

# Lekcja 6

## Fale elektromagnetyczne i przeszkody

### Cel

- Przedstawienie podstawowych informacji na temat zjawisk towarzyszących rozchodzeniu się fal elektromagnetycznych w środowisku z przeszkodami materialnymi.

### Efekty kształcenia

- Uczeń potrafi opisać zachowanie się fali padającej na materialną przeszkodę.
- Uczeń zna szczególną rolę przeszkód o charakterze przewodzącym w transmisji fal elektromagnetycznych.
- Uczeń potrafi opisać zjawisko dyfrakcji, jego zależność od długości fali oraz rolę w przesyłaniu informacji za pomocą fal elektromagnetycznych.



## 1. Zachowanie się fali EM na granicy ośrodków

W Lekcjach 2 i 3 wspomnieliśmy o emisji fal elektromagnetycznych (EM), jako zaburzeń pola EM rozchodzących się w próżni. Jednak kiedy chcemy wykorzystać fale EM do przesyłania informacji, szczególnie w warunkach miejskich, pojawia się pytanie: co dzieje się, gdy fala EM napotyka na przeszkodę w postaci innego ośrodka czy obiektu materialnego?

Kiedy fala trafia na przeszkodę część energii może ulec odbiciu (Rys. 1), co oznacza, że z przeszkody w punkcie padania emitowana jest fala pod tym samym kątem co fala padająca, ale po przeciwnej stronie prostej – tzw. **normalnej** – prostopadłej do powierzchni przeszkody w punkcie padania (zaznaczonej na rysunku pionową linią kropkowaną).

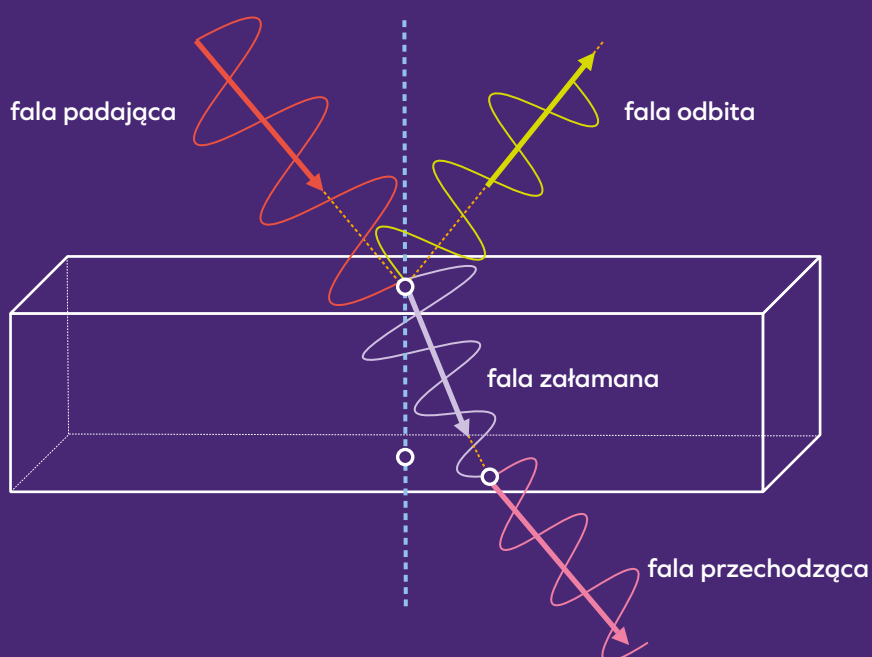
Ta część energii fali, która nie uległa odbiciu, wnika do przeszkody, ulega załamaniu zależnemu od właściwości materiału przeszkody (kierunek fali ulega zmianie w stosunku do fali padającej). Część energii fali może ulec częściowej **absorpcji** (pochłonięciu) przez ośrodek materialny, co powoduje stopniowe zmniejszanie amplitudy fali, po czym fala ulega kolejnemu załamaniu przy opuszczaniu przeszkody po drugiej stronie (tutaj także może dojść do częściowego odbicia, ale dla uproszczenia pominiemy tę możliwość).

Zgodnie z prawem zachowania energii, suma energii fali odbitej, energii pochłoniętej przez przeszkodę oraz energii fali przechodzącej, musi równać się energii fali padającej. To, jak konkretnie energia fali padającej zostanie podzielona pomiędzy te różne postacie, uzależnione jest to bardzo od materiału przeszkody i długości padającej fali.

