samolot niewidzialnym wystarczy sprawić, by nie docierał od niego żaden sygnał, świadczący o jego obecności. Znacznie trudniejsze są przypadki, gdy brak sygnału sam w sobie świadczy o obecności czegoś zakłócającego. Chodzi tu o cień.

Podstępny cień

Jeśli to my wysyłamy sygnały, jak w przypadku radaru czy nietoperza, kierującego się swoim zmysłem radiolokacyjnym, brak sygnału zwrotnego świadczy o braku obiektu. Jeśli jednak nastawiamy się na odbiór sygnału dochodzącego skądś zza obiektu – brak sygnału świadczy o jakiejś przeszkodzie, która stanęła mu na drodze (rys. 1a, b). W przypadku fal radiowych, będących podstawą działania radaru, nie dysponujemy żadnym na tyle silnym i stabilnym źródłem promieniowania gdzieś w górnych warstwach atmosfery, by zaniknięcie pochodzącego od niego sygnału mogło być interpretowane jako obecność czynnika zakłócającego. Inaczej rzecz się ma w przypadku promieniowania elektromagnetycznego o krótszych długościach fali, szczególnie z zakresu widzialnego.



Rys. 1. Widzialność przedmiotów, a) Światło pada na ekran przy nieobecności przeszkody, b) Światło pada na ekran w obecności przeszkody: powstaje cień, c) Światło „opływa” przeszkodę: brak cienia

Oko ssaków, w szczególności człowieka, wyewoluowało tak, by być wrażliwym na te długości fal elektromagnetycznych, które są najlepiej dostępne w świecie, który zamieszkujemy. Maksimum natężenia promieniowania słonecznego przypada na długość fali około 500 nm, co odpowiada barwie zielono-żółtej. Jednakże nic by nam nie przyszło z tego słonecznego promieniowania, gdyby coś mu przeszkodziło w wędrówce do powierzchni Ziemi. Tak się składa, że atmosfera naszej planety złożona jest z cząsteczek, które skutecznie zatrzymują promieniowanie nadfioletowe, natomiast światło z zakresu widzialnego

go przepuszczają w wysokim stopniu. Jednakże to wciąż jeszcze za mało, by cieszyć się błękitem nieba i widokiem siebie nawzajem. Gdyby atmosfera nie rozpraszała słonecznego światła czerń nieba nad nami urozmaicona byłaby tylko punktami gwiazd w nocy oraz tarczą słoneczną w dzień. Na powierzchni Ziemi widzielibyśmy tylko te strony przedmiotów, które byłyby zwrócone w stronę Słońca. W cieniu natomiast byłoby całkiem mroczno, o ile nie rozjaśniłoby go przypadkowe odbicie promieniowania od innych rzeczy. Dzięki temu, że światło z zakresu widzialnego doskonale rozpraszane jest na cząsteczkach atmosfery, dochodzi ono do naszych oczu z różnych kierunków i może być pochłaniane i odbijane przez przedmioty rozmaicie względem pierwotnego źródła – Słońca – usytuowane.

Aby stać się niewidocznym w zakresie światła widzialnego nie wystarczy nie być źródłem wtórnych – odbitych – sygnałów. Nie wolno też zdradzić się poprzez obecność cienia. Aby dany przedmiot nie rzucał cienia, musi w jakiś sposób zakrzywiać padające na nie promieniowanie świetlne (por. rys. 1c).

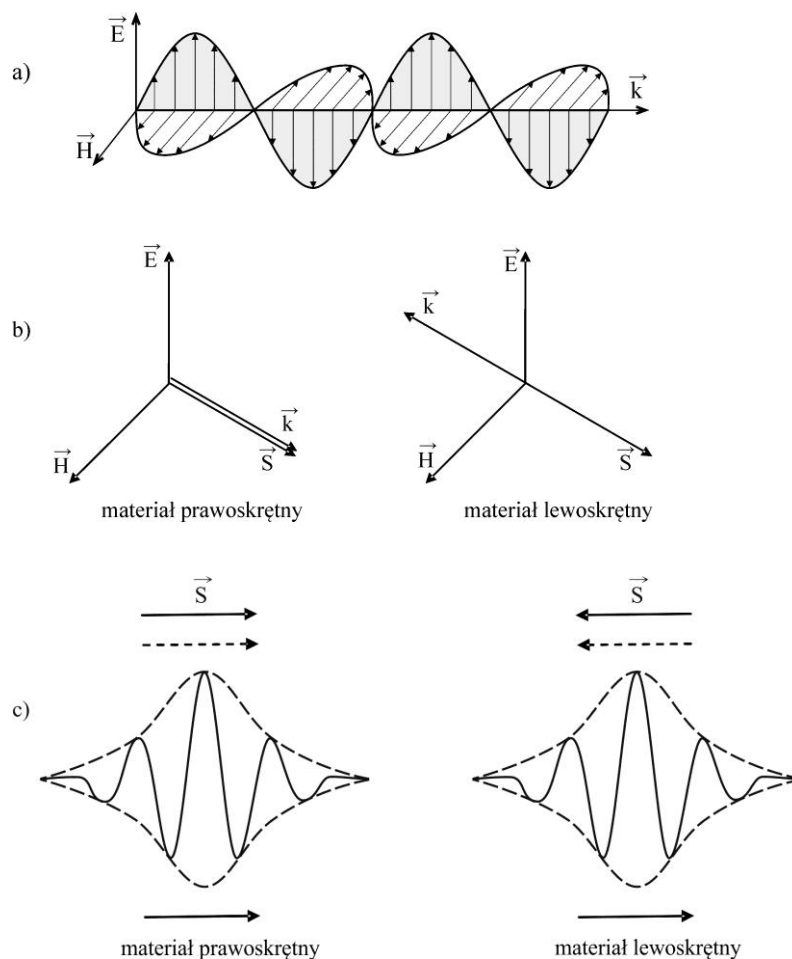
Po raz pierwszy idea materiału w tak nietypowy sposób zakrzywiającego promieniowanie pojawiła się w latach 60. ubiegłego wieku w artykule rosyjskiego fizyka, Wiktora Wiesiełago. Początkowo nie wzbudził on większego zainteresowania. Prawdopodobną przyczyną był prosty fakt, iż substancje takie w przyrodzie nie istnieją. Trzeba było poczekać, by nauka, od dawien dawna przekraczająca granice tego, co „naturalne”, zdecydowała się wkroczyć i na ten obszar.