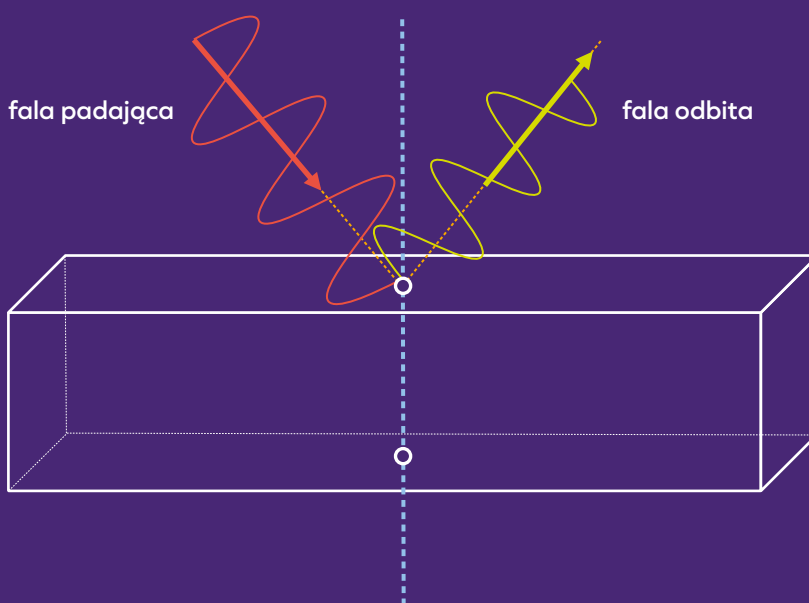
## 2. Przykładowe przeszkody dla fal EM

Bardzo szczególnym rodzajem przeszkody jest obiekt metalowy. Metal, jako doskonały przewodnik, może zapewnić taki rozkład ładunków elektrycznych na swojej powierzchni, by zniwelować pole elektryczne w swoim wnętrzu (jeżeli pole nie jest dokładnie zniwelowane, wywołuje dalszy ruch ładunków, aż do osiągnięcia tego efektu).

Oznacza to, że wewnątrz obiektu metalowego nie może istnieć fala EM – fala padająca na jego powierzchnię ulega niemal całkowitemu odbiciu. Co więcej, by takie zjawisko zaszło, powierzchnia nie musi być lita. Fala EM ulegnie odbiciu nawet od metalowej siatki, której oczka są mniejsze niż długość padającej fali.