Zanim jednakże przejdziemy do „elektrodynamiki materiałów z ujemnymi wartościami zarówno przenikalności elektrycznej jak i magnetycznej” (jak brzmiał tytuł pionierskiej pracy Wiesiełago), przypomnijmy pokrótce, jak promieniowanie elektromagnetyczne oddziałuje ze zwykłymi substancjami.

Światło i materia

Jak już wspominaliśmy, światło widzialne stanowi niewielki wycinek całego spektrum promieniowania elektromagnetycznego, czyli fal elektromagnetycznych. Fale te mają dwie składowe, wzajemnie do siebie prostopadłe i prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali – elektryczną i magnetyczną (rys. 2a). Energia fali zależy wprost proporcjonalnie od jej częstotliwości, czyli ilości oscylacji w określonym przedziale czasu. Dolną granicę stanowią fale radiowe, następnie mikrofałe, podczerwień, światło widzialne, nadfiolet, promieniowanie rentgenowskie i gamma, niosące największą energię.

Dopóki fala elektromagnetyczna rozchodzi się w próżni, jej prędkość równa jest słynnej stałej c , największej – zgodnie z teorią względności Einsteina – możliwej prędkości. Gdy fala wnika do ośrodka materialnego zmienia swoją prędkość. To, jak bardzo ją zmieni, zależy od elektromagnetycznych właściwości danego materiału.



Rys. 2. Fale elektromagnetyczne

- Pole elektromagnetyczne. Wektory natężenia pola elektrycznego (\vec{E}), natężenia pola magnetycznego (\vec{H}) i wektor rozchodzenia się czoła fali (\vec{k}) tworzą układ prawoskrętny;
- W materiałach prawoskrętnych wektor przepływu energii (\vec{S}) skierowany jest zgodnie z wektorem rozchodzenia się czoła fali (\vec{k}); w materiałach lewoskrętnych wektor przepływu energii (\vec{S}) skierowany jest przeciwnie do wektora rozchodzenia się czoła fali (\vec{k});
- W materiałach prawoskrętnych wektor prędkości fazowej (linia ciągła) skierowany jest zgodnie z wektorem prędkości grupowej (linia przerywana) i wektorem przepływu energii (\vec{S}); w materiałach lewoskrętnych wektor prędkości fazowej (linia ciągła) skierowany jest przeciwnie do wektora prędkości grupowej (linia przerywana) i wektora przepływu energii (\vec{S})

Właściwości te są z kolei określone przez dwie stałe: względną przenikalność elektryczną oraz względną przenikalność magnetyczną. Materia zbudowa-

na jest z cząsteczek, które posiadają określone właściwości elektryczne (ładunek) oraz magnetyczne. Jeśli weźmiemy dwa ładunki elektryczne, A i B, i umieścimy je w próżni w pewnej odległości od siebie, będą one ze sobą wzajemnie oddziaływały z siłą o określonej wartości. Jeśli te same ładunki przeniesiemy z próżni do ośrodka, który sam składa się z naładowanych cząstek, wówczas siła oddziaływania pomiędzy ładunkami A i B – nawet przy zachowanej takiej samej odległości – zmieni się. Istnienie innych ładunków w otoczeniu spowoduje ekranowanie tego oddziaływania, czyli – w najbardziej powszechnym przypadku – jego zmniejszenie. Względna przenikalność elektryczna jest właśnie miarą tego, ile razy siła oddziaływania elektrycznego w danej materii jest mniejsza od siły oddziaływania w próżni. Jest zatem również miarą tego, jak silnie ładunki elektryczne wewnątrz danej materii reagują na zewnętrzne pole elektryczne. Większość substancji charakteryzuje się dodatnią wartością przenikalności elektrycznej. Znany wyjątkiem są niektóre metale.

Elektrony walencyjne w metalach tworzą tak zwany gaz elektronów swobodnych. Gaz taki charakteryzuje się *częstością plazmową*, czyli jak gdyby „naturalną” (własną) częstością drgań, wykonywanych w nieobecności zewnętrznych sił wymuszających. O ile częstotliwość fali elektromagnetycznej nie przekroczy częstości plazmowej, drgania te na tyle skutecznie ekranują pole elektryczne fali, że nie pozwalają jej wnikać w głąb metalu, a wręcz wytwarzają pole skierowane przeciwnie do pola zewnętrznego. W rezultacie przenikalność elektryczna takiego metalu jest ujemna, i to tym bardziej ujemna, im dalej od częstości plazmowej. Opisuje to wzór: $\epsilon_{metal} = 1 - (\omega_{plazma}^2 / \omega^2)$, gdzie ϵ_{metal} oznacza przenikalność elektryczną, ω_{plazma} – częstotliwość plazmową, a ω – częstotliwość fali elektromagnetycznej. Jak widać, gdy częstotliwość fali jest mniejsza od ω_{plazma} ułamek w nawiasie jest większy od jedynki, a wynik odejmowania mniejszy od zera. Nie mogąc wnikać w głąb, promieniowanie ulega odbiciu od powierzchni metalu, a on sam uzyskuje charakterystyczny połysk.

Przejdźmy teraz do względnej przenikalności magnetycznej. Wielkość ta określa, jak zmienia się pole magnetyczne w przestrzeni wypełnionej danym materiałem w porównaniu do pola magnetycznego, jakie zaistniałoby w próżni – przy zachowaniu tych samych zewnętrznych źródeł pola magnetycznego. W odróżnieniu od elektrycznego odpowiednika, wartość przenikalności magnetycznej jest dla wszystkich substancji występujących w naturze dodatnia. Wynika to z faktu, iż nie istnieją – wedle dotychczasowej wiedzy – tak zwane monopole magnetyczne, punktowe, jednoimiennie „ładunki magnetyczne”, będące odpowiednikami swobodnych jednoimiennych ładunków elektrycznych. Choć istnieją teorie na temat obecności we wczesnych fazach ewolucji Wszechświata monopoli magnetycznych, to obecnie obserwować możemy jedynie dipole – w których jednemu z biegunów zawsze towarzyszy biegun odmienny. Jeśli przetniemy dipol magnetyczny na dwie części, w rezultacie otrzymamy nie dwa

monopole, ale... wciąż dwa dipole! Na krańcach obu części pojawiają się bowiem bieguny komplementarne. Zatem jeśli chodzi o magnetyzm, nie istnieje analog gazu elektronów swobodnych ani podobny mechanizm ekranowania pola magnetycznego.

Załamane światło

Iloczyn przenikalności elektrycznej i magnetycznej równy jest kwadratowi wielkości, która jest znacznie lepiej znana przeciętnemu nie-fizykowi niż same przenikalności. Wielkością tą jest współczynnik załamania światła. Mówi on, ile razy prędkość światła w danym ośrodku jest mniejsza od prędkości światła w próżni. Konsekwencją tej zmiany prędkości jest „załamanie” promienia światła na granicy dwóch ośrodków, co wyjaśnia nazwę współczynnika. Większość z nas pamięta proste szkolne doświadczenia, widok łyżeczki w szklance z wodą, która wydaje się załamana na powierzchni styku cieczy i powietrza. Być może pamiętamy też przepiękną wstęgę barw, na jakie rozszczepia białe światło zwykły pryzmat. Jeśli nie, na pewno każdy choć raz w życiu widział na niebie zjawisko opierające się na tych samych zasadach optycznych: tęczę.

Zarówno rozszczepienie światła przez pryzmat jak i zjawiskowa tęcza zawdzięczają swoje istnienie zależności przenikalności – a więc i współczynnika załamania – od częstotliwości fali. W próżni każda fala elektromagnetyczna, niezależnie od swojej długości, ma taką samą prędkość c . Jak już wspominaliśmy, wnikając do wnętrza materii fala spowalnia. Ale każda z częstotliwości spowalniana jest inaczej! W przypadku światła widzialnego oznacza to, że każda z barw podąża „swoją własną drogą”. Czasem całkiem dosłownie: z pryzmatu różne kolory wydostają się z powrotem do powietrza pod innymi kątami, co skutkuje rozszczepieniem. Tęcza także opiera się na tej samej zależności drogi, jaką podąża światło, od jego koloru. Tyle, że tym razem rolę pryzmatów odgrywają miliony drobniutkich kropelek wody, które unoszą się w powietrzu. Pamiętajmy o zależności przenikalności od częstotliwości fali elektromagnetycznej, gdyż okaże się ona sporą trudnością do pokonania przy próbach skonstruowania niewidzialnej peleryny.