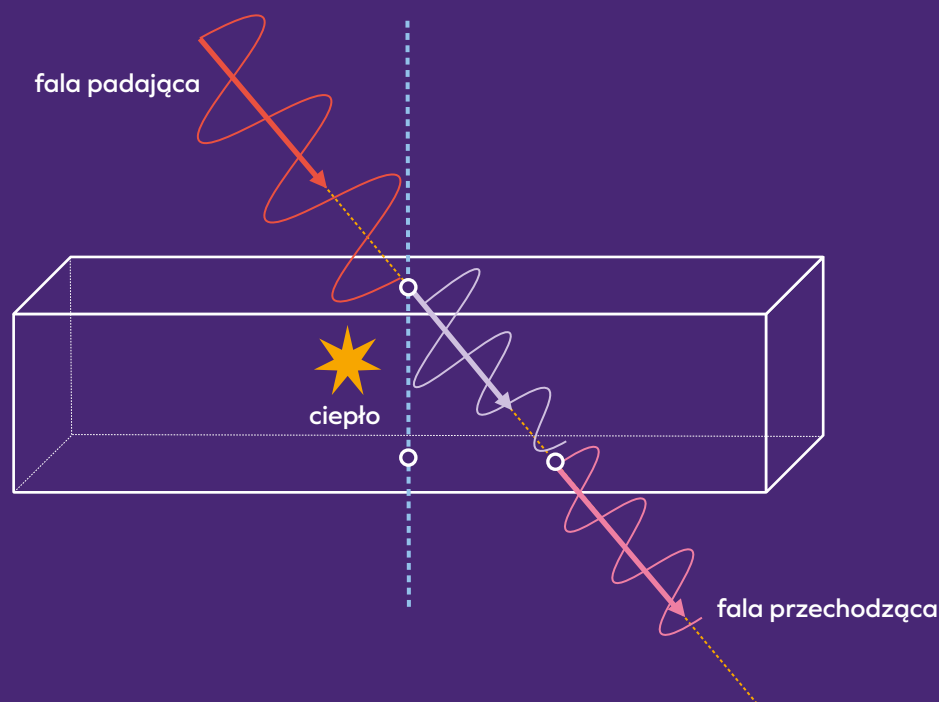


**Rys. 1.** Ogólny schemat przedstawiający zachowanie się fali przy przejściu przez materialną przeszkodę.



**Rys. 2.** Odbicie fali EM na powierzchni metalu.

Dla przeszkód niemetalowych (lub w ogólności – nieprzewodzących) sytuacja jest bardziej złożona. Bardzo długie fale EM, używane np. w klasycznych stacjach radiowych, przenikają przez dużą część ścian przy znikomym odbiciu i załamaniu (Rys. 3). Jeżeli dochodzi do pochłonięcia części energii fali w ośrodku materialnym, energia ta zostaje zużyta na pobudzenie do ruchu atomów lub cząsteczek tego ośrodka. Przejawia się tym samym jako wydzielenie ciepła i prowadzi do jego ogrzania.



**Rys. 3.** Przenikanie fali EM przez przeszkodę materialną nieprzewodzącą przy pomijalnym odbiciu.

Jak bardzo różne może być zachowanie się fal EM w ośrodkach materialnych możemy zaobserwować na przykładzie światła i promieni ultrafioletowych. Światło widzialne jest falą elektromagnetyczną, której długości fali mieszczą