Jeśli zarówno przenikalność elektryczna jak i magnetyczna są dodatnie, mamy do czynienia z dobrze nam znanymi z codziennego życia materiałami. Obowiązuje prawo Snelliusa, dotyczące załamania promienia świetlnego na granicy dwóch ośrodków, pryzmaty rozszczepiają, wypukłe soczewki skupiają, a wklęsłe rozpraszają światło. W przypadku, gdy przenikalność elektryczna jest ujemna, a magnetyczna dodatnia, jak we wspomnianym przykładzie niektórych metali, wówczas fale elektromagnetyczne nie są w stanie wniknąć w głąb takich materiałów – charakteryzują się one wysokim połyskiem i całkowitą nieprzezroczystością. A co by było w przypadku, gdyby obie przenikalności miały znak ujemny?

Ujemne załamanie?

Jeśli wiemy, ile wynosi kwadrat jakiejś liczby, wiemy również, ile wynosi jej wartość bezwzględna. Możliwe są jednak dwa znaki: dodatni i ujemny. Przykładowo, jeśli kwadrat pewnej wielkości równy jest 4, to ona sama równa jest +2 lub -2. Pamiętamy, że kwadrat współczynnika załamania równy jest iloczynowi przenikalności elektrycznej i magnetycznej. Wiemy, że dla wody iloczyn względnych przenikalności wynosi 1,77. Teoretycznie zatem, możliwe są dwie wartości współczynnika załamania: +1,33 lub -1,33. Ponieważ jednak obie przenikalności są dla wody wartościami dodatnimi, bez większego namysłu przyjmowany był zawsze znak dodatni współczynnika załamania. Łatwo udowodnić, że jest to wybór prawidłowy. Wystarczy przepuścić światło przez pryzmat lub soczewkę i pokazać, że faktycznie zachowuje się ono zgodnie z prawami optyki dla dodatniego współczynnika. Ale co by było, gdyby obie przenikalności były ujemne? Ich kwadrat przyjmuje wartość dodatnią, i znowu mamy dwie możliwości wyboru znaku. Czy również prawidłowe byłoby wybranie znaku dodatniego? Ponieważ pytanie to zostało postawione w czasie, gdy eksperymentalna weryfikacja współczynnika załamania dla takich niekonwencjonalnych substancji była niemożliwa, odpowiedź wymagała pewnych obliczeń.

Opisując – wówczas jedynie teoretyczny – przypadek takich substancji Wiktor Wiesiełago nazwał je „lewoskrętnymi”. W przypadku konwencjonalnych ośrodków wektory natężenia pola elektrycznego, natężenia pola magnetycznego i falowy (wskazujący kierunek i zwrot prędkości czoła fali) tworzą układ prawoskrętny, co wynika z podstawowych równań elektrodynamiki, równań Maxwella (i co widać na rys. 2a). Te same równania jednakże wskazują na to, że w przypadku, gdy ośrodek ma ujemne przenikalności: elektryczną i magnetyczną, wektory te tworzą układ lewoskrętny! Ponieważ w każdego rodzaju ośrodku wektor przepływu energii tworzy z wektorami natężeń pól układ prawoskrętny, wynika z tego, iż w ośrodkach lewoskrętnych energia płynie w kierunku przeciwnym do czoła fali (por. rys. 2b). Ta konkluzja wydawała się tak niefizyczna, że wielu naukowców negowało możliwość podobnego zachowania fali elektromagnetycznej, kwestionując wyniki pierwszych eksperymentalnych potwierdzeń istnienia materiałów lewoskrętnych. Aby lepiej zrozumieć, w czym tkwi problem, musimy dokonać rozróżnienia na prędkość fazową i prędkość grupową fali.