się w zakresie od 400 do 800 nanometrów ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ). Z codziennego doświadczenia wiemy, że światło doskonale przenika przez zwykłe szkło (dochodzi także do częściowego odbicia rzędu ok. 4%). To samo szkło z kolei w bardzo dużym stopniu absorbuje promieniowanie ultrafioletowe UVB, które także jest falą EM o długości fali z zakresu 280 do 315 nm (już poza zakresem widzialnym). Właśnie z tego powodu nie jest możliwe opalanie się przez szybę okienną.

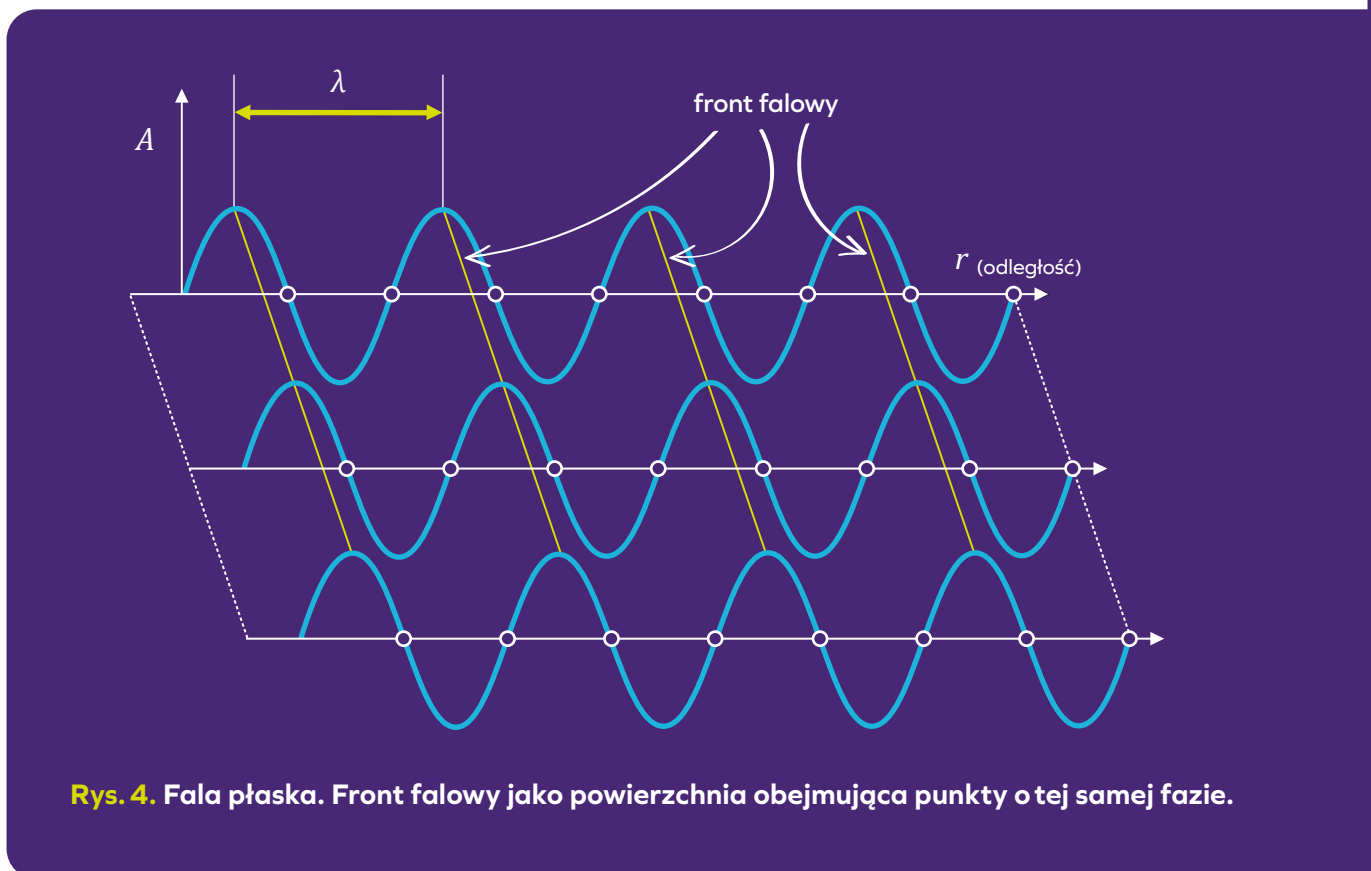
Silne pochłanianie energii fal EM w określonym zakresie związane jest z istnieniem rezonansowych częstotliwości (patrz Lekcja 5) dla ruchów wibracyjnych i rotacyjnych atomów oraz cząsteczek, z których zbudowana jest dana przeszkoda. Fala EM pełni rolę wymuszenia, a w warunkach rezonansu pochłonięta energia nie jest wypromieniowana dalej jako fala EM (tak jest np. w przypadku odbicia fali), ale zużywana jest do pobudzenia ruchu molekuł danego ciała, czyli jego ogrzania.

Wspomniane już fale radiowe o długościach od 10 m do 10 km przenikają bez znacznych strat nawet przez grube betonowe ściany, które z kolei mogą być prawie nieprzenikalne dla promieni mikrofalowych stosowanych np. w telefonii mobilnej. Oczywiście ściany z tzw. betonu zbrojonego, czyli wzmocnionego stalowymi prętami lub siatkami, są twardą

przeszkodą dla niemal wszystkich stosowanych w telekomunikacji zakresów fal EM. Jest to duże wyzwanie dla zapewnienia łączności mobilnej w środowisku miejskim, pomiędzy budynkami oraz w ich wnętrzach.

### 3. Dyfrakcja fal

Do opisu kolejnego ważnego zjawiska związanego z zachowaniem się fal przy przeszkodach warto sprecyzować pojęcie **fali płaskiej**. Z falą taką mamy do czynienia, gdy **fronty falowe** (inaczej – powierzchnie falowe), czyli linie łączące punkty o tej samej fazie, są do siebie równoległe (Rys. 4)

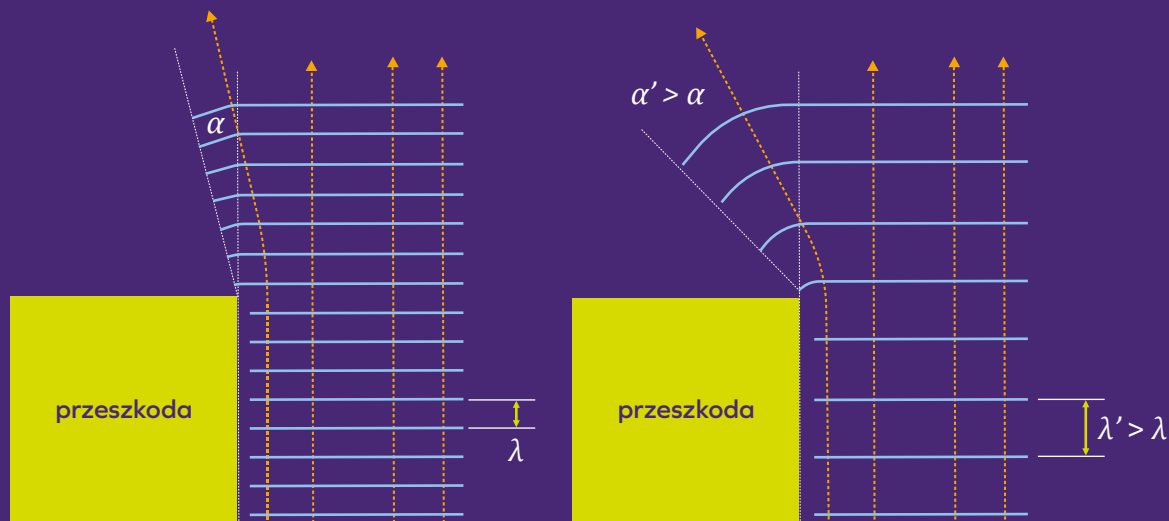


**Rys. 4.** Fala płaska. Front falowy jako powierzchnia obejmująca punkty o tej samej fazie.

Każda rozchodząca się fala w wystarczająco małym wycinku może być uznana za falę płaską. Fale rozchodzące się kuliście na powierzchni wody nie są falami płaskimi, ale w niewielkim wycinku kątowym fronty falowe takiej fali można w przybliżeniu uznać za równoległe. Zaletą pojęcia fali płaskiej jest to, że jednoznacznie pozwala ono na określenie kierunku rozchodzenia się fali – prostopadle do frontów falowych.

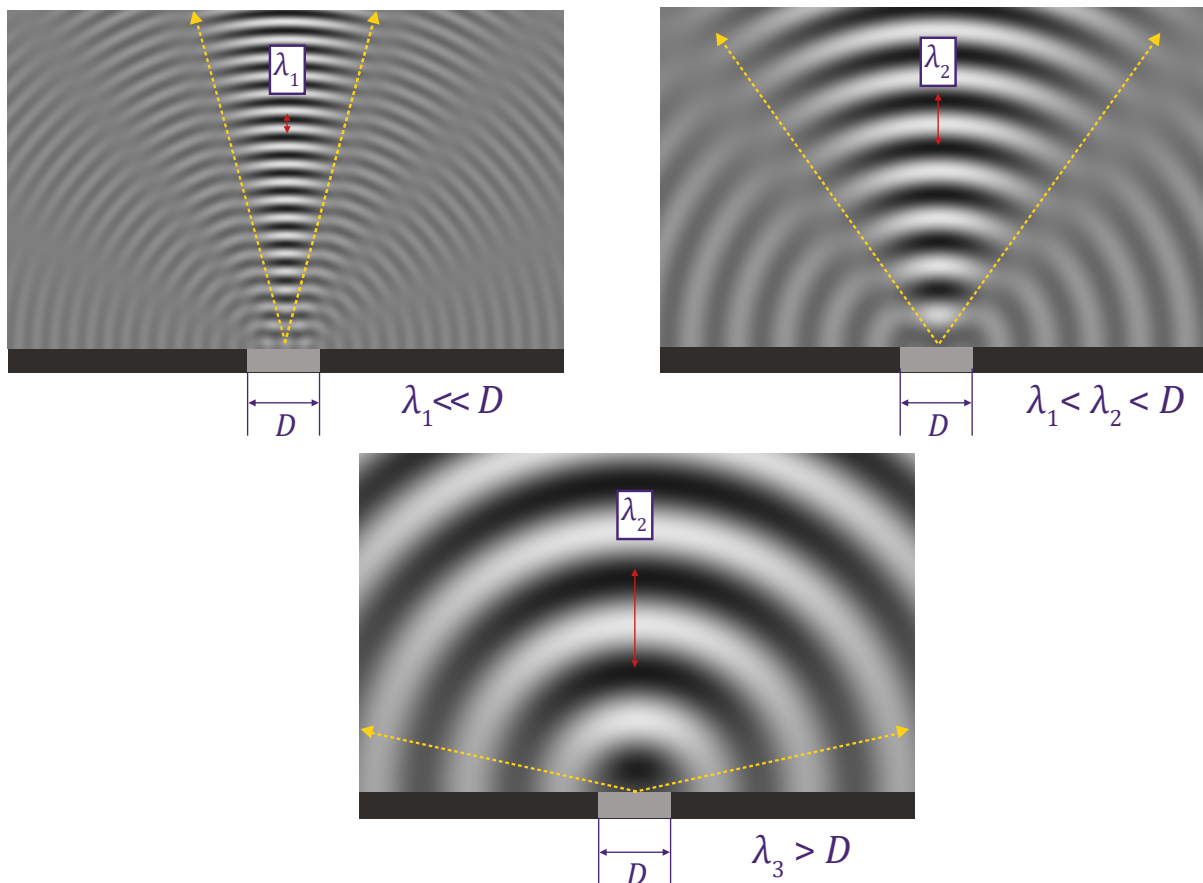
Jedną z charakterystycznych cech fal jest to, że trafiając na krawędź nieprzepuszczalnej dla nich przeszkody ulegają one ugięciu. Przypatrzmy się falom, które w dolnej części Rys. 5 są falami płaskimi i poruszają się w kierunku pionowym do góry. Fronty falowe oznaczono kolorem niebieskim. Po dotarciu do krawędzi przeszkody fronty falowe ulegają zagięciu w kierunku przeszkody, a tym samym ulega zmianie kierunek przemieszczania się fali. Efekt ten, nazywany **dyfrakcją**, jest tym bardziej widoczny, im większa jest długość fali. Kąt ugięcia  $\alpha$  uzależniony jest od stosunku długości fali do rozmiaru przeszkody.