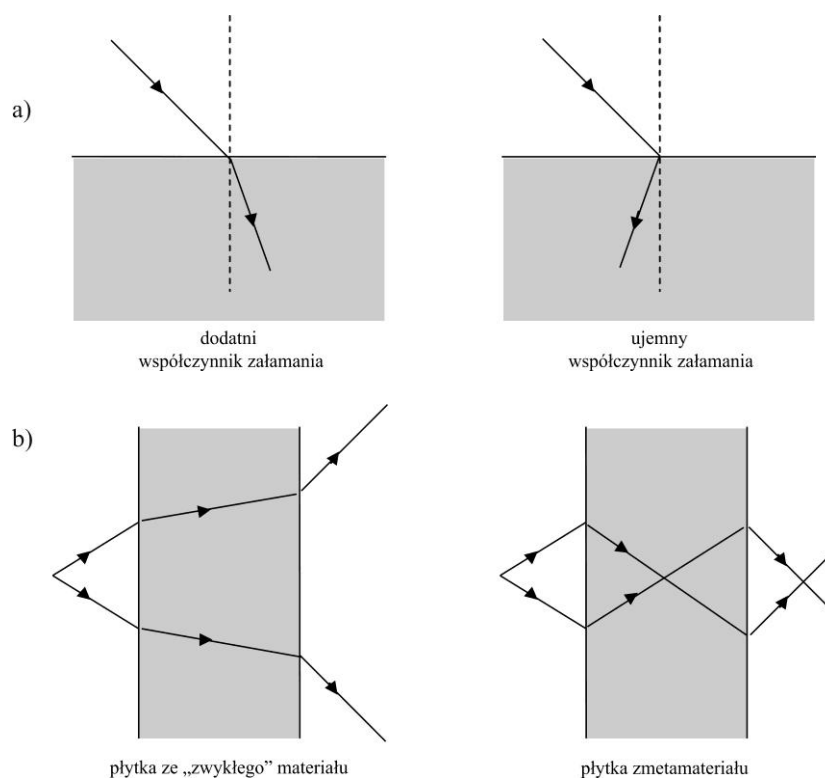
Tak zwana fala płaska, będąca rozwiązaniem równań Maxwella, na których opiera się elektrodynamika, rozciąga się w przestrzeni w nieskończoność, mając wszędzie taką samą amplitudę (por. rys. 2a). Jednakże, dowolna kombinacja fal płaskich jest również rozwiązaniem tych równań, przeważnie bardziej realistycznym. Dlaczego? Pojedyncza fala jest niezmienna w przestrzeni i w czasie, i nie może nieść ze sobą żadnej informacji. W rzeczywistości światło występuje raczej w formie impulsów, ograniczonych przestrzennie i czasowo. Przecież

w jednym miejscu jest jasno, w innym ciemno. A za chwilę może być na odwrót. Efekt takiego przestrzennego i czasowego zlokalizowania można osiągnąć nakładając na siebie wiele fal płaskich, różniących się częstotliwościami i fazami. Fale takie w większości miejsc wygaszają się wzajemnie, pozostawiając niezerową amplitudę jedynie w ograniczonym obszarze przestrzeni. Powstaje w ten sposób tak zwana *paczka falowa*. Pozwala ona uczynić paradoksalną falowo-korpuskularną dualność elektromagnetyzmu nieco bardziej zrozumiałą. Jak wiadomo, światło można traktować jako falę, co przejawia się w zjawiskach interferencji, dyfrakcji i innych podobnych, ale również jako zbiór cząstek, zwanych fotonami. To ostatnie zostało udowodnione przez Alberta Einsteina poprzez wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego. Taki zwarty przestrzennie pakiet złożony z nieskończenie rozciągniętych fal stanowi pomost pomiędzy rozumieniem światła jako fali a koncepcją punktowej cząstki. Prędkość poruszania się paczki falowej nazywana jest *prędkością grupową*. Nie musi być ona taka sama jak prędkości frontów poszczególnych fal płaskich, z których się składa, czyli *prędkości fazowych*. W szczególnym przypadku materiałów lewoskrętnych prędkości fazowe skierowane są przeciwnie niż prędkość grupowa (rys. 2c). Stąd bierze się przeciwny zwrot wektora przepływu energii – zawsze zgodnego z prędkością grupową, i wektora falowego – zgodnego z prędkością fazową. Ostatecznie, przeciwne zwroty tych dwóch prędkości wskazują, że dla współczynnika załamania należy przyjąć znak ujemny.

Tak dziwne efekty...

Teraz spójrzmy, jak będzie załamywał się promień światła, gdy biegnąc w powietrzu napotka na powierzchni materiału o ujemnym współczynniku załamania. Wciąż obowiązuje prawo Snelliusa, które mówi o tym, iż stosunek sinusów kąta promienia padającego i załamanego równy jest współczynnikowi załamania. Abstrahując od matematycznych szczegółów wystarczy powiedzieć, że ujemny znak współczynnika załamania powoduje bieg promienia „po drugiej stronie” (w porównaniu ze „zwykłym” przypadkiem) prostej prostopadłej do powierzchni materiału (rys. 3a). Łyżeczka zanurzona w cieczy o ujemnym współczynniku załamania nie byłaby optycznie delikatnie „złamana” względem części nad powierzchnią, ale wydawałaby się mierzyc w kierunku patrzącego. Ryba pływająca w cieczy o ujemnym współczynniku załamania wydawałaby się przemieszczać nad powierzchnią. Soczewka wypukła, wykonana z materiału o ujemnym współczynniku załamania rozprasza światło, wklęsła zaś – skupia! Czyli zupełnie na odwrót niż w przypadku zwykłych, znanych nam soczewek. Co więcej, mogą pojawić się efekty, które w ogóle nie występują w materiałach o dodatnim współczynniku załamania. Płaskie równoległościennne płytki wykonane z takich egzotycznych substancji mogłyby skupiać promieniowanie (rys. 3b), czego w żadnych warunkach nie czynią zwykłe płytki. Takie cudaczne soczewki nie byłyby tylko ciekawostką naukową, ale miałyby spore zastosowa-