Zjawisko dyfrakcji fali płaskiej, która pada na szczelinę o szerokości  $D$ , pokazano na Rys. 6 (obrazy wygenerowano z wykorzystaniem aplikacji, do której link można znaleźć w Materiałach zewnętrznych [1]).



**Rys. 5.** Dyfrakcja fali płaskiej na nieprzenikalnej przeszkodzie.

Jak widać, gdy długość fali jest znacznie mniejsza od szerokości szczeliny, większość energii fali skupiona jest w obszarze niewielkiego kąta. Zupełnie inny obraz przedstawia przypadek długości fali większej niż szerokość szczeliny – fala wydaje się rozprzestrzeniać za przeszkodą niemal równomiernie jako fala kolista.



**Rys. 6.** Dyfrakcja fali płaskiej na szczeliny.

Zjawisko dyfrakcji fal akustycznych jest bardzo ważne w komunikacji głosowej, ponieważ długości fal emitowanych przez narządy mowy są porównywalne z typowymi rozmiarami przeszkód w naszym otoczeniu. Dzięki niemu możemy swobodnie rozmawiać z osobą stojącą zaraz za rogiem budynku, nawet jeśli jej nie widzimy.

Bardzo mała długość fali światła widzialnego powoduje to, że uginanie się światła na przeszkodach jest znikome (ale możliwe do wychwycenia gołym okiem – patrz Doświadczenie). To także ma dla nas duże znaczenie, gdyż możemy założyć, że promienie świetlne poruszają się prostoliniowo, co znacznie ułatwia nam dokładne odwzorowanie otoczenia z wykorzystaniem wzroku. Nietoperze oraz inne zwierzęta bazujące w swoim zachowaniu na echolokacji emitują niesłyszalne dla nas ultradźwięki, czyli fale akustyczne o bardzo małej długości fali, właśnie dlatego, by zmniejszyć efekty dyfrakcyjne. Z podobnego powodu ultradźwięki używane są w ultrasonografii (USG).

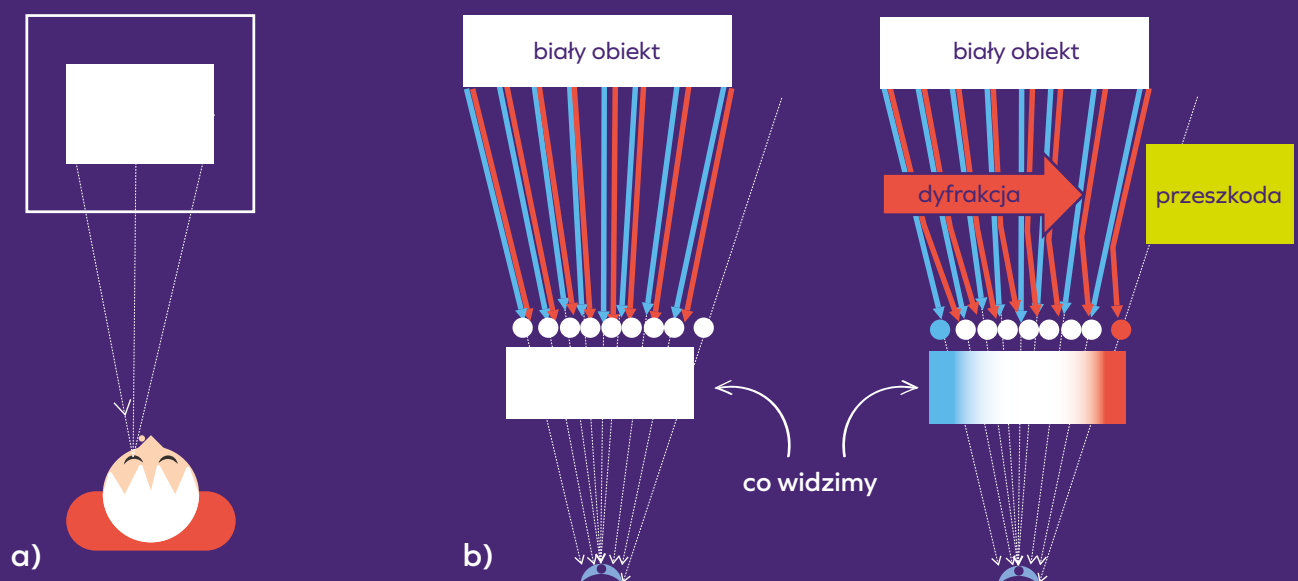
Uginanie się fal EM stosowanych w klasycznym radiu (długości fal rzędu kilometrów) pozwala im na docieranie do trudno dostępnych miejsc poza obszarem widoczności anteny nadawczej (patrz Materiały zewnętrzne [3]). Wraz ze skracaniem się długości fali nadawanego sygnału, a zatem przy zwiększaniu jego częstotliwości (co obserwujemy szczególnie w telefonii mobilnej), ugięcie jest coraz mniejsze i coraz ważniejsze staje się zmniejszenie liczby przeszkód na drodze transmisji sygnału. Zagadnieniami tego rodzaju zajmiemy się bardziej szczegółowo w Lekcji 10.