nie praktyczne. Okazuje się bowiem, że ich właściwości byłyby znacznie korzystniejsze niż tradycyjnych soczewek. Z tego też powodu zyskały miano „supersoczewek”. Najciekawszą z tych właściwości jest teoretycznie dowolnie duża zdolność rozdzielcza, która może być mniejsza niż długość fali skupianego światła. Tradycyjne przyrządy optyczne ograniczone są zawsze długością stosowanego promieniowania. Żaden z nich nie ukaże kształtów mniejszych niż ta długość, a każdy obraz uzyskiwany jest z dokładnością tego właśnie rzędu. I nie jest to spowodowane ułomnością wykonywanych przez człowieka przyrządów, ale fundamentalnymi prawami optyki – zjawiskiem dyfrakcji. To ono jest przyczyną tego, że mikroskopy optyczne nie nadają się do badania struktur o rozmiarach poniżej kilkuset nanometrów. W mniejszych skalach używane być muszą mikroskopy elektronowe. Tymczasem podobne teoretyczne ograniczenie nie obowiązuje supersoczewek.



Rys. 3. Materiały o dodatnim i ujemnym współczynniku załamania

- Załamanie światła na granicy powietrza i ośrodka o dodatnim lub ujemnym współczynniku załamania.
- Przechodzenia światła przez płytkę równoległościenną wykonaną z materiału o dodatnim lub ujemnym współczynniku załamania.

Te i inne jeszcze niezwykle efekty pozostawały przez dziesięciolecia jedynie naukowymi ciekawostkami, interesującymi nieliczne grono fizyków-teoretyków. Nawet wojskowi po obu stronach żelaznej kurtyny przeoczyli ich potencjał. To prawda, że w Naturze nie istnieją materiały z ujemnym współczynnikiem załamania światła. Ale czyż wielokrotnie wcześniej człowiek nie sięgał po przekraczanie granic tego, co Natura ofiarowała mu w stanie gotowym do użycia? Czy mogłoby się udać konstruować takie substancje?

A jednak to możliwe!

W połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku w środowisku naukowym odżyło zainteresowanie hipotetycznymi materiałami o ujemnym współczynniku załamania. Było to zasługą głównie Johna B. Pendry'ego (Imperial College, Londyn), któremu zawdzięczają one sporą część opisu teoretycznego. Za swoje badania w obszarze nowopowstałego działu fizyki, Pendry uhonorowany został tytułem szlacheckim. W ślad za pracami teoretycznymi pojawiły się pierwsze próby zaobserwowania opisywanych efektów w eksperymentach, i już na samym początku nowego milenium odnotowano pierwsze sukcesy.

Przenikalność elektryczna i magnetyczna materiału nie są wielkościami charakteryzującymi atomy lub cząsteczki, z których materiały te są zbudowane. Są one pewnymi uśrednieniami, opisującymi oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z daną substancją – pod warunkiem, że uśrednianie jest zasadne, czyli tylko wówczas, gdy długość fali promieniowania jest na tyle duża, że nie „zauważa” ono pojedynczych atomów czy cząsteczek, a jedynie ich kolektywną odpowiedź. Może można by zatem skonstruować sztuczne „cząsteczki” i skomponować je w taki sposób, by ich uśrednione interakcje z falą elektromagnetyczną mogły być opisane za pomocą ujemnych wartości obu przenikalności? Okazało się, że owszem, można, a tak utworzone materiały zyskały miano „metamateriałów”. Przedrostek „meta” oznacza w języku greckim „po”, „poza” i wskazuje na następstwo. Metamateriały są tymi, które przyszły po zwykłych, przez Naturę stworzonych substancjach, a zbudowane są z „metacząsteczek”, sztucznych tworów wykreowanych przez człowieka dla swoich potrzeb. Jak wspomniano powyżej, aby móc opisywać oddziaływanie materii z promieniowaniem za pomocą przenikalności elektrycznej i magnetycznej, części składowe materii muszą być rozmiarów małych w porównaniu z długością fali promieniowania. Nic dziwnego zatem, że jako pierwsze powstały metamateriały, które zachowywały się jak materiały z ujemnym współczynnikiem załamania w interakcjach z mikrofalami, czyli falami o dużych – w porównaniu ze światłem widzialnym – długościach. Pierwszy taki eksperyment został przeprowadzony przez zespół Davida R. Smitha z Uniwersytetu Kalifornijskiego w San Diego. Wkrótce przyszła pora i na mniejsze struktury.

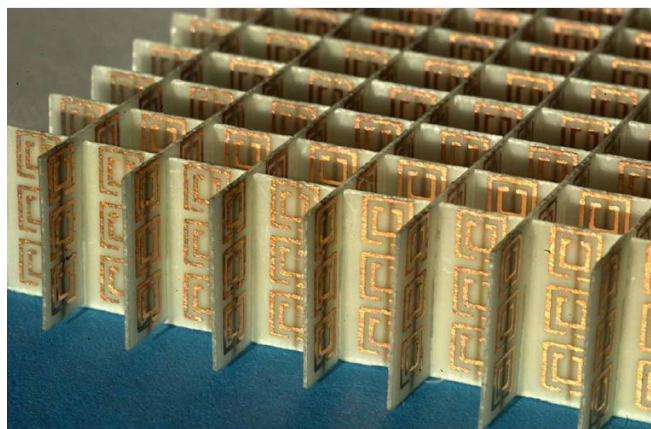
Szczegóły konstrukcji poszczególnych metamateriałów potrafią być wielce skomplikowane. Spróbujmy przyjrzeć się ogólnej idei przedstawionej teoretycznie przez Johna Pendry'ego, a zrealizowanej następnie przez Davida Smitha.

Poza (zwykle) materiały

Jak widzieliśmy powyżej, niektóre metale same z siebie mają – dla określonych częstotliwości fali – ujemną przenikalność elektryczną. Jednakże ich przenikalność magnetyczna jest zawsze dodatnia, zatem lity kawałek metalu nie może odegrać roli materiału o ujemnym współczynniku załamania. Trzeba „zostawić miejsce” na elementy, które będą dawały ujemną odpowiedź na przyłożone pole magnetyczne. Ponadto, jeśli zamiast jednorodnej bryłki weźmiemy wiele cienkich metalowych drucików i ułożymy z nich sześcienną kratownicę, wówczas możemy – zmieniając średnicę drucików i odległości pomiędzy nimi – regulować wartości częstości, dla których taka struktura będzie miała ujemną przenikalność elektryczną. Uzyskanie pożądanej odpowiedzi na elektryczną składową fali elektromagnetycznej było łatwiejszą częścią zadania. Jak pamiętamy, w przyrodzie nie występują żadne substancje o ujemnej przenikalności magnetycznej, które moglibyśmy poddać odpowiedniej inżynierii i włączyć w skład konstruowanego materiału. Okazało się jednak, że potrzebne „magnetyczne molekuly” można sprokurować z materiałów, które same w sobie własności magnetycznych nie posiadają. Najprostsza taka konstrukcja składa się z dwóch przerwanych pierścieni, wykonanych z dobrego przewodnika, i rozdzielonych warstwą innego materiału. Fachowo układ taki nazywany jest rozszczepionym rezonatorem kołowym (SRR, *split-ring resonator*). Dzięki przerwom w pierścieniach i odstępowi pomiędzy nimi ma on pewną pojemność (jak kondensator), a ponieważ pierścienie wykonane są z materiału przewodzącego ma też określoną indukcyjność. Zachowuje się zatem jak rezonansowy układ LC, charakteryzując się specyficzną dla określonych wartości geometrii i rodzaju użytych materiałów częstością rezonansową. Zmiany zewnętrznego pola magnetycznego, których źródłem jest fala elektromagnetyczna, powodują, na mocy zasady indukcji, przepływ prądu w pierścieniach. Z kolei, jak wiadomo, prąd elektryczny wytwarza wokół przewodnika pole magnetyczne. Podobnie jak w przypadku częstości plazmowej i ujemnej przenikalności elektrycznej, kluczem do uzyskania negatywnej odpowiedzi magnetycznej jest częstość rezonansowa drgań układu SRR. Okazuje się, iż w pewnym zakresie częstości w pobliżu częstości rezonansowej wytworzone przez układ pole magnetyczne skierowane jest przeciwnie do pola zewnętrznego. Skutkuje to ujemną przenikalnością magnetyczną materiału zawierającego takie elementy. A ponieważ wartość częstości rezonansowej można regulować ustalając różne parametry układu i użyte materiały, zatem zakres częstości fal elektromagnetycznych, dla których uzyskać można w ten sposób ujemną odpowiedź magnetyczną, jest dość szeroki.

Naniesione na płytki z materiału izolującego elementy SRR wraz z prostoliniowymi przewodami tworzą strukturę, która dla fal o odpowiedniej długości zachowuje się jak materiał (metamateriał) z ujemnym współczynnikiem załamania (rys. 4). Jak już wspominaliśmy, po raz pierwszy zostało to potwierdzone

eksperymentalnie przez zespół Davida R. Smitha z Uniwersytetu Kalifornijskiego w San Diego. W ślad za tą poszły i inne grupy naukowców, konstruując coraz wymyślniejsze struktury o coraz mniejszych rozmiarach.