## Doświadczenie

Chociaż długość fali świetlnej jest bardzo mała (400 – 800 nm) i obserwacja silnych efektów dyfrakcyjnych wymaga zazwyczaj specjalnych narzędzi (tzw. siatek dyfrakcyjnych), istnieje bardzo prosty eksperyment, który nie tylko pozwala na bezpośrednią obserwację dyfrakcji światła, ale również potwierdzenie jej zależności od długości fali.

Do przeprowadzenia eksperymentu potrzeby będzie tylko niewielki, jasny obiekt (najlepiej w kolorze białym) na wyraźnie ciemniejszym tle (im ciemniejszym tym lepiej) – Rys. 7a.



Rys. 7. Dyfrakcja fali świetlnej.

Zamknij jedno oko (przyjmijmy, że prawe, ale to nie ma znaczenia) i skup swój wzrok na obiekcie przystawiając palec po lewej stronie nosa tak, by przesłonił pole widzenia dochodząc do krawędzi obiektu (możesz też zamiast przesłaniania widoku palcem przekrócić głowę w lewo, by krawędź nosa posłużyła za przesłonę). Pamiętaj, by wzrok był cały czas skupiony na jasnym obiekcie. Czy dzieje się coś dziwnego?

Krawędź obiektu w pobliżu przeszkody nabiera odcienia czerwonego, natomiast przeciwną krawędź – niebieskiego. Efekt jest tym bardziej widoczny, im węższy jest jasny obiekt.

Spróbuj wytłumaczyć, dlaczego się tak dzieje.



**Dyskusja.** Zaobserwowany efekt można łatwo wyjaśnić dyfrakcją światła oraz tym, że silniej jej podlegają fale o większej długości. Światło białe składa się zasadniczo z wszystkich kolorów tęczy, przyjmijmy jednak dla uproszczenia, że już dwa kolory – niebieski i czerwony – po zmieszaniu tworzą kolor biały. Reprezentują one odpowiednio bardzo małą i bardzo dużą długość fali. Przyjmijmy jeszcze jedno uproszczenie, mianowicie, że efekt dyfrakcji fali w kolorze czerwonym jest znaczny, zaś dla tej w kolorze niebieskim – pomijalny.

Popatrzmy teraz na Rys. 7b. Przy braku jakichkolwiek przeszkód promienie świetlne docierają do oka w postaci zmieszanej dając białą barwę obiektu. Co dzieje się, gdy pojawi się obok promieni nieprzezroczysta przeszkoda? Fale ulegają ugięciu w jej kierunku i to tym bardziej, im większa jest długość fali. Na rysunku przedstawiamy ten efekt w uproszczeniu jako przesunięcie się wszystkich promieni czerwonych w prawo, niebieskie zaś praktycznie nie ulegają zmianie. Środkowa część obiektu pozostaje w efekcie biała – promienie czerwone nadal mieszają się z niebieskimi (choć pochodzącymi już z innej części obiektu). Inaczej jest przy krawędziach. Przy prawej krawędzi ugięte promienie czerwone nie natrafiają na odpowiedniki niebieskie i widzimy w tym miejscu nadmiar koloru czerwonego. Przy lewej krawędzi promienie czerwone już nie mieszają się ze skrajnymi niebieskimi – stąd w tym miejscu pojawia się odcień niebieski.