Rys. 4. Metamateriał (źródło zdjęcia: *Science* 305 [2004] 788)

Czapka-niewidka na dwa sposoby

Gdy wiadomo już było, że istnieją sposoby konstruowania „lewoskrętnych” materiałów, pojawiło się pytanie o ich zastosowanie przy skonstruowaniu czegoś w rodzaju czapki-niewidki. Choć na pierwszy rzut oka mogłoby to wydawać się fantasmagorią, jakby rodem z opowieści o Q (z filmów o Jamesie Bondzie), to z naukowego punktu widzenia wcale nie jest nierealne. Z jednej strony nastęczało to kolejnych trudności, z drugiej – mogło okazać się pod pewnymi względami prostsze. Nawet jeśli dysponowalibyśmy już materiałami o dowolnym współczynniku załamania dla dowolnych długości fal elektromagnetycznych, aby skonturować obszar niewidzialności musielibyśmy zapewnić, by całe widmo promieniowania widzialnego „opływało” dany przedmiot. Tylko to, jak wyjaśnialiśmy wcześniej, zapewniłoby niewidzialność (i brak śladów, w postaci cienia). Zatem współczynnik załamania na granicach ukrytego obszaru musiałby mieć różną wartość w różnych punktach; ponadto, musiałby być dostosowany do każdej z długości fal z zakresu widzialnego. Wygląda to na kilka stopni skomplikowania więcej, niż kwestia stworzenia metamateriału wykazującego określone właściwości dla konkretnej długości fali. I tak jest w istocie. Z drugiej strony – czy do konstrukcji takich niewidzialnych schowków nie dałoby się użyć czegoś, co stworzyła sama przyroda, zamiast zaprzęgać naukę do konstruowania coraz bardziej wymyślnych materiałów? Taką drogą podążył Baile Zhang z Singapuru, który wraz ze swoim zespołem po raz pierwszy zaprezentował w 2011 roku niewidzialność makroskopowego obiektu. Zauważył on, że zjawisko dwójłomności, które występuje w kalcycie, zazwyczaj będące utrud-

nieniem dla potencjalnego zastosowania tego materiału, może zostać wykorzystane do konstrukcji czapki-niewidki. W kryształach dwójłomnych prędkość i współczynnik załamania światła zależą od orientacji tego kryształu względem padającego promienia. Zestawiając ze sobą dwa kawałki kalcytu udało się ukryć przed ludzkim wzrokiem stalowy klin o kilkucentymetrowej długości. Co prawda, doświadczenie to przeprowadzone zostało pod wodą, ale inny zespół, Shuanga Zhanga, skonstruował podobną, opartą na kryształach kalcytu, czapkę-niewidkę działającą w powietrzu.

Ograniczeniem czerpania z zasobów natury jest jednak fakt, że choć niezwykle bogate, nie są one nieograniczone w swej różnorodności. Dlatego próby tworzenia metamateriałów odpowiednich do konstrukcji obszarów niewidzialności wciąż trwają. Dotychczas największym sukcesem pochwalić się może amerykański zespół Xianga Zhanga². Choć udało się skonstruować materiały działające w szerokim zakresie długości fal, to jak dotąd, użycie ich w charakterze peleryny zapewniającej niewidzialność jest wysoce problematyczne. W wykonywanych dotychczas doświadczeniach udawało się bowiem ukryć „przedmioty” o rozmiarach rzędu kilku do kilkuset długości fali, nie są to zatem rozmiary obiektów, które moglibyśmy lub mogłoby wojsko chcieć ukryć. Ponadto, konstruowane enklawy niewidzialności nie były „przenośne”, stanowiły bowiem jedną całość: ukrywany obiekt, „peleryna-niewidka” i otoczenie. Nawet gdyby udało się pokonać te przeszkody, wciąż jeszcze nie można oczekiwać, że już w przyszłym sezonie przed szkolnym bale przebierańców rodzice szyć będą dzieciom na domowej maszynie peleryny Harry’ego Pottera. Otrzymany przez Zhanga materiał nie nadawałby się choćby z tego powodu, iż jest bardzo kruchy. Znając historię dotychczasowego rozwoju nauki i udoskonalień jej aplikacji, nikt rozsądny nie powinien się jednak zakładać, że nie będzie to wkrótce możliwe.

Niewidzialność

Mamy już dziś samoloty niewidzialne dla radarów. Coraz bardziej realne wydają się konstruowane z nanomateriałów peleryny-niewidki. Czy te odkrycia znajdą praktyczne zastosowanie...? Częścią z nich zainteresowała się już – niestety – armia. Ale nawet jeśli okazałoby się, że konstruowanie i użytkowanie urządzeń opartych na tych odkryciach nauki nie jest z jakichś powodów możliwe czy opłacalne, to czy sama radość eksplorowania granic możliwości współpracy Przyrody z ludzkim Rozumem nie jest wystarczającą nagrodą za te starania? I czyż droga ku niewidzialności – która co najmniej kilku naukowców uczyniła widzialnymi, i to nawet bardzo – nie jest celem samym w sobie, jakkolwiek daleki byłby cel ostateczny?

² Zhang to jedno z najpopularniejszych chińskich nazwisk, które nosi kilkaset milionów osób rozproszonych obecnie po całym świecie.