## Słowniczek

**Absorpcja** – zjawisko pochłaniania energii fali przez ośrodek lub obiekt materialny.

**Dyfrakcja** – zjawisko ugięcia się fali na krawędzi nieprzepuszczalnej przeszkody. Wielkość ugięcia zależy od stosunku długości fali do rozmiaru przeszkody (np. szerokości szczeliny, przez którą przechodzi fala).

**Front falowy** – linia (lub powierzchnia, jeśli fala rozchodzi się w przestrzeni) łącząca punkty o tej samej fazie.

**Fala płaska** – fala, której fronty falowe są liniami (lub powierzchniami, jeśli fala rozchodzi się w przestrzeni) równoległymi do siebie.

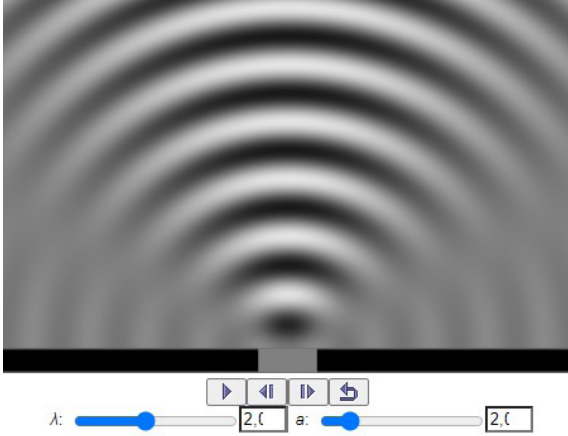
**Normalna** – prosta prostopadła do powierzchni ciała, na które pada fala.





## Materiały zewnętrzne

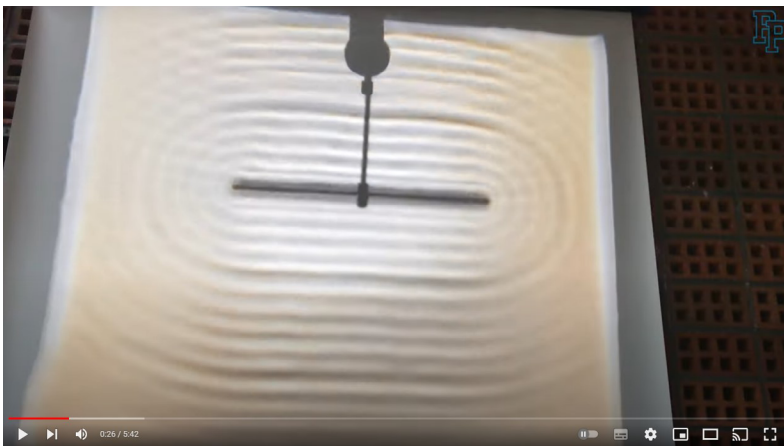
1. Aplikacja online umożliwiająca obserwację dyfrakcji fali o długości  $\lambda$  na szczelinie o szerokości  $a$ . Oba parametry można regulować niezależnie (*Diffraction Simulation ComPADRE*).



Zeskanuj QR kod



2. Film: Zjawisko dyfrakcji (demonstracja eksperymentalna zjawiska dyfrakcji na falach na powierzchni wody).



Zeskanuj QR kod



3. Animacja obrazująca dyfrakcję fal radiowych i wpływ długości fali na skalę ugięcia fali na przeszkodach terenowych (tytuł filmu: *Radio wave diffraction*).



Zeskanuj QR kod





## Praca domowa

1. Nietoperze używają echolokacji do wykrywania i chwytania zdobyczy. Jakiej minimalnej częstotliwości dźwięku musi użyć nietoperz, by zlokalizować ćmę o rozmiarze 2 cm? Przyjmij prędkość dźwięku równą 340 m/s. Wskazówka: możesz założyć, że echolokacja zadziała poprawnie już wtedy, gdy rozmiar obiektu jest porównywalny z długością fali (lub większy).

### Dane:

Prędkość dźwięku:  $v = 340 \text{ m/s}$

Rozmiar obiektu:  $d = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$

Długość fali:  $\lambda \approx d = 0,02 \text{ m}$

### Szukane:

Częstotliwość dźwięku:  $f = ?$

2. Czy jest możliwa rozmowa przez otwarte okna osób znajdujących się w dwóch pomieszczeniach oddzielonych nieprzepuszczalną dla dźwięku ścianą? Narysuj schematycznie rozchodzenie się fali akustycznej od nadawcy w lewym pomieszczeniu. Weź pod uwagę, że długość fal dźwiękowych komunikatu głosowego jest duża w porównaniu z rozmiarem przeszkód.

